
Entwicklung einer Prüfsystematik für die Qualitätssicherung von temperaturreduzierten Asphalten

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 233

Entwicklung einer Prüfsystematik für die Qualitätssicherung von temperaturreduzierten Asphalten

von

Stephan Büchler, Frederik Kollmus, Michael P. Wistuba
TU Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS)

Konrad Mollenhauer, Jens Wetekam
Universität Kassel, Fachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 233

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0315
Entwicklung einer Prüfsystematik für die Qualitätssicherung
von temperaturreduzierten Asphalten

Fachbetreuung:
Franz Bommert

Referat:
Asphaltbauweisen

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-932-1 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s233>

Bergisch Gladbach, April 2026

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung einer Prüfsystematik für die Qualitätssicherung von Temperaturreduzierten Asphalten

Als Konsequenz der Festlegung eines neuen Grenzwerts für Asphaltstäube und Aerosole beim Einbau von Asphaltmischgut muss neben technischen Lösungen am Asphaltfertiger (Absaugrichtung) auch der Asphaltmischguteinbau temperaturabgesenkt erfolgen. Dabei muss sichergestellt werden, dass eine Temperaturabsenkung die mechanische und funktionale Qualität sowie das Gebrauchsverhalten und die Dauerhaftigkeit des hergestellten Asphaltmischguts nicht gefährdet.

Mit diesem Forschungsprojekt wurde das Ziel verfolgt, für Zusätze und Technologien zur Herstellung von Temperaturabgesenkten Asphalten (TA-Asphalte) jeglicher Art, einen einheitlichen Nachweis der Temperaturabsenkung im Labor zu entwickeln.

Dazu wurden Probekörper bei unterschiedlichen Temperaturen mit erhöhter Verdichtungsenergie hergestellt. Die dabei berechneten Raumdichten wurden funktional beschrieben (Verdichtungs-funktion), so dass für eine übliche Verdichtungsenergie die mögliche, abgesenkte Verdichtungs-temperatur und/oder für eine gewünschte Temperatur die benötigte Verdichtungsenergie ermittelt werden konnte.

Zum Nachweis dieses Vorgehens wurden die relevanten Technologien zur Herstellung von TA Asphalten bezogen auf ihre Wirkungsweise untersucht: Grenzflächenaktive Zusätze, Rheologie- bzw. Reaktivmodifizierende Zusätze, Mineralische Zusätze (Zeolith), die Schaumbitumen-Technologie und teilweise die bereits bewährten Viskositätsverändernden Zusätze (VVZ).

Zunächst wurde das Vorgehen an einem Asphaltmischgut für Asphaltdeckschichten der Sorte AC 11 D S mit 5 temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren sowohl mit dem Marshall-Verdichtungsgerät, als auch mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät und dem Gyrator überprüft. Zusätzlich wurde der Verformungswiderstand mittels Druck-Schwellversuchen an den hergestellten Probekörpern bewertet.

Während des Mischprozesses konnte anhand des Drehmoments im Labormischer nachgewiesen werden, dass TA-Asphalte geringere Mischarbeiten benötigen.

Das Marshall-Verdichtungsgerät erwies sich als geeignetes Verdichtungsverfahren mit einer guten Spreizung bzgl. der Verdichtungstemperaturen, den geringsten Streumaßen und als technisch günstig und einfach in der Handhabung. Die damit temperaturabgesenkt hergestellten Probekörper waren bzgl. des Verformungswiderstandes unauffällig. Ein Ausschlusskriterium konnte für kein Verdichtungsgerät gefunden werden.

Die Validierung des Vorgehens erfolgte an weiteren vier Asphaltmischgutsorten, welche in Fachkreisen teilweise als kritisch für die Temperaturabsenkung angesehen werden: SMA 8 S, AC 11 D S (mit 20 % Asphaltgranulat (AG)), SMA 16 B S (mit 30 % AG) und AC 32 T S (mit 60 % AG).

Für jede Asphaltmischgutsorte wurden 3 Varianten hergestellt: Neben der Referenzvariante zwei temperaturabgesenkte Varianten, wobei als oberflächenaktive Zusätze jeweils Produkte unterschiedlicher Hersteller eingesetzt wurden.

Die temperaturabsenkende Wirkung wurde mit allen Zusätzen / Verfahren und an allen Asphaltmischgutsorten nachgewiesen und funktional beschrieben. Es wurde festgestellt, dass die Kombination von Asphaltmischgutart/-sorte und TA-Technologie im Labor optimiert werden muss, so ist zum Beispiel eine Zugabe der Zusätze ohne Optimierung der Zugabemenge nur bedingt zielführend. Diese Optimierung war nicht Gegenstand dieses Projekts.

Der Einsatz von Zeolith in Kombination mit Splittmastixasphalten war im Projekt problemlos möglich, zeigte jedoch keine Vorteile bzgl. der Temperaturabsenkung. Weiterhin wurde für das Asphaltmischgut für Asphalttragschichten der Sorte AC 32 T S die Wirkung der Temperaturabsenkung sowohl mit Zeolith, als auch mit dem grenzflächenaktiven Zusatz nachgewiesen. Aufgrund der hier eingesetzten Materialien trat der Effekt jedoch erst bei einer Temperaturreduzierung von >10 °C auf.

Die Überprüfung der Streumaße für die Raumdichten der Marshall-Probekörper zeigte, dass keine übermäßigen Streuungen aufgrund der Zusätze / Verfahren auftraten. Auch erwiesen sich die temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren als unproblematisch bzgl. des Verformungswiderstands.

Insgesamt kann mit dem hier vorgestellten und überprüften einheitlichen Vorgehen zur Herstellung von Probekörpern im Labor für unterschiedlichste TA-Technologien ihr Potential beschrieben werden, ohne signifikante negative Auswirkungen bzgl. der Performance oder der Reproduzierbarkeit erwarten zu müssen.

Development of a testing methodology for the quality assurance of low-temperature asphalts

As a consequence of the definition of a new limit value for asphalt mixture fumes and aerosols during the asphalt paving process, defined by the Committee on Hazardous Substances (AGS) of the Federal Institute for Occupational Safety and Health in Germany, in addition to technical solutions on the asphalt paver (extraction equipment), the temperature of the asphalt mixture has to be reduced. But it must be ensured that a temperature reduction does not jeopardize the mechanical and functional quality as well as the performance and durability of the asphalt mixture.

The aim of this research project was to develop a standardized procedure or proof of temperature reduction in the laboratory for additives and technologies for the production of all types of temperature-reduced asphalts (Warm Mix Asphalt (WMA) mixtures).

For this purpose, specimens were compacted at different temperatures with increased compaction energy using different compaction methods. The calculated bulk densities were described functionally (compaction function), so that the possible lowered compaction temperature for a normal compaction energy and/or the required compaction energy for a desired temperature could be detected.

To demonstrate this approach, the relevant technologies for the production of WMA were included in relation to their mode of action: Surfactants, rheology or reactive modifying additives, mineral additives (zeolite), foamed bitumen technology and, in some cases, the already proven viscosity reducing additives.

First, the procedure was tested on an asphalt mixture for asphalt surface courses (Asphalt Concrete AC 11 D S) with 5 temperature-reducing additives / processes using the Marshall Compactor, the Steel Roller compactor and the Gyrator. In addition, the resistance to permanent deformation was evaluated using Cyclic compression test in accordance with German standard TP Asphalt-StB Part 25 B1.

During the mixing process in the laboratory, the torque in the laboratory mixer clearly demonstrated that the WMA require less mixing work.

The Marshall Compactor proved to be a suitable compaction device with a good spread in terms of compaction temperatures, the lowest scattering dimensions and as technically favourable and easy to handle. The specimens produced at a reduced temperature were unremarkable in terms of resistance to permanent deformation. No exclusion criterion could be found for any compaction device.

The procedure was validated using further four types of asphalt mixtures, some of which are usually considered problematic for temperature reduction: Stone Mastic Asphalt (SMA 8 S), Asphalt Concrete (AC 11 D S) with 20 % Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), SMA 16 B S with 30 % RAP and AC 32 T S with 60 % RAP.

Three variants were produced with each asphalt mixture type, two temperature-reduced variants in addition to the reference variant, whereby products from different manufacturers were used for the surfactants.

The temperature-reducing effect was demonstrated and functionally described with all additives/processes and on all asphalt mixture types. It was found that the combination of asphalt mixture type/grade and temperature reducing technology must be optimized in the laboratory; for example, adding the additives without optimizing the quantity added is only partially effective. This optimization was not the subject of this project.

The use of zeolite in combination with stone mastic asphalt mixtures was possible in the project without any problems, but showed no advantages in terms of temperature reduction. Furthermore, for the asphalt mixture for asphalt base course (AC 32 T S), the effect of temperature reduction was demonstrated both with zeolite and with the surfactant. However, due to the materials used here, the effect only occurred at a temperature reduction of more than 10 °C.

Checking the scattering measures for the bulk densities of the specimens compacted with the Marshall Compactor showed that no excessive scattering due to the additives/processes occurred. The temperature-reducing additives / processes also proved to be unproblematic in terms of the resistance to permanent deformation.

Overall, the procedure presented and tested here for the compaction of specimens in the laboratory can be used to describe the potential for a wide variety of TA technologies without expecting significant negative effects in terms of performance or reproducibility.

Summary

Development of a testing methodology for the quality assurance of low-temperature asphalts

1 Background and objective

The Committee on Hazardous Substances (AGS) of the Federal Institute for Occupational Safety and Health in Germany set a new limit value for asphalt mixture fumes and aerosols at the end of 2019, which means that in addition to technical solutions on the asphalt paver (emission reduction device), the temperature of the asphalt mixture must also be reduced during the paving process.

At the same time, it must be ensured that lowering the temperature does not jeopardize the mechanical and functional quality as well as the performance and durability of the asphalt mixture produced at a lower temperature (Warm Mix Asphalt (WMA)).

There are currently various technologies for reducing the temperature of asphalt mixtures. There is no standardized procedure and no test standard for quality verification.

In this project, a laboratory standard is being developed for the first time that will make it possible to evaluate all currently used and, if possible, future technologies for reducing the temperature of asphalt mixtures under defined standardized conditions and to demonstrate their suitability and the potential of a temperature reduction process. The quality assurance system developed here is recommended for integration into the German technical standard.

2 Technologies for temperature reduction

Technologies used today for the production of WMA are:

- "Chemical additives to the bituminous binder"
 - Surfactants or adhesion promoters, which act at the interface between the bituminous binder and aggregate and ensure better workability and compaction at reduced temperatures.
 - Rheology or reactive modifying additives that intervene in the structure of the bituminous binders.
- "Viscosity reducing additives" (VVZ) to the bituminous binder
 - The technology of bitumen modification by means of VVZ, in particular by means of organic waxes, is considered mature and ready for use. These are only considered comparatively in the project.
- "Foaming of bituminous binder"

- Mineral additives bring molecularly bounded water into the asphalt mixture via zeolites, which is dissolved during the asphalt mixing process and leads to a spontaneous increase of the binder volume in the form of water vapor. Also it leads to a reduction in viscosity and an easier workability.
- In foamed bitumen technology, water is added to the hot bitumen under high pressure, which foams the bitumen. This leads to a spontaneous increase in the volume of the binder, a reduction in viscosity and therefore easier processing.

The first step is to categorize the above-mentioned technologies in more detail. This should help to identify a temperature-reducing additive or process based on the working principle and also the handling in the laboratory.

In the project, the above-mentioned technologies are first categorized and coded using abbreviations according to Table 1.

Operating principle (V/M/S/O/R/A)
V = viscosity reducing additives or viscosity-modified bitumen M = Mineral additives, i.e. zeolites S = Foamed bitumen technology O = Surfactants R = rheology modifying additives A = other additives / technologies
Reducing of the temperature (00KH / 00T)
reducing of the temperature as part of the initial testing, possibly with addition K or H / reducing the temperature during reheating as part of the control testing, possibly with addition T
Information on the manufacturing process (G/B/N)
G = additive is added to the aggregate (filler) B = additive is added to the bituminous binder N = „normal“ manufacturing process, ready-to-use bituminous binder
Possible additional functions (Rj/H)
Rj = Rejuvenator H = always observe manufacturer's instructions

Example for a bituminous binder according to TL VBit-StB 22 (e.g. 15/25 VL): V-10/10-N

Example for a Surfactant: O-10H/00-B-H

Table 1: Coding of the technologies for temperature reduction in the project

3 Testing system for quality assurance

3.1 Procedure

The new testing system for the quality assurance of WMA is based on testing the temperature- and load-dependent compaction behavior.

For its development, the compaction temperature, compaction energy and compaction devices are varied hierarchically. WMA of the categories M, S, O and R are mixed in the laboratory, compacted using three types of compaction devices and the temperature dependency is evaluated using a functional relationship.

A German standard asphalt mixture for asphalt surface courses (Asphalt Concrete AC 11 D S) without Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is used, to which the four WMA technologies to be tested are applied, without any changes in the Mix Design. Five asphalt mixtures (reference material + four WMA) were tested.

The Marshall compactor, the rolling sector compactor (WSV) and the Gyrator are used for compaction. For each compaction device, the reference material is used to define a target value for the bulk density or void content to be achieved later with the WMA.

A surfactant, a rheology-modifying additive and a zeolite are used. In addition, an asphalt mixture variant is produced using foamed bitumen technology. Moreover, a variant with viscosity-changing bitumen according to german standard "TL VBit-StB" is included.

The compaction temperature is gradually lowered for all mixtures (including the reference mix) in order to analyze the temperature dependencies of the materials.

The produced variants with the mixing temperatures and compaction temperatures are shown in Table 2.

Variant AC 11 D S	Mixing temperature	Additive, compaction temperature	Compaction plausible ?		
			MPK	WSV	Gyrator
1-1	160 °C	reference, 145 °C	✓	✓	(✓)
1-2		reference, 135 °C			
1-3		reference, 125 °C			
1-4		reference, 115 °C			
2-1	140 °C	surfactant, 135 °C	✓	✓	✓
2-2		surfactant, 115 °C			
2-3		surfactant, 95 °C			
3-1	160 °C	rheology modifying additive, 135 °C	≈	≈	✓
3-2		rheology modifying additive, 115 °C			
3-3		rheology modifying additive, 95 °C			
4-1	160 °C	zeolite, 135 °C	✓	✓	✓
4-2		zeolite, 115 °C			
4-3		zeolite, 95 °C			
5-1	140 °C	foamed bitumen technology , 135 °C	(✓)	(✓)	(✓)
5-2		foamed bitumen technology, 115 °C			
5-3		foamed bitumen technology, 95 °C			
6-1	160 °C	PmB 25/45 VL, 145 °C	✓	✓	-
6-2		PmB 25/45 VL, 135 °C			
✓ = results plausible (✓) = Results partially plausible ≈ = Functional assessment realized, but target bulk density cannot be achieved					

Table 2: Overview of variations for the production of asphalt specimens to determine the compaction function of an asphalt mixture AC 11 D S and simplified evaluation of compaction

The Marshall compaction was carried out in accordance with German standard “TP Asphalt-StB, Teil 10B” with 8 x 50 (= 400) blows and with 2 x 50 blows (standard). The same standard is used for Gyrator compaction, with 400 gyrations as well as with 100 gyrations (as standard).

When using the Steel Roller compactor, asphalt mixture slabs were produced using standard compaction in accordance to German standard “TP Asphalt-StB Teil 33” on the one hand and slabs were also compacted at maximum load (200 additional rollovers) on the other hand.

The density of the specimens obtained in this way is determined volumetrically during the compaction process. This is done by gradually changing the height of the test specimen (with the Steel Roller compactor at maximum load due to more rollovers).

The density of the specimens is then determined by immersion weighing.

During the mixing process, the torque is recorded in the laboratory mixer and the respective mixing work is evaluated.

The mixing process with foamed bitumen is carried out at the University of Kassel, where no torque recording is available.

3.2 Compaction function

However, in Germany it is not usual to use the volumetrically determined bulk density, instead the bulk density after immersion weighing. In order to calculate the bulk density by immersion weighing from the volumetrically determined bulk density, at least the final bulk densities and those for standard compaction must be determined by immersion weighing.

The change in volumetric density is first described using the exponential function (Equation 1) in accordance with German standard "TP Asphalt-StB, Teil 10B". This is illustrated using the example of a Marshall compaction (see Fig. 3-1).

$$\rho(S) = a - b \times e^{S/T} \quad (2)$$

with: $\rho(S)$ = calculated bulk density over the number of blows

a = Bulk density after 400 blows

b = Difference between the starting bulk density and the bulk density after 400 blows

S = Number of blows [21 Nm]

T = Compaction resistance [21 Nm]

An exponential function is then calculated for each temperature according to the scheme of "TP Asphalt-StB, Teil 10B" with the two bulk densities, determined by the immersion weighing. Also using the fixed, previously determined parameters T and a and the parameter b , which needs to be determined by regression. The coefficient of determination is always 100%, since only 2 points (bulk densities at 100 and 400 blows) are available. Note that this procedure does not represent a parallel shift of the curve, as can be seen from the difference between the correction and the measured bulk density after 100 and 400 blows (see Figure 1).

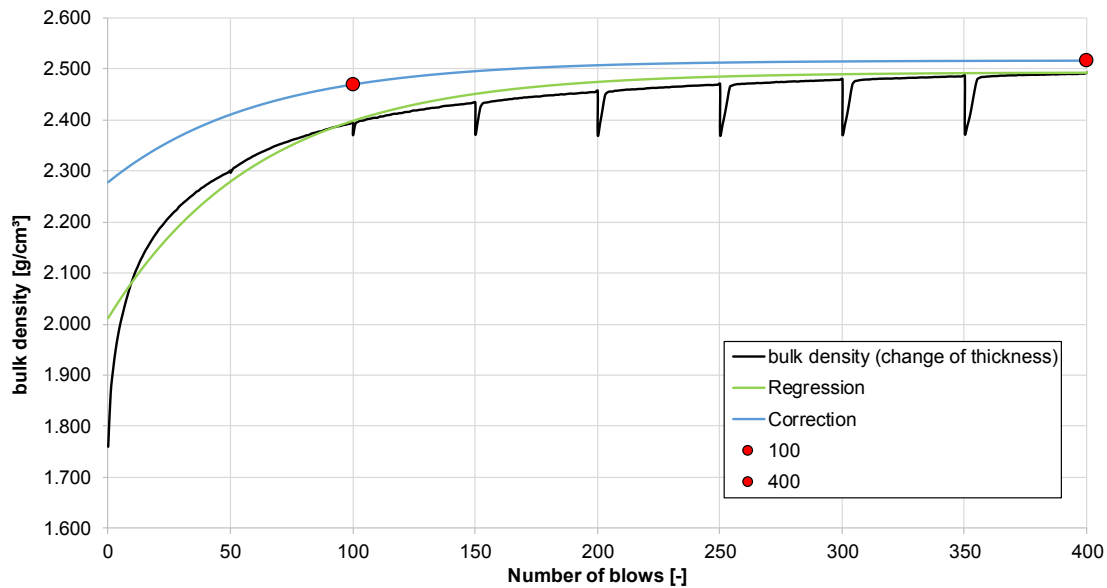


Figure 1: Example of bulk density calculated using the number of blows and bulk density corrected using immersion weighing (“Correction”)

This curve represents the change in bulk density over the number of blows at a specific compaction temperature.

This procedure is used for all tested compaction temperatures. Now the bulk densities for a certain number of blows can be plotted against the temperature, as shown in Fig. 3-2. At least the bulk densities after 50, 100, 150 and 200 blows are suggested for determination.

The bulk densities obtained in this way are described using a functional relationship ("Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion" (TAVF)) (black curve in Figure 2).

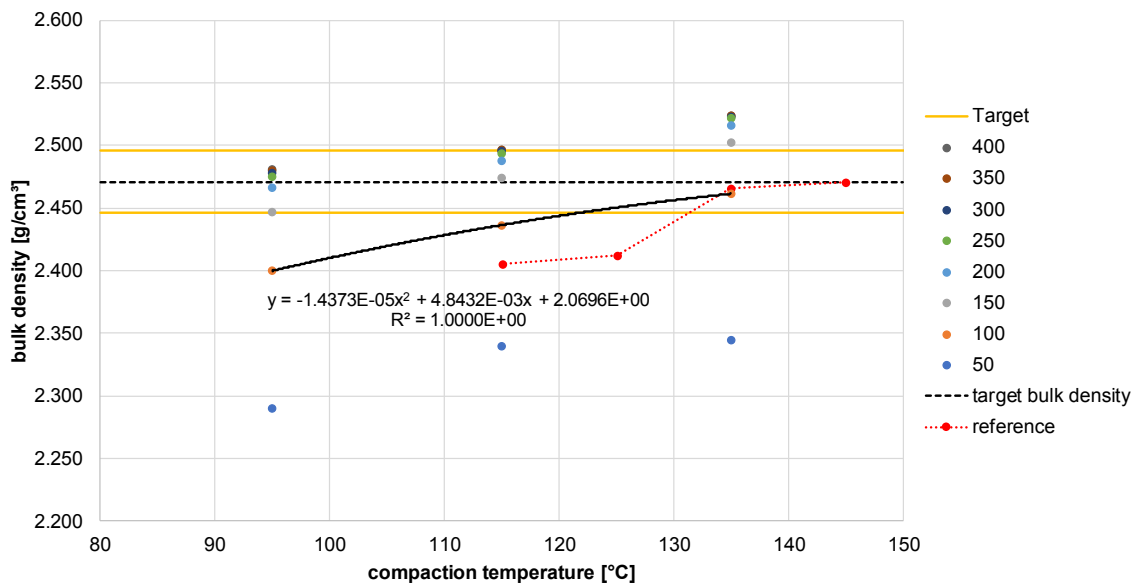


Figure 2: Achieved bulk density over the number of blows at different compaction temperatures, black curve for 100 compaction blows (AC 11 D S with surfactant, Marshall Compactor)

Figure 2 shows the results of in total six specimens, which are compacted at three compaction temperatures (135, 115 and 95 °C) up to a maximum density (400 blows). Along the compaction function (2nd degree polynomial) for 100 blows, the graph shows the temperature at which a selected target bulk density can be achieved (here: 135 °C). It can also be seen what compaction energy is required to achieve the target density at 115 °C, for example (here: 145 blows). If the compaction function is applied to the maximum bulk density, it can also be seen below which temperature the target bulk density can no longer be achieved (here: below approx. 80 °C).

If taking a look on the mixing work during the asphalt mixing process, it clearly shows that the reference variant requires the most mixing work.

Significantly less mixing work is required for the surface-active additive (Surfactant), despite a lower mixing temperature.

The mixtures with reactive modifying additive and zeolite require the least mixing work, but were mixed at the same mixing temperature as the reference. A positive effect of the temperature-reducing additives was thus clearly confirmed. No abnormalities were detected during the asphalt mixing process when using the additives.

However, in the following the mixing work is not considered as a quality criterion. In addition to the rare and expensive testing technology, the properties of the specimens produced from the mix are ultimately decisive. The different mixing temperatures currently recommended for different additives also make comparison difficult.

As conclusion for the compaction - Marshall compaction showed plausible dependencies of the bulk density on the compaction temperature and compaction work, while the bulk densities achieved with the steel roller compactor and the gyrator were not always plausible.

The reproducibility is predominantly present for all three compaction devices, but shows advantages for the Marshall compaction. The specimens obtained with the Gyrator generally exhibit the highest bulk densities. This project does not verify whether practical values can be achieved.

The Marshall compaction shows the lowest scatter in terms of bulk densities. The Steel roller compactor and Gyrator compaction show comparable scatter. Changes in the scattering dimensions due to the temperature-reducing additives or processes could not be determined.

As a further criterion, the resistance to permanent deformation is carried out by means of a Uniaxial Cyclic compression test in accordance with German standard "TP Asphalt-StB Teil 25 B1". In addition to the compliant specimens made of asphalt mixture slabs, Marshall and Gyrator specimens are also tested. Both the specimens from the Steel roller compaction and the Marshall compaction show plausible results, while the Gyrator specimens react implausibly in some cases.

In general, the samples with viscosity modified bitumen (variant 6-1 and 6-2) exhibit significantly better resistance to permanent deformations, which is in line with the expectations. However, the TA technologies tested do not result in any disadvantageous performance in terms of resistance to permanent deformations.

In addition to the systematics regarding the compaction function, the scattering dimensions, the resistance to permanent deformation as well as the handling and the technical equipment in the laboratory were used for the further procedure. No exclusion criterion was found for any compaction device.

All in all, Marshall compaction proves to be suitable, with a good spread in terms of compaction temperatures, low scattering dimensions and as technically favorable and easy to handle. The specimens produced at a reduced temperature are unremarkable in terms of resistance to permanent deformation.

4 Verification of the procedure

The previously developed or optimized procedure is verified on four other asphalt mixture types/grades, some of which are considered critical for temperature reduction:

- SMA 8 S,
- AC 11 D S with 20 % RAP,

- SMA 16 B S with 30 % RAP and
- AC 32 T S with 60 % RAP.

Three variants of each asphalt mixture type are produced, two temperature-reduced variants in addition to the reference variant. Products from different manufacturers are used for the surface-active additives. Table 3 shows an overview of the variants.

Asphalt mixture type	Additive / technology	Temperature reduction possible?	Compaction function possible?	Resistance to permanent deformation
SMA 8 S	reference	-	-	-
	surfactant	yes	yes	equal to better
	zeolite	yes	yes	better
AC 11 D S	reference	-	-	-
	surfactant	yes	yes	equal
	foamed bitumen	yes/no	yes	better
SMA 16 B S	reference	-	-	-
	surfactant	yes	yes	equal
	foamed bitumen	yes/no	Ja	better
AC 32 T S	reference	-	-	-
	surfactant	no	yes	equal
	zeolite	no	yes	equal

Table 3: Used asphalt mixture types and additives and their effects on the resistance to permanent deformation determined in the Uniaxial Cyclic compression test.

The temperature reduction can be applied and functionally described with all additives/processes and with all asphalt mixture types without any problems.

It is found that the combination of asphalt mixture type/grade and temperature reduction technology must be optimized in the laboratory, because a simple addition of the additives is only of limited use (see Tab. 4-2). This optimization is not a subject of this project. To ensure comparability, the mix design is not changed and the dosage is applied according to the manufacturer's instructions.

The use of zeolite in combination with stone mastic asphalt mixture was possible without any problems, but showed no advantages in terms of temperature reduction, which Radenberg was also able to observe in 2004.

The use of foamed bitumen technology also showed no advantages in terms of temperature reduction. However, it should be noted that the foamed bitumen technology still needs to be optimized in the laboratory.

In the case of the surfactants, hardly any temperature reduction effects were realized in some cases. It is necessary to check in each individual case whether a product does not react optimally,

e.g. in combination with the respective asphalt mixture type (composition, type of aggregate, bituminous binder), or whether the quantities added may need to be optimized.

For the Asphalt Concrete 32 T S mixture with a high amount of RAP, the temperature reduction was demonstrated both with the zeolite and with the surfactant. However, due to the materials used here, the effect only occurred at a temperature reduction more than 10 °C. It is assumed that with this mixture at 135 °C, the fresh, rather soft bituminous binder still has a primary effect during compaction and thus masks the effects of the additives.

The scattering measures for the bulk densities of the Marshall Compactor specimens showed that the precision of the (measurement) method is maintained with all types of asphalt mixtures in combination with the additives or technologies for temperature reduction. This means that there is no excessive scattering due to the temperature reducing additives or technologies.

The resistance to permanent deformation was also tested here by means of a Uniaxial Cyclic compression test, but only with specimen produced with the Marshall Compactor. The test results showed that the resistance to permanent deformation of all variants are equal to or better than the respective reference (see Tab. 4-1). The foamed bitumen variants prove to be advantageous for both tested variants. The temperature-reducing additives or methods were therefore unproblematic in terms of resistance to permanent deformation.

This confirms the standardized procedure for the production of specimens in the laboratory without any negative effects on the performance of the asphalt mixtures.

5 Summary

In this project, a wide range of temperature-reducing additives and processes were tested in the laboratory on different compaction devices with the aim of developing a process that is as standardized as possible in order to demonstrate the potential of all relevant temperature-reducing additives and processes to produce Warm Mix Asphalt (WMA) mixtures.

In this project, the focus was on the comparison of uniform asphalt mixtures, so that the individual asphalt mixtures were not optimized in terms of additives or processes. The reference to the compaction effect in situ was also not taken into account here.

First a wide variety of additives and technologies (surfactants and rheology modifying additives, mineral additives (zeolites), foamed bitumen technology) were initially tested on an Asphalt Concrete (AC 11 D S) and later on four other types of asphalt mixtures. Specimens were produced

with the asphalt mixture types at different compaction temperatures and energies and the correlation with the achieved bulk density was functionally illustrated. In addition, the resistance to permanent deformation was evaluated using Uniaxial Cyclic compression tests.

On the basis of all the variants for the WMA examined here, it can be stated:

- The effect of temperature-reducing technologies can already be demonstrated during the asphalt mixing process in the laboratory, but is not a quality criterion.
- The creation of a compaction function as a function of the compaction temperature and compaction energy is possible with all standard compaction devices and temperature-reducing technologies. This is valid for the Asphalt Concrete AC 11 D S.
- The specimens of all variants of the AC 11 D S compacted at lower temperatures (temperature-reduced) and with all three compaction devices are unremarkable in terms of resistance to permanent deformation and are similar to the reference variant.
- Due to the lower scattering dimensions and the good differentiability of the bulk densities, the Marshall compactor is recommended for use in the laboratory. It is explicitly mentioned that higher bulk densities can be achieved with the Gyrator, but that the compaction method is not yet universally applicable.
- The verification on four types of asphalt mixtures with different additives / processes was successful, even if a temperature-reducing effect cannot always be proven. For this purpose, the additive and asphalt mixture must be matched to each other, which was only achieved to a limited extent or was not the primary objective here.
- During verification, neither the scattering dimensions nor the resistance to permanent deformation of all the specimens, compacted with the Marshall Compactor, showed any abnormalities.

Overall, with the procedure presented and tested here for the production of specimens in the laboratory for different temperature reducing technologies, their potential can be described uniformly without significant effects in terms of performance or scattering dimensions.

Inhalt

1	Einleitung	21
1.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	21
1.2	Methodik des Vorgehens	22
1.2.1	Kategorisierung	22
1.2.2	Entwicklung einer Verdichtungsfunktion	23
1.2.3	Anwendungsdemonstration der Vorgehensweise	26
1.2.4	Dokumentation des Konzepts	26
1.3	Beschreibung der Prüfverfahren	27
1.3.1	Labormischer mit Leistungsaufnahme	27
1.3.2	Marshall-Verdichtungsgerät mit Verdichtungswiderstand	28
1.3.3	Gyrator-Verdichtungsverfahren	29
1.3.4	Walzsektor-Verdichtungsgerät	31
1.3.5	Schaumbitumen-Anlage	32
2	Möglichkeiten der Temperaturabsenkung	36
2.1	Literaturrecherche	36
2.2	Kurzbeschreibung der Zusätze / Verfahren	39
2.2.1	Oberflächenaktive Zusätze	40
2.2.2	Reaktiv- bzw. Rheologiemodifizierung	41
2.2.3	Mineralische Zusätze	42
2.2.4	Schaumbitumen	43
2.3	Kategorisierung der Technologien	43
3	Ermittlung einer Verdichtungsfunktion	46
3.1	Materialien und Prüfplan	46
3.2	Verarbeitbarkeit	48
3.3	Verdichtungsfunktion für MPK	50
3.3.1	Referenz	50
3.3.2	Variante 2, oberflächenaktiver Zusatz	53
3.3.3	Variante 3, reaktivmodifizierender Zusatz	57
3.3.4	Variante 4, Zeolith	60
3.3.5	Variante 5, Schaumbitumen	64

3.3.6	Variante 6, viskositätsverändernder Zusatz	66
3.3.7	Zusammenfassung Marshall-Verdichtung	68
3.4	Verdichtungsfunktion für die Walzsektor-Verdichtung	69
3.4.1	Referenz	69
3.4.2	Variante 2, oberflächenaktiver Zusatz	70
3.4.3	Variante 3, reaktivmodifizierender Zusatz	75
3.4.4	Variante 4, Zeolith	78
3.4.5	Variante 5, Schaumbitumen	81
3.4.6	Variante 6, viskositätsverändernder Zusatz	83
3.4.7	Zusammenfassung Walzsektor-Verdichtung	84
3.5	Verdichtungsfunktion für Gyrator-Verdichtung	85
3.5.1	Referenz	85
3.5.2	Variante 2, oberflächenaktiver Zusatz	88
3.5.3	Variante 3, reaktivmodifizierender Zusatz	90
3.5.4	Variante 4, Zeolith	93
3.5.5	Variante 5, Schaumbitumen	95
3.5.6	Zusammenfassung Gyrator-Verdichtung	97
3.6	Vergleich der Verdichtungsverfahren	98
3.7	Statistische Auswertung	104
3.7.1	Marshall-Verdichtung	104
3.7.2	Walzsektor-Verdichtung	106
3.7.3	Gyrator-Verdichtung	106
3.7.4	Zusammenfassung der statistischen Auswertung	107
3.8	Ermittlung des Verformungswiderstands	108
3.8.1	Ergebnisse der Walzsektor-Verdichtung	108
3.8.2	Ergebnisse der Marshall-Verdichtung	114
3.8.3	Ergebnisse der Gyrator-Verdichtung	116
3.8.4	Zusammenfassung zum Verformungswiderstand	118
3.9	Zusammenfassung der Entwicklung der Vorgehensweise zur Qualitätssicherung	120
4	Anwendungsdemonstration der Vorgehensweise	122
4.1	Ergebnisse der Anwendungsdemonstration	124
4.1.1	Variante 10 (SMA 8 S)	124
4.1.2	Variante 20 (AC 11 D S)	130
4.1.3	Variante 30 (SMA 16 B S)	136
4.1.4	Variante 40 (AC 32 T S)	142

4.1.5	Zusammenfassung Raumdichte	148
4.1.6	Statistische Auswertung	148
4.2	Verformungswiderstand	152
4.2.1	V10 - SMA 8 S	152
4.2.2	V20 - AC 11 D S	154
4.2.3	V30 - SMA 16 B S	156
4.2.4	V40 – AC 32 T S	158
4.2.5	Zusammenfassung zum Verformungswiderstand	160
5	Zusammenfassung der Ergebnisse	163
5.1	Verarbeitbarkeit am AC 11 D S	163
5.2	Verdichtungsfunktion am AC 11 D S	163
5.3	Validierung an weiteren Mischgutsorten	164
5.4	Zusammenfassung	165
6	Qualitätssicherungs-Konzept	167
6.1	Kategorisierung von Methoden der Temperaturabsenkung	167
6.2	Vorgehen im Labor	168
6.2.1	Festlegung Hohlraumgehalt	169
6.2.2	Herstellen von Mischgut	169
6.2.3	Verdichtung	169
6.2.4	Auswertung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion	170
6.2.5	Hinweise, Anmerkungen	171
7	Zusammenfassung	174
7.1	Zusammenfassung	174
7.2	Identifizierte Problemstellungen	180
	Literatur	182
	Bilder	186
	Tabellen	194
	Anhang	198

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Vom Ausschuss für Gefahrstoffe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin wurde Ende 2019 ein Grenzwert von 1,5 mg pro m³ Luft für Asphaltstäube und Aerosole beim Einbau von Asphaltmischgut festgelegt, der zunächst Ende 2024 verpflichtend für die Bauindustrie werden sollte (aktuell Ende 2026). Dies hat zur Folge, dass neben technischen Lösungen am Asphaltfertiger (Absaugreinrichtung), der Asphaltmischguteinbau in veränderter Form erfolgen muss.

Es ist bekannt, dass aus einer Absenkung der Herstellungstemperatur und damit einer geringeren Temperatur beim Einbau des Asphaltmischguts die gesundheitsrelevanten Emissionen reduziert (bspw. bei innerörtlichen Baustellen) (Wirth & Opel 2008) werden. So kann eine Reduktion der Einbautemperatur um 10 °C ungefähr zu einer Halbierung der auftretenden Aerosole und Dämpfe aus Bitumen führen (DAV 2009).

Weiterhin kann die Effizienz des Herstellungsprozesses von Asphaltmischgut in Richtung einer klimafreundlicheren Lösung verbessert werden, wenn niedrigere Herstellungstemperaturen angestrebt werden. International wie national gibt es eine Reihe von Bemühungen temperaturabgesenkten Asphalt, im weiteren TA-Asphalt genannt prozesssicher herzustellen (auch Niedrigtemperaturasphalt oder Warmasphalt bzw. englisch: Warm Mix Asphalt, WMA). Dabei handelt es sich um Asphalt, dessen Mischtemperatur gegenüber herkömmlichem Heißmischgut (englisch: Hot Mix Asphalt, HMA) zwischen 10 bis 50 °C reduziert ist (vgl. Rubio et al. 2012; Wistuba, 2025) (Bild 1-1).

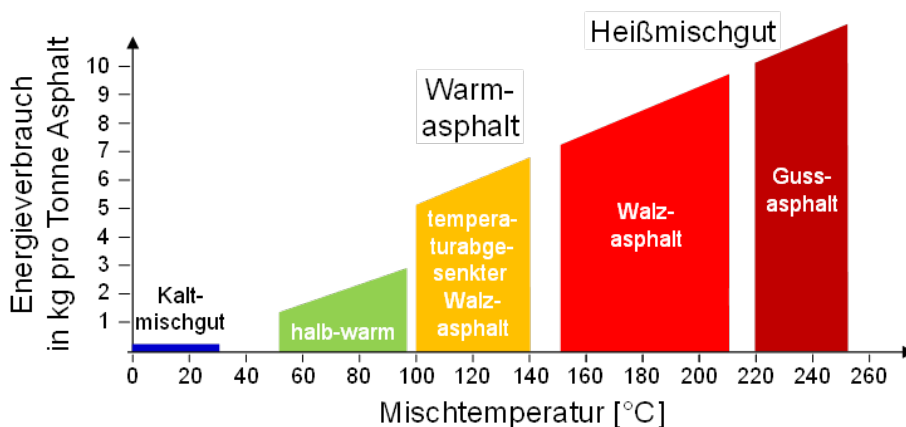


Bild 1-1: Energieverbrauch für verschiedene Asphaltkonzepte (schematisch) (Olard et al. (2008), Vaitkus, Vorobjovas & Žalimienė (2009))

Gleichzeitig zur Temperaturabsenkung muss sichergestellt werden, dass die mechanische und funktionelle Qualität sowie das Gebrauchsverhalten und die Dauerhaftigkeit des temperaturabgesenkten hergestellten Asphaltmischguts nicht gefährdet sind.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, ein ganzheitliches Qualitätssicherungssystem für TA-Asphalt zu erstellen, das nach Projektabschluss in das Technische Regelwerk integriert werden kann.

Dazu ist (gegebenenfalls getrennt für jede vielversprechende TA-Asphalt-Technologie) eine Systematik aufzustellen, anhand der die Produktion, die Verarbeitbarkeit und die Verdichtbarkeit, die baupraktische Eignung, das Gebrauchsverhalten und die Dauerhaftigkeit des jeweiligen TA-Asphalts mit Hilfe von aussagekräftigen, materialtechnologischen Kenngrößen nachgewiesen werden können. Dabei sollen die im Asphaltstraßenbau bewährten Prüfverfahren angewandt und die gebräuchlichen Anforderungswerte (z. B. volumetrische Kennwerte wie Hohlraumgehalt, Verdichtungsgrad) sowohl im Rahmen der Erstprüfung als auch der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) und der Kontrollprüfung zielsicher angesprochen werden können, um Konformität und Vertragsanforderungen nachzuweisen.

1.2 Methodik des Vorgehens

Das Vorgehen in diesem Forschungsprojekt gliedert sich im Wesentlichen in vier Arbeitspakete, welche im Folgenden vorgestellt werden.

1.2.1 Kategorisierung

Im Rahmen der Informationsgewinnung werden nationale und internationale Quellen analysiert, die sich mit der Thematik der Temperaturreduzierung im Asphaltstraßenbau auseinandersetzen. Dabei werden auch die in Deutschland bisher weniger erprobten Technologien berücksichtigt, wie der Einsatz von Schaumbitumen und die Verwendung von chemischen, oberflächenaktiven und anderen Bitumenzusätzen, die nicht zwingend zu einer Viskositätsveränderung des Bindemittels führen.

Nach der Informationsgewinnung werden die unterschiedlichen Technologien kategorisiert, z. B. bzgl.

- ihrer Technologie /Wirkungsweise,
- ihrer Anwendbarkeit in unterschiedlichen Asphaltarten,
- des Mischprozesses mit technischer Umsetzung,
- des Transports und Einbaus und
- ggf. des Verdichtungsprozesses,

sodass in der Folge unterschiedliche TA-Asphalt-Kategorien unterschieden werden.

Alle Technologien zur Herstellung von TA-Asphalt zielen darauf ab, ein mit herkömmlichen Methoden einbaubares und auch sonst regelkonformes Asphaltmischgut bereit zu stellen. Die Asphaltmischgutproduktion (und ggf. Verdichtung) kann sich dabei gegenüber herkömmlichem Heißmischgut unterscheiden, was anhand der Kategorisierung im Qualitätssicherungssystem systematisch abgebildet wird.

Die vorgeschlagene Kategorisierung von TA-Asphalt wird als offenes System aufgebaut, so dass auch zukünftige Herstellungstechnologien (etwa mittels neuen Bitumenzusätzen (=Additive)) jederzeit eingegliedert werden können. Auch die in diesem Projekt nicht weiter zu untersuchenden organischen Zusätze (Wachse) werden in die Kategorisierung mit einbezogen.

1.2.2 Entwicklung einer Verdichtungsfunktion

Unter den kritischen Materialkenngrößen spielen die Verarbeitbarkeit und die Verdichtbarkeit des TA-Asphalts eine besondere Rolle und sind damit ein wesentlicher Aspekt im Rahmen der Qualitätssicherung.

Als Prüfverfahren, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit von TA-Asphalt im Labor nachzuweisen, wird international – abweichend von dem in Deutschland zur Laborverdichtung von Asphalt bevorzugten Verdichtungsverfahren – das Gyrator-Verdichtungsgerät angewandt (Bonaquist 2011). In Deutschland werden das Marshall- und das Walsektor-Verdichtungsgerät eingesetzt.

Alle drei unterschiedlichen Ansätze zur Laborverdichtung von Asphalt (Gyrator, Marshall- und Walzsektor-Verdichtungsgerät; siehe unten) werden im Projekt überprüft und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf TA-Asphalte bewertet. Schließlich wird jeweils eine Verdichtungsfunktion bestimmt, welche die Einflüsse der Verdichtungstemperatur und -energie auf die resultierenden volumetrischen Eigenschaften (z. B. Hohlraumgehalt) beschreibt. Dazu wird je Kategorie (oberflächenaktive, chemische, mineralische Bitumenzusätze (=Additive) und Schaumbitumen) jeweils ein Repräsentant ausgewählt und mit diesem ein TA-Asphalt hergestellt. Anschließend wird im Labor ein Asphaltdeckschichtmischgut der Sorte AC 11 D S mit dem jeweiligen Repräsentanten temperaturreduziert hergestellt. Als Referenz wird die Sorte AC 11 D S auch konventionell als Heißmischgut hergestellt.

Verarbeitbarkeit

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit wird bei der Herstellung der TA-Asphalte im Labormischer die geleistete Mischarbeit (abhängig von der Geometrie der Mischtrommel und des Mischwerkzeugs) gemessen (ausgenommen TA-Asphalte mit Schaumbitumen). Damit können wertvolle Hinweise über die Wirksamkeit unterschiedlicher Zusätze bezüglich der Verarbeitbarkeit des TA-Asphalts gewonnen werden.

Es wird zusätzlich visuell überprüft, ob mit den Herstellerangaben ein homogenes Asphaltmischgut hergestellt werden kann. Dazu werden aussagekräftige Indikatoren (z. B. Mischgut homogen umhüllt, starke Dampfbildung, Klumpenbildung) festgelegt, anhand derer das resultierende Asphaltmischgut von qualifiziertem Laborpersonal visuell bewertet werden kann. Wird für das Asphaltmischgut keine zufriedenstellende Beschaffenheit erreicht, muss eine individuelle Vorgehensweise festgelegt werden, nach der bestimmte Parameter der Asphaltmischgutproduktion (z. B. die Mischtemperatur oder der Menge des Zusatzes) für ein visuell einwandfreies Asphaltmischgut zu verändern sind. Möglicherweise lässt sich bereits anhand der Indikatoren auf die zu ändernden Parameter schließen.

Verdichtungsfunktion

Das fertig gemischte Asphaltmischgut wird jeweils mit den drei unterschiedlichen Laborverdichtungsverfahren verdichtet:

1. Marshall-Verdichtungsgerät

Es wird der Verdichtungswiderstand in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010b) bestimmt. Da die Probekörperhöhe aufgezeichnet wird, kann über die Schlagzahl die erzielte Raumdichte ermittelt werden.

2. Gyrator

Auch bei der Bestimmung der Verdichtbarkeit mittels Gyrator gemäß europäischer Norm DIN EN 12697-31 (Europäisches Komitee für Normung (CEN) 2020) wird die Probekörperhöhe aufgezeichnet, so dass über die entsprechende Anzahl der Umdrehungen (Gyrationen) die Raumdichte ermittelt werden kann. Das detaillierte Vorgehen wird in Kapitel 1.3.3 beschrieben.

3. Walzsektor-Verdichtungsgerät

Bei der Verdichtung mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät gemäß TP Asphalt-StB, Teil 33 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007) wird die Plattenhöhe bzw. -dickenänderung aufgezeichnet. So kann über die Anzahl der Walzübergänge die Raumdichte berechnet werden.

Dabei wird festgestellt, wie zielsicher eine bestimmte Raumdichte bzw. ein bestimmter Hohlraumgehalt erreicht werden kann. Prinzipiell wird bei jedem Verfahren die Verdichtungsenergie stufenweise erhöht (über die Anzahl an Schlägen beim Marshall-Verdichtungsgerät, die Anzahl der Umdrehungen bei der Gyratorverdichtung oder die Anzahl der Übergänge während der Hauptverdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerät) und für jede Stufe die Raumdichte (über die Probekörperhöhe) bestimmt.

Die Verdichtungstemperatur wird je nach TA-Asphalt-Zusatz bzw. -Technologie im Bereich der Herstellerangaben gewählt. Sie wird zusätzlich variiert, in dem eine um 10 °C bzw. 20 °C reduzierte Verdichtungstemperatur gewählt wird, um mögliche Verdichtungsfenster zu ermitteln. Gibt es laut Herstellerangaben keine feste Temperaturvorgaben, wird ein Variationsbereich von 135 °C bis 95 °C gewählt. Für jede Verdichtungstemperatur werden mindestens zwei Probekörper je Verdichtungsverfahren hergestellt.

Bei allen Verdichtungsverfahren erfolgt ein Abgleich der während der Verdichtung aufgezeichneten Probekörperhöhe und der berechneten Raumdichte zu den nach der Verdichtung erreichten tatsächlichen Höhen und Raumdichten, wobei die „Vergleichs“-Raumdichte mittels Verfahren B nach TP Asphalt-StB, Teil 6 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2023) bestimmt wird.

Über die Variation von Verdichtungsenergie und -temperatur kann eine Verdichtungsfunktion erstellt werden. So kann ein Temperaturfenster für z. B. die Referenzenergie und für einen erhöhten Energieeinsatz ermittelt werden, siehe dazu die Prinzipdarstellungen in Bild 1-2 und Bild 1-3.

In Bild 1-2 soll beispielsweise eine Raumdichte von 2,500 g/cm³ erzielt werden. Unter Berücksichtigung der Verfahrenspräzision mit einer kritischen Spannweite von 0,030 g/cm³ für die Bestimmung der Raumdichte nach dem Verfahren B der TP Asphalt-StB Teil 6 (2023) steht in diesem Beispiel bei üblicher Verdichtung von 100 % ein Temperaturfenster von ca. 115 °C bis 117 °C zur Verfügung. Dieser Raumdichtebereich, unter Berücksichtigung der Präzision, ist in Bild 1-3 und Bild 1-6, durch horizontale Linien in grün (gestrichelt) dargestellt.

Wird die Verdichtungsenergie auf bis zu 250 % (z. B. 5 x 50 Schläge) erhöht, so kann noch bei ca. 110 °C die entsprechende Raumdichte erreicht werden. Unterhalb von ca. 110 °C kann auch mit weiter erhöhter Energie die Raumdichte nicht mehr erreicht werden, so dass auch die minimale Temperaturgrenze T_{\min} zielsicher bestimmt werden kann (s. Bild 1-3). Die maximal erreichbare Raumdichte hat entsprechend ihren „Grenzwert“ erreicht und eine höhere Verdichtungsenergie führt nicht mehr zu einer erhöhten Raumdichte.

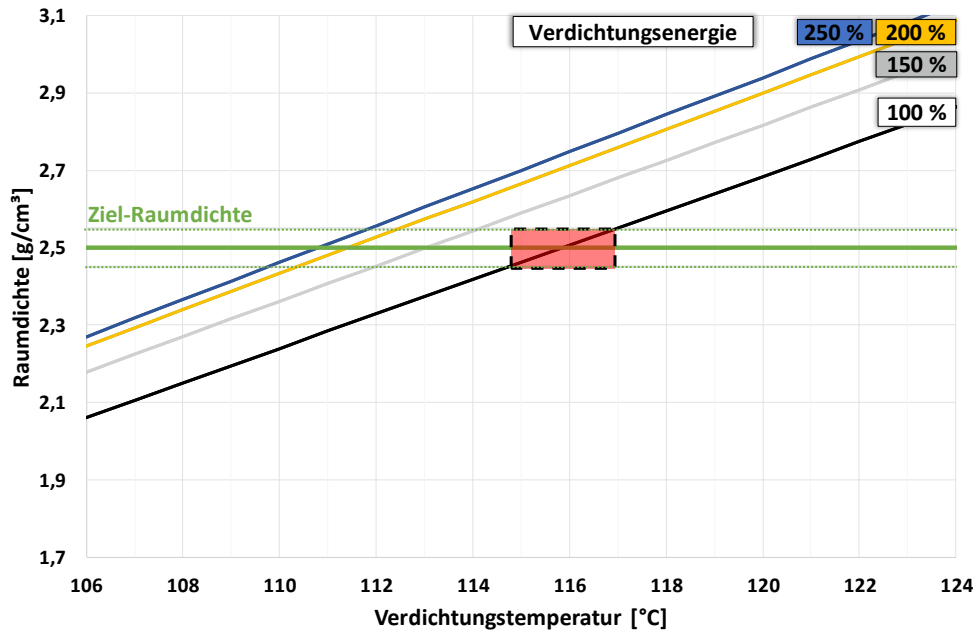


Bild 1-2: Prinzipbeispiel zur Erzielung einer gewünschten Raumdichte (hier: 2,500 g/cm³): Mögliches Temperaturfenster bei Einsatz von 100 % der Verdichtungsenergie

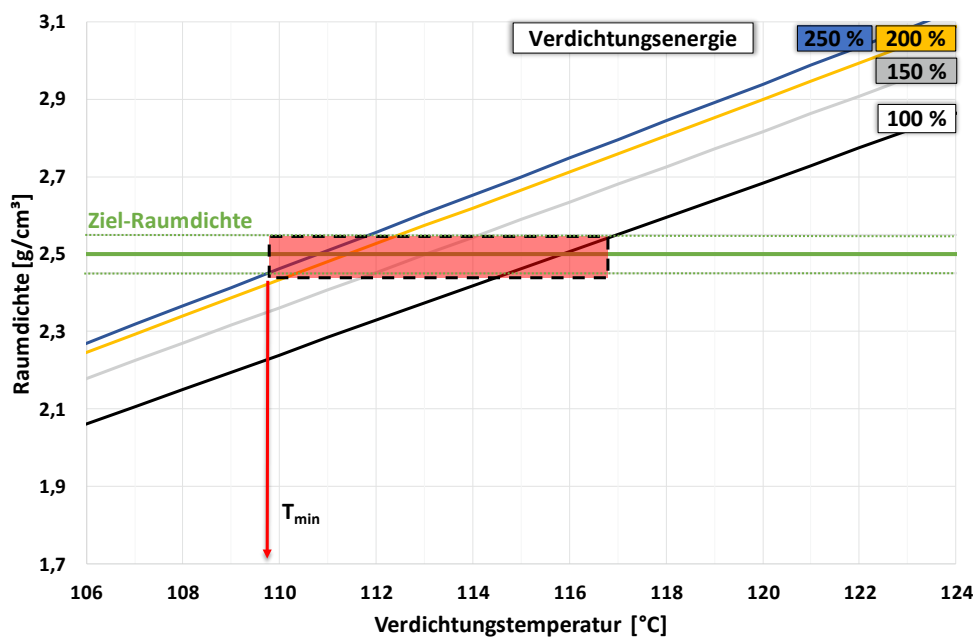


Bild 1-3: Prinzipbeispiel zur Erzielung einer gewünschten Raumdichte (hier: 2,500 g/cm³): Temperaturfenster bei Erhöhung der Verdichtungsenergie (200 % bzw. 250 %) und abnehmender Temperatur

Der Vorteil einer derartig ermittelten Verdichtungsfunktion ist, dass das Diagramm grundsätzlich unabhängig vom Verdichtungsgerät erstellt werden kann. Das Prinzip und damit die Funktion können auf alle Verdichtungsgeräte angewandt werden.

Abschließend wird die Verdichtungsfunktion überprüft. Dazu werden bei der ermittelten Verdichtungstemperatur (und ggf. Verdichtungsenergie) mehrere Probekörper hergestellt und deren Raumdichte überprüft.

Sofern physikalisch sinnvoll, wird zusätzlich ein Probekörper mit wiedererwärmtem Asphaltmischgut hergestellt (siehe Kapitel 3.3), um zu ermitteln, ob die jeweilige TA-Asphalt-Technologie bei Wiedererwärmung abgeschwächt oder noch voll wirksam ist. So können wertvolle Grundlagen für das Qualitätssicherungssystem (QS-System) hinsichtlich der Bewertung bei Kontrollprüfungen geschaffen werden.

Weiterhin werden die Auswirkungen der angewendeten Verdichtungstemperaturen und Zusätze bzw. Technologien bei gleichen erreichten Raumdichten auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dazu wird der Verformungswiderstand mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch (DSV) gemäß (TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2022) bestimmt.

Zum Abschluss wird für die nachfolgende Anwendungsdemonstration (Kapitel 4) ein Verdichtungsgerät ausgewählt, ggf. auch für jede Kategorie ein Verdichtungsgerät. Als Kriterien werden u. a. die Streumaße und die Ergebnisse der Druck-Schwellversuche herangezogen.

1.2.3 Anwendungsdemonstration der Vorgehensweise

Anschließend wird das Prinzip der Verdichtungsfunktionen anhand von Reihenuntersuchungen validiert und es wird eine Grundlage für einen Bewertungshintergrund geschaffen.

Anhand der erstellten Kategorien werden an 4 Asphaltarten mindestens zwei zu wählende Zusätze bzw. Technologien geprüft (8 TA-Asphalt-Varianten). Zusätzlich wird jeweils eine konventionelle Asphaltvariante ohne TA-Technologie als Referenz hergestellt (4 Referenzvarianten).

Die Herstellung der TA-Asphalte erfolgt gemäß Herstellerangaben (oder in einem definierten Temperaturbereich) mit dem erweiterten Prüfumfang zur Bestimmung der Verdichtungsfunktion (mehrere Temperaturen, Variation der Verdichtungsenergie). Je Variante wird die Verdichtungsfunktion wenigstens dreifach bestimmt (= 6 Probekörper), um daraus Streumaße abzuleiten. So kann statistisch abgesichert die passende Verdichtungstemperatur sowie die erforderliche Verdichtungsenergie ermittelt werden.

Nachdem die Verdichtungsfunktionen ermittelt worden sind, werden für jede TA-Asphalt-Variante mindestens fünf Probekörper hergestellt, um daraus weitere Streumaße bezüglich der Zusätze ableiten zu können. Auch hier werden die hergestellten Probekörper dem Druck-Schwellversuch unterzogen, um den jeweiligen Verformungswiderstand zu beurteilen.

1.2.4 Dokumentation des Konzepts

Das resultierende Qualitätssicherungs-Konzept wird unter Berücksichtigung folgender Parameter erstellt:

- Möglichkeiten der technischen Umsetzung im Labor,
- Möglichkeiten der visuellen Überprüfung des Mischvorgangs durch Laborpersonal,
- statistische Auswertung der Ergebnisse, Streumaße der Verdichtungsfunktionen für unterschiedliche Verdichtungsgeräte und die hergestellten Probekörper,
- Auffälligkeiten bezüglich der Druck-Schwellversuche.

Daraus wird zusammenfassend festgestellt, welches Verdichtungsverfahren für die jeweilige Technologie / Kategorie möglichst effektiv im Labor eingesetzt werden kann.

Abschließend wird eine Umsetzung in das Technische Regelwerk vorgeschlagen, welches Erstprüfungen und möglichst auch die WPK und Kontrollprüfungen berücksichtigt.

1.3 Beschreibung der Prüfverfahren

1.3.1 Labormischer mit Leistungsaufnahme

Unter den kritischen Materialkenngrößen spielen die Verarbeitbarkeit und die Verdichtbarkeit des TA-Asphalts eine wesentliche Rolle und sind damit ein wesentlicher Aspekt im Rahmen der Qualitätssicherung.

Der eigens für die Untersuchungen zum Mischwiderstand eingesetzte Gegenlauf-Zwangsmischer GZM-30+ (s. Bild 1-4) ist mit Drehmomentwiderständen ausgerüstet, so dass während einer dreiminütigen Mischdauer die geleistete Mischarbeit [kJ] der Mischtrommel und des Rührers gemessen werden kann. Die Werte basieren auf einer elektrischen Messung und können nur vergleichend betrachtet werden.



Bild 1-4: Im Labor eingesetzter, handelsüblicher, Gegenlauf-Zwangsmischer mit Aufzeichnung der Mischarbeit

Die Messwerte werden digital gespeichert und grafisch ausgewertet (siehe Bild 1-5).

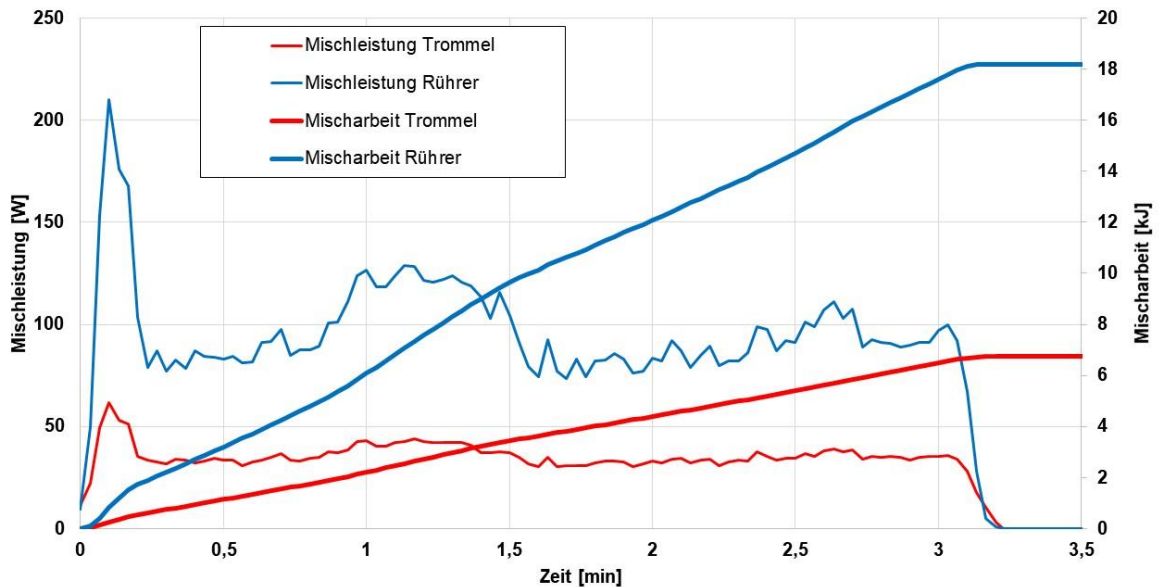


Bild 1-5: Beispiel für die grafische Auswertung der Mischarbeit, getrennt für Trommel und Rührer des Labormischers

Beide Mischarbeiten werden abschließend zu einer Gesamtmischarbeit summiert (hier nicht dargestellt). Während der Herstellung der Asphaltvarianten im Labor muss stets darauf geachtet werden, dass jeweils die gleiche Asphaltmischgutmenge (hier: 35 kg) hergestellt wird, damit ein unmittelbarer Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

1.3.2 Marshall-Verdichtungsgerät mit Verdichtungswiderstand

Hier wird der Verdichtungswiderstand in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010b) bestimmt. Da die Probekörperdicke aufgezeichnet wird, kann über die Anzahl an Schlägen die erzielte Raumdichte berechnet werden.

Nach Herstellung des Asphaltmischguts mit dem Labormischer werden zur Bestimmung des Verdichtungswiderstands Marshall-Probekörper mit einer Verdichtungsanzahl von bis zu 400 Schlägen (200 je Probekörperseite) hergestellt. Die Raumdichtezunahme in der Marshallform kann über die Messung der Probekörperdicke direkt nach jedem Verdichtungsschlag berechnet werden.

Die Faktoren Masse und Grundfläche sind über den gesamten Verdichtungsprozess eines Marshall-Probekörpers konstant und lassen sich aus der Gleichung zur Beschreibung der Raumdichte in Abhängigkeit von der aufgewendeten Verdichtungsarbeit herauskürzen. Damit wird der Verdichtungsverlauf über die Änderung der Probekörperdicke beschrieben. Die gemessenen Probekörperdicken können einer 3-parametrischen Exponentialfunktion angepasst und der im negativen Exponenten stehende Regressionsparameter als Verdichtungswiderstand T berechnet werden. Das Verfahren ist in den TP Asphalt-StB, Teil 10 B detailliert beschrieben.

Abweichend zur Prüfvorschrift wird hier der Probekörper nach jeweils 50 Schlägen umgedreht, bis keine Veränderung in der Probekörperdicke mehr erkennbar ist, siehe Bild 1-6.

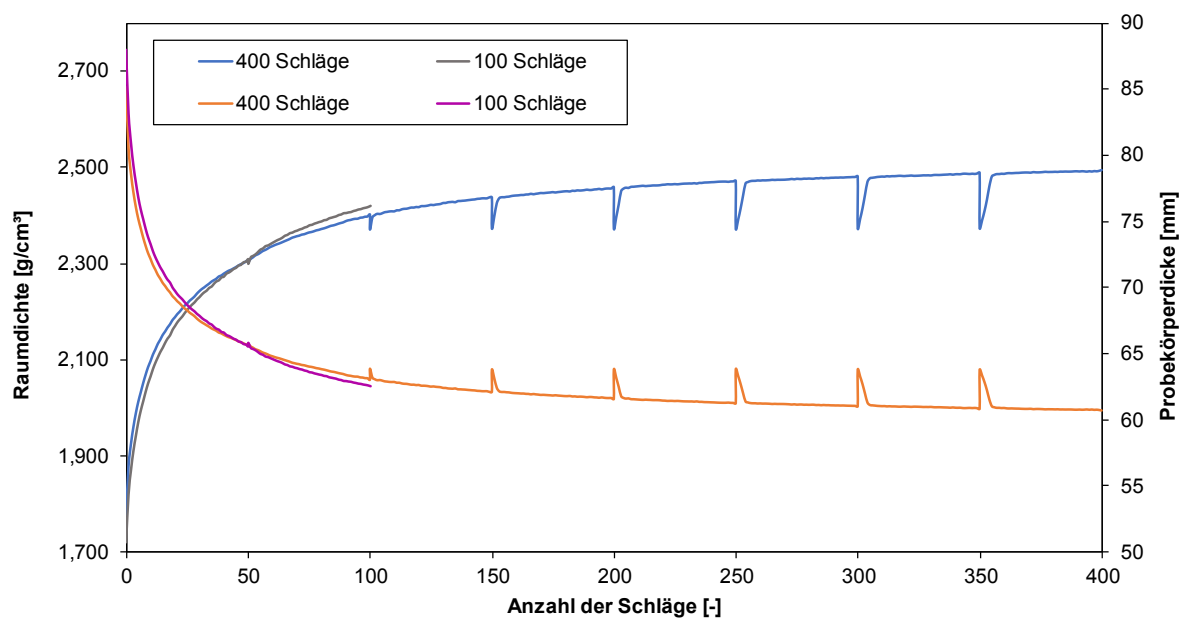


Bild 1-6: Beispiel für die Änderung der Probekörperdicke und der Raumdicke beim Marshall-Verdichtungsgerät mit Drehung der Probe alle 50 Schläge (zwischen 100 und 400 Schlägen)

1.3.3 Gyrator-Verdichtungsverfahren

Die Verdichtungsuntersuchungen mittels Gyrator werden gemäß DIN EN 12697-31 (Europäisches Komitee für Normung (CEN) 2020) an wenigstens zwei Probekörpern durchgeführt. In dem Verdichtungsverfahren wird eine Vertikalkraft auf die zu verdichtende Probe aufgebracht. Die zylindrische Probenform wird an der Unterseite horizontal kreisförmig ausgelenkt, sodass eine knetende Verdichtungswirkung erreicht wird. Eine kreisförmige Auslenkungsbewegung wird als eine Umdrehung (Gyration) bezeichnet und bildet das Maß für die erfolgte Verdichtungswirkung. Während der Verdichtung wird die Probekörperhöhe in Abhängigkeit von den Gyrationen aufgezeichnet, so dass die entsprechende Anzahl der Gyrationen ermittelt werden kann, bei der eine gewünschte Raumdicke erzielt wird bzw. die Raumdicke in Abhängigkeit von den Gyrationen berechnet werden kann.

Nach der Probenteilung werden die abgewogenen Asphaltmischgutproben in den Wärmeschrank gestellt, um die gewünschte Verdichtungstemperatur zu gewährleisten. Die Verdichtungsformen und Stempel werden ebenso auf die gewünschte Verdichtungstemperatur vorgewärmt.

Die Verdichtung erfolgt mit folgenden, regelwerkskonformen Parametern:

- Vorlast: 150 N
- Dauer der Vorlast: 10 s
- Gyrationenwinkel: 0,82 °
- Drehzahl: 32 U/min
- Probendurchmesser: 100 mm
- Verdichtungsdruck: 600 kPa

Hierbei wurde die Umdrehungszahl hoch angesetzt, um die Versuchsdauer gering zu halten und Abkühlungseffekte zu vermeiden. Die Vorlast wurde auf den geringen Wert von 20 kPa für 10 s angesetzt, um die Probe nicht im Vorfeld zu verdichten.

Die Bewertung des Verdichtungswiderstands erfolgt über die Veränderung der Raumdichte eines Probekörpers. Diese Veränderung resultiert aus der aufgebrauchten Verdichtungsarbeit des Gyrotors, welche zur Abnahme der Höhe bzw. Dicke des Probekörpers und damit zur Abnahme des Hohlraumgehalts führt.

Als Ergebnis des Verdichtungswiderstands wird die aus der Dicke berechnete Raumdichte in Abhängigkeit von den durchgeführten Gyrationen des Probekörpers als Verdichtungskurve dargestellt (s. Bild 1-7). Es werden für die Untersuchung des Verdichtungswiderstands 100 und 400 Gyrationen angesetzt.

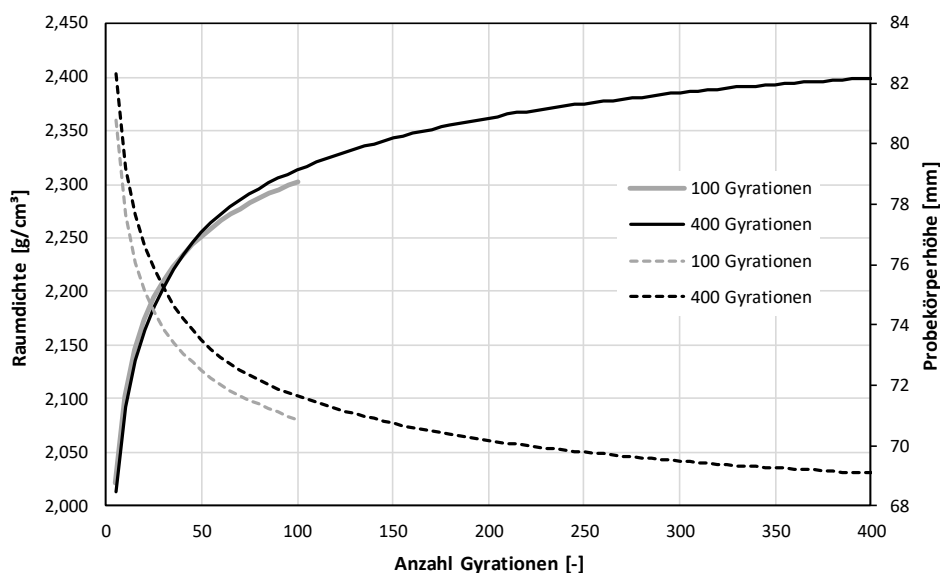


Bild 1-7: Verdichtung mit dem Gyrotor: Exemplarische Darstellung des Verlaufs der Probekörperhöhe und der daraus berechneten Raumdichte des Probekörpers.

1.3.4 Walzsektor-Verdichtungsgerät

Bei der Verdichtung mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät gemäß TP Asphalt-StB, Teil 33 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007) wird die Plattenhöhe bzw. -dickenänderung aufgezeichnet. So kann über die Anzahl an Walzübergängen die zu erzielende Raumdichte erreicht werden.

Die Herstellung der 320 x 200 mm² großen Asphalt-Probeplatten erfolgt in Anlehnung an die TP Asphalt StB, Teil 33 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007). Das Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht aus einer Verdichtungsform mit Einfüllaufsatz und einem kreissektorförmigen Verdichtungskörper (in der Folge als Walzsektor bezeichnet). Die Verdichtung erfolgt durch eine wiegeartige Bewegung des auf den Kreismittelpunkt fixierten Walzsektors auf der Probeplattenoberfläche, verursacht durch eine translatorische Bewegung der Verdichtungsform. Das Funktionsprinzip des Walzsektor-Verdichtungsgeräts kann Bild 1-8 entnommen werden.

Die für die Herstellung der Asphalt-Probeplatten erforderliche Mischgutmenge berechnet sich aus der angestrebten Dicke der Asphalt-Probeplatte, der Grundfläche der Verdichtungsform und der angestrebten Raumdichte des verdichteten Asphalts, welche wiederum aus dem angestrebten Hohlraumgehalt und der Rohdichte folgt.

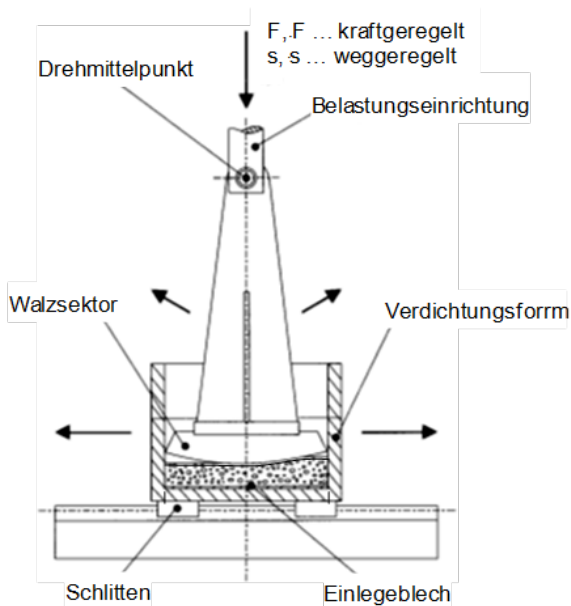


Bild 1-8: Prinzipskizze des Walzsektor-Verdichtungsgeräts (TP Asphalt-StB, Teil 33 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007))

Für die Herstellung von Asphalt-Probeplatten mit praxisadäquaten Eigenschaften ist im Technischen Regelwerk ein Verdichtungsregime definiert, das die Verdichtungsabläufe in situ möglichst praxisnah simuliert. Da im Rahmen dieses Projekts zwei verschiedene Walzsektor-Verdichtungsgeräte mit unterschiedlichen Plattenbreiten (200 mm bzw. 320 mm) zum Einsatz kommen, werden hier die Kräfte auf eine Linienlast entlang der schmalen Seite der Probeplatte bezogen. 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 je Übergang weggeregelt abgesenkt, bis auf der Asphalt-Probeplatte eine Last von 10 N/mm 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 Oberfläche 15 Übergänge bei konstanter Last von 2 N/mm aufgebracht. Danach wird die Linienlast kraftgeregelt in 15 Stufen bis zum Erreichen einer Maximalkraft von 75 N/mm gesteigert. Die Entlastung erfolgt in weiteren 15 gleichen Laststufen. In Bild 1-9 sind der Verlauf der zur Verdichtung aufgetragenen Kraft sowie die dabei erreichte Plattendicke während dieser Verdichtungs-schritte schematisch dargestellt.

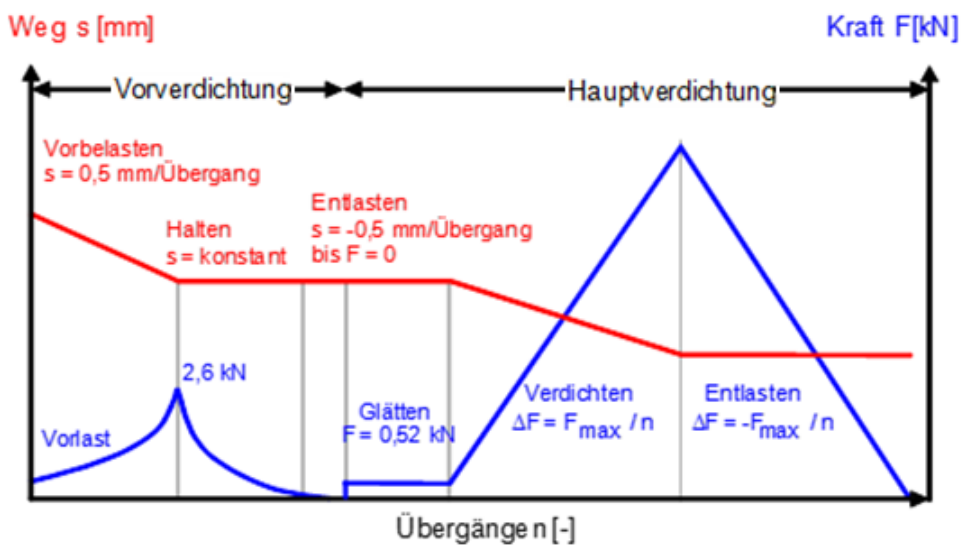


Bild 1-9: Plattendicke (rot) und aufgetragene Kraft (blau) je cm Plattenbreite während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerät, weggeregelt Vorverdichtung, kraftgeregelte Hauptverdichtung (Ringleb & Herzberg 2012)

Zur Bestimmung der Verdichtungskurve wird abweichend von der Prüfvorschrift bei der Hauptverdichtung nach Erreichen der Maximalkraft von 15 bzw. 19 kN die Kraft konstant gehalten und es erfolgen bis zu 200 weitere Lastübergänge in der beheizten Form. So kann die Verdichtungsenergie linear erhöht werden und über die mittlere Plattendicke die Raumdicke errechnet werden.

1.3.5 Schaumbitumen-Anlage

Für die Herstellung von TA-Asphalten mit Schaumbitumen wird eine Labor-Schaumbitumenanlage der Firma Wirtgen verwendet. Die Herstellung des Schaumbitumens erfolgt mit folgenden Parametern:

- Druck: 5,5 bar
- Temperatur: 170 °C
- Wassergehalt: 2,9 %

Die eingestellten Parameter befinden sich in den empfohlenen Grenzen von mindestens 3 bar Druck und ca. 170 °C bis 180 °C Bindemitteltemperatur nach dem Merkblatt M KRC (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2005).

Bild 1-10 zeigt schematisch die Expansion, welche durch das Schäumen entsteht. Diese wird visuell kontrolliert.

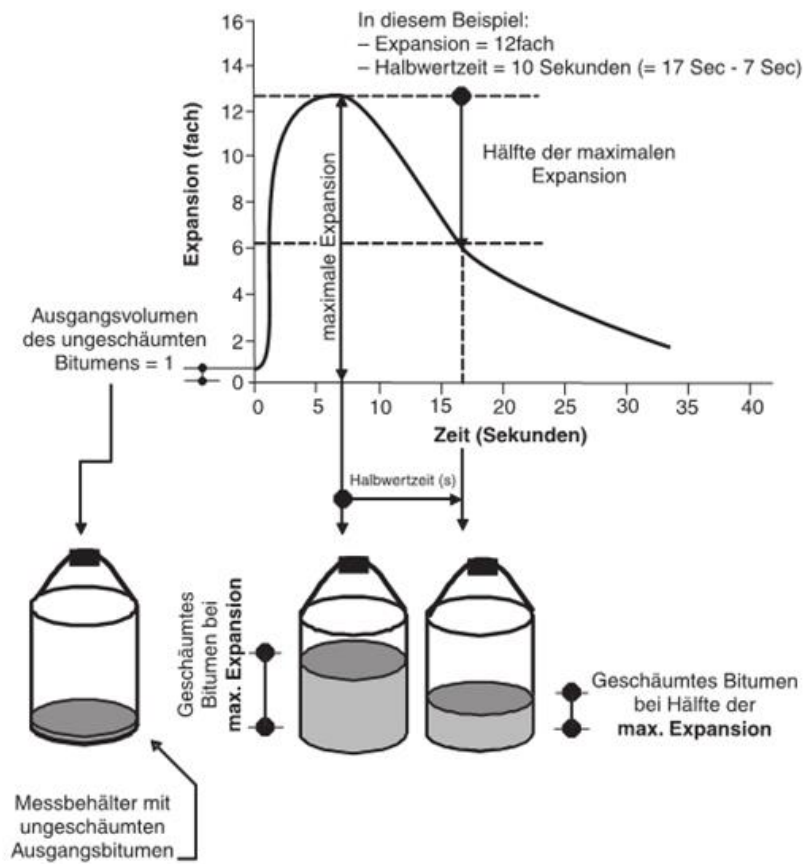


Bild 1-10: Schematische Veranschaulichung von Expansion und Halbwertzeit (M KRC - Anhang 2 - Bild 2)

Um das Bindemittel im Labor so realitätsnah wie möglich zuzugeben, wird überprüft, ob das Schaumbitumen über eine Sprühlanze direkt in den temperierten Zwangsmischer zugegeben werden kann (siehe Bild 1-11; (Wiegand 2022)). Als zweite Zugabemöglichkeit wird das Schaumbitumen in einen Eimer gesprüht und dann zügig in den Mischer eingewogen.



Bild 1-11: Direktes Einspritzen von Schaumbitumen aus dem Schaumbitumen-Apparat (rechts) in den Labormischer (links)

Einsprühversuche über die Sprühlanze mit zwei verschiedenen Bindemittelmengen von 225 g und 1.000 g haben gezeigt, dass die an der Anlage eingestellte Bindemittelmenge nicht zielgenau erreicht werden kann. In Bild 1-12 und Bild 1-13 sind die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen dargestellt. Es zeigt sich, dass sich durch den längeren Weg, welches das Schaumbitumen durch die Lanze zurücklegen muss, die resultierende Bindemittelmenge, welche ausgesprüht wird, deutlich von der eingestellten Bindemittelmenge unterscheidet. Zudem ist die Streuung der ausgesprühten Bindemittelmenge mit bis zu 25 % sehr groß. Bei einer eingestellten Menge von 225 g wurden acht Sprühversuche durchgeführt und bei einer Menge von 1.000 g zwei Sprühversuche.

Aus den vorgenannten Gründen wird auf das direkte Einspritzen von Schaumbitumen über die Sprühlanze verzichtet. Zur Herstellung einer Schaumasphaltvariante wird somit das Schaumbitumen zunächst in einen Eimer gesprüht, anschließend innerhalb von einer Minute in den Mischer eingewogen und der Mischvorgang gestartet. Dieses Vorgehen hat sich in der Durchführung als unproblematisch erwiesen und lässt sich gut umsetzen. Eine Optimierung der Schaumeigenschaften nach M KRC, Anhang 8 wird nicht vorgenommen, da eine ausreichende Erfahrung mit der Technologie vorliegt.

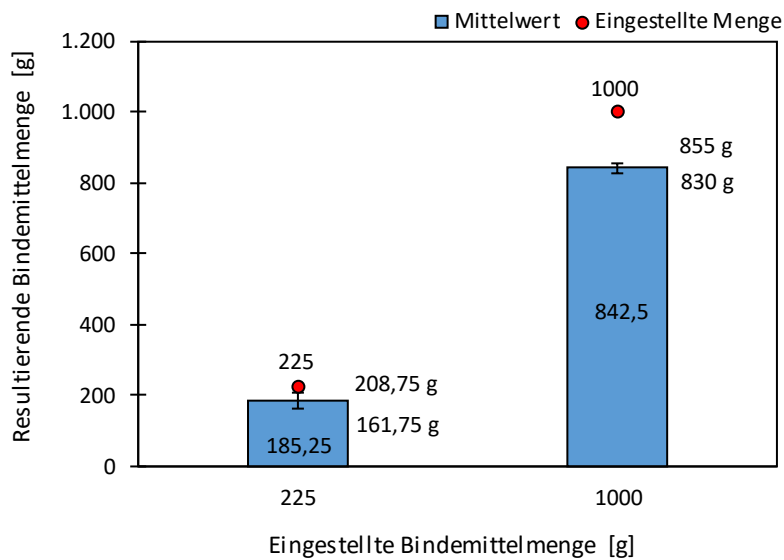


Bild 1-12: Herstellung von Asphaltmischgut mittels Schaumbitumen: In Vorversuchen eingestellte und resultierende Bindemittelmenge [g] bei Einsatz der Sprühdüse

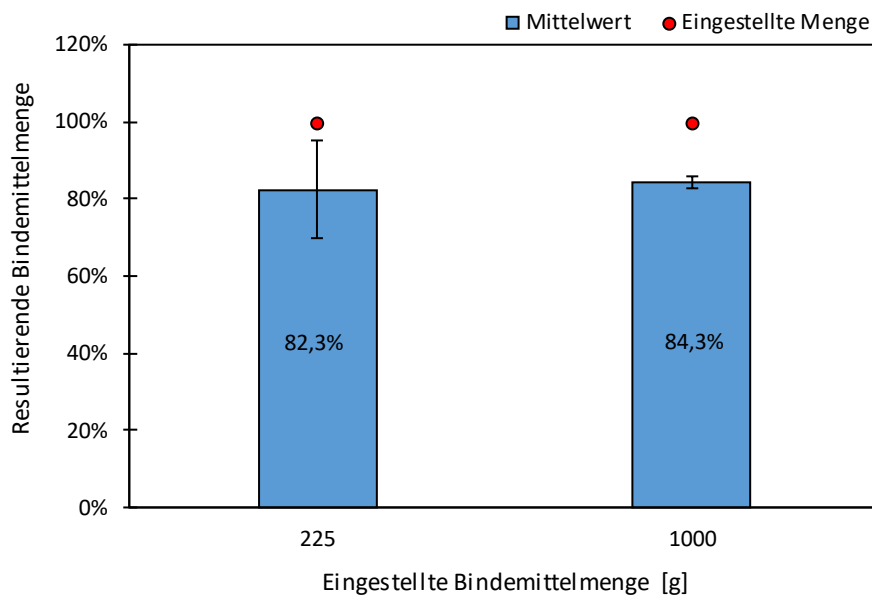


Bild 1-13: Herstellung von Asphaltmischgut mittels Schaumbitumen: In Vorversuchen resultierende Bindemittelmenge [%] bei Einsatz der Sprühdüse

2 Möglichkeiten der Temperaturabsenkung

2.1 Literaturrecherche

Um eine Absenkung der Herstellungs- und Einbautemperaturen in einer Größenordnung von 10 bis 50 °C zu erreichen, werden international verschiedene Zusätze (Bindemittelzusätze) und Technologien eingesetzt. Allein in den USA sind mehr als 30 TA-Asphalt-Technologien auf dem Markt zugänglich (Tutu & Tuffour 2016). Die am weitesten verbreiteten und vielversprechendsten Zusätze und Technologien umfassen die Verwendung von Schaumbitumen (bzw. Schaumasphalt), von organischen Zusätzen (Wachsen) oder von chemischen Zusätzen in Form von oberflächenaktiven sowie reaktiv- bzw. rheologiemodifizierenden Zusätzen.

Zudem existieren auf internationaler Ebene verfahrenstechnische Prinzipien, die eine Temperaturabsenkung bei der Herstellung von Asphaltmischgut ermöglichen. Hier seien vor allem das Verfahren „LEA“ (Low Energy Asphalt) des französischen Unternehmens LEA-CO in Zusammenarbeit mit der Firma EIFFAGE (Prowell, Hurley & Frank 2012) sowie das KGO III-Verfahren genannt. Das KGO III-Verfahren ist auf den schwedischen Entwickler Karl Gunnar Ohlson zurückzuführen und wird in Schweden vielfach eingesetzt (Lindquist & Lindquist).

Frühe Erfahrungen mit TA-Asphalten wurden in Europa ab Mitte der 1990er Jahre gesammelt. Da in Deutschland das Bundesministerium für Arbeit und Soziales 1996 neue Grenzwerte für die Exposition von Arbeitnehmern, die mit Asphaltstäuben in Kontakt kommen, in Erwägung zog, wurde die Reduzierung der Misch- und Verdichtungstemperaturen an verschiedenen Asphalten erprobt. Im Jahr 1997 wurde in Hamburg unter Verwendung des organischen Zusatzes „Fischer-Tropsch-Wachs“ TA-Asphalt hergestellt. Aus dem Jahr 1999 sind erste Versuchsstrecken in Deutschland mit Zeolithen (mineralische Zusätze) dokumentiert. Im selben Jahr wurde aus Norwegen vom Einsatz von Schaumbitumen berichtet (Prowell, Hurley & Frank 2012).

Eine von der National Asphalt Pavement Association durchgeführte Studie führte die TA-Asphalt-Technologie bereits 2002 in den USA ein (D'Angelo et al. 2008; Prowell, Hurley & Frank 2012) und löste eine Reihe von Forschungsaktivitäten aus (u. a. Bonaquist 2011; Hamzah, Golchin & Tye 2013; Kheradmand et al. 2014; Kakar et al. 2016; Yu et al. 2018; Kakar et al. 2018; Pereira et al. 2018)

In Deutschland hat man sich lange Zeit auf die Viskositätsveränderung des Bindemittels beim Mischvorgang mittels organischer Zusätze in Form von Wachsen und mineralischen Zusätzen (Zeolithe) konzentriert, mit welcher der Erhalt der funktionellen Gebrauchseigenschaften und der Dauerhaftigkeit des so hergestellten TA-Asphalts prozesssicher erreicht werden kann. Für diese Technologien ist somit bereits ein großer Erfahrungshintergrund vorhanden (Bundesanstalt für Straßenwesen 2017) und die Handhabung mit diesen Zusätzen ist u. a. im „Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt M TA“ (2021) beschrieben.

Entsprechend wird in diesem Forschungsprojekt auf die viskositätsverändernden organischen Zusätze in Form von Wachsen nicht näher eingegangen. Hier wird kein Forschungsbedarf gesehen, da heute die Charakterisierung von wachsmodifizierten Bindemitteln und daraus hergestellten Asphalten mit Hilfe entsprechender Prüfmethoden lückenlos möglich und deren Einsatz hinlänglich erprobt ist.

Andere Technologien, wie die Verwendung von Schaumbitumen oder oberflächenaktiven, chemischen Zusätzen können laut Merkblatt M TA auch als temperaturabsenkende Mittel verwendet werden, wobei für diese Technologien in Deutschland noch Forschungsbedarf besteht. Hierzu laufen bereits Projekte (z. B. das Projekt „Nachweis des Temperaturfensters für die Verarbeitung von Asphalten mit temperaturabsenkenden Zusätzen im Labormaßstab Gyrator-Verdichtung (GYR2TemWin)“ der Ruhr-Universität Bochum oder das Projekt „Verfahrenstechnische, bautechnische und energetische Eignung der Schaumbitumenteknologie zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat“ ebenfalls Ruhr-Universität Bochum) und erste Teststrecken wurden realisiert. Jedoch ist die Handhabung mit diesen Technologien in Bezug auf die gebräuchlichen Anforderungswerte (z. B. Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad) sowohl im Rahmen der Erstprüfung als auch von WPK und Kontrollprüfung noch offen bzw. zu klären.

In Tab. 2-1 und Tab. 2-2 sind auf Grundlage der Literaturrecherche verschiedene Zusätze und auch betriebsfertige Bindemittel aufgelistet, die bei Anwendung zu einer Temperaturabsenkung in Herstellungs- und/oder Verdichtungsprozess beim Asphaltstraßenbau führen sollten.

Hinweis:

Für alle hier aufgeführten (und auch andere) Zusätze jedweder Form gilt: Beachten Sie das Sicherheitsdatenblatt vor Anwendung der Zusätze! Prüfen Sie, ob die Möglichkeit besteht, dass sich die Zusätze bei den geplanten Temperaturen zersetzen (ggf. keine Wirksamkeit) oder geben die Zusätze möglicherweise schädliche Dämpfe frei?

Ausgehend von dieser Auflistung können die verschiedenen Zusätze in Kategorien eingeteilt werden. Diese Einteilung in Kategorien kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, wie z. B. Wirkweise, Mischprozess, Arbeitssicherheit oder Handhabung am Mischwerk bzw. im Labor.

Bezeichnung des Zusatzes	Herstellendes Unternehmen	Technologie; Wirkprinzip
Evotherm (P35)	Ingevity; USA	Oberflächenaktiver Zusatz; Emulgator (Verbesserung der Haftung an Grenzfläche zwischen Gesteinskörnung und Bindemittel); Reduzierung der Oberflächenspannung
Evotherm Dispersed Asphalt Technology (DAT)	Ingevity; USA	Oberflächenaktiver Effekt und inverse Bitumenemulsion
Iterlow T	Iterchimica; Italien	Tensid; Haftverbesserer; keine Viskositätsveränderung des Bitumens
Iterlow ECO	Iterchimica; Italien	Tensid; oberflächenaktiver Zusatz
B2Last	BASF	Reaktivmodifizierung: Vernetzung zwischen Harz & Asphalten; Ausbildung eines "Netzwerks"
Anova 1503	Cargill	Grenzflächenwirksam zwischen Gestein und Bindemittel keine Viskositätsveränderung des Bitumens
Cecabase RT Bio 10	Arkema; Frankreich	Oberflächenaktiver Zusatz; Reduzierung der Oberflächenspannung und Verbesserung der "Schmierwirkung"
Butonal®5126	BASF	Rheologiemodifikator bzw. Elastizitätsmodifikator
Lanxess BA WM23	Lanxess; Deutschland	Chemischer Zusatz
Advera	PQ Corporation	Mikro-Aufschäumen des Bitumens durch Freigabe von molekular gebundenem Wasser aus den Zeolithen
Aspha-Min	MHI Naturstein & Baustoffservice GmbH	Viskositätsverändernder Zusatz (VVZ); erhöht physikalisch, aber nur temporär das Bindemittelvolumen durch die Bildung von Mikroporen
Rediset LQ-1200 Rediset LQ-900	Nouryon	Reduzierung der Oberflächenspannung, verbessert die Adhäsion (und senkt die Viskosität, laut (Prowell, Hurley & Frank 2012))
HyperTherm / QualiTherm	QPR (Kanada, USA) Coco Asphalt Engineering	Reduzierung der Oberflächenspannung
CWM	Chemoran Ltd, Oranmore, Co.Galway	Reduzierung der Oberflächenspannung; Verbesserung der Adhäsion
Shell Bitumen LT R	Shell	Betriebsfertiges Bindemittel
Shell Thiopave	Shell	Betriebsfertiges Bindemittel; Bitumen wird teilweise durch Schwefel ersetzt und Zugabe von Wachs
Shell Cariphalte LT-R	Shell	Betriebsfertiges Bindemittel
TLA-X	Lake Asphalt of Trinidad and Tobago	Trinidad Lake Asphalt + Zusätze
BituTech PER (WA)	Engineered Additives, USA	Ursprüngliche Anwendung als Rejuvenator; bildet die Malten-Phase nach; Verringerung der Viskosität des Bindemittels; Änderung der Bitumenklasse möglich (weicher)
LEADCAP	Kumho Petrochemical Co.; Korea	Reduzierung der Viskosität des Bindemittels und oberflächenaktiver Zusatz
Licomont BS-100	Clariant	Viskositätsverändernder Zusatz; Amidwachs
Fastac-R	XBE LLC; USA	Verbesserung der Adhäsion bzw. Haftverbesserer
PAVSAV	Asphalt & Wax Innovations	Viskositätsverändernder Zusatz
Delta S	Collaborative Aggregates LLC	Rejuvenator, der auch zur Temperaturabsenkung verwendet werden kann

Tab. 2-1: Zusammenstellung einiger auf dem Markt verfügbarer Zusätze zur Temperaturabsenkung im Asphaltstraßenbau (nicht vollständig; Stand: November 2024), Teil 1

Zycotherm SP	Zydex Industries	Haftverbesserer
NuMIXER	Sripath	Viskositätsverändernder Zusatz
ReNUBIT	Sripath	Verbesserung der Polymerverträglichkeit; Verringerung der Viskosität; Haftverbesserer
INNODUR 100AD	Ruthmann	Viskositätsverändernder Zusatz
INNODUR 100FT	Ruthmann	Fischer-Tropsch-Wachs
Bio Road Warm Mix	Unico Green	Oberflächenaktiver Zusatz
DANOX WM-700	KAO Chemicals Europe	Oberflächenaktiver Zusatz
Low Emission Asphalt Lite (LEA-Lite)	McConnauhay Technologies	Oberflächenaktiver Zusatz, Haftverbesserer
Colzuphalt	dga-Gruppe	Oberflächenaktiver, reaktiver Zusatz
Prododin NT Plus	TIB Chemicals AG	Oberflächenaktiver Zusatz
DANOX WM-700	Kao Chemicals Europe	Oberflächenaktiver Zusatz
TEGO Addibit FS 725A	Evonik	Stabilisator für die Herstellung von Schaumbitumen

Tab. 2-2: Zusammenstellung einiger auf dem Markt verfügbarer Zusätze zur Temperaturabsenkung im Asphaltstraßenbau (nicht vollständig; Stand: November 2024), Teil 2

2.2 Kurzbeschreibung der Zusätze / Verfahren

Eine mögliche Einteilung der oben aufgelisteten Produkte nach ihrer Wirkungsweise zeigt Bild 2-1. Unter der Hauptkategorie „Chemische Zusätze“ werden zum einen oberflächenaktive Zusätze aufgeführt, die an der Grenzfläche zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung wirken und für eine bessere Verarbeitbarkeit und Verdichtung bei verringerter Temperatur sorgen sollen. Zum anderen wird unter der Hauptkategorie „Chemische Zusätze“ die Unterkategorie Rheologie- bzw. Reaktivmodifizierung aufgelistet. Dazu gehören beispielsweise die Zusätze „B2Last“ und „Butonal 5126“ des Chemiekonzerns BASF.

Eine weitere Hauptkategorie stellen die viskositätsverändernden organischen Zusätze (VVZ) dar, zu denen die verschiedenen Wachsmodifizierungen gezählt werden.

Auf Grundlage der Wirkungsweise ist noch die Kategorie „Vergrößerung des Bindemittelvolumens“ zu nennen, die in die Unterkategorien „Mineralische Zusätze“ und „Schaumbitumen“ aufgeteilt wird.

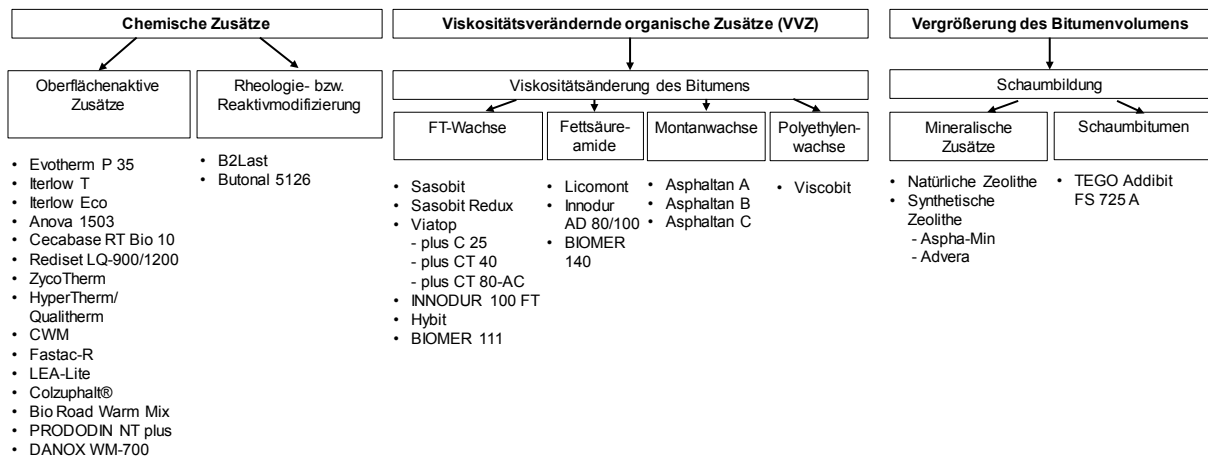


Bild 2-1: Einteilung einiger Zusätze zur Temperaturabsenkung von Asphaltmischgut nach der Wirkungsweise in Anlehnung an Täube (2021) inkl. hier nicht untersuchter VVZ

Die Wirkungsweisen der Hauptkategorien werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt, mit Ausnahme der viskositätsvermindernden organischen Zusätze (siehe Anmerkung oben).

2.2.1 Oberflächenaktive Zusätze

Chemische Zusätze umfassen Emulgatoren, Tenside, Polymere und haftverbessernde Zusätze und Kombinationen daraus (Kakar et al. 2016; Klüter et al. 2020), wobei die herstellenden Unternehmen chemischer Zusätze meist keine spezifischen Informationen über die jeweils verwendeten Chemikalien bekanntgeben. Die Zugabe von chemischen Zusätzen bei der Asphaltproduktion erfolgt meist direkt zum Bindemittel oder es werden fertig modifizierte Bindemittel hinzugegeben (DAV 2021).

Die meisten chemischen Zusätze wirken an der (mikroskopischen) Grenzfläche zwischen Bindemittel und Gesteinskorn, indem sie die innere Reibung an dieser Grenzfläche innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs (typischerweise zwischen 85 und 140 °C) reduzieren. Sie bewirken keine Viskositätsänderung des Bitumens (Oliveira et al. 2013; EAPA 2014; Kakar et al. 2016; Nelken 2021). Daher werden sie meistens auch oberflächenaktive bzw. grenzflächenwirksame, chemische Zusätze genannt. Beispiele für diese Art von Zusätzen sind u. a. Anova WMA, Evotherm P35, Rediset LQ, BA WM 23 und Cecabase (s. Bild 2-1).

Die Verringerung der Reibungskräfte erleichtert auch bei niedriger Temperatur die „Schmierwirkung“ zwischen dem Bindemittel und dem Gesteinskorn während des Mischens und Verdichtens und resultiert in einer verbesserten „Verzahnung“ (Adhäsion) (Caputo et al. 2020; DAV 2021). Allerdings ist festzuhalten, dass die Wirkung von chemischen Zusätzen auf eine Verbesserung der Verdichtbarkeit mit standardisierten Laborverfahren nur eingeschränkt überprüfbar ist (Neutag 2021; Klüter et al. 2020).

Aus vereinfachter, chemischer Sicht sind oberflächenaktive Zusätze aus einer unpolaren Kohlenstoffkette und einem polaren Kopf zusammengesetzt. Die unpolare Kohlenstoffkette ist in Mineralöl löslich und weist eine Affinität zum Bitumen auf. Der polare Kopf besitzt eine Affinität zu Gestein und Wasser. Die unpolaren Kohlenstoffketten binden sich im Mischprozess an das Bitumen und die polaren Köpfe an das Gestein (s. Bild 2-2). So wird ein gleichmäßiger Bitumenfilm um das Gestein gelegt. Die außerhalb des Bitumenfilms gelegenen oberflächenaktiven Anteile des Zusatzes wandern ebenfalls mit ihrem polaren

Kopf in Richtung des Gesteins. So wird der Bitumenfilm zusätzlich von außen gestützt und eine haftverbessernde Wirkung wird auch bei verringerten Mischguttemperaturen erzeugt (Willmeroth 2023).

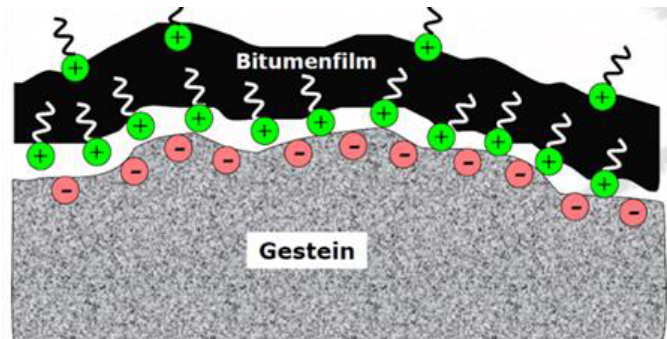


Bild 2-2: Prinzip der Vernetzungshilfe von oberflächenaktiven Zusätzen (Willmeroth 2023)

Eine Verbesserung der Verdichtbarkeit bei verringerter Einbautemperatur im Praxisgebrauch wird nach Willmeroth (2023) durch die Bildung von Mizellen im Asphalt bewirkt. Die Mizellen entstehen dabei durch das Vorhandensein eines Tensids im Zusatz und der Restfeuchte im Asphalt. Diese Bildung von Mizellen sorgt für die verringerte Reibung an der Grenzfläche zwischen Gestein und Bindemittel. Entsprechend kann auch bei niedrigeren Einbautemperaturen ein geringerer Hohlraumgehalt im Vergleich zu einem nicht modifizierten Asphalt erreicht werden.

Daneben existieren chemische Zusätze, welche bei Anwendung im höheren Temperaturbereich tatsächlich die Viskosität des Bitumens verändern (Caputo et al. 2020; Klüter et al. 2020). Diese sind von den oben genannten chemischen Zusätzen zu differenzieren, was in der Literatur nicht eindeutig erfolgt. Im Rahmen dieses Projekts werden die chemischen Zusätze entsprechend kategorisiert, u. a. nach Herstellungsart, Wirkungsweise und Erfahrungen.

2.2.2 Reaktiv- bzw. Rheologiemodifizierung

Auf dem Markt für temperaturabsenkende Zusätze existieren mittlerweile auch chemische Zusätze, die zu einer Reaktiv- bzw. Rheologiemodifizierung des Bindemittels führen. Namentlich seien hier die Produkte „B2Last“ und „Butonal 5126“ des Chemiekonzerns BASF genannt. Bei Anwendung dieser Zusätze kommt es zu einer chemischen Reaktion mit dem Bitumen.

Im Fall eines reaktivmodifizierenden Zusatzes (z. B. B2Last) wird ein elastisches Polymernetzwerk gebildet (s. Bild 2-3). Dieses entsteht durch die Andockung der Monomere (kleine, sehr reaktionsfreudige Moleküle) des B2Last an die funktionellen Gruppen des Bitumens. Entsprechend wird nach Aussage des Herstellers der Zusatz vollständig aufgebraucht und Bestandteil des entstehenden Polymernetzwerkes (Carreño Gómez, Bokern & Oeser 2020).

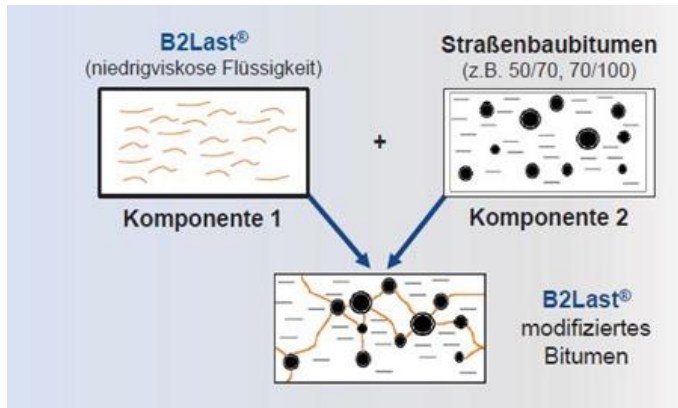


Bild 2-3: Reaktivmodifizierung des Bitumens mittels B2Last (Oeser 2020)

Weitere Informationen und Praxisberichte zu dem reaktivmodifizierenden Zusatz B2Last können unter anderem in den folgenden Literaturquellen nachgelesen werden: (Carreño Gómez, Bokern & Oeser 2020; Michels 2022; Schatz, Michels & Carreño Gómez 2021; Fleischel, Michels & Schatz 2022; Barthel et al. 2023; Carreño Gómez & Oeser 2021; Carreño Gómez, Oeser & Fleischel 2021; Carreño Gómez et al. 2021).

Ein weiterer chemischer Zusatz, welcher als Rheologie- bzw. Elastizitätsmodifikator vom Hersteller BASF bezeichnet wird, stellt der Zusatz „Butonal 5126“ dar. Es ist eine Polymerdispersion bzw. Styrol-Butadien-Dispersion, die als Direktmodifizierung eines Straßenbaubitumens bei der Mischgutherstellung in die Mischtrommel gegeben wird. Nach Herstellerangaben kann es somit in Verbindung mit einem Straßenbaubitumen als Alternative zu einem polymermodifizierten Bitumen gesehen werden. Zudem soll ein Asphaltmischgut, welches mit „Butonal 5126“ versetzt wurde, temperaturreduziert eingebaut und verdichtet werden können (BASF; Hinrichs 2021).

2.2.3 Mineralische Zusätze

Mineralische Zusätze sind hydrothermisch kristallisierte Mineralien. Hierzu zählt Zeolith als der am häufigsten eingesetzte mineralische Zusatz (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2021).

Künstlich hergestellte Zeolithe sind hydratisierte Natrium-Aluminium-Silikate, die 18 bis 22 M.-% Wasser in gebundener Form enthalten (Sengoz, Topal & Gorkem 2013). Bei der Vermischung und Erwärmung von Zeolithen in Bitumen wird feindisperser Wasserdampf freigesetzt und das Bitumen schäumt auf. Grund hierfür ist die große Temperaturdifferenz zwischen dem Zusatzstoff und dem Bitumen, welches zum Austreiben und Verdampfen des molekular gebundenen Wassers und zu einer Blasenbildung führt. Der Kontakt des Bindemittels mit wasserhaltigem Zeolith bewirkt über die Volumenzunahme eine Verringerung der Viskosität und erlaubt eine zeitlich begrenzte Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Verdichtungswilligkeit des Asphaltmischguts. Da das Wasser vollständig verdunstet, werden die chemischen und rheologischen Bitumeneigenschaften bei diesem Prozess nicht nachhaltig verändert (DAV 2021).

Natürliche Zeolithe bestehen aus mikroporösen, hydratisierten Aluminium-Silikat-Mineralien, welche als gebrochenes Gestein in der Natur vorkommen. Durch ihren Porenraum und ihre bindenden Eigenschaften können sie gleichermaßen als mineralischer Zusatz für die Temperaturabsenkung eingesetzt werden.

Bei der Asphaltmischgutherstellung werden die mineralischen Zusätze entweder kurz vor oder zeitgleich mit dem Bitumen hinzugegeben.

2.2.4 Schaumbitumen

Bereits im Jahr 1957 entwickelte Dr. Ladis H. Csanyi, Professor an der Iowa State University (USA), eine frühe Schaumbitumen-Technologie zur Produktion von Kaltmischgut (Vaitkus et al. 2009). Im Grundsatz wird dabei Bitumen unter Zugabe von Wasser und unter hohem Druck aufgeschäumt, wodurch dessen Volumen erhöht wird und die Viskosität stark absinkt. Die abgesenkte Viskosität ermöglicht ein Mischen und Verarbeiten des Schaumasphalts bei deutlich niedrigerer Temperatur.

In den 1960er und 70er Jahren wurde dieses Verfahren maßgeblich weiterentwickelt und schließlich von Mobil Oil Australia Ltd. patentiert. Nachdem das Patent im Jahr 1991 ausgelaufen war, wurden zahlreiche Systeme zur Schaumherstellung entwickelt, ohne entscheidende Unterschiede aufzuweisen (Krass & Nyatanyi 2001).

In Deutschland wurde die grundsätzliche Eignung der Schaumbitumen-Technologie zur Reduzierung der Misch- und Verdichtungstemperaturen unter anderem durch ein AiF-Forschungsprojekt von (Wirth & Opel 2008) nachgewiesen. Es wurde festgestellt, dass die Mischtemperatur um ca. 30 °C auf 140 °C bis 150 °C reduziert und die Verdichtungstemperatur bei konstanter Verdichtbarkeit und Gebrauchstauglichkeit um ca. 40 °C auf 110 °C verringert werden kann.

Dennoch gilt die Schaumbitumen-Technologie in Deutschland bislang als wenig erprobt, wohingegen in den USA (Martin et al. 2014; EAPA 2014; Newcomb et al. 2015), als auch in europäischen Ländern wie den Niederlanden, Frankreich und Norwegen bedeutende Erfahrungen vorliegen (Wirth & Opel 2008).

2.3 Kategorisierung der Technologien

Die in Tab. 2-1 und Tab. 2-2 genannten Zusätze sind bereits grob kategorisiert (siehe auch Bild 2-1), und werden nun weiter unterteilt.

Hintergrund und Ziel dieser Kategorisierung ist es, Anhaltspunkte für eine Anwendung im Labor im Rahmen von Erst- und Kontrollprüfung sowie WPK zu schaffen. Zudem sollen neben bestehenden Produkten auch zukünftige, auf dem Markt neu verfügbare Zusätze einer passenden Kategorie zugeordnet werden können, sodass die Auswahl des für den jeweiligen Zweck geeigneten Zusätze erleichtert ist.

Die primäre Einteilung erfolgt nach der Wirkungsweise gemäß der Einteilung in Bild 2-1. Unter der Hauptkategorie „Chemische Zusätze“ sind zum einen oberflächenaktive Zusätze aufgeführt, die an der Grenzfläche zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung wirken und für eine bessere Verarbeitbarkeit und Verdichtung bei verringerter Temperatur sorgen sollen, sowie zum anderen die Unterkategorie Rheologie- bzw. Reaktivmodifizierung (siehe Kapitel 2.2).

Auf Grundlage der Wirkungsweise ist in Anlehnung an Täube (2021) weiterhin die Kategorie „Vergrößerung des Bindemittelvolumens“ zu nennen, die in die Unterkategorien „Mineralische Zusätze“ und „Schaumbitumen“ aufgeteilt wird (siehe Kapitel 2.2.3 und 2.2.4).

Neben der Wirkungsweise der Produkte / Verfahren sollen in die Kategorisierung weitere Spezifikationen aufgenommen werden, wie „Betriebsfertiges Bindemittel“, Herstellungstemperatur des TA-Asphalts mit diesem Zusatz im Labor, Besonderheiten im Mischprozess / spezielle Mischtechnologien im Labor.

Daraus wurde eine Kategorisierung entwickelt, welche anhand drei, ggf. vier, Buchstaben-Kombinationen erfolgt. In Tab. 2-3 sind die Spezifikationen dargestellt.

Kürzel	Wirkungsweise
V	Viskositätsverändernd (organische Zusätze, Wachse); nach TL VBit
M	Mineralischer Zusatz
S	Schaumbitumen
O	Oberflächenaktiv bzw. grenzflächenwirksam
R	Reaktiv- bzw. rheologiemodifizierend
A	Andere Wirkungsweise
Absenkung der Verdichtungstemperatur, Herstellung	
Bsp.: 10	Beispiel: Bitumen 15/25 VL Temperatur 125 °C statt 135 °C
K	Kein Zusatz oder das Verfahren wird bei der Herstellung im Labor nicht angewendet
H	Herstellerangaben beachten
Absenkung der Verdichtungstemperatur, Wiedererwärmung	
Bsp.: 10 oder H	Beispiel: Bitumen 15/25 VL Temperatur 125 °C statt 135 °C oder Herstellerangaben beachten
T	Wiedererwärmtes Mischgut muss getrocknet werden (insbesondere bei Verwendung von Schaumbitumen, Zeolithen)
Zugabe im Herstellungsprozess	
G	Zugabemenge mit Abzug vom Gesteinskörnungsgemisch
B	Zugabemenge mit Abzug vom Gesamtbindemittelgehalt
N	„Normaler“ Mischprozess - keine Berücksichtigung im Herstellungsprozess; betriebsfertige Produkte
Zusätzliche Funktionen	
Rj	Zusätzliche Funktion: Regenerator („Verjüngungsmittel“)
H	Unbedingt Herstellerangaben beachten

Tab. 2-3: Kategorien für Zusätze / Verfahren zur Temperaturabsenkung und deren Bezeichnung mittels Kürzel

Anhand dieser Kategorisierung wird anschließend für jede Wirkungsweise, ein repräsentativer Zusatz / Verfahren für die Laboruntersuchungen zur Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit ausgewählt, das bestenfalls zudem in der Pilotproduktliste der BASt für die Anwendung in Erprobungsstrecken gelistet ist (Stand 04.04.2024).

Die Anwendung der Kategorisierung wird anhand verschiedener Zusätze beispielhaft dargestellt:

- 15/25 VL: V-10/10-N

Viskositätsverändernder Zusatz - Verdichtungstemperatur bei Herstellung um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung um 10 °C abgesenkt – Betriebsfertiges Bitumen, „normale“ Herstellung

- Oberflächenwirksamer Zusatz: O-10/0-B

Oberflächen-/Grenzflächenwirksam - Verdichtungstemperatur nach Herstellung um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung nicht abgesenkt - Zugabemenge wird vom Gesamtbindemittelgehalt abgezogen

- Zeolithe: M-10/0T-G

Mineralischer Zusatz – Verdichtungstemperatur bei Herstellung wird um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung wird nicht abgesenkt, Mischgut ist zu trocknen - Zugabemenge wird dem Gestein-/Füllergehalt zugeschlagen bzw. vom Füllergehalt abgezogen

- Schaumbitumen: S-0K/0T-N

Schaumbitumen – Verdichtungstemperatur nach Herstellung wird nicht abgesenkt, Verfahren wird nicht angewandt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung wird nicht abgesenkt, Mischgut ist zu trocknen – Herstellung „normal“, ohne Besonderheiten

- Chemisch reaktiv: R-10/0-B-H

Reaktiv- bzw. Rheologiemodifizierung – Verdichtungstemperatur bei Herstellung wird um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung wird nicht abgesenkt – Zugabemenge bezogen auf Gesamtbindemittelgehalt – Unbedingt Herstellerangaben beachten

3 Ermittlung einer Verdichtungs-funktion

3.1 Materialien und Prüfplan

Für die grundsätzliche Ermittlung von Verdichtungs-funktionen wird die Asphalt-sorte AC 11 D S mit unterschiedlichen Zusätzen eingesetzt. Das Material wird im Labor gemischt. Als Gestein kommt ein Gabbro aus Bad Harzburg zum Einsatz, als Füller dient ein Kalksteinmehl aus Hehlen. Als Bitumen kommt ein 25/55-55 A der TotalEnergies Bitumen Deutschland GmbH zum Einsatz.

Die Zusammensetzung bleibt in dieser Phase für alle Varianten gleich. Lediglich der (geringe) Anteil der Zusätze wird dem Bitumen oder dem Füller zugerechnet.

Die Zusammensetzung des Asphalts ist in Tab. 3-1 dargestellt:

Merkmal	AC 11 D S
Eingesetzte Baustoffe	Kalksteinmehl, Gabbro, 25/55-55 A
Resultierender Bindemittel- gehalt [M.-%]	6,1
Anteil Ausbauasphalt [%]	-
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [M.-%]
< 11,2	100,0
< 8,0	85,0
< 5,6	70,0
< 2,0	45,0
< 1,0	35,0
< 0,25	17,0
< 0,125	10,0
< 0,063	7,0

Tab. 3-1: Zusammensetzung der für die Überprüfung eingesetzten Referenz-Mischgutsorte AC 11 D S

Alle gemischten Asphalte werden bezüglich ihrer Zusammensetzung analysiert. Die Ergebnisse sind im Anhang dokumentiert.

Aufgrund der vorliegenden Gesteinsfraktionen konnte die Zusammensetzung nur soweit optimiert werden, dass ein zu hoher Hohlraumgehalt gemäß den TL Asphalt-StB 07/13 realisiert wurde. Bei der Anwendung der unterschiedlichen Zusätze konnte jedoch teilweise eine höhere Verdichtung erreicht werden, so dass der Hohlraumgehalt wieder regelkonform ausfiel.

Die Zusammensetzung der vier eingesetzten Asphaltmischgutsorten (AC 11 D S, SMA 8 S, SMA 16 B S und AC 32 T S) zur Validierung der Verdichtungsfunktion ist in Kapitel 4 in Tab. 4-1 dargestellt.

Als Zielwert für die später mit dem Mischgut zu erzielende Raumdichte bzw. dem zu erzielenden Hohlraumgehalt werden mit dem Referenzmischgut AC 11 D S Probekörper gemäß Prüfvorschrift hergestellt. Zusätzlich wird die Verdichtungstemperatur um 10, 20 und 30 °C gegenüber der Referenztemperatur abgesenkt, um die Temperaturabhängigkeit des Referenzmischguts abzuschätzen. Der Abstand der Verdichtungstemperaturen ist gleichbleibend zu halten, die zulässigen Toleranzen für die Temperierung dürfen nicht ausgereizt werden.

Im Weiteren kommen ein oberflächenaktiver Zusatz, ein reaktiv- bzw. rheologiemodifizierender Zusatz und ein Zeolith zum Einsatz. Zudem wird eine Asphaltmischgutvariante mittels Schaumbitumen hergestellt.

Als Bindemittel wird ein Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A eingesetzt. Für die Variante mit reaktivmodifizierendem Zusatz wird ein Straßenbaubitumen 50/70 eingesetzt.

Zusätzlich zum geplanten Versuchsumfang wird ein Bitumen PmB 25/45 VL nach TL VBit-StB verwendet.

Da für annähernd alle Produkte keine Standard-Temperatur für die Verdichtung angegeben ist, werden hier die Verdichtungstemperaturen 135 – 115 – 95 °C genutzt. Soweit erforderlich wird auch mit der Standard-Temperatur von 145 °C verdichtet.

Die Mischtemperatur ist jeweils herstellereitig vorgegeben und beträgt in einem Fall 140 °C, sonst 160 °C.

Eine Übersicht der überprüften Varianten an TA-Asphalt zeigt Tab. 3-2:

Variante	Mischtemperatur	Zusatz, Verdichtungstemperatur
1-1	160 °C	Referenz, 145 °C
1-2		Referenz, 135 °C
1-3		Referenz, 125 °C
1-4		Referenz, 115 °C
2-1	140 °C	oberflächenaktiver Zusatz, 135 °C
2-2		oberflächenaktiver Zusatz, 115 °C
2-3		oberflächenaktiver Zusatz, 95 °C
3-1	160 °C	reaktivmodifizierender Zusatz, 135 °C
3-2		reaktivmodifizierender Zusatz, 115 °C
3-3		reaktivmodifizierender Zusatz, 95 °C
4-1	160 °C	Zeolith, 135 °C
4-2		Zeolith, 115 °C
4-3		Zeolith, 95 °C
5-1	140 °C	Schaumbitumen, 135 °C
5-2		Schaumbitumen, 115 °C
5-3		Schaumbitumen, 95 °C
6-1	160 °C	PmB 25/45 VL, 145 °C
6-2		PmB 25/45 VL, 135 °C

Tab. 3-2: Übersicht der Varianten an TA-Asphalt zur Ermittlung der Verdichtungsfunktion

3.2 Verarbeitbarkeit

In einem ersten Schritt erfolgt die Beurteilung der Verarbeitbarkeit (generelle Kontrolle der Machbarkeit). Dazu wird der Mischvorgang über eine kleine Zugabeöffnung visuell überwacht, um mögliche Auffälligkeiten frühzeitig zu erkennen. Während des Mischens werden festgehalten:

- Zeit für Umhüllungsgrade von 50 %, 75 %, 90 %, ca. 100 % und sicher 100 % (ca. 10 s nach vollständigem Umhüllungsgrad),
- Geruchsentwicklung (leicht, stark),
- Dampfentwicklung (leicht, stark),
- Abschließend: Mischgut homogen?,
- Abschließend: Klumpenbildung?,
- Abschließend: „Wirkt das Mischgut zu trocken?“ und

- Abschließend: „Wirkt das Mischgut zu fett?“.

Die Ergebnisse für die durchgeführten Mischungen sind in Tab. 3-3 zusammengefasst.

Variante	Mischtemperatur [°C]	Zeit für Umhüllungsgrad [s]				
		50 %	75 %	90 %	100 %	Sicher 100 %
V1	160	25	45	57	75	80
V2	140	45	57	70	100	105
V3	160	35/36	56/56	70/71	85/86	105/105
V4	160	40	53	63	90	110
V5	140	/	/	/	/	120

Tab. 3-3: Ergebnisse der visuellen Kontrolle beim Mischvorgang

Anhand der visuellen Kontrolle kann festgehalten werden, dass bei der Referenzvariante (V1) die Umhüllung des Mischguts am schnellsten erfolgt. Es folgen der Reihe nach das reaktivmodifizierende Zusatz (V3), Zeolith (V4) und der oberflächenaktive Zusatz (V2). Dabei ist festzuhalten, dass Variante V2 bei 140 °C statt 160 °C gemischt wurde. Bei der Variante V5 war eine visuelle Kontrolle während der Mischgutherstellung nicht möglich, aufgrund der Konstruktion des Labormischers. Es wurden keine weiteren Auffälligkeiten – wie beispielsweise Geruchsentwicklung oder Klumpenbildung – festgestellt.

Während des Mischvorgangs wurde zusätzlich die Mischarbeit des Rührers und der Trommel am Labormischer gemessen. In Bild 3-1 sind die addierten Mischarbeiten von Trommel und Rührer über die Zeit dargestellt.

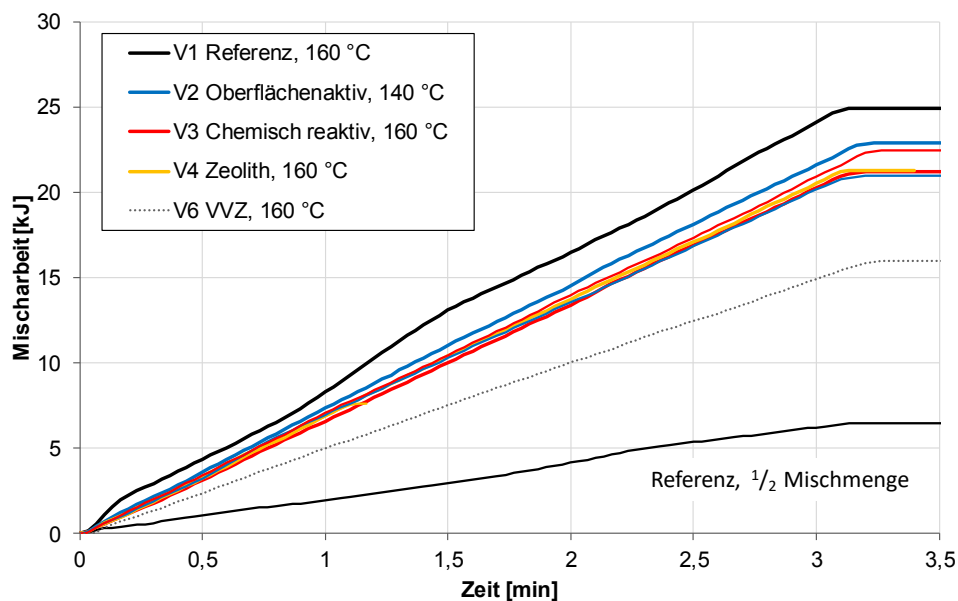


Bild 3-1: Addierte Mischarbeit von Trommel und Rührer über die Zeit für die überprüften Varianten (VVZ = viskositätsverändernder Zusatz)

Die aufgezeichneten Mischarbeiten zeigen eindeutig, dass die Referenzvariante (V1) die größte Mischarbeit benötigt. Es wird auch deutlich, dass jeweils die gleiche Menge Mischgut gemischt werden muss, um vergleichbare Mischarbeiten zu erhalten. Andernfalls fällt die Mischarbeit stark ab (Referenz, ½ Mischung).

Gegenüber der Referenz fällt die Mischarbeit für den oberflächenaktiven Zusatz (V2) deutlich geringer aus, trotz der geringeren Mischtemperatur von 140 °C. Die geringste Mischarbeit zeigen die Mischungen mit reaktivmodifizierendem Zusatz (V3) und Zeolith (V4), welche nahezu auf einer Linie liegen. Die zusätzlich aufgenommene Variante (V6) mit viskositätsveränderndem Zusatz (VVZ) nach TL VBit wurde irrtümlich nur mit 35 kg gemischt, was sich in einer deutlich niedrigeren Mischarbeit niederschlägt. Vermutlich würde aber die Mischarbeit bei 40 kg immer noch unterhalb der Referenz liegen.

Im Weiteren wird die Aufnahme der Mischarbeit jedoch nicht weiter als Qualitätskriterium berücksichtigt. Es sprechen mehrere Punkte dagegen:

- Die Prüftechnik der Drehmomentaufnahme bzw. Mischarbeit ist wenig verbreitet und vergleichsweise teuer.
- Zur Beurteilung des Mischwiderstands bzw. der Mischarbeit muss immer ein Referenz-Mischgut gemischt werden. Ein laborübergreifender Vergleich ist aufgrund der unterschiedlichen Messtechniken aktuell nicht möglich.
- Für einen Vergleich müssen die Füllmassen jeweils gleich groß sein. Werden weitere oder weniger Mengen benötigt, müssen diese ggf. getrennt gemischt werden.
- Jeder Hersteller eines Zusatzes kann die Mischtemperatur – als wesentliche Größe zur Minimierung der Aerosole - individuell festlegen. Eine einheitliche Mischtemperatur für unterschiedlichste Zusätze ist kaum realisierbar. Dies beeinflusst jedoch den Mischwiderstand, so dass ein Vergleich erschwert wird.
- Letztlich sind die Eigenschaften der aus dem Mischgut hergestellten Probekörper entscheidend.

Natürlich muss auch weiterhin jedes im Labor gemischte TA-Asphaltmischgut bezüglich seiner Konsistenz visuell bewertet werden und auf Auffälligkeiten muss reagiert werden.

3.3 Verdichtungsfunktion für MPK

3.3.1 Referenz

Für die Referenzvariante wird im Regelfall keine Verdichtungsfunktion ermittelt. Sie dient hier lediglich zur Ermittlung der zu erzielenden Raumdichte. Als Ziel-Raumdicke wurde an Marshall-Probekörpern (MPK) (bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C) folgender Referenzwert ermittelt (siehe Tab. 3-4):

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,471 \text{ g/cm}^3$$

Als Toleranz-Bereich für die Ziel-Raumdicke werden $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt, so dass der anzustrebende Raumdichtebereich zwischen $2,446 \text{ g/cm}^3$ bis $2,496 \text{ g/cm}^3$ liegt. Zur Erfahrungssammlung wurde der Bereich etwas größer als die kritische Spannweite der Einzelwerte der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6 angesetzt. Prinzipiell kann die Toleranz auf (künftige) Erfahrungswerte angepasst werden. Ein einheitlicher Bereich garantiert jedoch die Vergleichbarkeit.

Die oben angegebene Raumdichte wurde per Tauchwägung gemäß dem geltenden Regelwerk ermittelt. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung der Raumdichte mittels Dickenänderung. Die Bestimmung der Raumdichte während der Verdichtung erfolgt in Anlehnung an die TP Asphalt, Teil 10 B (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010b) anhand der Dickenänderung. Beide Messmethoden führen jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen, wie in Tab. 3-4 dargestellt ist.

Für die Referenzvariante wurde ebenfalls die Verdichtungstemperatur reduziert, um das Verdichtungsprinzip zu überprüfen und eine bessere Vergleichbarkeit zu den anderen Varianten zu ermöglichen. Entsprechend sind in Tab. 3-4 ebenfalls die mittleren Raumdichten aus der Tauchwägung und der Dickenänderung der Varianten mit 135, 125 und 115 °C Verdichtungstemperatur angegeben.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Schläge			400 Schläge		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
145	2,471	2,397	0,074	2,518	2,493	0,025
135	2,466	2,403	0,063	2,529	2,505	0,024
125	2,412	2,390	0,022	2,513	2,492	0,021
115	2,406	2,382	0,024	2,502	2,492	0,010

Tab. 3-4: Übersicht der mittleren Raumdichten am Marshall-Probekörper der Referenzvariante (V1) nach 100 und 400 Schlägen

Die hier ermittelten Unterschiede in den Raumdichten aus der Tauchwägung und der Dickenänderung werden in den späteren Berechnungen entsprechend berücksichtigt.

Des Weiteren wurden zwei Marshall-PK der Referenzvarianten mit einer maximalen Verdichtung hergestellt (ca. 400 Schläge). Die Proben wurden jeweils nach 50 Schlägen umgedreht, während die Probekörperdicke aufgezeichnet wurde. Anhand der Aufzeichnungen wurde über die Einwaage des Probekörpers die Raumdichte je Schlag berechnet. Probekörperdicke und Raumdichte des jeweiligen Probekörpers wurden im Anschluss messtechnisch ermittelt und mit den Aufzeichnungen abgeglichen. Die Mittelwerte der Raumdichten nach Tauchwägung und Dickenänderung sind in Tab. 3-4 dargestellt.

Um anhand der Daten aus der Dickenänderung auf die Raumdichten der Tauchwägung zu schließen, muss die Verdichtungskurve korrigiert werden. Als Basis wird eine Regression der Raumdichte über die Anzahl an Schlägen gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10 B (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010a), siehe Bild 3-2 (Regression), erstellt.

$$\rho(S) = a - b \times e^{S/T} \quad (1)$$

Mit: $\rho(S)$ = Berechnete Dichte über die Anzahl an Schlägen S
a = Raumdichte nach 400 Schlägen
b = Differenz der Start-Raumdicke und Raumdichte nach 400 Schlägen
S = Anzahl der Schläge [21 Nm]
T = Verdichtungswiderstand [21 Nm]

Da die Probekörper alle 50 Schläge gewendet wurden, was mit aufgezeichnet wurde, ist hier jeweils ein kurzer Ausschlag zu erkennen, siehe Bild 3-2.

Werden nun die Krümmung der Regression (Parameter T) und die mittels Tauchwägung ermittelten Raumdichten bei 100 und 400 Schlägen (in Bild 3-2 als Punkte markiert) für die Korrektur angesetzt, kann (über die zwei in der Abbildung eingetragenen Punkte) eine Funktion zur Korrektur berechnet werden. Als Parameter a wird dabei die per Tauchwägung ermittelte Raumdichte eingesetzt. Letztendlich wird nur der Parameter b neu berechnet, mit einem Bestimmtheitsmaß von immer 100 %. (Es handelt sich somit nicht nur um eine Parallelverschiebung der Verdichtungsfunktion!)

Diese Korrektur muss für jede Verdichtungstemperatur durchgeführt werden. Somit sind für jede angewandte Verdichtungstemperatur 4 Marshall-Probekörper zu verdichten: 2 x 100 Schläge und 2 x bis zur Endraumdicke (hier 400 Schläge).

Anmerkung: Alternativ könnte diese Raumdichtefunktion auch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 10 A (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010a) ermittelt werden. Dazu müssten jedoch 6 Stufen à 3 Probekörper hergestellt werden, in Summe also 18 Probekörper.

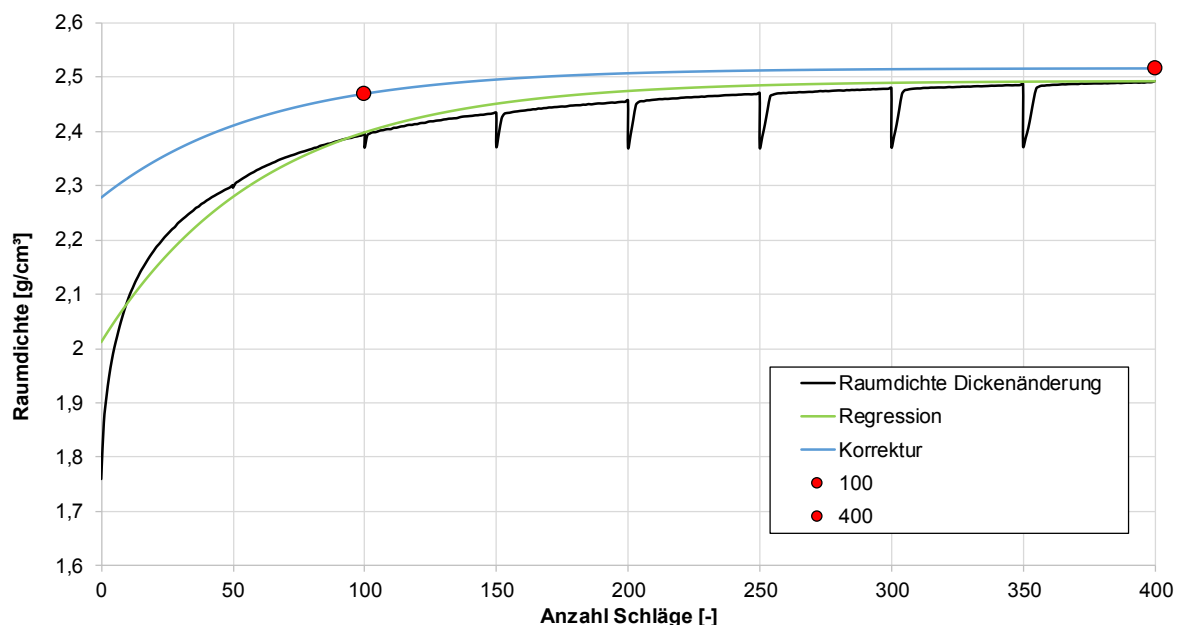


Bild 3-2: Über die Anzahl an Schlägen berechnete Raumdichte (Messwerte) und über die Tauchwägung korrigierte Raumdichte (Korrektur) der Referenz bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C

Anhand der korrigierten Funktion können die Raumdichten bei einer unterschiedlichen Anzahl von Schlägen abgelesen werden. Für jede überprüfte Verdichtungstemperatur werden diese Raumdichten in einem Diagramm aufgetragen und jeweils die gleiche Anzahl von Schlägen miteinander verbunden, siehe Bild 3-3.

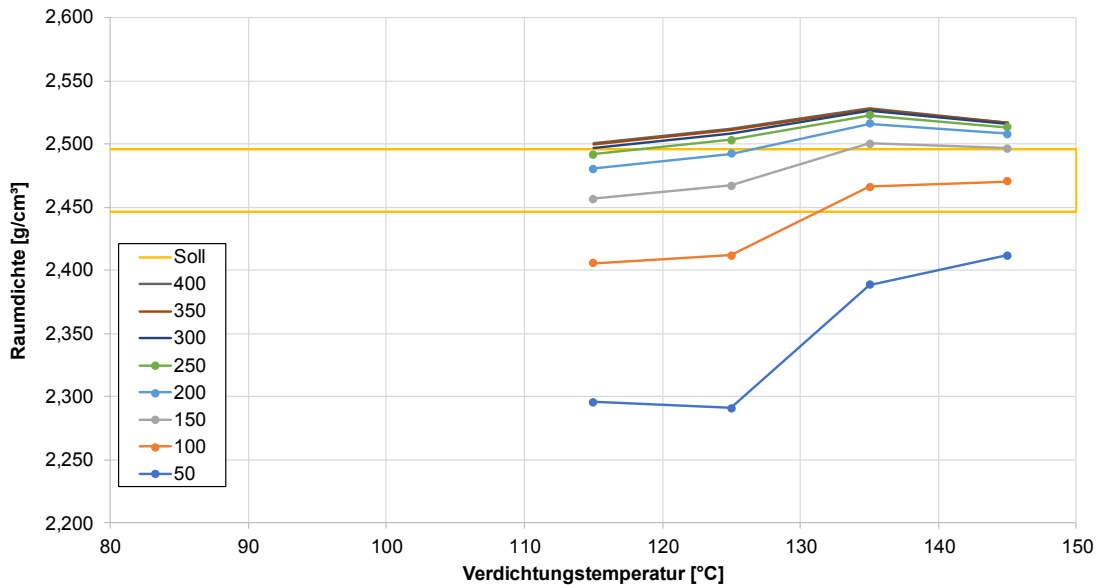


Bild 3-3: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Referenz

In Bild 3-3 ist zu erkennen, dass mit 100 Schlägen sowohl bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C, als auch bei 135 °C die gewünschte Ziel-Raumdicke bzw. der Toleranz-Bereich erreicht werden kann. Unterhalb von ca. 130 °C wird der Toleranz-Bereich verlassen. Wird die Kurve bei 400 Schlägen verlängert, kann erkannt werden, dass unterhalb von ca. 80 °C der Toleranz-Bereich der gewünschten Raumdicke nicht mehr erreicht wird.

3.3.2 Variante 2, oberflächenaktiver Zusatz

Bei Variante 2 wurde dem Bitumen der Zusatz vor dem Mischprozess gemäß Herstellerangaben zugegeben. Es wurden 0,4 M.-% bezogen auf das Gewicht des Bitumens bei einer Temperatur von 190 °C für 5 Minuten mittels eines Hoch-Schermischers eingerührt. Anschließend wurde das Mischgut bei einer Temperatur von 140 °C im Labormischer für 3 Minuten gemischt und die dabei geleistete Arbeit aufgezeichnet (siehe Kapitel 3.2).

Das so hergestellte Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt und anschließend zu einem Teil auf die jeweilige Verdichtungstemperatur (135, 115 oder 95 °C) abgekühlt (Variante 2-1) bzw. zum anderen Teil auf Raumtemperatur abgekühlt und am nächsten Tag auf die Verdichtungstemperatur (135, 115 oder 95°C) erwärmt (Variante 2). So können Rückschlüsse auf einen möglichen Einfluss der Wiedererwärmung, z. B. im Rahmen einer Kontrollprüfung, auf die Raumdicke bzw. die Verdichtungsfähigkeit geschlossen werden.

Wie zuvor wurden die Proben alle 50 Schläge umgedreht, während die Probekörperdicke aufgezeichnet wurde. Es wurden Marshall-Probekörper mit 100 Schlägen (s. Tab. 3-5) und 400 Schlägen (s. Tab. 3-6) hergestellt.

Probekörperdicke und Raumdichte des jeweiligen Probekörpers wurden im Anschluss ermittelt und mit den Aufzeichnungen abgeglichen.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	Variante 2 (mit Wiedererwärmung des Mischguts)			Variante 2-1 (ohne Wiedererwärmung des Mischguts)		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>
135	2,462	2,432	0,030	2,470	2,435	0,035
115	2,437	2,409	0,028	2,434	2,390	0,044
95	2,400	2,369	0,031	2,419	2,335	0,084

Tab. 3-5: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2 und V2-1) nach 100 Schlägen

Nach 400 Schlägen weichen die messtechnisch ermittelten Raumdichten kaum noch von den volumetrisch berechneten Werten ab, siehe Tab. 3-6. Damit kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass kaum noch von außen zugängliche Hohlräume vorhanden sind, welche bei Tauchwägung einbezogen werden würde.

Ein Einfluss der Wiedererwärmung des Mischguts auf die Verdichtungsfähigkeit ist nicht erkennbar. Die Raumdichten der Varianten 2 und 2-1 sind für die jeweilige Verdichtungs-temperatur nahezu identisch und liegen innerhalb der Verfahrenspräzision (s. Tab. 3-5 und Tab. 3-6).

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	Variante 2 (mit Wiedererwärmung des Mischguts)			Variante 2-1 (ohne Wiedererwärmung des Mischguts)		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>
135	2,524	2,510	0,014	2,540	2,518	0,022
115	2,497	2,498	-0,001	2,512	2,484	0,028
95	2,481	2,477	0,004	2,494	2,470	0,024

Tab. 3-6: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2) nach 400 Schlägen

Analog zur Referenzvariante wird nach der Bestimmung der Raumdichte der Verlauf der Raumdichteänderung für jede Temperatur über die Anzahl an Schlägen berechnet und grafisch dargestellt, siehe Bild 3-4. In der Abbildung ist der Verlauf der Raumdichteänderung für die Variante 2-1 dargestellt, für die Variante 2 ist nur der Verlauf

der Raumdichte bei 100 Schlägen dargestellt (schwarze, gestrichelte Linie mit Bezeichnung 100 (V2)). Auf die Darstellung der weiteren Verläufe der Raumdichteänderung für eine andere Anzahl an Schlägen wird bei der Variante 2 aufgrund der nahezu gleichen Werte im Vergleich zur Variante 2-1 verzichtet.

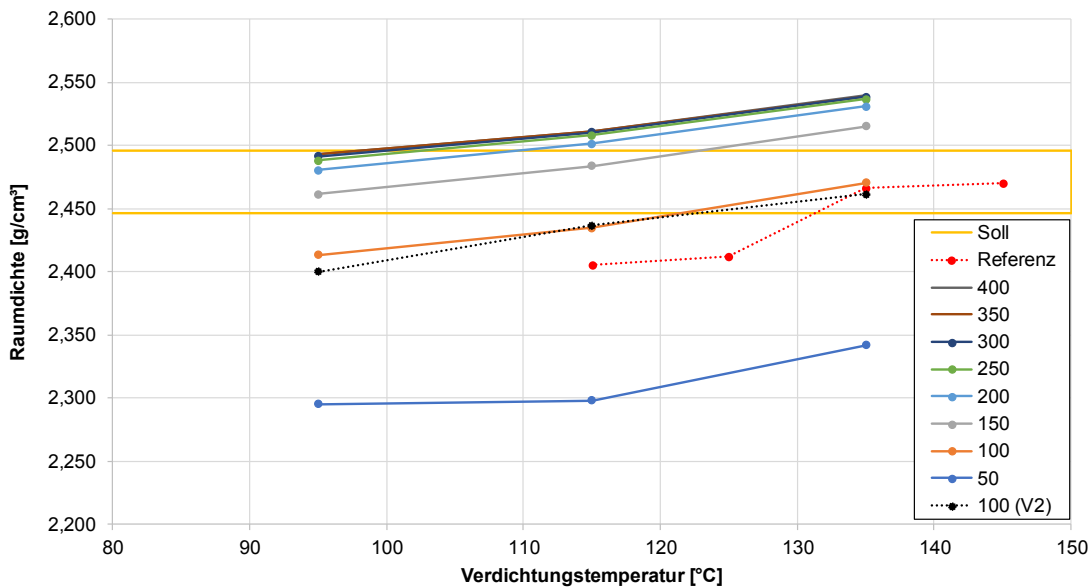


Bild 3-4: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2 mit 100 Schlägen und Wiedererwärmung und V2-1 ohne Wiedererwärmung)

Bei der Variante 2-1 kann mit 100 Schlägen bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C die Ziel-Raumdicke erreicht werden. Bei 150 Schlägen ist der Bereich der Ziel-Raumdicke bereits überschritten.

Bei 115 °C kann der gewünschte Raumdichtebereich nur mit ca. 150 Schlägen erreicht werden.

Bei 95 °C kann der Toleranz-Bereich der Ziel-Raumdicke ebenfalls mittels 150 Schlägen erreicht werden, liegt jedoch fast an der unteren Grenze. Die Ziel-Raumdicke kann hier unter Anwendung der Verdichtungsfunktion mit 169 Schlägen erreicht werden.

In Bild 3-5 ist eine Funktion für 100 Schläge entsprechend 100 % Verdichtungsarbeit eingezeichnet. Hier wird deutlich, dass 100 Schläge bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C benötigt werden, um die gewünschte Raumdichte zu erzielen. Der Raumdichtebereich kann bei dieser Verdichtungsarbeit noch bis ca. 122 °C erreicht werden.

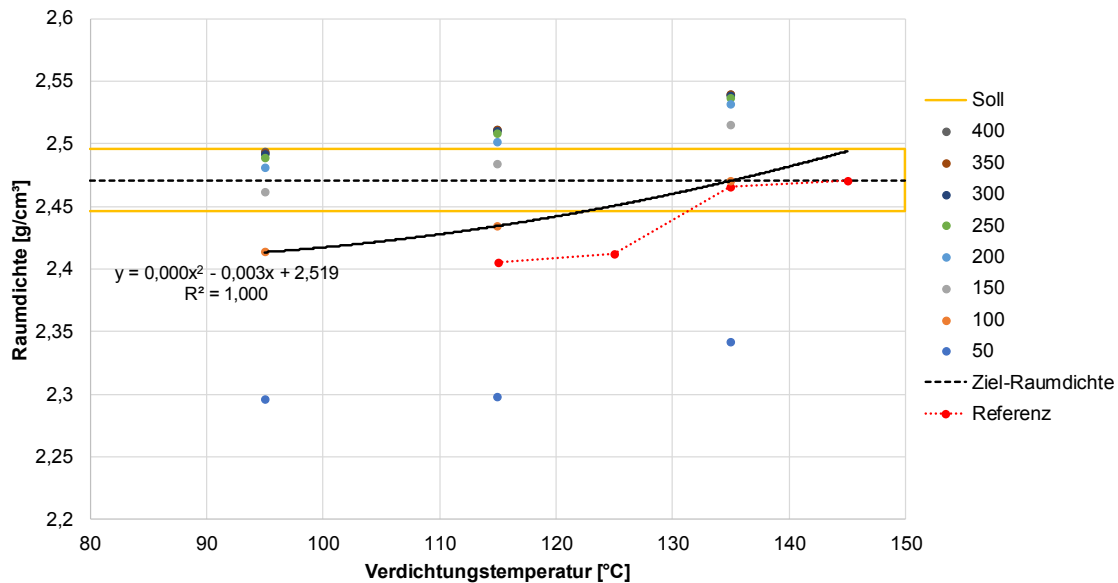


Bild 3-5: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge (V2-1, ohne Wiedererwärmung des Mischguts)

Bei 95 °C sind bereits 169 Schläge (entspricht 169 % Verdichtungsarbeit) notwendig, um die gewünschte Raumdichte zu erreichen. Das wird in der praktischen Umsetzung mittels Walze als nicht prozesssicher angesehen und wird hier als unterste Grenze festgehalten, ab der eine ausreichende Verdichtung noch möglich ist.

Die hier dargestellte Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) wird durch ein Polynom 2. Grades angenähert. Mit dieser Funktion können die Abhängigkeiten gut beschrieben werden. Das Bestimmtheitsmaß sollte immer nahe 100 % liegen, da nur 3 Stützpunkte vorhanden sind.

Zur Überprüfung der TAVF wurden weitere 5 Marshall-Probekörper mit 100 Schlägen bei einer gewählten Verdichtungstemperatur von 135 °C hergestellt. Zudem wurden weitere 2 Marshall-Probekörper mit 126 Schlägen (2 x 63 Schläge) bei einer gewählten Verdichtungstemperatur von 125 °C sowie 2 Marshall-Probekörper mit 140 Schlägen (2 x 70 Schläge) bei einer Verdichtungstemperatur von 115 °C hergestellt.

Bild 3-6 zeigt den Mittelwert aus fünf Marshall-Probekörpern (gelbe, eckige Markierung im Diagramm) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C. Es ist erkennbar, dass die mit Hilfe der angegebenen Funktion berechnete Raumdichte mit guter Wiederholbarkeit zielgenau erreicht wird.

Zudem ist der Mittelwert aus den zwei Marshall-Probekörpern bei 126 Schlägen bei einer Verdichtungstemperatur von 125 °C (blaue, eckige Markierung) sowie der Mittelwert aus den zwei Marshall-Probekörpern bei 140 Schlägen bei einer Verdichtungstemperatur von 115 °C (lila, eckige Markierung) dargestellt. Der Mittelwert der Raumdichte für 126 Schläge bei 125 °C liegt zwischen den Kurvenverläufen für 100 und 150 Schläge bei 125 °C. Dies ist plausibel und entspricht den Erwartungen. Die Raumdichte für 140 Schläge bei 115 °C liegt sehr nahe der Kurve für 150 Schläge bei gleicher Verdichtungstemperatur. Dies ist ebenfalls plausibel, womit die ermittelte Verdichtungs-funktion bestätigt ist.

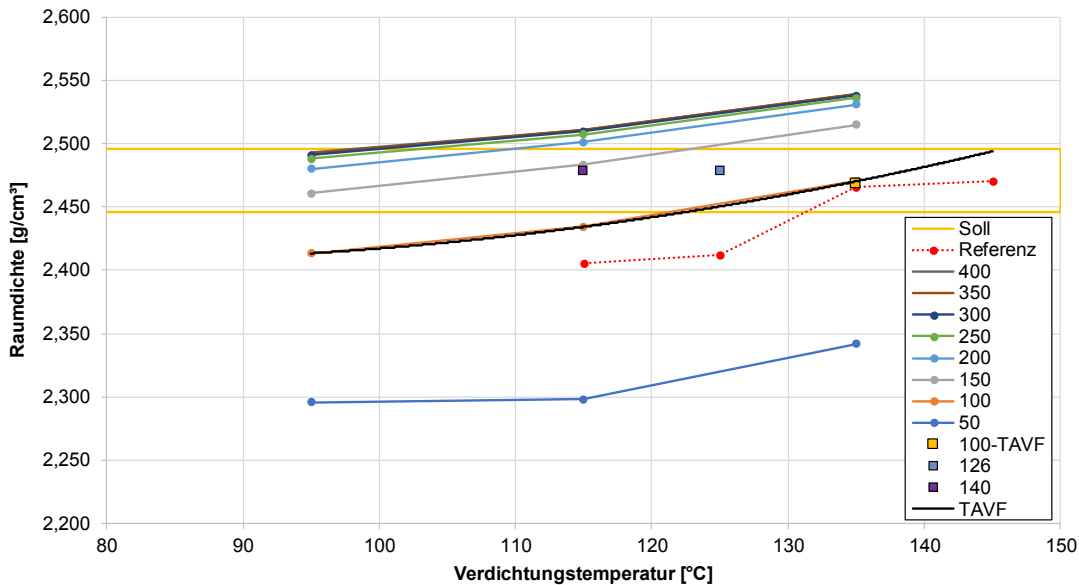


Bild 3-6: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion bei 135 °C mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2-1)

3.3.3 Variante 3, reaktivmodifizierender Zusatz

Bei Variante 3 wurde anstatt eines polymermodifizierten Bitumens 25/55-55 A ein Straßenbaubitumen 50/70 verwendet. Nach Herstellerangaben erfolgt durch die Anwendung des Zusatzes eine (Polymer-)Modifizierung des Straßenbaubitumens, so dass ein Polymermodifiziertes Bitumen nicht benötigt wird (s. Kapitel 2.2.2).

Dem Bitumen 50/70 wurde der reaktivmodifizierende Zusatz vor dem Mischprozess gemäß Herstellerangaben zugegeben. Es wurden 2,5 M.-% bezogen auf das Gewicht des Bitumens bei 160 °C für 3 Minuten mittels eines Hoch-Schermischers eingerührt.

Anschließend wurde das Mischgut bei 160 °C im Labormischer für 3 Minuten gemischt und die dabei geleistete Arbeit aufgezeichnet (siehe Kapitel 3.2).

Das so hergestellte Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die erforderliche Verdichtungstemperatur (145, 135, 115 oder 95 °C) ab und wurde dann verdichtet. Die zusätzliche Verdichtungstemperatur von 145 °C wurde gewählt, um die nach dem Technischen Regelwerk (TP Asphalt-StB Teil 30) für ein Mischgut mit Polymermodifiziertem Bitumen geforderte Verdichtungstemperatur abzudecken.

Das weitere Vorgehen entsprach dem zuvor beschriebenen Verfahren, inkl. der Korrektur der Raumdichten. Somit wurden für jede angewandte Verdichtungstemperatur 4 Marshall-Probekörper verdichtet: 2 x 100 Schläge und 2 x bis zur Endraumdichte (400 Schläge).

In Tab. 3-7 sind die Raumdichten bei den Verdichtungstemperaturen 145, 135, 115 und 95 °C nach 100 und 400 Schlägen dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Schläge			400 Schläge		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
145	2,456	2,408	0,048	2,516	2,499	0,017
135	2,448	2,399	0,049	2,540	2,509	0,031
115	2,417	2,366	0,051	2,510	2,485	0,025
95	2,381	2,327	0,054	2,472	2,452	0,020

Tab. 3-7: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit dem reaktivmodifizierenden Zusatz (V3) nach 100 Schlägen und 400 Schlägen

Die Veränderungen der Raumdichte sind plausibel bezüglich der Abhängigkeit der Verdichtungstemperatur. Im Gegensatz zum Zusatz der Variante 2 bleibt jedoch der Unterschied in den ermittelten Raumdichten mittels Tauchwägung und Dickenänderung auch nach 400 Schlägen bestehen.

In Bild 3-7 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl an Schlägen bei den vier gewählten Verdichtungstemperaturen dargestellt.

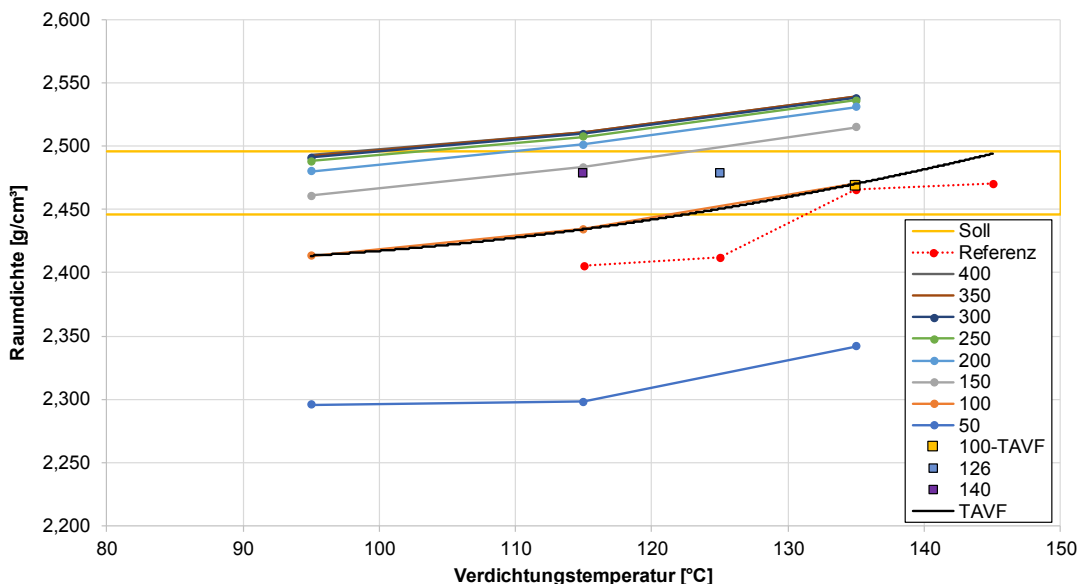


Bild 3-7: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (V3)

Bei 100 Schlägen und einer Verdichtungstemperatur von 145 °C kann die Ziel-Raumdichte nicht erreicht werden. Unter Berücksichtigung der ermittelten Verdichtungs-funktionen für

die jeweiligen Temperaturen kann festgehalten werden, dass bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C die Ziel-Raumdicke mittels ca. 116 Schlägen erreicht werden kann.

Bei 100 Schlägen und einer Verdichtungstemperatur von 135 °C liegt die Raumdicke knapp oberhalb der unteren Toleranzgrenze.

Bei einer Verdichtungstemperatur von 115 °C werden 152 Schläge benötigt, um die Ziel-Raumdicke zu erreichen. Wird die Verdichtungstemperatur auf 95 °C abgesenkt, sind ca. 350 Schläge (entspricht 350 % Verdichtungsarbeit) für die Erreichung der Ziel-Raumdicke notwendig.

In Bild 3-8 ist eine Funktion für 100 Schläge (entspricht 100 % Verdichtungsarbeit) eingezeichnet. Hier wird deutlich, dass eine höhere Verdichtungstemperatur und bzw. oder mehr Verdichtungsarbeit (> 100 %) notwendig ist, um die Ziel-Raumdicke zu erreichen. Der gewünschte Raumdichtebereich kann bei einer Verdichtungsarbeit von 100 % noch bis ca. 135 °C erreicht werden.

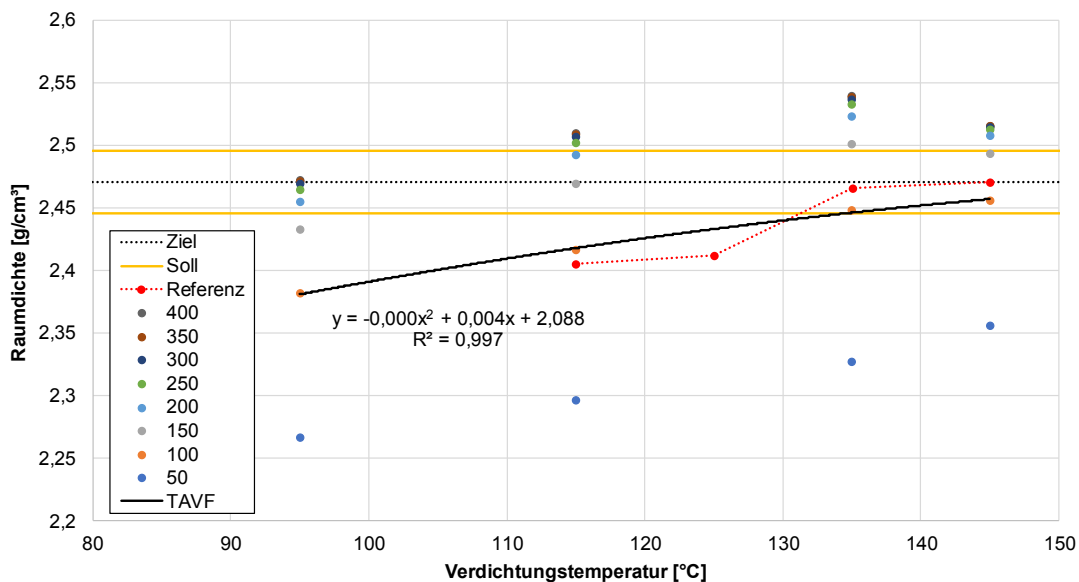


Bild 3-8: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (V3)

Zur Überprüfung der TAVF wurden 5 Marshall-Probekörper (100 Schläge) bei einer gewählten Verdichtungstemperatur von 135 °C und weitere 5 Marshall-Probekörper bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C hergestellt. Bild 3-9 zeigt den Mittelwert aus den jeweiligen fünf Marshall-Probekörpern (schwarzer und gelber Punkt im Diagramm) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C bzw. 145 °C.

Es ist erkennbar, dass die mit Hilfe der Funktion berechnete Raumdicke nicht ganz erreicht werden kann. Die Raumdicke aus den fünf Probekörpern bei 135 °C liegt unterhalb der mittels Funktion ermittelten Raumdicke und knapp außerhalb des Toleranzbereichs der Ziel-Raumdicke. Bei 145 °C liegt die Raumdicke aus den fünf Probekörpern ebenfalls knapp unterhalb der mittels Funktion ermittelten Raumdicke, jedoch genau auf der unteren Linie des Toleranzbereichs.

Aufgrund der unvermeidbaren Streuungen in Herstellung und Messverfahren sind die so erzielten Raumdichten als plausibel und mit den zuvor ermittelten Raumdichten als praktisch gleich anzusehen.

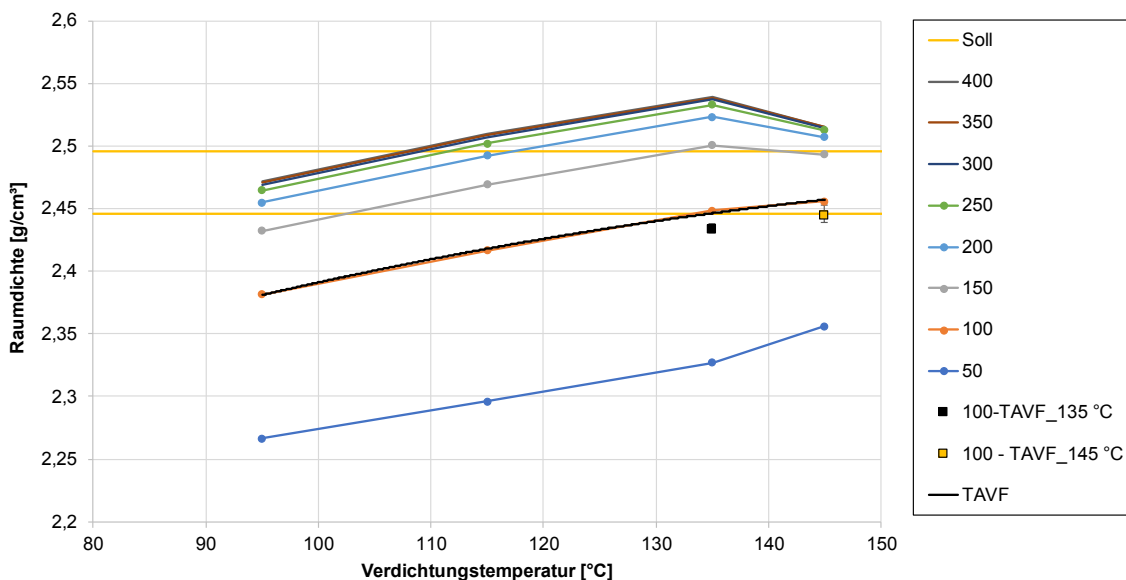


Bild 3-9: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion bei 115 °C mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (V3)

3.3.4 Variante 4, Zeolith

Bei Variante 4 wurde dem Gestein vor dem Mischprozess Zeolith gemäß Herstellerangaben zugegeben. Es wurden 0,3 M.-% an Zeolith bezogen auf die gesamte Masse des Mischguts zugegeben und dem Füller angerechnet.

Anschließend wurde das Mischgut bei 160 °C im Labormischer für 3 Minuten gemischt und die dabei geleistete Arbeit aufgezeichnet (siehe Kapitel 3.2).

Das so hergestellte Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die Verdichtungstemperaturen ab (135, 115 oder 95 °C) und wurde dann verdichtet.

Das weitere Vorgehen entspricht wieder den zuvor dargestellten Varianten, inkl. der Korrektur der Raumdichten. Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Dickenänderung und die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C sind in Tab. 3-8 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Schläge			400 Schläge		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
135	2,481	2,512	0,034	2,540	2,512	0,028
115	2,444	2,510	0,014	2,525	2,510	0,015
95	2,422	2,487	0,038	2,486	2,487	-0,001

Tab. 3-8: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit Zeolith (V4) nach 100 und 400 Schlägen

In Bild 3-10 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl an Schlägen bei den drei gewählten Verdichtungs Temperaturen dargestellt.

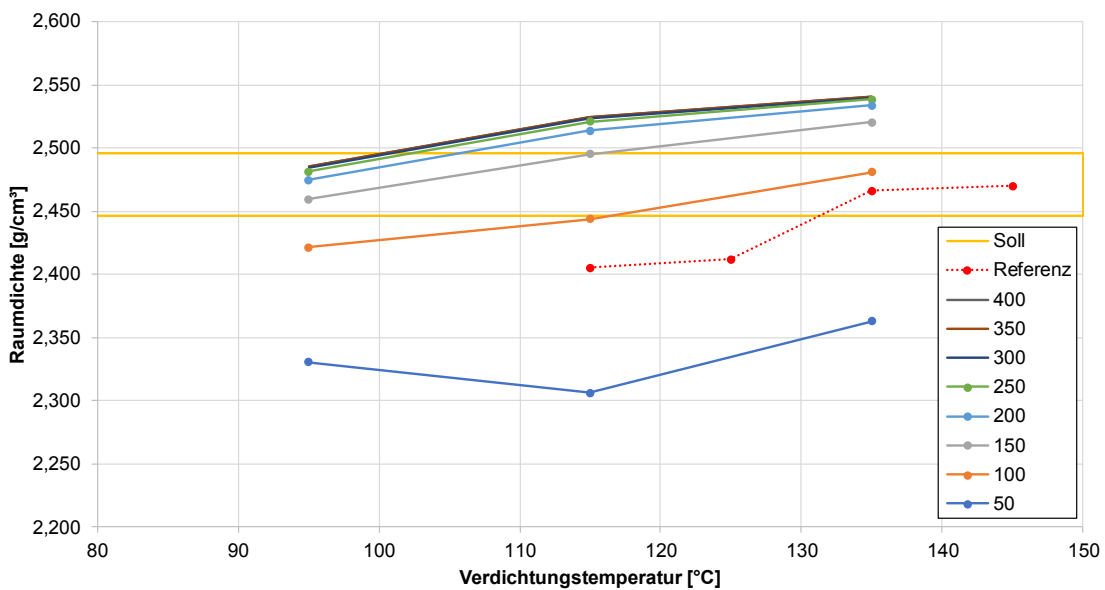


Bild 3-10: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungs Temperaturen mit dem Zeolith (V4)

Bild 3-11 zeigt, dass die Regression bei 100 Schlägen mit einem Polynom 2. Grades beschrieben werden kann.

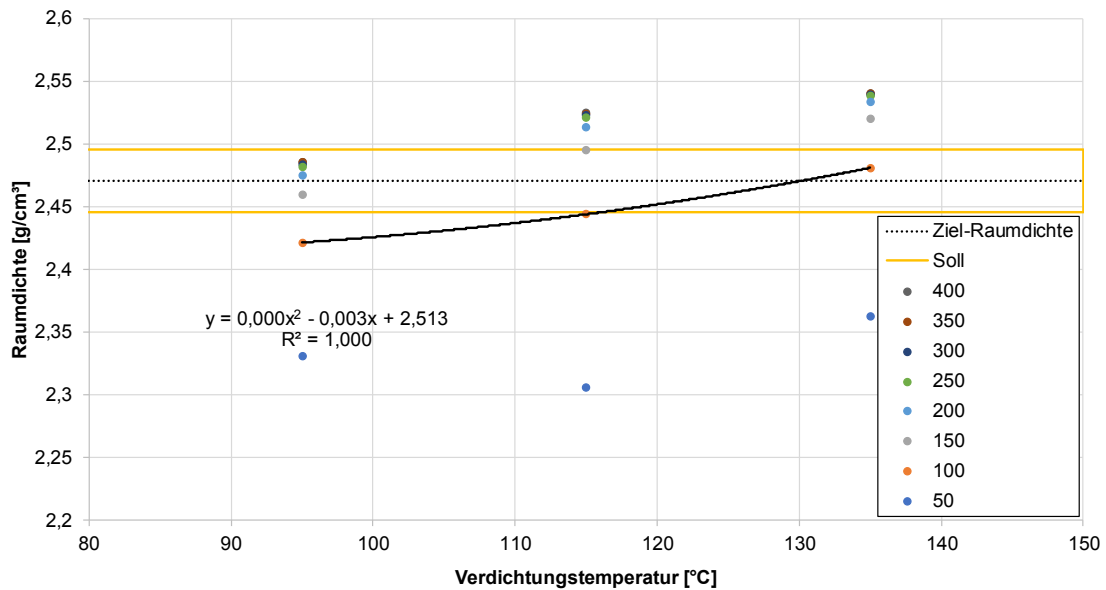


Bild 3-11: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (V4), Kurve für 100 Verdichtungsschläge mit Zeolith (V4)

Bei Verwendung von Zeolith zeigt sich, dass die Verdichtungstemperatur von 135 °C etwas zu hoch gewählt ist. Hier würden bereits 92 Schläge (entspricht 92 % Verdichtungsarbeit) ausreichen, um die Ziel-Raumdicke zu erreichen.

Bei 115 °C wird die Ziel-Raumdicke mit 100 Schlägen nicht erreicht. Es werden ca. 120 Schläge benötigt.

Als Verdichtungstemperatur für 100 Schläge (entspricht 100 % Verdichtungsarbeit) kann eine Temperatur von 130 °C angegeben werden, um die Zielraumdicke zu erreichen. Jedoch kann auch noch bei 115 °C mit 100 Schlägen der gewünschte Raumdichtebereich erreicht werden. Unterhalb von ca. 82 °C kann der Raumdichtebereich praktisch nicht mehr erreicht werden.

Zur Überprüfung der TAVF wurden weitere 5 Marshall-Probekörper (100 Schläge) bei einer gewählten Verdichtungstemperatur von 130 °C hergestellt. Zudem wurden weitere Marshall-Probekörper bei verschiedenen Verdichtungstemperaturen mit unterschiedlicher Anzahl an Schlägen hergestellt. Eine Übersicht der Varianten zur Überprüfung der TAVF liefert die Tab. 3-9.

Temperatur [°C]	Anzahl der Schläge [-]	Raumdichte [g/cm ³] (Tauchwägung)
130	100	2,446
120	100	2,450
120	126	2,451
115	126	2,441
105	150	2,454

Tab. 3-9: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit Zeolith (V4) bei verschiedenen Temperaturen mit unterschiedlicher Anzahl von Schlägen

Im folgenden Bild 3-12 sind die ermittelten Raumdichten der Marshall-Probekörper zur Überprüfung der TAVF dargestellt. Die ermittelten Raumdichten stimmen teilweise nicht mit der TAVF überein. Die Raumdichte bei 130 °C und 100 Schlägen liegt nicht wie zu erwarten auf der Kurve der Funktion, sondern deutlich unterhalb, auf der Grenze des Toleranzbereichs. Bei einer Temperatur von 120 °C und 100 Schlägen liegt die Raumdichte jedoch auf der Kurve der Funktion. Eine Erhöhung der Anzahl der Schläge auf 126 führt nicht zu einem Raumdichteanstieg. Alle weiteren Raumdichten liegen unterhalb der erwarteten Raumdichte.

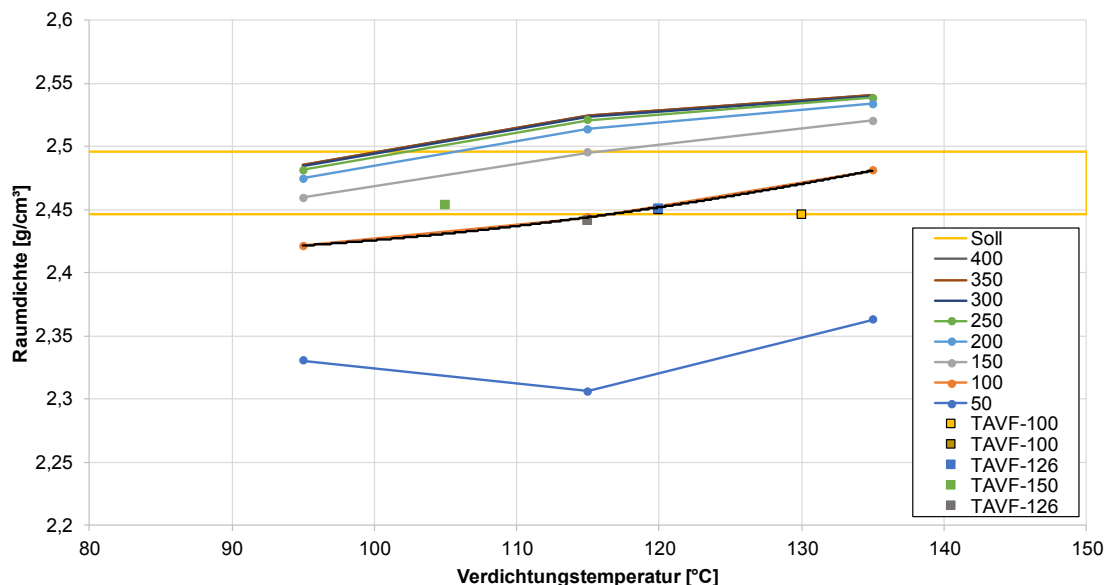


Bild 3-12: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion der Variante V4 (Zeolith)

Die so erzielten Werte liegen zwar innerhalb des zu treffenden Raumdichtebereichs, sollten jedoch näher an der Ziel-Raumdichte liegen. Eine mögliche Erklärung wäre der bei der Analyse der Zusammensetzung gefundene gering erhöhte Feinkornanteil. Das Verdichtungsverfahren, in Kombination mit Zeolith (welcher auf Füllerebene wirkt), kann auf diese Änderung empfindlich reagieren und die Verdichtung erschweren.

3.3.5 Variante 5, Schaumbitumen

Die Herstellung des Mischguts mit Schaumbitumen wurde im Labor der Universität Kassel vorgenommen. Der Mischprozess erfolgte bei einer Temperatur von 140 °C unter Anwendung von Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 A. Der Herstellungsprozess ist in Kapitel 1.3.5 beschrieben.

Das so hergestellte Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die Verdichtungstemperaturen ab (135, 115 oder 95 °C) und wurde dann verdichtet.

Das weitere Vorgehen entsprach den zuvor dargestellten Varianten, inkl. der Korrektur der Raumdichten. Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Dickenänderung und die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C sind in Tab. 3-10 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Schläge			400 Schläge		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>
135	2,477	2,384	0,093	2,516	2,502	0,014
115	2,470	2,333	0,137	2,518	2,494	0,024
95	2,374	2,297	0,077	2,475	2,468	0,007

Tab. 3-10: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit Schaumbitumen (V5) nach 100 und 400 Schlägen

In Bild 3-13 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl an Schlägen bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen dargestellt.

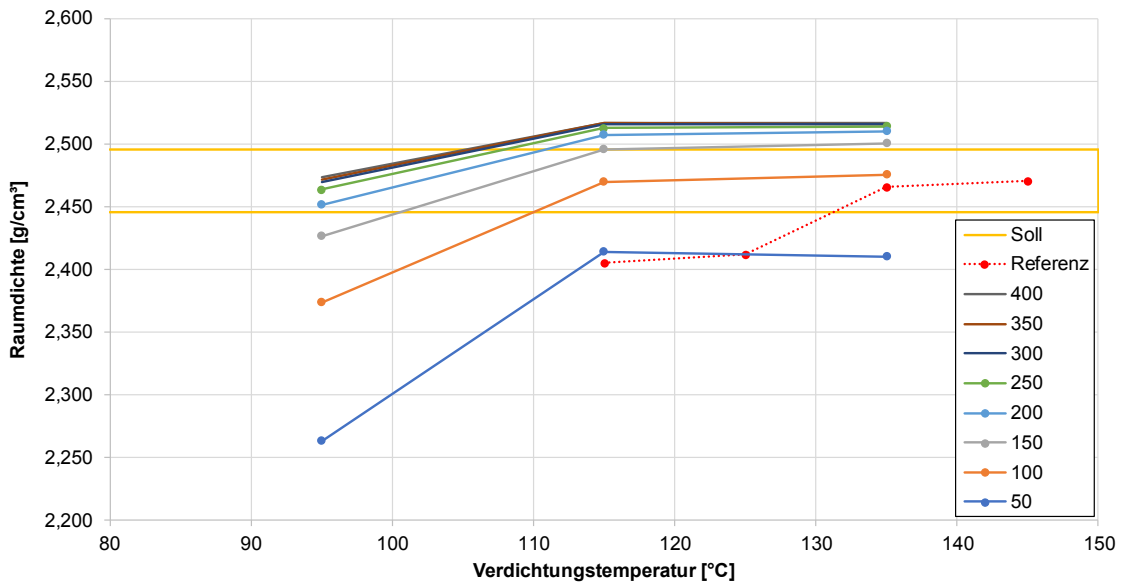


Bild 3-13: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit Schaumbitumen (V5)

Bild 3-13 zeigt, dass sowohl bei 135 °C, als auch bei 115 °C die gewünschte Ziel-Raum-dichte erreicht werden kann. Bei der geringeren Verdichtungstemperatur von 95 °C fällt das erzielte Raumdichteniveau stark ab.

Die bei 135 °C und 115 °C nahezu identischen Raumdichten und der deutliche Abfall bei 95 °C zeigen, dass die in Bild 3-14 dargestellte Regression mittels eines Polynoms 2. Grades insbesondere bei höheren Temperaturen nicht geeignet ist, die Temperaturabhängigkeit des Verdichtungsprozesses plausibel zu beschreiben.

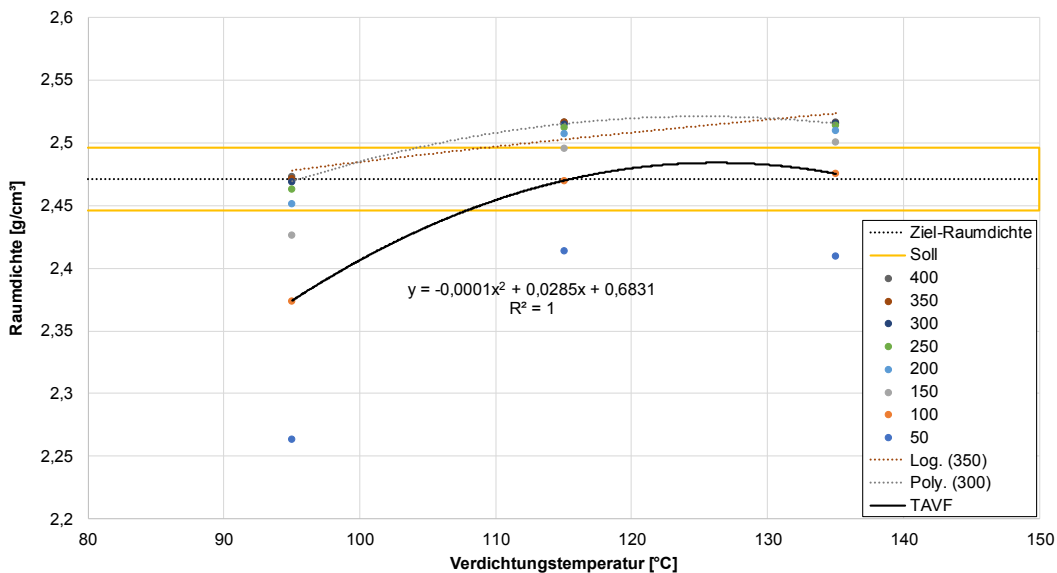


Bild 3-14: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Gerade für 100 Verdichtungsschläge (Variante V5 Schaumbitumen)

Bei Anwendung von Schaumbitumen zeigt sich, dass eine Verdichtungstemperatur von 135 °C etwas zu hoch gewählt ist. Hier würden 94 Schläge (entspricht 94 % Verdichtungsarbeit) benötigt werden, um die Ziel-Raumdichte zu erreichen.

Als Verdichtungstemperatur für 100 Schläge (entspricht 100 % Verdichtungsarbeit) kann eine Temperatur von 115 °C angegeben werden. Jedoch kann auch noch bei ca. 107 °C mit 100 Schlägen der gewünschte Raumdichtebereich erreicht werden bei Zugrundlegung des dargestellten Polynoms 2. Grades.

3.3.6 Variante 6, viskositätsverändernder Zusatz

Als zusätzliche Variante 6 wurde im Asphaltmischgut ein Bitumen verwendet, welches mit einem viskositätsverändernden Zusatz (VVZ) bzw. Wachs als gebrauchsfertiges Polymer-modifiziertes Bindemittel hergestellt wurde. Nach TL VBit-StB wird dieses als PmB 25/45 VL deklariert.

Das Mischgut wurde bei einer Temperatur von 160 °C im Labormischer für 3 Minuten gemischt, anschließend wurde es in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die erforderliche Verdichtungstemperatur (135, 115 oder 95 °C) ab und wurde dann verdichtet.

Das weitere Vorgehen entspricht wieder den zuvor dargestellten Varianten, inkl. der Korrektur der Raumdichten. Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Dickenänderung und die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C sind in Tab. 3-11 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Schläge			400 Schläge		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>
135	2,481	2,436	0,045	2,532	2,515	0,017
115	2,456	2,409	0,047	2,530	2,503	0,027
95	2,422	2,384	0,038	2,509	2,488	0,021

Tab. 3-11: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper der Variante 6 nach 100 und 400 Schlägen

In Bild 3-15 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl an Schlägen bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen dargestellt. Es zeigt sich eine annähernd lineare Abhängigkeit der erreichten Raumdichten von der Verdichtungstemperatur. Entsprechend ist eine lineare Funktion für 100 Schläge (entspricht 100 % Verdichtungsarbeit) eingezeichnet. Hier wird deutlich, dass die Ziel-Raumdichte bei einer Verdichtungstemperatur von 128 °C erreicht werden kann. Der gewünschte Dichtebereich kann bei einer Verdichtungsarbeit von 100 % noch bis ca. 112 °C erreicht werden.

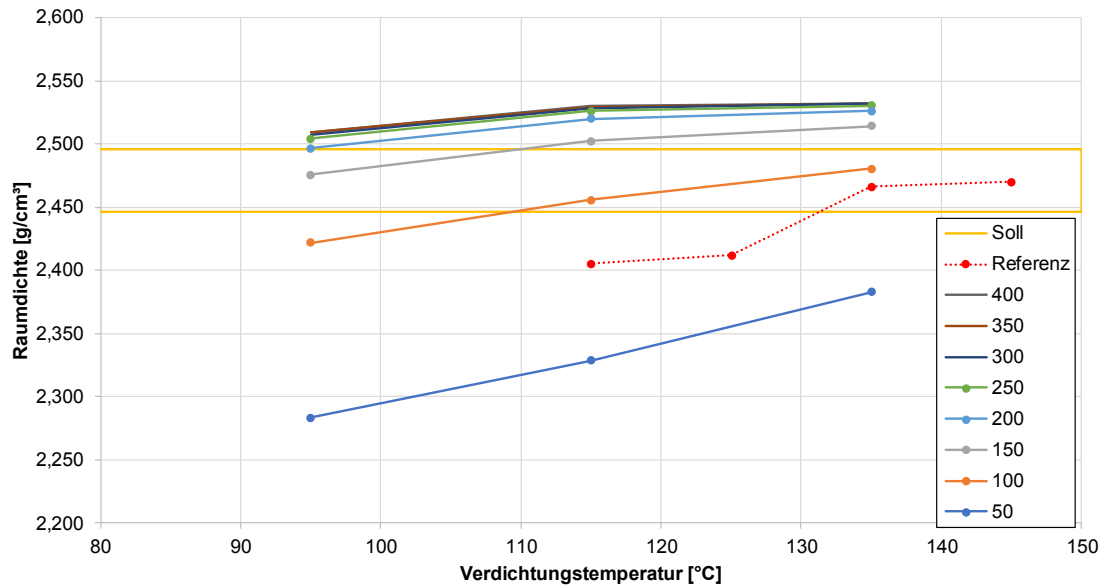


Bild 3-15: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V6 viskositätsverändernder Zusatz), Gerade für 100 Verdichtungsschläge

Zur Überprüfung der ermittelten TAVF der Variante 6 mit gebrauchsfertigem, viskositätsverändertem Bitumen werden weitere 5 Marshall-Probekörper bei einer Verdichtungstemperatur von 130 °C und weitere 5 Marshall-Probekörper bei einer Verdichtungstemperatur von 110 °C hergestellt.

Bild 3-16 zeigt die Mittelwerte aus den jeweiligen fünf Marshall-Probekörpern (TAVF im Diagramm) bei einer Verdichtungstemperatur von 130 °C bzw. 110 °C. Die mit Hilfe der Funktion hergestellten Probekörper können die gewünschten Raumdichten reproduzierbar erreichen.

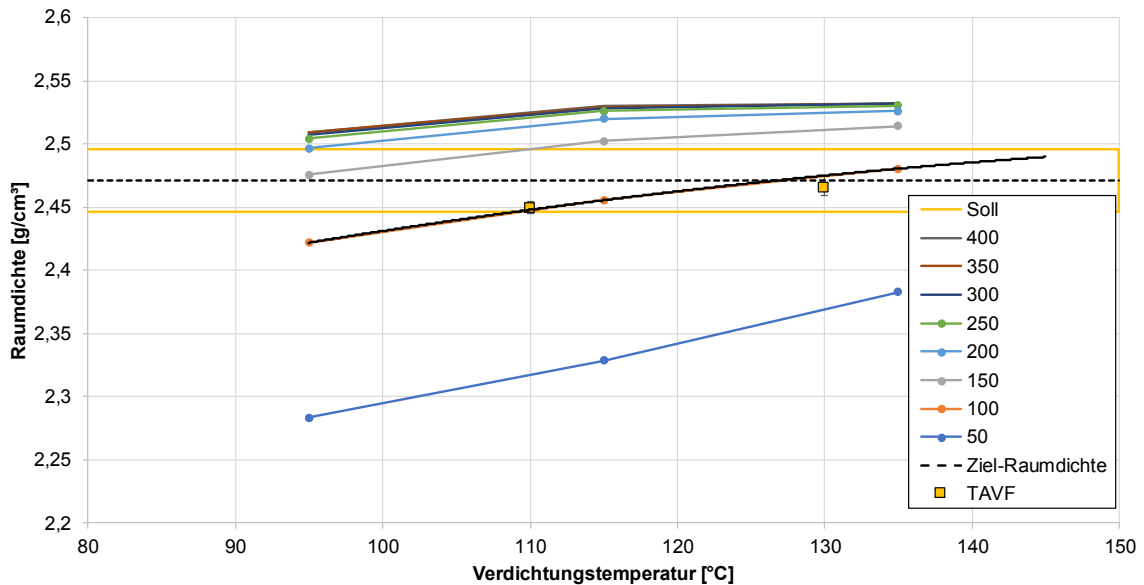


Bild 3-16: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V6 viskositätsverändernder Zusatz), Gerade für 100 Verdichtungsschläge

3.3.7 Zusammenfassung Marshall-Verdichtung

Die Ergebnisse der Verdichtung mit dem Marshall-Verdichtungsgerät zeigen, dass für alle untersuchten Varianten die Ermittlung einer Verdichtungsfunktion möglich ist. Für die unterschiedlichen Zusätze und Verfahren konnte nachgewiesen werden, dass eine systematische und plausible Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit und der Verdichtungstemperatur besteht.

Dabei ist darauf zu achten, dass die über die Dickenänderung ermittelten Raumdichten von den per Tauchwägung ermittelten Raumdichten abweichen. Um diese physikalisch nicht zu vermeidende Abweichung zu korrigieren sind zusätzliche Probekörper mit 100 Schlägen (Standard) notwendig. Die mit dem Marshall-Verdichtungsgerät ermittelten Raumdichteverläufe jedes Probekörpers können per Verdichtungsfunktion in Annäherung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010b) beschrieben und über die per Tauchwägung bestimmten Raumdichten mittels des Parameters T korrigiert werden.

Resultierend kann die Veränderung der Raumdichte über die Temperatur mittels einer Funktion beschrieben werden, wobei sich die Anwendung eines Polynoms zweiten Grades als vorteilhaft erwiesen hat.

Damit kann ein Temperaturbereich ermittelt werden, in welchem eine Verdichtung mit üblichen 100 Schlägen möglich ist bzw. wird ersichtlich, welche Verdichtungsleistung bei einer bestimmten Temperatur benötigt wird.

Weiterhin kann abgeschätzt werden, ab welcher unteren Temperatur der Raumdichtebereich durch Verdichtung mit dem Marshall-Verdichtungsgerät praktisch nicht mehr zu erreichen ist.

Eine Kornzertrümmerung wurde trotz der hohen Anzahl von Verdichtungsschlägen in keinem Fall festgestellt.

Das hier untersuchte Verfahren regiert, je nach Zusatz, teilweise empfindlich auf geringe Veränderungen in der Zusammensetzung. Bei der Überprüfung der TAVF ist daher auf eine präzise Zusammensetzung bezüglich Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung zu achten.

3.4 Verdichtungsfunktion für die Walzsektor-Verdichtung

Die Ermittlung einer Verdichtungsfunktion für die Walzsektor-Verdichtung soll prinzipiell analog zur Marshall-Verdichtung erfolgen. Jedoch treten hier spezielle Verdichtungsbedingungen auf, welche besonders berücksichtigt werden müssen. Diese sind nachfolgend erläutert.

3.4.1 Referenz

Für die Referenz, wie auch für alle weiteren Mischungen wurden je Probeplatte ca. 10.200 g Mischgut eingewogen. Über die Dickenänderung der Platte (Grundfläche hier: 320 x 200 mm²) kann dann die Raumdichte berechnet werden.

Die Kraft- und Wegkurven während der vorschriftsgerechten Verdichtung gemäß den TP Asphalt-StB, Teil 33 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007) sind für die Referenz in Bild 3-17 dargestellt.

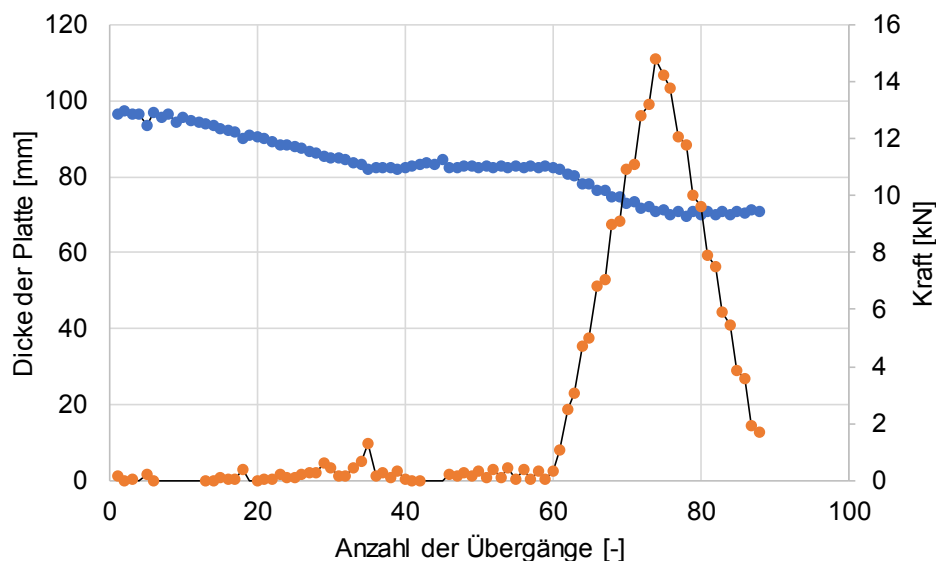


Bild 3-17: Beispiel für die aufgebrachten bzw. gemessenen Kräfte und Wege bei einer vorschriftsgerechten Verdichtung von Asphalt-Probeplatten im Walzsektor-Verdichtungsgerät.

Mit dem Referenz-Mischgut wurde eine Verdichtung bei den Temperaturen 145 °C und 135 °C nach dem Schema der Prüfvorschrift durchgeführt (Standard).

Als Ziel-Raumdichte bei 145 °C wurde hier mittels Tauchwägung die folgende Raumdichte ermittelt:

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,434 \text{ g/cm}^3$$

Als Bereich für die Ziel-Raumdichte werden wiederum $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt (siehe oben), so dass der anzustrebende Raumdichtebereich von 2,409 bis 2,459 g/cm³ reicht.

Die während der Verdichtung berechnete Raumdichte wird bei maximaler Last von 15 kN (hier abweichend von der TP Asphalt-StB Teil 33, aufgrund veränderter Grundfläche) ermittelt. Die so ermittelten Ergebnisse sind in Tab. 3-12 dargestellt. Hier ist auch die jeweils erzielte Plattendicke angegeben. Diese soll > 65 mm betragen, da aus den Platten im Weiteren Probekörper für die Druck-Schwellversuche gebohrt werden.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
145	71,3	2,245	2,434	0,189
135	70,3	2,264	2,435	0,171

Tab. 3-12: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten Platten der Referenzvariante (V1)

Die Dichte nach Tauchwägung weicht von den ermittelten Dichten der MPK ab. Dies ist in den größeren Abmessungen der Asphalt-Probekörper begründet. Die vergleichbaren, gebohrten Probekörper erreichen eine Dichte von durchschnittlich 2,460 g/cm³, was als praktisch gleich zu den Dichten der MPK angesehen wird (im Rahmen der Prüftoleranz).

Die physikalisch nicht zu vermeidenden Abweichungen aus beiden Raumdichte-Verfahren (Dickenänderung und Tauchwägung) sind bedeutend größer als bei der Marshall-Verdichtung. Dies ist der größeren Oberfläche der Platten geschuldet (mehr von außen zugängliche Hohlräume bei der Tauchwägung).

Eine weitere Verdichtung zur Bestimmung der Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit erfolgt hier nicht, da nur die Ziel-Raumdichte bestimmt werden sollte.

3.4.2 Variante 2, oberflächenaktiver Zusatz

Die Herstellung des Mischguts mit dem oberflächenaktiven Zusatz ist in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Das Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt und anschließend zu einem Teil auf die Verdichtungstemperatur (135, 115 oder 95 °C) abgekühlt (Variante 2-1) und zum anderen Teil zunächst auf Raumtemperatur abgekühlt und am nächsten Tag auf die Verdichtungstemperatur (135, 115 oder 95°C) erwärmt (Variante 2). So können Rückschlüsse auf einen möglichen Einfluss der Wiedererwärmung, z. B. im Rahmen einer Kontrollprüfung, auf die Raumdichte bzw. die Verdichtungsfähigkeit geschlossen werden.

Die zusätzliche Verdichtungsarbeit wird bei Erreichen der maximalen Kraft von 15 kN (siehe Bild 3-18) aufgebracht. Es werden ca. 200 weitere Übergänge mit dieser Kraft vorgenommen und die Dickenänderung der Platten aufgezeichnet.

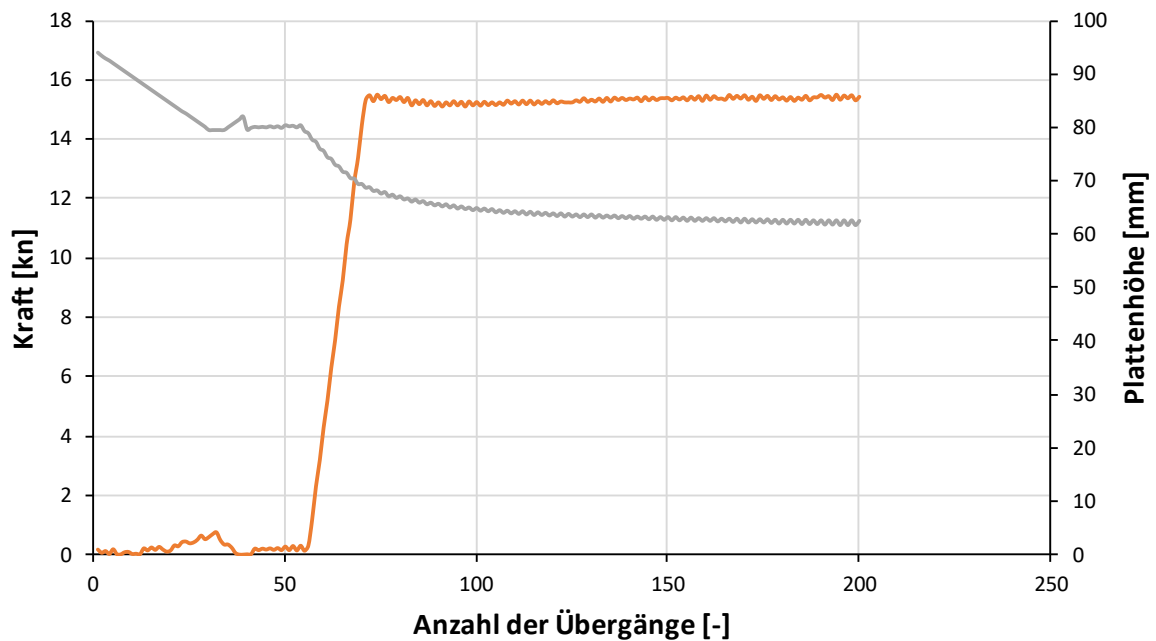


Bild 3-18: Beispiel für die aufgebrachten bzw. gemessenen Kräfte und Wege bei der angepassten Verdichtung (200 zusätzliche Übergänge bei 15 kN) von Asphalt-Probeplatten im Walzsektor-Verdichtungsgerät.

In Tab. 3-13 sind für die Standard-Verdichtung die aus den Plattendicken berechneten Raumdichten sowie die Raumdichten nach Tauchwägung dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte, Standard-Verdichtung							
	Variante 2 (mit Wiedererwärmung des Mischguts)				Variante 2-1 (ohne Wiedererwärmung des Mischguts)			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
135	69,7	2,287	2,427	0,140	71,4	2,232	2,455	0,223
115	70,2	2,270	2,408	0,138	-	-	2,437	-
95	71,6	2,226	2,373	0,147	69,8	2,283	2,428	0,145

Tab. 3-13: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walsektor-verdichteten Platten der Varianten 2 und 2-1 nach Standard-Verdichtung

Der Vergleich der Varianten mit und ohne Wiedererwärmung zeigt, dass ohne Wiedererwärmung etwas höhere End-Raumdichten erreicht werden (Differenzen: 0,028 / 0,029 / 0,055 g/cm³). Nach Wiedererwärmung ist somit noch eine Verdichtung mit dem WSV möglich, die Unterschiede sind als signifikant anzusehen.

Zur Verdeutlichung des Verdichtungsvorgangs sind in Bild 3-19 für jede Verdichtungstemperatur die aus den Plattendicken berechneten Raumdichten für jeden Übergang dargestellt; hier Variante 2 mit Wiedererwärmung.

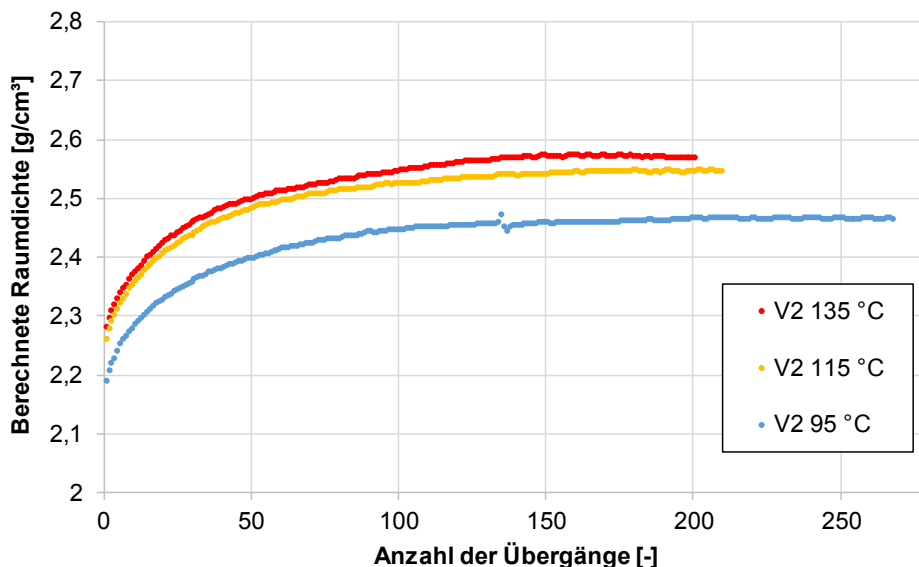


Bild 3-19: Berechnete Raumdichten über die Anzahl der Übergänge bei unterschiedlichen Temperaturen bei Einsatz des oberflächenaktiven Zusatzes (V2, mit Wiedererwärmung)

Zum Vergleich werden hier und im Folgenden die berechneten Raumdichten bei 200 Übergängen angegeben. Ab dieser Anzahl treten praktisch keine Veränderungen der Plattendicke (und damit der jeweils berechneten Raumdichte) mehr auf. Für die Platten wurde nach der Verdichtung ebenfalls die Raumdichte per Tauchwägung bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3-14 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte, nach 200 Übergängen							
	Variante 2 (mit Wiedererwärmung des Mischguts)				Variante 2-1 (ohne Wiedererwärmung des Mischguts)			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm³	g/cm³	g/cm³	mm	g/cm³	g/cm³	g/cm³
135	61,4	2,573	2,539	-0,034	67,7	2,323	2,525	0,202
115	62,4	2,540	2,542	0,002	63,2	2,491	2,519	0,028
95	64,3	2,465	2,540	0,075	64,3	2,447	2,519	0,072

Tab. 3-14: Übersicht der ermittelten Raumdichten an den Asphalt-Probepplatten mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2) nach ca. 200 Übergängen im Walzsektor-Verdichtungsgerät

Tab. 3-14 zeigt, dass die Raumdichten, bestimmt über die Dickenänderung, die Unterschiede in der Temperatur abbilden. Dies ist bei der Tauchwägung nicht mehr sichtbar; die Ergebnisse sind praktisch gleich.

Wie auch bei der Marshall-Verdichtung muss die berechnete Raumdichte den mittels Tauchwägung bestimmten Raumdichten angepasst werden, analog zu Kapitel 3.3.2. Dazu wird eine Regression der Raumdichten über die Anzahl der Übergänge vorgenommen (analog Bild 3-2). Es wird wieder die Krümmung (Parameter γ) der Regression für die Korrektur benötigt, so dass über zwei Punkte eine Funktion zur Korrektur berechnet werden kann.

Zur Bestimmung dieser Funktion wird ebenfalls die Raumdichte mittels Tauchwägung nach Standard-Verdichtung benötigt.

Bild 3-20 zeigt die korrigierten Raumdichten über die Anzahl der Übergänge bei unterschiedlichen Temperaturen für Variante 2-1 (ohne Wiedererwärmung des Mischguts).

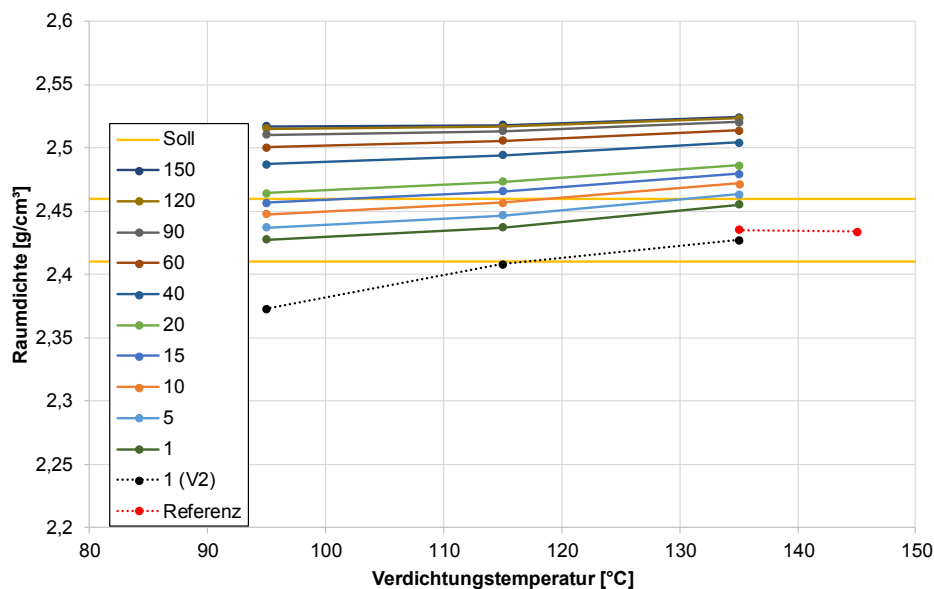


Bild 3-20: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V2-1 oberflächenaktiver Zusatz)

Die Variante V2 mit Wiedererwärmung „1 (V2)“ ist in Bild 3-20 gestrichelt eingezeichnet. Der Unterschied zur Variante 2-1 ohne Wiedererwärmung „1“ ist deutlich zu erkennen, es werden geringere Raumdichten erzielt. Weiterhin kann aber festgehalten werden, dass bei 135 °C auch mit Wiedererwärmung die Ziel-Raum-dichte annähernd erreicht wird. Für dieses Produkt müsste bei einer Wiedererwärmung die Verdichtungstemperatur nicht unbedingt erhöht werden.

Bei 135 °C liegt die Raumdichte der Variante 2-1 bereits an der oberen Grenze des Toleranzbereichs. Es sind entsprechend weniger Übergänge notwendig, um bei 135 °C die Ziel-Raum-dichte zu erreichen. Bei 115 °C kann mit der Standard-Verdichtung die Ziel-Raum-dichte genau erreicht werden (Variante 2-1). Für 95 °C liegt die Raumdichte knapp unterhalb der Ziel-Raum-dichte aber noch deutlich oberhalb der unteren Toleranzgrenze.

In Bild 3-21 ist die Verdichtungs-funktion eingezeichnet.

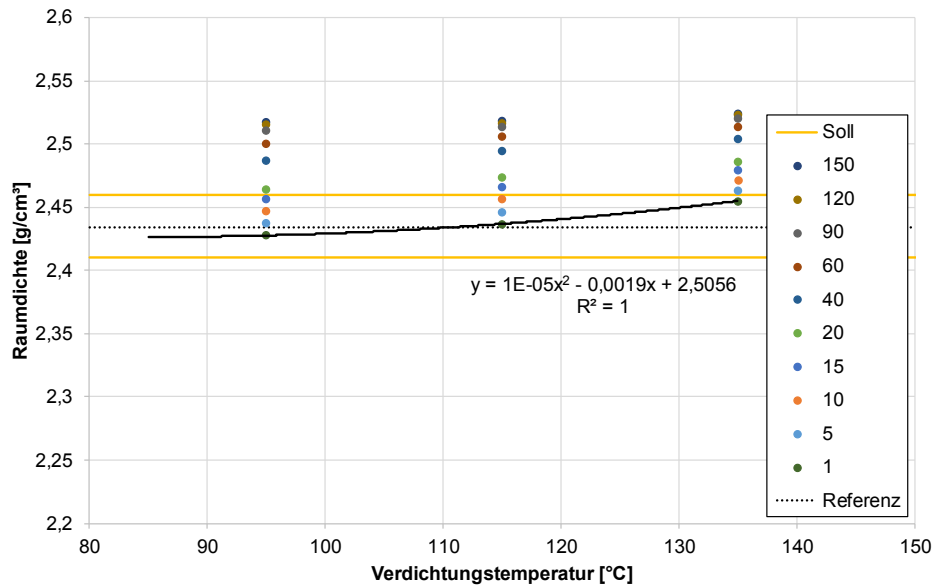


Bild 3-21: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurven für übliche und maximale Verdichtung, Variante V2-1 (oberflächenaktiver Zusatz)

Gemäß der Verdichtungsfunktion kann eine Temperatur von ca. 115 °C gewählt werden, um die Ziel-Raumdicke zu erreichen. Eine Verdichtung ist auch noch unterhalb von 80 °C möglich. Eine minimale Temperatur kann aber nicht abgelesen werden, so dass 80 °C als Minimum angegeben werden.

Zur Überprüfung der Verdichtungsfunktion wurde erneut Mischgut hergestellt und eine Platte bei der nach Verdichtungsfunktion ermittelten Temperatur von 115 °C hergestellt. Die ermittelte Raumdichte von 2,441 g/cm³ ist in Bild 3-22 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Raumdichte nahezu auf der Kurve der Verdichtungsfunktion liegt, sodass die Funktion bestätigt werden kann.

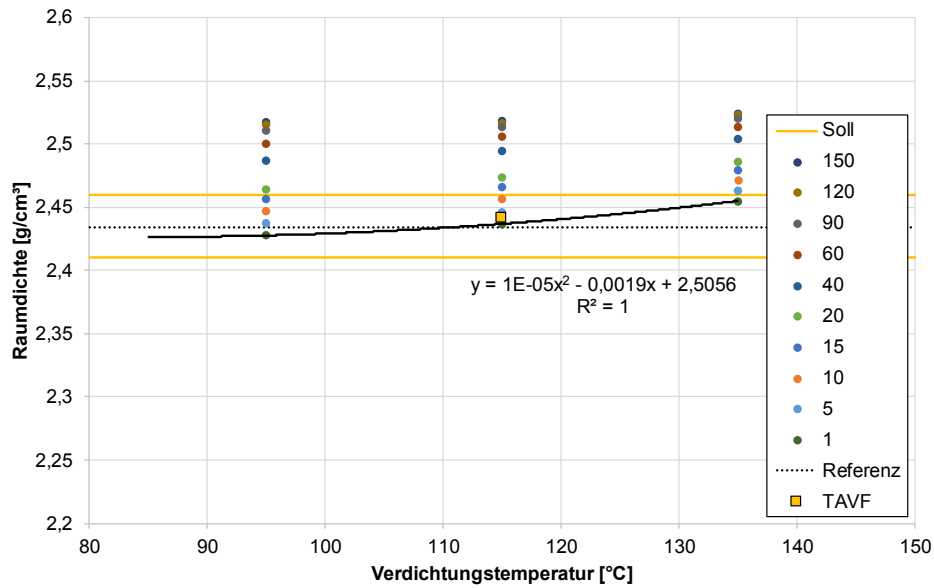


Bild 3-22: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion für die Walzsektor-Verdichtung der Variante 2-1 (oberflächenaktiver Zusatz)

3.4.3 Variante 3, reaktivmodifizierender Zusatz

Die Herstellung des TA-Asphaltmischguts mit einem reaktivmodifizierenden Zusatz ist in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Das Asphaltmischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die Verdichtungstemperaturen ab (145, 135, 115 oder 95 °C) und wurde dann verdichtet.

Die zusätzliche Verdichtungsarbeit wurde analog zur Variante 2 bei Erreichen der maximalen Kraft von 15 kN aufgebracht (s. Bild 3-18). Es wurden weitere Übergänge mit dieser Kraft vorgenommen, bis keine Dickenänderung der Platten mehr erfolgte. Dabei wurde die Dickenänderung der Platten aufgezeichnet. Die ermittelten Raumdichten an WSV-Platten nach der Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen sind in Tab. 3-15 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte							
	Standard-Verdichtung				200 Übergänge			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
145	68,7	2,305	2,445	0,140	61,8	2,556	2,534	-0,022
135	68,4	2,330	2,417	0,087	63,3	2,518	2,527	0,009
115	69,0	2,310	2,398	0,088	65,2	2,444	2,517	0,073
95	68,8	2,316	2,401	0,085	66,5	2,397	2,490	0,093

Tab. 3-15: Übersicht der ermittelten Raumdichten an WSV-Platten der Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) nach Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen

Wie erwartet weisen die Raumdichten nach Tauchwägung höhere Werte auf. Nach Standard-Verdichtung zeigt sich eine deutliche Abnahme der Raumdichte mit abnehmender Verdichtungstemperatur. Nach 200 Übergängen liegen die Raumdichten, unabhängig von der Verdichtungstemperatur, innerhalb des Toleranz-Bereichs auf einem gleichen Niveau. Dies gilt nur bei Betrachtung der Raumdichte nach Tauchwägung, nach Dickenänderung weisen die Raumdichten auch nach 200 Übergängen noch deutliche Unterschiede auf.

Wie zuvor muss die über die Plattendicke berechnete Raumdichte den mittels Tauchwägung bestimmten Raumdichten angepasst werden, analog zu Kapitel 3.3.2. Dazu wird die Regression der Raumdichten über die Anzahl der Übergängen berücksichtigt.

Bild 3-23 zeigt die korrigierten Raumdichten über die Anzahl der Übergänge bei unterschiedlichen Temperaturen.

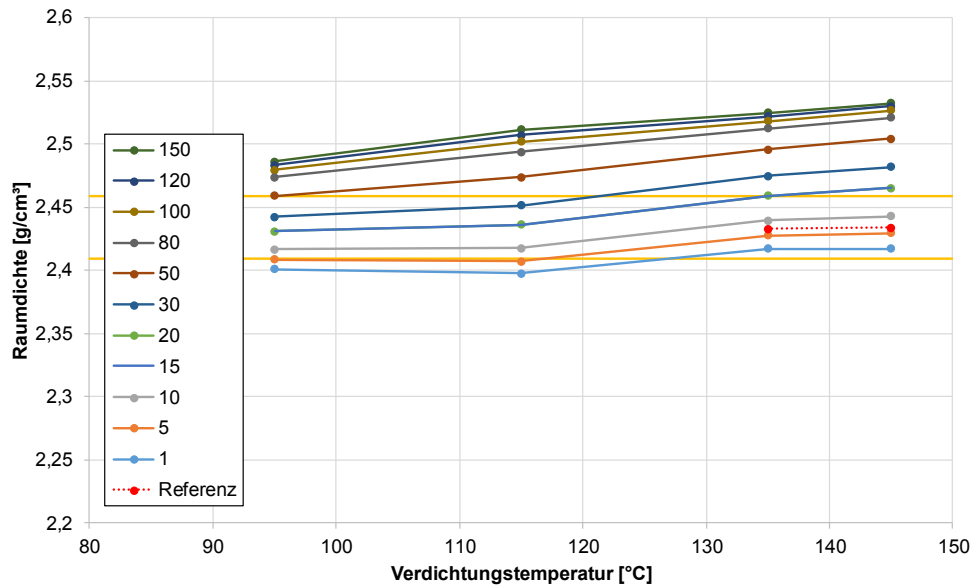


Bild 3-23: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz)

Bei dieser Variante zeigt sich eine nicht erwartete Veränderung der Raumdichten. Bei 145 °C und 135 °C kann zwar der Raumdichtebereich mit der Standard-Verdichtung erreicht werden. Für die Ziel-Raumdichte werden jedoch zusätzliche 7 Übergänge benötigt.

Bei 115 °C kann mit der Standard-Verdichtung der gewünschte Raumdichtebereich nicht mehr erreicht werden. Die Ziel-Raumdichte kann mit zusätzlichen 14 Übergängen erreicht werden.

Für 95 °C kann die Ziel-Raumdichte mit ca. 15 zusätzlichen Übergängen erreicht werden.

In Bild 3-24 ist die mögliche Regressionen für die Standard-Verdichtung eingezeichnet.

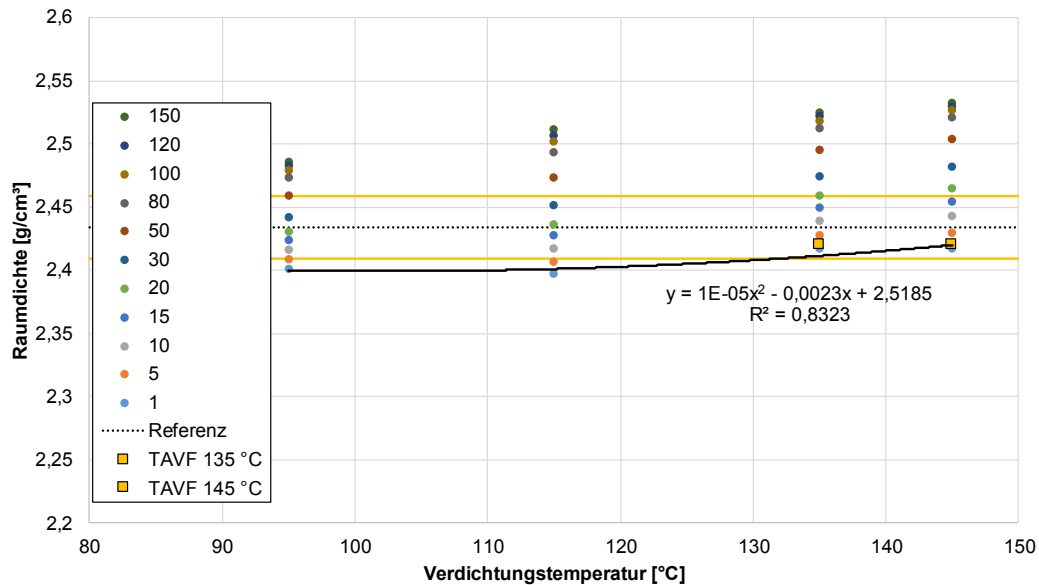


Bild 3-24: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurven für übliche und maximale Verdichtung, Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz)

Nach der hier durchgeführten Regression kann bei einer Verdichtungstemperatur von 130 °C der gewünschte Raumdichtebereich erreicht werden. Allerdings wird bei 145 °C die Ziel-Raumdichte nicht erreicht. Der Herstellungsprozess erfolgte nach Herstellerangaben. Es ist zu klären, ob hier ggf. noch Optimierungsbedarf besteht.

Eine Ermittlung der minimalen Verdichtungstemperatur kann mit < 80 °C angegeben werden. Generell wird hier festgelegt, dass mehr als 15 Übergänge als nicht praxisgerecht anzusehen sind, und somit dies als maximale Verdichtung für die Auswertung der minimalen Verdichtungstemperatur herangezogen wird.

Zur Überprüfung der Verdichtungsfunktion wurde erneut Mischgut hergestellt und jeweils eine Platte bei 145 bzw. 135 °C hergestellt. Die ermittelten Raumdichten sind ebenfalls in Bild 3-24 („TAVF 135 °C“ und „TAVF 145 °C“) dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Raumdichte für 145 °C auf der ermittelten Verdichtungskurve liegt. Für 135 °C liegt die Raumdichte etwas oberhalb der ermittelten Verdichtungskurve, was jedoch im Bereich möglicher (Prüf)Streuungen liegt.

3.4.4 Variante 4, Zeolith

Die Herstellung von TA-Asphaltmischgut mit Zeolith ist in Kapitel 3.3.4 beschrieben. Das Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die Verdichtungstemperaturen ab (135, 115 oder 95 °C) und wurde anschließend verdichtet.

Die zusätzliche Verdichtungsarbeit wird wieder bei Erreichen der maximalen Kraft von 15 kN (siehe Bild 3-18) aufgebracht. Es werden weitere Übergänge mit dieser Kraft vorgenommen und die Dickenänderung der Platten aufgezeichnet.

Die mit der Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen ermittelten Ergebnisse sind in Tab. 3-16 dargestellt. Es ist auch die jeweilige Dicke der Platte mit angegeben.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte							
	Standard-Verdichtung				200 Übergänge			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
135	69,5	2,293	2,434	0,141	59,4	2,683	2,532	-0,151
115	69,4	2,297	2,432	0,135	61,6	2,587	2,515	-0,072
95	71,2	2,238	2,413	0,175	63,2	2,524	2,524	0,000

Tab. 3-16: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten Platten der Variante 4 (Zeolith) nach Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen

Es zeigt sich wieder die erwartete Tendenz, dass mit sinkender Verdichtungstemperatur auch geringere Raumdichten ermittelt werden. Auch nach 200 Übergängen ist erkennbar, dass die Raumdichten, bestimmt über die Dickenänderung, Unterschiede in der Temperatur abbilden. Dies ist bei der Tauchwägung nur bedingt sichtbar.

Wie zuvor, muss die berechnete Raumdichte den mittels Tauchwägung bestimmten Raumdichten angepasst werden, analog zu Kapitel 3.3.2. Dazu wird wieder die Regression der Raumdichten über die Anzahl der Übergänge berücksichtigt.

In Bild 3-25 sind die korrigierten Raumdichten über die Anzahl der Übergänge bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt.

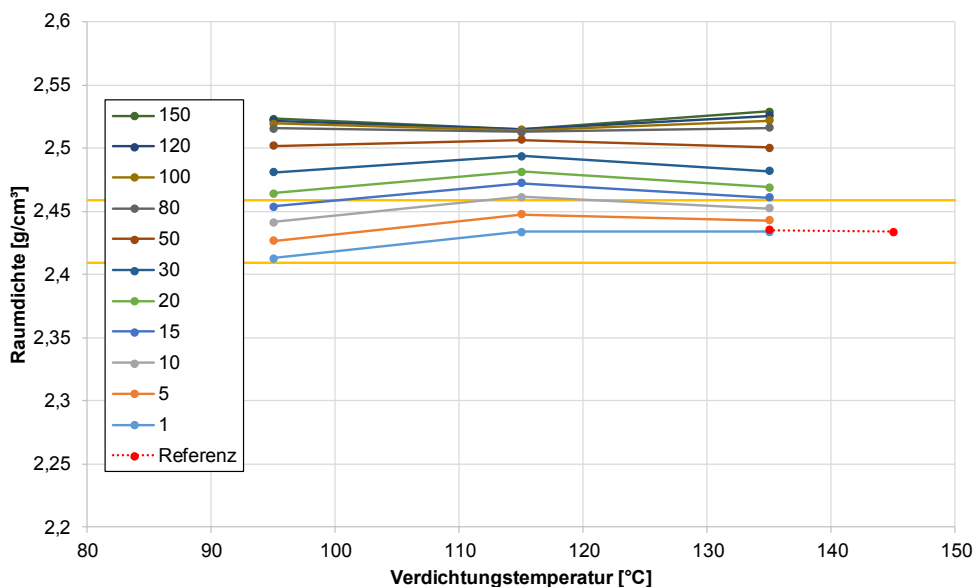


Bild 3-25: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V4 (Zeolith)

Bild 3-25 kann entnommen werden, dass bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C mit der Standard-Verdichtung die Ziel-Raumdichte erreicht wird. Dies trifft auch bei 115 °C

zu. Erst bei 95 °C wird die Ziel-Raumdichte nicht mehr erreicht, bleibt jedoch im gewünschten Raumdichtebereich. Mit zusätzlichen 9 Übergängen kann die Ziel-Raumdichte erreicht werden, siehe dazu auch die Verdichtungsfunktion in Bild 3-26.

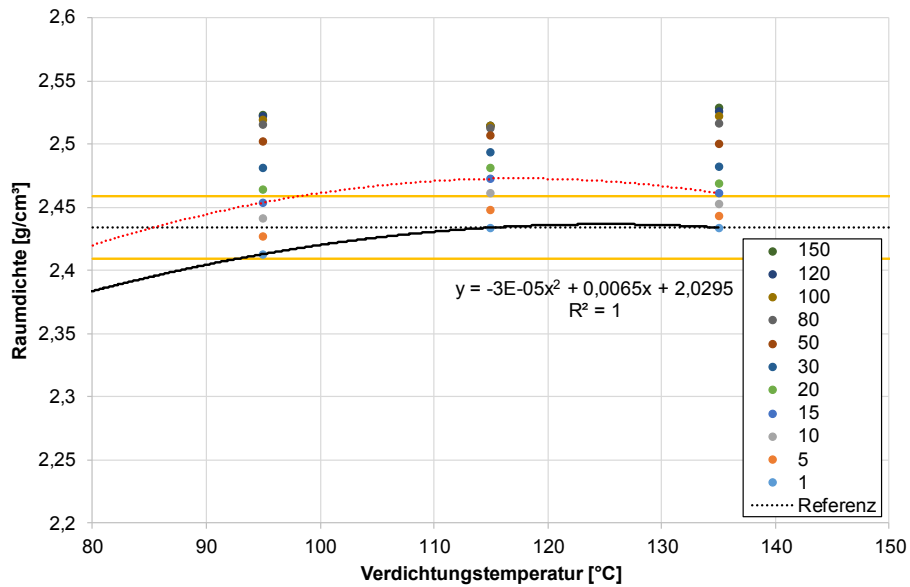


Bild 3-26: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für Standard-Verdichtung, Variante V4 (Zeolith)

Bild 3-26 zeigt, dass der Raumdichtebereich noch bei einer Temperatur von ca. 93 °C mittels Standard-Verdichtung erreicht werden kann.

Die untere Temperaturgrenze für eine praktisch noch mögliche Verdichtung (15 Übergänge) liegt demnach unterhalb von 80 °C.

Zur Überprüfung der Verdichtungsfunktion wurde erneut Mischgut hergestellt und eine Platte bei der nach Verdichtungsfunktion ermittelten Temperatur von 115 °C hergestellt. Die ermittelte Raumdichte von 2,437 g/cm³ ist in Bild 3-27 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Raumdichte nahezu auf der Kurve der Verdichtungsfunktion liegt, sodass die Funktion bestätigt werden kann.

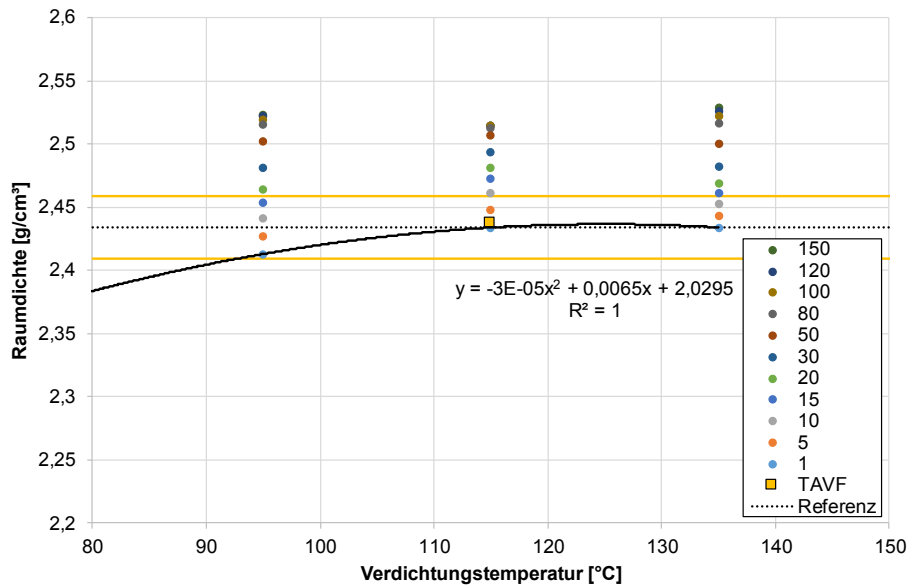


Bild 3-27: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion für die Walzsektor-Verdichtung der Variante V4 (Zeolith)

3.4.5 Variante 5, Schaumbitumen

Die Herstellung des TA-Asphaltmischguts mittels Schaumbitumen wurde im Labor der Universität Kassel vorgenommen. Der Mischprozess erfolgt bei einer Temperatur von 140 °C unter Anwendung von Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 A. Der Herstellungsprozess ist in Kapitel 1.3.5 beschrieben.

Das so hergestellte Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die Verdichtungstemperaturen ab (135, 115 oder 95 °C) und wurde dann verdichtet.

Für die Herstellung der Asphalt-Probepplatten wurde aufgrund der fehlenden Einstellmöglichkeit konstanter Verdichtungskräfte die Anzahl der Walzübergänge während der Zunahme und der darauffolgenden Abnahme von jeweils 15 Übergängen auf 100 Übergänge erhöht.

Die Probekörperdicke wurde ebenfalls nicht aufgezeichnet, so dass nur die Raumdichte nach Ausmessen am Ende des Verdichtungsprozesses möglich war.

Die ermittelten Raumdichten an den Asphalt-Probepplatten über das Ausmessen und die Tauchwägung nach 1 bzw. 108 Übergängen bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C sind in Tab. 3-17 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte							
	Standard-Verdichtung				100 Übergänge			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
135	45,05	2,421	2,492	0,071	43,32	2,509	2,537	0,028
115	45,41	2,401	2,475	0,074	43,49	2,504	2,545	0,041
95	44,74	2,437	2,484	0,047	43,64	2,497	2,526	0,029

Tab. 3-17: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten -Platten der Variante 5 (Schaumbitumen) nach Standard-Verdichtung und bei maximal möglicher Verdichtung

Wie erwartet weisen die Raumdichten nach Tauchwägung höhere Werte gegenüber dem Ausmessverfahren auf. Eine Verringerung der Raumdichte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur wurde für beide Verfahren nicht beobachtet.

Die grafische Darstellung der Raumdichten in Bild 3-28 zeigt, dass hier ein höheres Raumdichteniveau gegenüber der Referenz erzielt wurde. Ursächlich wird das andere Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV-Gerät der Universität Kassel versus WSV-Gerät der TU Braunschweig) angesehen. Das Verdichtungsregime hätte zunächst auf die Referenz-Raumdichte abgestimmt werden müssen. Da dieser Prozess sehr aufwändig ist - bedingt durch die jedes Mal neu auszuführende Schaumbitumenproduktion - wurde aus laborökonomischen Gründen darauf verzichtet.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass hier nur eine minimale Tendenz der Abhängigkeit der Raumdichten von der Verdichtungstemperatur zu erkennen ist. Im Gegensatz zum Marshall-Verdichtungsgerät kann hier auch noch bei 95 °C die Ziel-Raumdichte mit der Standard-Verdichtung erreicht werden.

Eine geringere Verdichtungstemperatur wurde aufgrund des hohen Aufwands nicht überprüft.

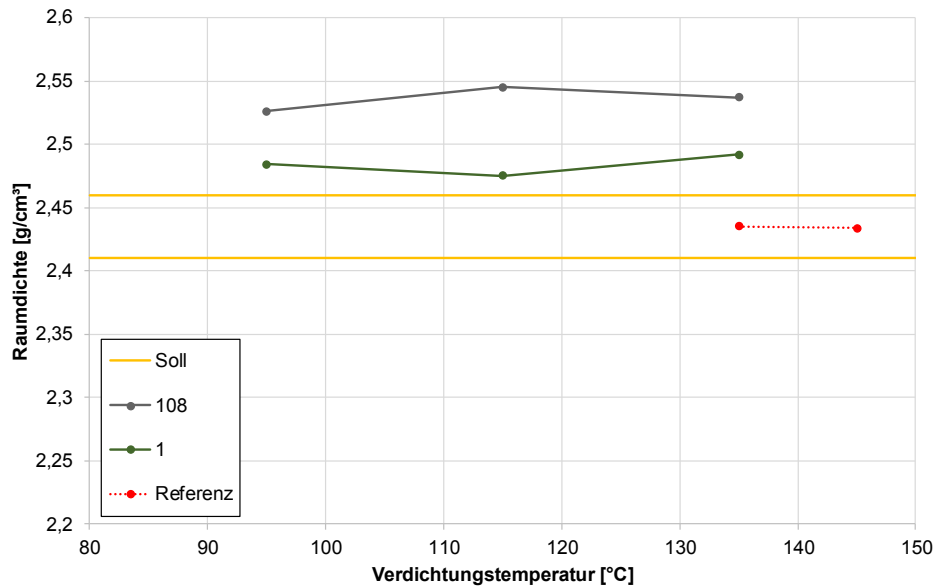


Bild 3-28: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 und 108) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V5 Schaumbitumen)

3.4.6 Variante 6, viskositätsverändernder Zusatz

Die Herstellung des TA-Asphaltmischguts mittels viskositätsveränderndem Zusatz ist in Kapitel 3.3.6 beschrieben. Das Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, kühlte auf die Verdichtungstemperaturen ab (135, 115 oder 95 °C) und wurde dann verdichtet.

Die zusätzliche Verdichtungsarbeit wurde wieder bei Erreichen der maximalen Kraft von 15 kN (siehe Bild 3-18) aufgebracht. Es wurden weitere Übergänge mit dieser Kraft vorgenommen und die Dickenänderung der Platten aufgezeichnet. Die mit der Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen ermittelten Ergebnisse sind in Tab. 3-18 dargestellt. Es ist auch die jeweilige Dicke der Platte angegeben.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte							
	Standard-Verdichtung				200 Übergänge			
	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz	Dickenänderung		Tauchwägung	Differenz
°C	mm	g/cm³	g/cm³	g/cm³	mm	g/cm³	g/cm³	g/cm³
135	69,4	2,252	2,461	0,141	62,3	2,517	2,503	-0,014
115	67,8	2,329	2,432	0,135	61,3	2,553	2,484	-0,069
95	70,2	2,238	2,423	0,185	64,9	2,432	2,496	0,064

Tab. 3-18: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten Platten der Variante 6 (viskositätsverändernder Zusatz) nach Standard-Verdichtung und bei maximal möglicher Verdichtung

Wie erwartet weisen die Raumdichten nach Tauchwägung höhere Werte auf. Auch hier zeigt sich die Veränderung der Raumdichte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur. Bei der Raumdichte nach Dickenänderung ist jedoch keine Abnahme der Raumdichte im Zusammenhang mit der Abnahme der Verdichtungstemperatur erkennbar, die Raumdichte bei 115 °C ist am höchsten. Nach 200 Übergängen liegen die Raumdichten nach Tauchwägung unabhängig von der Verdichtungstemperatur auf dem gleichen Niveau, wohingegen nach Dickenänderung deutliche Unterschiede erkennbar sind.

Die Darstellung in Bild 3-29 zeigt weiterhin, dass bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und beim Standard-Verdichtungsregime die Raumdichte an der oberen Grenze des Toleranz-Bereichs liegt. Für 115 °C wird die Ziel-Raumdichte erreicht und auch bei 95 °C liegt die Raumdichte noch innerhalb des Toleranz-Bereichs. Es scheint, als ob der Abkühlungsprozess (Phasenübergang des VVZ) eine höhere Verdichtung zulässt.

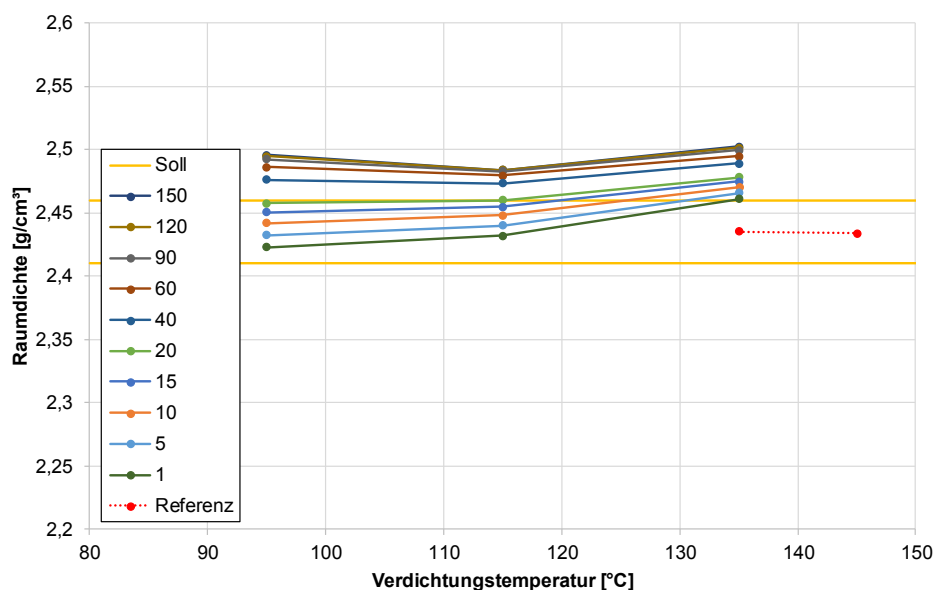


Bild 3-29: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V6 (viskositätsverändernder Zusatz)

3.4.7 Zusammenfassung Walzsektor-Verdichtung

Auch mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät ist die Ermittlung einer Verdichtungsfunktion möglich.

Für unterschiedliche Zusätze konnte überwiegend nachgewiesen werden, dass eine systematische und plausible Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit und der Verdichtungstemperatur besteht.

Die über die Dickenänderung ermittelten Raumdichten weichen generell von den per Tauchwägung ermittelten Raumdichten ab. Um diese physikalisch nicht zu vermeidende Abweichung zu korrigieren, sind auch hier Asphalt-Probepplatten mit Standard-Verdichtung und maximaler Verdichtung notwendig.

Die Raumdichte kann über eine Funktion in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben werden, wobei sich auch hier ein Polynom zweiten Grades als vorteilhaft erweist. Allerdings sollte die Funktion im Weiteren auf Plausibilität überprüft werden, da jeder Zusatz / jedes Verfahren individuell reagieren kann.

Somit kann ein Temperaturbereich ermittelt werden, in welchem eine Verdichtung mit der Standard-Verdichtung möglich ist.

Weiterhin kann abgeschätzt werden, ab welcher unteren Temperatur der Raumdichtebereich praktisch nicht mehr zu erreichen ist. Dabei werden 15 Übergänge als praktisch maximale Verdichtung angesetzt.

3.5 Verdichtungsfunktion für Gyrator-Verdichtung

3.5.1 Referenz

Folgende Ziel-Raumdichte wurde durch Anwendung von 100 Gyrationen bei einer Temperatur von 145 °C an zwei Gyrator-Probekörpern ermittelt (siehe Tab. 3-19):

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,431 \text{ g/cm}^3$$

Als Toleranz-Bereich für die Ziel-Raumdichte werden wiederum $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt, so dass der anzustrebende Raumdichtebereich zwischen 2,406 bis 2,456 g/cm^3 liegt.

Die oben angegebene Raumdichte wurde per Tauchwägung gemäß dem geltenden Regelwerk ermittelt. Für die Ermittlung der Verdichtungsfunktion erfolgte jedoch die Bestimmung der Raumdichte in Anlehnung an das Ausmessverfahren (über die Dickenänderung). Beide Messmethoden führen – in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt – zu unterschiedlichen Ergebnissen, siehe Tab. 3-19.

Für die Referenzvariante wurde ebenfalls die Verdichtungstemperatur um 10, 20 und 30 °C reduziert, um das Verdichtungsprinzip zu überprüfen und die Vergleichbarkeit zu den anderen Varianten zu ermöglichen. Des Weiteren wurden zwei Gyrator-Probekörper (PK) der Referenzvarianten mit einer maximalen Verdichtung hergestellt (ca. 400 Gyrationen), während die Probekörperdicke aufgezeichnet wurde.

Anhand der Aufzeichnungen kann über die Einwaage des Probekörpers die Raumdichte je Gyration berechnet werden. Probekörperdicke und Raumdichte des jeweiligen Probekörpers wurden im Anschluss messtechnisch ermittelt und mit den Aufzeichnungen abgeglichen. Die Mittelwerte der Raumdichten nach Tauchwägung und Dickenänderung sind in Tab. 3-19 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Gyrationen			400 Gyrationen		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
145	2,431	2,381	0,050	2,512	2,467	0,045
135	2,419	2,384	0,035	2,524	2,473	0,051
125	2,476	2,393	0,083	2,512	2,465	0,047
115	2,448	2,386	0,062	2,508	2,460	0,048

Tab. 3-19: Übersicht der mittleren Raumdichten am Gyrator-Probekörper der Referenzvariante (V1) nach 100 und 400 Gyrationen

Bei den mittleren Raumdichten der Referenzvariante V1 ist auffällig, dass die Raumdichten bei den Verdichtungstemperaturen 125 und 115 °C größer sind als die Raumdichten bei 145 und 135 °C. Dies kann nicht plausibel erklärt werden. Entsprechend wurde erneut Referenzmischgut gemischt, anschließend Gyrator-Probekörper bei den Temperaturen 145, 135 und 125 °C hergestellt und die Raumdichte per Tauchwägung und Dickenänderung bestimmt, siehe Tab. 3-20.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Gyrationen			400 Gyrationen		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
145	2,342	2,246	0,096	2,417	2,322	0,095
135	2,330	2,216	0,114	2,413	2,293	0,140
125	2,309	2,204	0,105	2,405	2,289	0,116

Tab. 3-20: Wiederholung der Referenzvariante (V1): Übersicht der mittleren Raumdichten am Gyrator-Probekörper nach 100 und 400 Gyrationen

Die Ergebnisse der Wiederholung ergaben eine plausible Abstufung der erzielten Raumdichten bezüglich der Verdichtungstemperatur und der Verdichtungsarbeit. Jedoch lagen die Ergebnisse auf einem deutlich niedrigeren Niveau, als in der ersten Herstellungsreihe. Eine Überprüfung der Zusammensetzung ergab nur geringe Veränderungen in der Sieblinie (innerhalb der Prüftoleranz). Es zeigt sich hier bereits bei der Referenzvariante, dass die Verdichtung mit dem Gyrator sehr empfindlich auf minimale Veränderungen in der Sieblinie reagiert und somit die Reproduzierbarkeit teilweise sehr eingeschränkt ist.

Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der ersten Reihe mit den Verdichtungstemperaturen 145 °C und 135 °C für das weitere Vorgehen genutzt. Diese Werte reihen sich plausibel in die folgenden Raumdichten unterschiedlicher Zusätze bzw. Verfahren ein.

Auch bei den Ergebnissen nach 400 Gyrationen werden ebenfalls nur die Werte der ersten Reihe bei 145 °C und 135 °C genutzt. Die beiden so ermittelten Raumdichten nach 400 Gyrationen liegen nahezu auf einem gleichen Niveau, sodass davon ausgegangen werden kann, dass eine maximale Verdichtung bei beiden Temperaturen erreicht wurde.

Um anhand der Daten aus der Dickenänderung auf die Raumdichten der Tauchwägung zu schließen, muss auch hier die Verdichtungsfunktion verändert werden. Als Basis wird wieder eine Regression der Raumdichte über die Anzahl an Gyrationen in Anlehnung an die TP Asphalt, Teil 10 B (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010a), siehe Bild 3-30 (Regression), erstellt.

Werden nun die Krümmung der Regression (Parameter T) und die mittels Tauchwägung ermittelten Raumdichten bei 100 und 400 Gyrationen (in Bild 3-30 als Punkte markiert) auch für die Korrektur angesetzt, kann wieder über die zwei Punkte eine Funktion zur Korrektur berechnet werden.

Diese Korrektur muss für jede Verdichtungstemperatur durchgeführt werden. Somit müssen auch hier für jede angewandte Verdichtungstemperatur 4 Gyrator-Probekörper hergestellt werden: 2 x 100 Gyrationen und 2 x bis zur Endraumdichte (max. 400 Gyrationen).

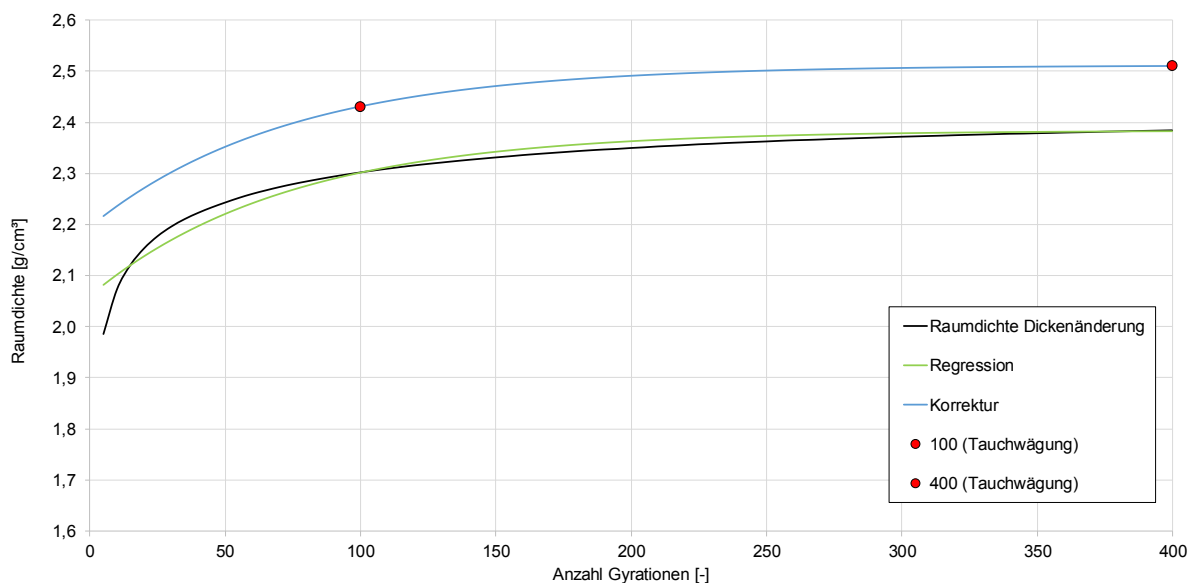


Bild 3-30: Über die Anzahl an Gyrationen berechnete Raumdichte (Raumdichte Dickenänderung, schwarze Linie) und über die Tauchwägung korrigierte Raumdichte (Korrektur, blaue Linie) der Referenzvariante (V1) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C

Anhand der korrigierten Funktion können die Raumdichten bei unterschiedlichen Anzahlen von Gyrationen abgelesen werden. Wie zuvor werden für jede überprüfte Verdichtungstemperatur diese Raumdichten in einem Diagramm aufgetragen und jeweils die gleiche Anzahl von Gyrationen miteinander verbunden, siehe Bild 3-31.

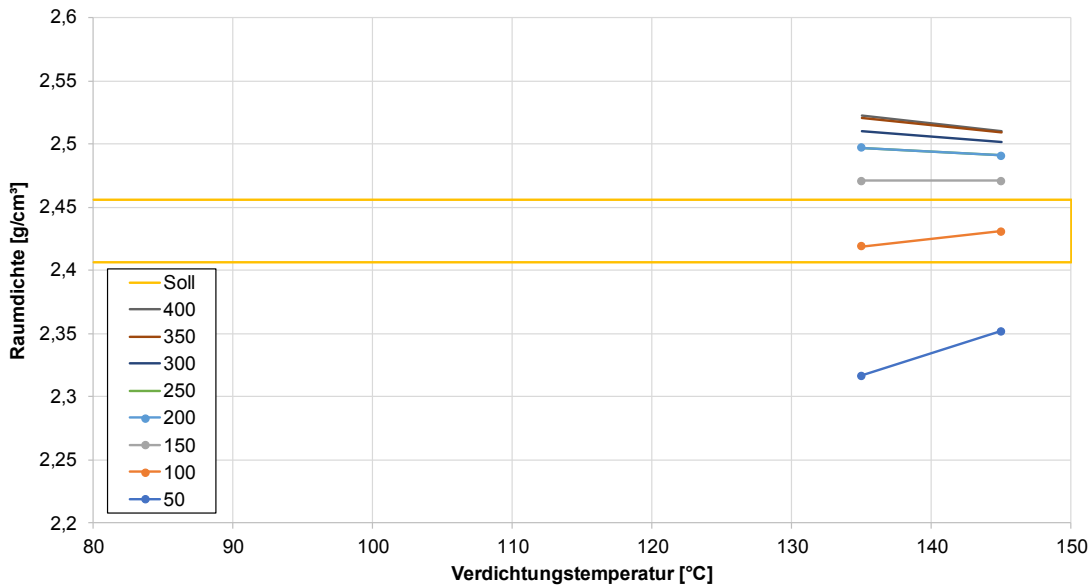


Bild 3-31: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Referenzvariante (V1)

In Bild 3-31 ist zu erkennen, dass mit 100 Gyrationen bei 145 °C die gewünschte Ziel-Raumdicke erreicht werden kann. Bei 135 °C wird eine etwas höhere Anzahl von ca. 110 Gyrationen benötigt.

3.5.2 Variante 2, oberflächenaktiver Zusatz

Die Herstellung des Mischguts mit anschließender Portionierung, Abkühlung und Wiedererwärmung ist in Kapitel 3.3.2 beschrieben.

In Tab. 3-21 sind die ermittelten Raumdichten der Variante 2 mit oberflächenaktivem Zusatz bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen nach 100 und 400 Gyrationen dargestellt. Bei dieser Variante wurden nach einer ersten Betrachtung der Ergebnisse für die Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C weitere Gyration-Probekörper bei den Temperaturen 85 und 75 °C hergestellt. Hintergrund ist die bei 95 °C vergleichbar hohe Raumdichte im Vergleich zur Ziel-Raumdicke, sodass davon ausgegangen wird, dass eine weitere Absenkung der Temperatur möglich ist.

Es ist, wie bei der Herstellung von MPK und WSV-Platten, eine Differenz in der Raumdichte je nach angewandtem Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte erkennbar.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Gyrationen			400 Gyrationen		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
135	2,450	2,407	0,043	2,525	2,486	0,039
115	2,457	2,392	0,065	2,503	2,465	0,038
95	2,434	2,389	0,045	2,500	2,462	0,038
85	2,430	2,385	0,045	2,492	2,449	0,043
75	2,434	2,328	0,106	2,455	2,400	0,055

Tab. 3-21: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit dem oberflächenaktiven Zusatz (Variante V2) nach 100 und 400 Gyrationen

Für jede überprüfte Verdichtungstemperatur werden die Raumdichten in einem Diagramm aufgetragen und jeweils die gleiche Anzahl von Gyrationen miteinander verbunden, siehe Bild 3-32.

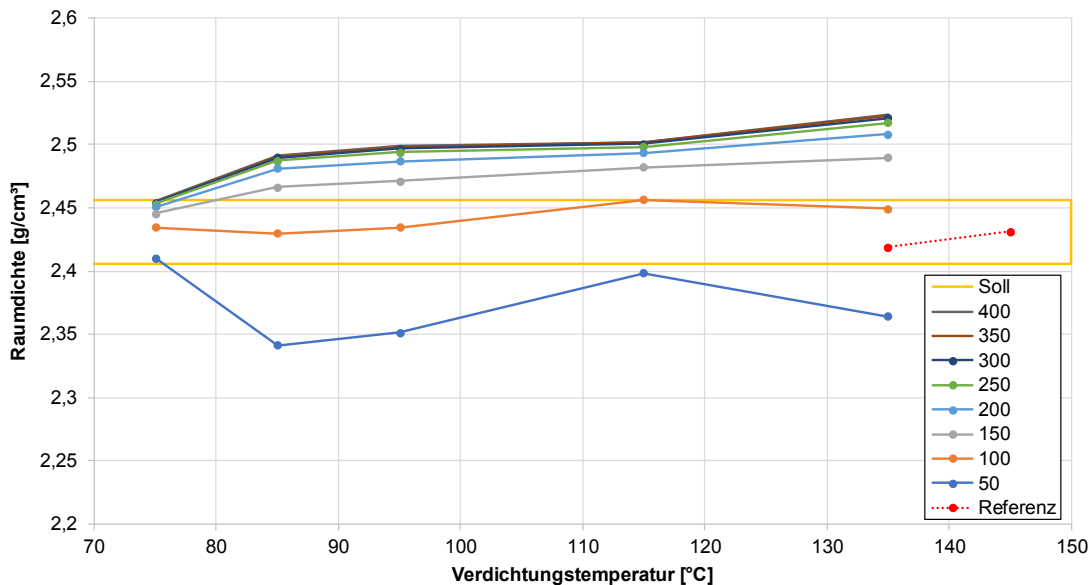


Bild 3-32: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem oberflächenaktiven Zusatz, Variante V2 (oberflächenaktiver Zusatz)

Es zeigt sich, dass mit 100 Gyrationen bei einer Verdichtungstemperatur von 135 $^{\circ}C$ bzw. 125 $^{\circ}C$ die Raumdichte im oberen Toleranz-Bereich der Raumdichte bzw. für 125 $^{\circ}C$ sogar

oberhalb des Toleranz-Bereichs liegt. Entsprechend ist eine geringere Verdichtungstemperatur zur Erreichung der Ziel-Raumdichte möglich. Bei Abnahme der Verdichtungstemperatur nimmt, wie zu erwarten, auch die Raumdichte ab. Die Raumdichte liegt jedoch auch bei 75 °C noch im Bereich der Ziel-Raumdichte. Entsprechend kann nach jetzigem Stand die Temperatur für die Gyrator-Verdichtung unter Anwendung des oberflächenaktiven Zusatzes bis auf mindestens 75 °C abgesenkt werden.

Bei Anwendung der Verdichtungsfunktion ergibt sich ein eher linearer Verlauf (siehe Bild 3-33), der im oberen Bereich des Toleranz-Bereichs verläuft. Der Einsatz eines Polynoms zweiten Grades ist möglich.

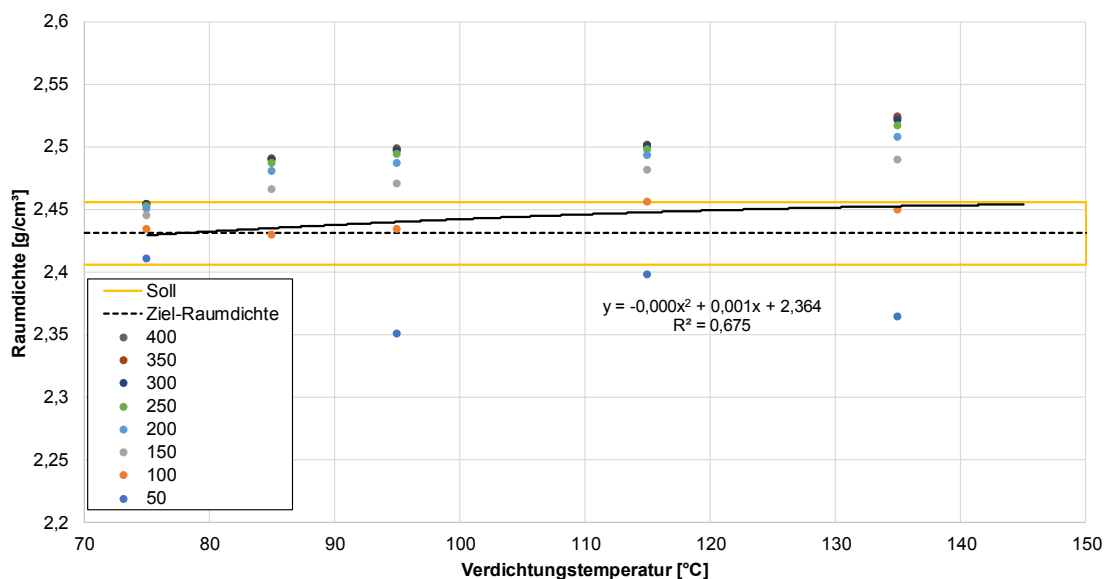


Bild 3-33: Erzielte Raum-dichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Gyrationen, Variante V2 (oberflächenaktiver Zusatz)

3.5.3 Variante 3, reaktivmodifizierender Zusatz

Bei Variante 3 wurde wieder anstatt eines Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A ein Straßenbaubitumen 50/70 mit einem reaktivmodifizierendem Zusatz verwendet. Dem Bitumen wurde der Zusatz vor dem Mischprozess gemäß Herstellerangaben zugegeben. Anschließend wurde das Mischgut bei 160 °C im Labormischer für 3 Minuten gemischt.

Das so hergestellte TA-Asphaltmischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, auf die erforderliche Verdichtungstemperatur (135, 115 oder 95 °C) abgekühlt und dann verdichtet.

Das weitere Vorgehen entspricht dem zuvor beschriebenen Verfahren, inkl. der Korrektur der Raum-dichten. Somit müssen für jede angewandte Verdichtungstemperatur 4 Gyrator-Probekörper verdichtet werden: 2 x 100 Gyrationen und 2 x bis zur Endraum-dichte (400 Gyrationen).

In Tab. 3-22 sind die Raum-dichten bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C nach 100 und 400 Gyrationen dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Gyrationen			400 Gyrationen		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
135	2,459	2,411	0,048	2,499	2,489	0,010
115	2,443	2,393	0,050	2,496	2,481	0,015
95	2,412	2,408	0,004	2,493	2,466	0,027

Tab. 3-22: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrotor-Probekörper mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (Variante V3) nach 100 und 400 Gyrationen

In Bild 3-34 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl an Gyrationen bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen dargestellt. Die Ergebnisse weisen einen plausiblen Verlauf auf.

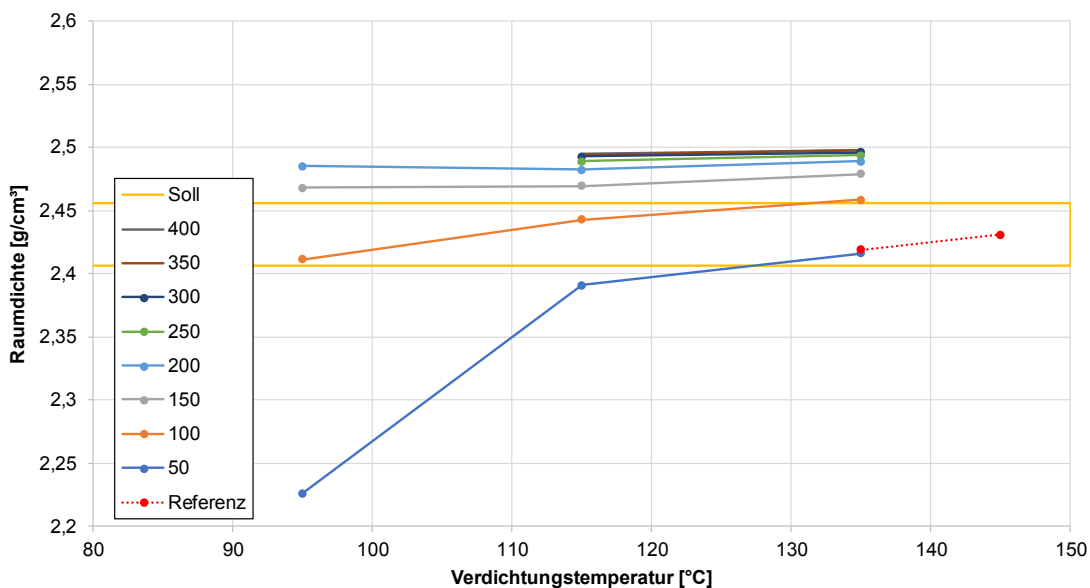


Bild 3-34: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem reaktivmodifizierenden Zusatz, Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz)

Bei Anwendung einer polynomischen Funktion 2. Grades (siehe Bild 3-35) für 100 Gyrationen liegen die Raumdichten mit ca. $2,50 g/cm^3$ bei den Verdichtungstemperaturen von 135 °C und 115 °C oberhalb der Ziel-Raumdichte. Bei 95 °C liegt die Raumdichte im unteren Toleranz-Bereich. Die optimale Verdichtungstemperatur unter Anwendung der in der Abbildung dargestellten Funktion liegt bei ca. 105 °C .

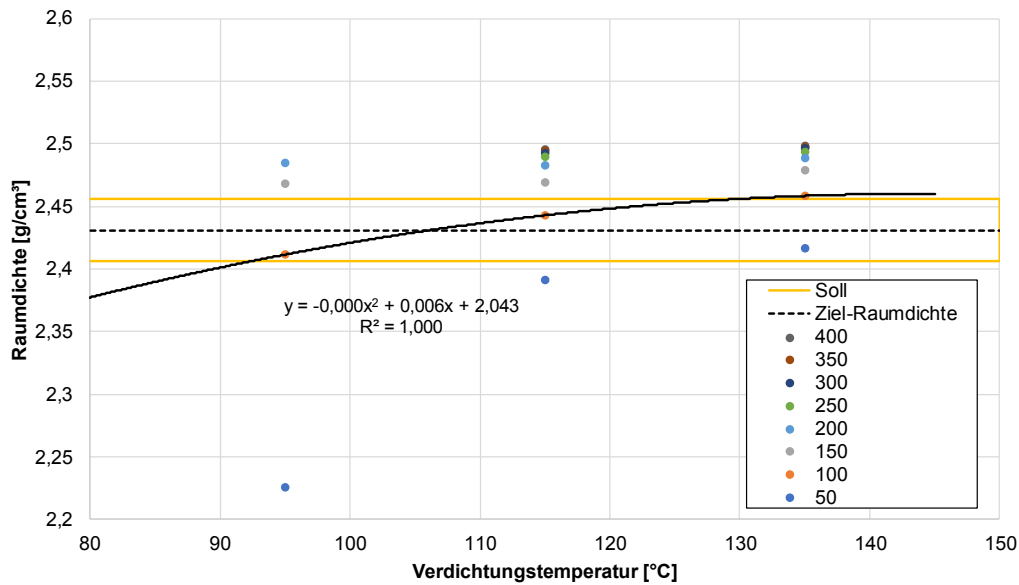


Bild 3-35: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsgyrationen, Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz)

Zur Überprüfung dieser Annahme bzw. der Verdichtungsfunktion wurden weitere fünf Probekörper bei einer Temperatur von 95 °C hergestellt. Die Ergebnisse sind in Bild 3-36 dargestellt.

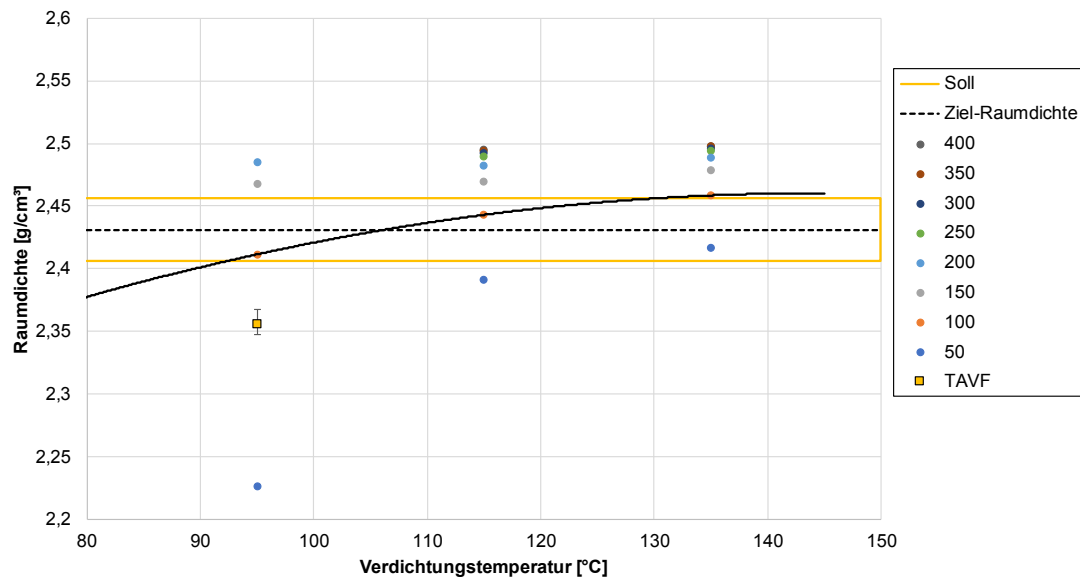


Bild 3-36: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungszyklen, Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz)

Wie in Bild 3-36 deutlich zu erkennen ist, kann das Raumdichteniveau der zuvor ermittelten Verdichtungsfunktion nicht erreicht werden. Die Ursache ist nicht bekannt. Die einzelnen Raumdichten liegen innerhalb der Prüftoleranz und die Zusammensetzung wurde nicht verändert.

3.5.4 Variante 4, Zeolith

Die Herstellung des TA-Asphaltmischguts mit Zeolith ist in Kapitel 3.3.4 beschrieben. Das so hergestellte TA-Asphaltmischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, auf die Verdichtungstemperaturen abgekühlt (135, 115 oder 95 °C) und verdichtet.

Das weitere Vorgehen entspricht den zuvor dargestellten Varianten, inkl. der Korrektur der Raumdichten. Die ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper über die Dickenänderung und die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Gyrationen bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C sind in Tab. 3-23 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Gyrationen			400 Gyrationen		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>	<i>g/cm³</i>
135	2,466	2,412	0,054	2,535	2,490	0,045
115	2,451	2,400	0,051	2,535	2,469	0,066
95	2,434	2,393	0,041	2,510	2,461	0,049

Tab. 3-23: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit Zeolith (Variante V4) nach 100 und 400 Gyrationen

Hier kann beobachtet werden, dass sowohl nach 100 als auch nach 400 Gyrationen die Raumdichten mit sinkender Verdichtungstemperatur abnehmen.

In Bild 3-37 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl der Gyrationen bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen dargestellt.

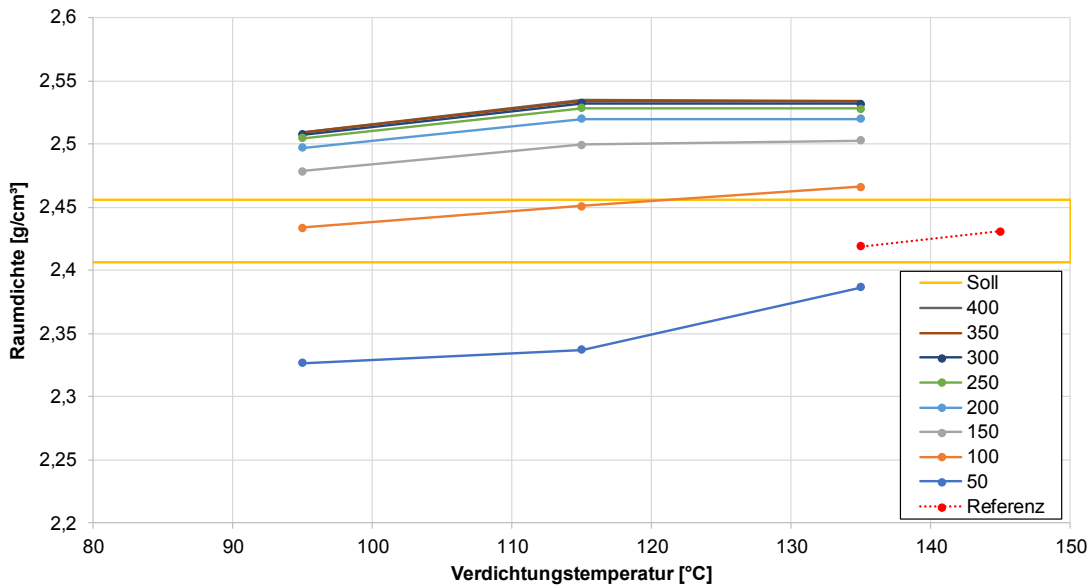


Bild 3-37: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V4 (Zeolith)

Bild 3-38 zeigt, dass die lineare Regression bei 100 Gyrationen die gewünschte Raumdichte bei ca. 92 °C erreicht. Auch unterhalb von 80 °C kann noch eine Raumdichte im gewünschten Bereich erzielt werden.

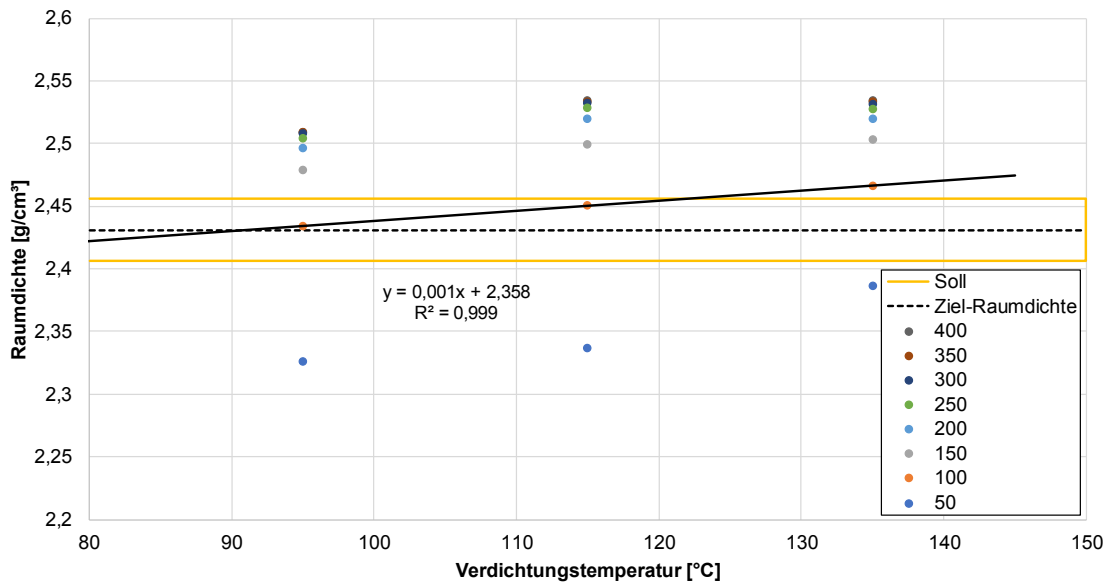


Bild 3-38: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V4 (Zeolith), Gerade für 100 Gyrationen

Die Überprüfung der Verdichtungsfunktion erfolgte durch Herstellung von fünf weiteren Gyrotor-Probekörpern bei einer Temperatur von 95 °.

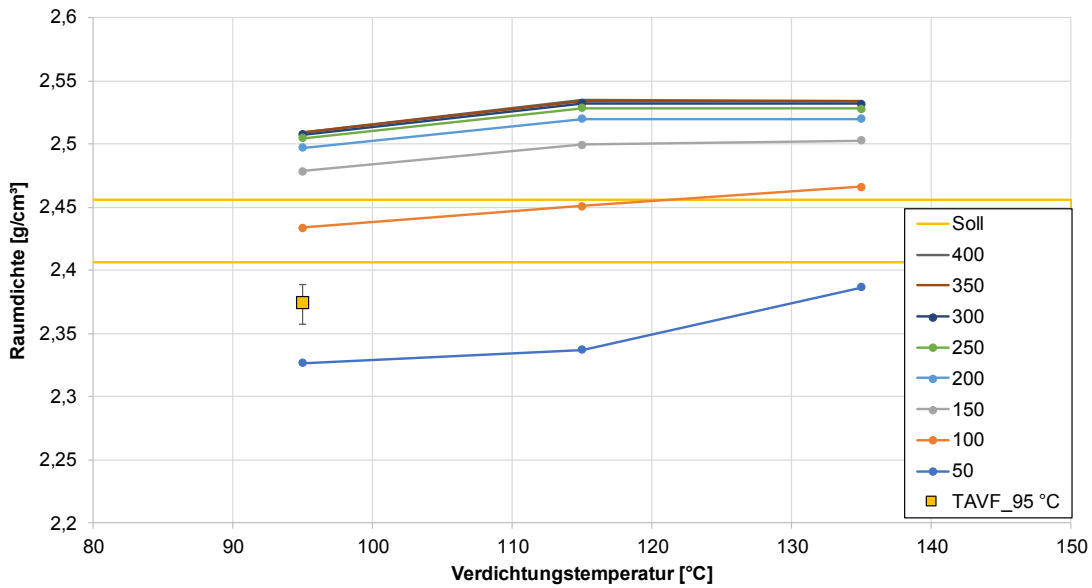


Bild 3-39: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V4 (Zeolith), Gerade für 100 Gyrationen

Wie in Bild 3-39 deutlich zu erkennen ist, kann auch hier das Raumdichteniveau der zuvor ermittelten Verdichtungsfunktion nicht erreicht werden. Die Ursache ist nicht bekannt. Die einzelnen Raumdichten liegen innerhalb der Prüftoleranz und die Zusammensetzung wurde nicht verändert.

3.5.5 Variante 5, Schaumbitumen

Das TA-Asphaltmischgut mit Schaumbitumen wurde wie in Kapitel 1.3.5 bzw. Kapitel 3.3.5 beschrieben hergestellt. Das Mischgut wurde in die benötigten Portionen geteilt, auf die Verdichtungstemperaturen abgekühlt (135, 115 oder 95 °C) und dann verdichtet.

Das weitere Vorgehen entspricht den zuvor dargestellten Varianten, inkl. der Korrektur der Raumdichten. Die ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper über die Dickenänderung und die Tauchwägung nach 100 und 400 Gyrationen bei den Verdichtungstemperaturen 135, 115 und 95 °C sind in Tab. 3-24 dargestellt.

Temperatur	Bestimmung der Raumdichte					
	100 Gyrationen			400 Gyrationen		
	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz	Tauchwägung	Dickenänderung	Differenz
°C	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3
135	2,452	2,463	-0,011	2,545	2,538	0,007
115	2,469	2,447	0,022	2,518	2,493	0,025
95	2,436	2,399	0,037	2,484	2,474	0,010

Tab. 3-24: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit Schaumbitumen (Variante V5) nach 100 und 400 Gyrationen

In Bild 3-40 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) über die Anzahl der Gyrationen bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen dargestellt.

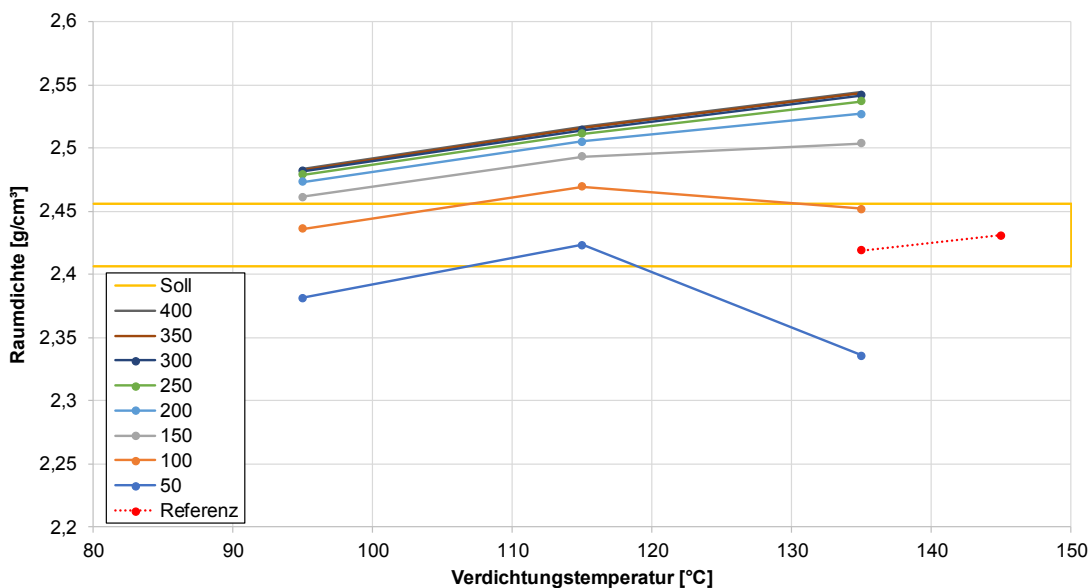


Bild 3-40: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V5 (Schaumbitumen)

Die ermittelten Raumdichten weisen beim Schaumbitumen eine veränderte Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur auf.

Zunächst ist auffällig, dass nach 50 Gyrationen die Raumdichte mit abnehmender Temperatur steigt. Ein Effekt, der möglicherweise auf die unterschiedliche Abkühlzeit nach dem Mischprozess zurückzuführen ist. Es wird vermutet, dass die eingemischten Luft-/Wasserbläschen nach einer bestimmten Abkühlungs- bzw. Wartezeit eine optimale Struktur für die Verdichtung aufweisen. Scheinbar baut sich diese Struktur jedoch mit zunehmender

Verdichtung wieder ab, so dass mit sinkender Temperatur zwar die Start-Verdichtung hoch ist, jedoch danach nur eine relativ geringe Verdichtung erfolgen kann.

In Konsequenz ergibt sich für die Standard-Verdichtung von 100 Gyrationen die in Bild 3-41 dargestellte Regression.

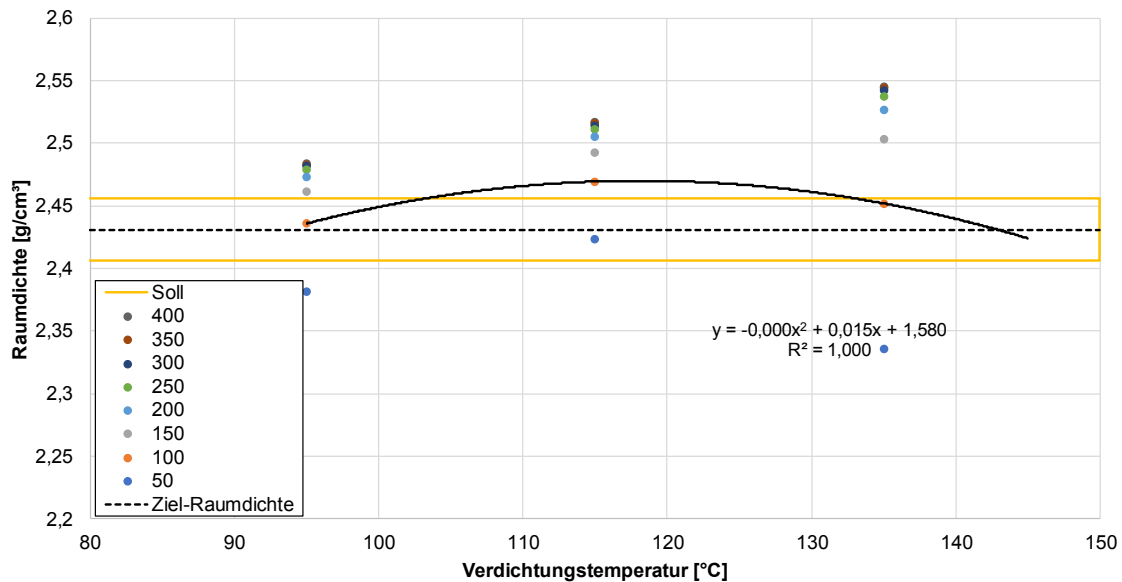


Bild 3-41: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Variante V5 (Schaumbitumen), Kurve für 100 Gyrationen.

Für die Verdichtungstemperaturen von 135 °C und 115 °C werden zu hohe Raumdichten erreicht, während bei 95 °C annähernd die Ziel-Raumdichte getroffen wird.

3.5.6 Zusammenfassung Gyrator-Verdichtung

Auch die Ermittlung einer Verdichtungsfunktion mit dem Gyrator ist prinzipiell möglich. Jedoch konnte nur für einzelne Zusätze nachgewiesen werden, dass eine systematische und plausible Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit und der Verdichtungstemperatur besteht.

Auch hier ist darauf zu achten, dass die über die Dickenänderung berechneten Raumdichten von den per Tauchwägung ermittelten Raumdichten abweichen. Um diese physikalisch nicht zu vermeidende Abweichung zu korrigieren, sind zusätzliche Gyrator-Probekörper mit Standard-Verdichtung notwendig.

Die Raumdichte kann teilweise über eine Funktion in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben werden, wobei hier ein Polynom 2. Grades angewandt wurde. Die ermittelten Funktionen müssen auf Plausibilität überprüft werden, da jeder Zusatz / jedes Verfahren individuell reagieren kann.

Bisher kann nur in Einzelfällen ein Temperaturbereich ermittelt werden, in welchem eine Verdichtung mit der Standard-Verdichtung möglich ist.

Eine Abschätzung, ab welcher unteren Temperatur der Raumdichtebereich praktisch nicht mehr zu erreichen ist, erfolgte nicht, da die knetende Beanspruchung im Gyrator auch bei

niedrigen Temperaturen noch eine Erhöhung der Raumdichte erzielt. Hier ist zu überprüfen, ob diese Raumdichteerhöhung als realistische Verdichtung betrachtet werden kann oder andere Ursachen (z. B. Kornzerreibung) hat.

3.6 Vergleich der Verdichtungsverfahren

Abschließend erfolgt ein Vergleich der Verdichtungsverfahren bezüglich der erreichten Raumdichten, zunächst jeweils bei Standard-Verdichtung ($T = 135\text{ °C}$, 2×50 Schläge, 1 Übergang bei max. Last oder 100 Gyrationen).

In Bild 3-42 sind die erzielten Raumdichten der überprüften temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren bei der Verdichtungstemperatur $T = 135\text{ °C}$, also temperaturabgesenkt, für die unterschiedlichen Verdichtungsverfahren dargestellt.

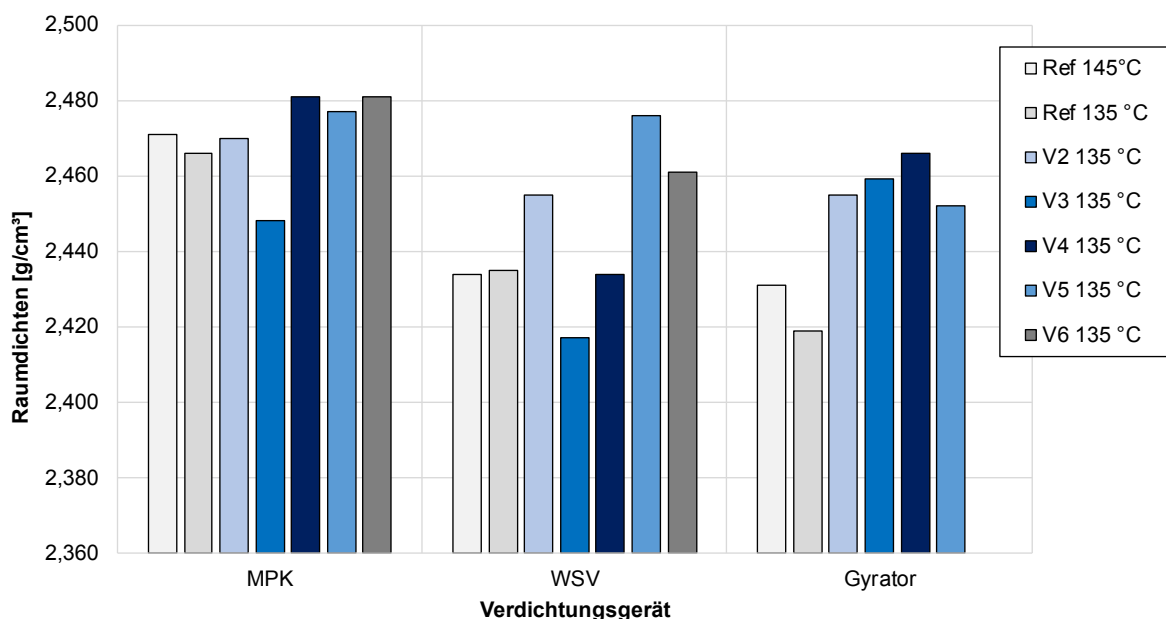


Bild 3-42: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C für alle Asphaltvarianten AC 11 D S (Referenzvariante V1, Varianten V2 bis V6)

Bei den Marshall-Probekörpern und den Asphalt-Probekörpern des Walzsektor-Verdichtungsgeräts kann größtenteils eine ähnliche Systematik erkannt werden. Die temperaturabgesenkten Varianten erreichen bzw. übertreffen die Raumdichten der Referenzvariante. Bei den Gyrator-Probekörpern zeigt sich generell ein höheres Niveau, sobald eine temperaturabsenkende Maßnahme ergriffen wird.

Bis auf Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) lassen sich alle TA-Asphalte mit dem jeweiligen Verdichtungsgerät höher oder zumindest gleich gut verdichten.

Die Variante V3 weist im Labor der TU Braunschweig (MPK und WSV) stets eine geringere Verdichtungswirkung gegenüber der Referenz auf (auch nach Wiederholung). Hingegen werden mit der Gyrator-Verdichtung im Labor der Universität Kassel höhere Raumdichten auf dem Niveau der anderen TA-Asphaltvarianten erzielt. Eine Ursache kann dafür nicht eindeutig ermittelt werden. Trotz des identen Vorgehens in beiden Laboren (gleicher Labormischer, Mischzeit, Mischgutmasse), ist nicht auszuschließen, dass geringe Unterschiede beim Mischvorgang ursächlich sind. Weiterhin wäre es aufgrund der grundsätzlich

verschiedenen Verdichtungssystematiken auch möglich, dass im Gyrator mit der kreisenden, knetenden Wirkung auch schwerer verdichtbares Asphaltmischgut höher verdichtet werden kann. Einen Ansatzpunkt bildet dabei der Mischwiderstand mit einer kreisenden Bewegung, welcher ebenfalls für alle TA-Asphalte (Ausnahme Variante V5 (Schaumbitumen) konnte nicht beurteilt werden) geringer ausfiel.

Mit der zusätzlich aufgenommenen Variante V6 (viskositätsverändernder Zusatz) können ebenfalls höhere Raumdichten trotz Temperaturabsenkung erreicht werden.

Zum Vergleich sind in Bild 3-43 die erzielten Raumdichten nach maximaler Verdichtung für die drei Verdichtungsverfahren (400 MPK- Schläge, 200 WSV-Übergänge bei Maximallast bzw. 400 Gyrationen) aufgetragen.

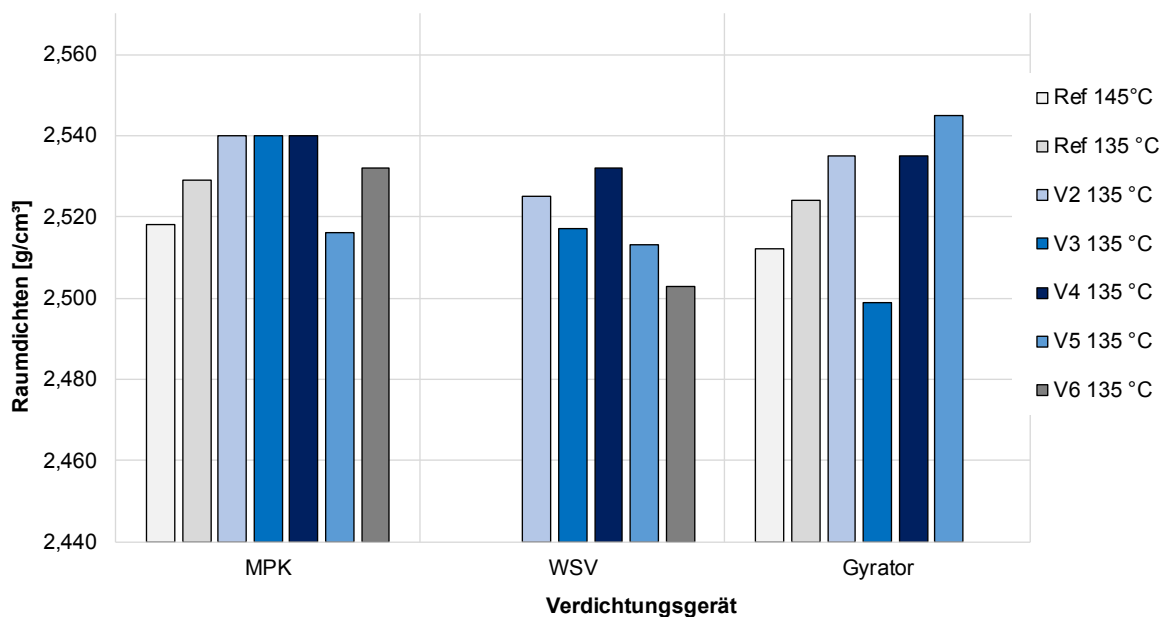


Bild 3-43: Erzielte Raumdichten nach Maximal-Verdichtung bei 135 °C für alle Asphaltvarianten AC 11 D S

Bei maximaler Verdichtung zeigt sich in Bild 3-43 eine etwas veränderte Systematik bezüglich der Raumdichten.

Bei der Marshall-Verdichtung weist jetzt das Schaumbitumen (Variante V5) die geringsten Raumdichten auf. Da diese Proben im Labor der Universität Kassel hergestellt wurden, können sowohl die veränderten Laborbedingungen, als auch möglicherweise vorhandenes, nicht komprimierbares, Wasser einen Einfluss auf das Ergebnis gehabt haben.

Für das Walzsektor-Verdichtungsgerät wurden keine Referenz-Proben mit maximaler Verdichtung hergestellt. Insgesamt erreichen die Asphalt-Probekörper jedoch immer die geringsten Raumdichten, während die Gyrator-Probekörper meist das Niveau der Marshall-Probekörper erreichen. Eine mögliche Ursache der geringen Raumdichten für die Asphalt-Probekörper stellt die unterschiedliche Probekörpergeometrie dar, welche in der Tauchwägung zu geringeren Werten führt.

Weiterhin ist auffällig, dass die Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz) im Gyrator eine geringe Enddichte erreicht. Hier besteht der Verdacht, dass dieser Zusatz oder der Gyrator empfindlich auf geringe Variationen in der Herstellung (ggf. auch Verdichtung) reagiert.

Eine weitere Systematik bezüglich der Raumdichten ist nicht erkennbar.

Im Weiteren werden die erzielten Raumdichten nach Standard-Verdichtung für unterschiedliche Temperaturen betrachtet (Bild 3-44 bis Bild 3-46).

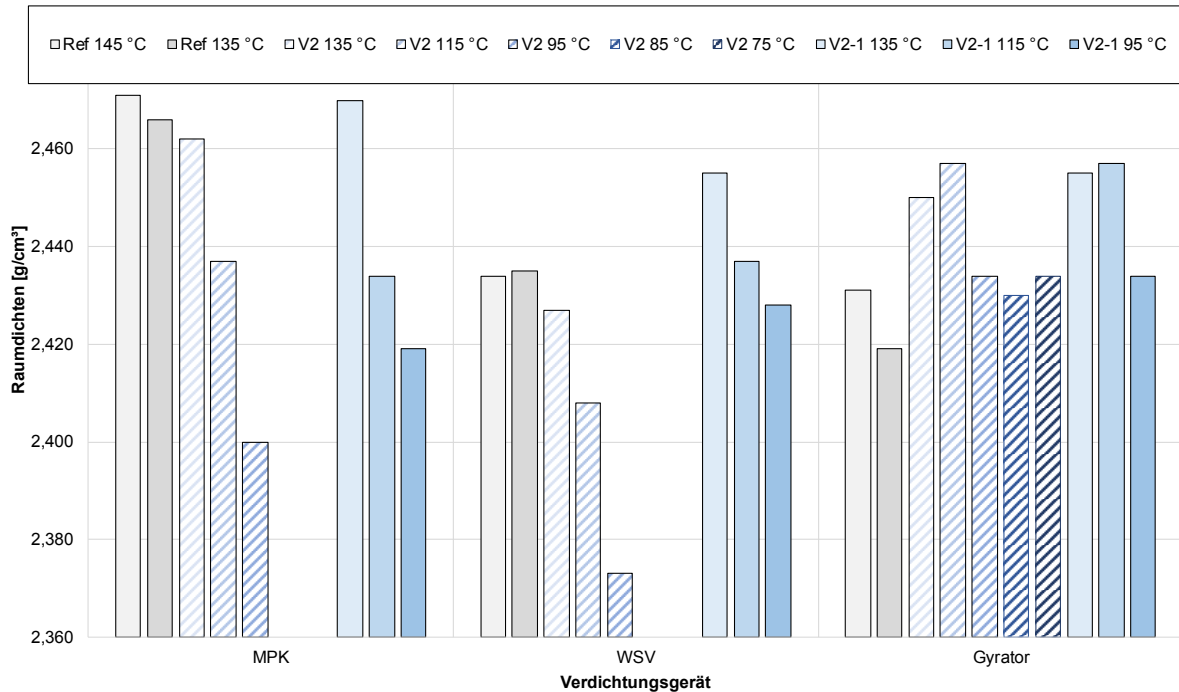


Bild 3-44: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V2 – AC 11 D S, Oberflächenaktiver Zusatz

Die gestrichelten Varianten in Bild 3-44 stellen die Ergebnisse nach Wiedererwärmung dar und sind nur zur Information dargestellt.

Generell weisen die Raumdichten der Marshall-Probekörper als auch der Asphalt-Probekörper (mit oder ohne Wiedererwärmung) eine plausible Systematik, d. h. Temperaturabhängigkeit, auf. Die Raumdichten der mit dem Gyrator hergestellten Probekörper (mit oder ohne Wiedererwärmung) weisen dagegen eine nur schwache Systematik auf.

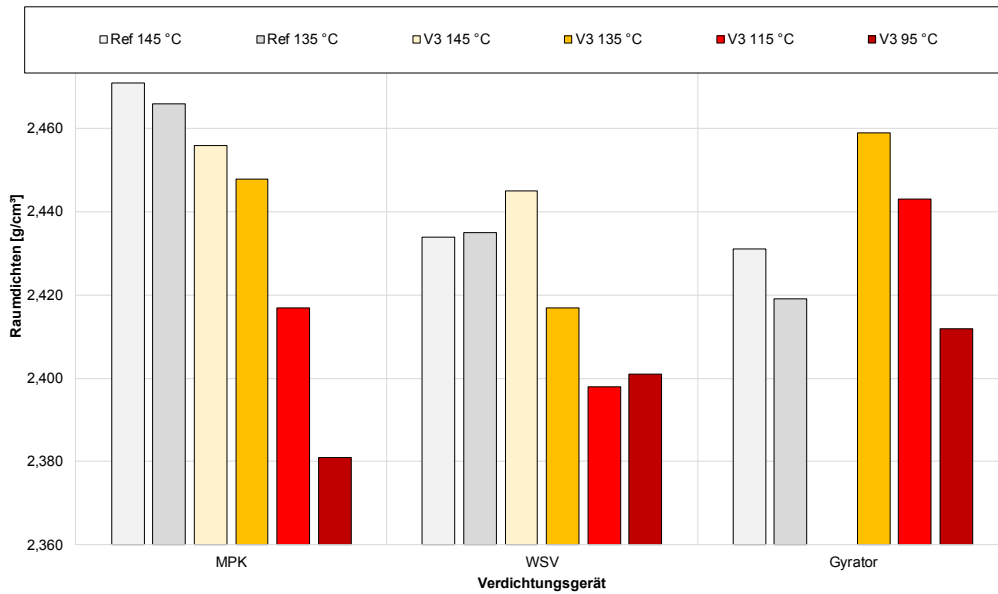


Bild 3-45: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V3- AC 11 D S, reaktivmodifizierender Zusatz

Bezüglich der Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) weisen alle Verdichtungsverfahren in Bild 3-45 eine systematische, plausible Abhängigkeit von der Verdichtungs-temperatur auf. Allerdings können mit dem Marshall-Verdichtungsgerät nicht die Raumdichten der Referenz erreicht werden. Mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät ist es auch nur bedingt möglich. Der Gyrator erzielt für diese Variante die beste Verdichtungswirkung.

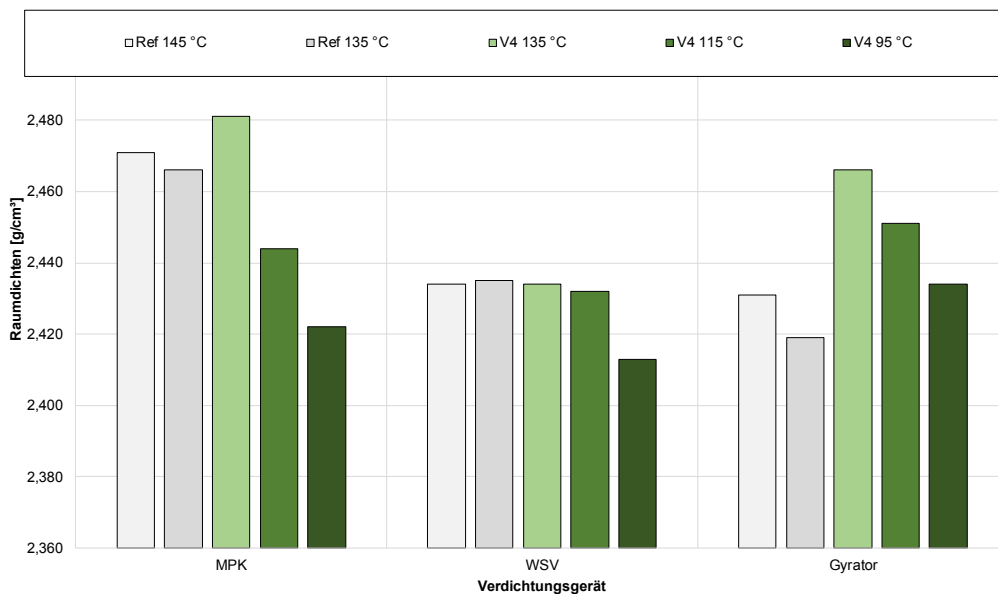


Bild 3-46: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V4 – AC 11 D S, Zeolith

Bezüglich der Variante mit Zeolith erreichen alle Verdichtungsgeräte eine plausible Temperaturabhängigkeit der erzielten Raumdichten, siehe Bild 3-46. Für das Walzsektor-Verdichtungsgerät wird bei 135 °C nur bedingt die erwartete Raumdichte erreicht, so dass

hier möglicherweise ein Ausreißer vorliegt. Auch für diesen Zusatz erzielt der Gyrator die beste Verdichtung bezüglich der Referenzvariante.

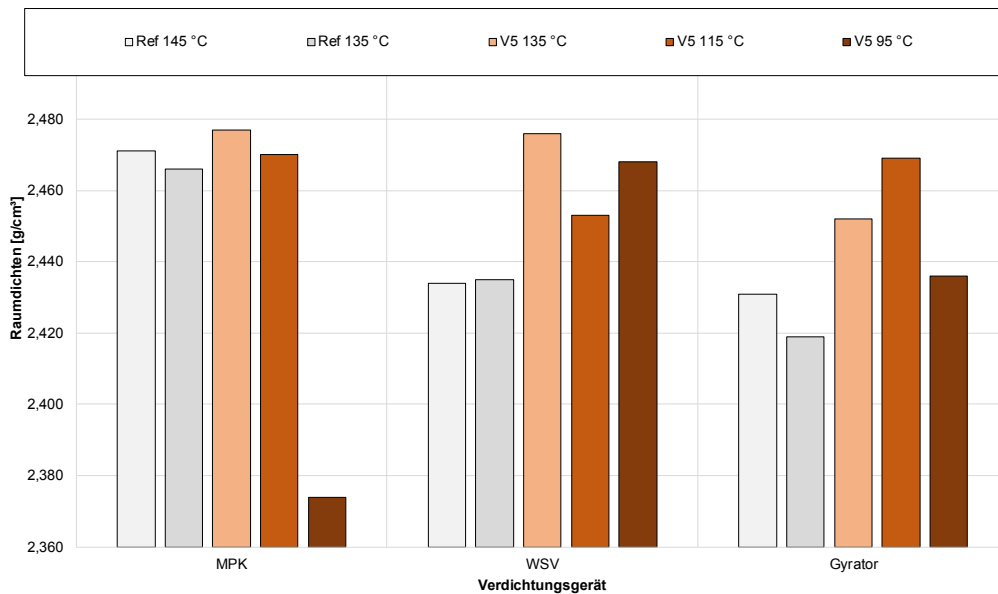


Bild 3-47: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V5 – AC 11 D S, Schaumbitumen

Bild 3-47 zeigt, dass mit dem Schaumbitumen keine plausible Systematik der Raumdichten bezüglich der Temperaturabhängigkeit erzielt wird. Allerdings können mit allen drei Verdichtungsverfahren bei 135 °C und 115 °C höhere Raumdichten gegenüber der jeweiligen Referenzvariante erzielt werden. Auffällig ist, dass beim Marshall-Verdichtungsgerät bei 95 °C eine vergleichsweise niedrige Raumdichte erzielt wird, was ggf. als Ausreißer gewertet werden kann.

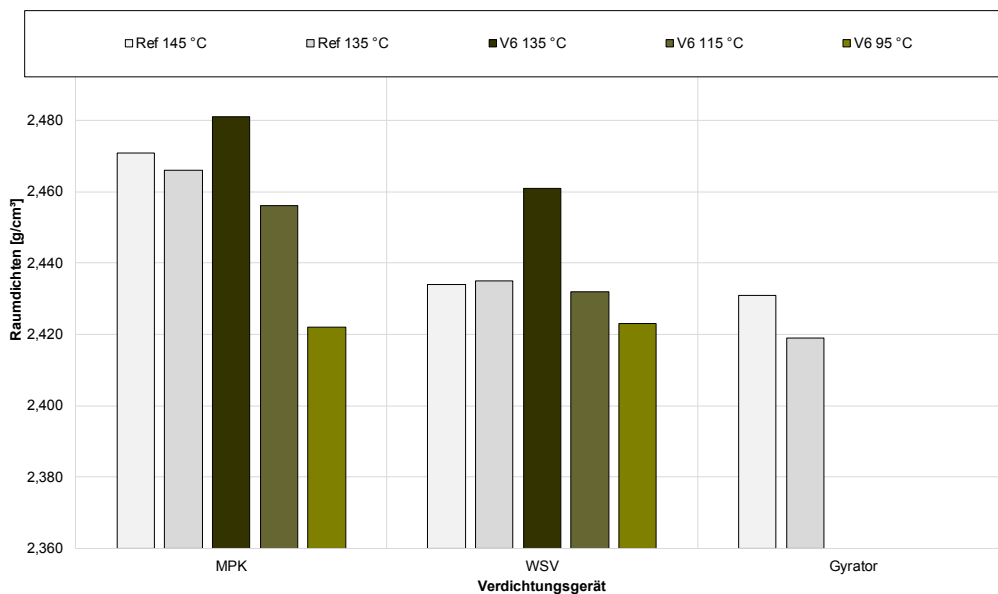


Bild 3-48: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V6 – AC 11 D S, viskositätsverändernder Zusatz

Die zusätzlich aufgenommenen Varianten mit viskositätsveränderndem Zusatz nach TL VBit-StB 22 in Bild 3-48 wurden nur mit dem Marshall- und dem Walzsektor-Verdichtungsgerät überprüft. Hier zeigt sich eine plausible Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur. Weiterhin kann die temperaturabsenkende Wirkung in beiden Verdichtungsgeräten nachgewiesen werden.

Mit den erzielten Ergebnissen, weisen die Marshall-Verdichtung und die Walzsektor-Verdichtung erwartete und plausible Raumdichten auf. Beim Gyrator ist dies nur teilweise so. Es wird grundsätzlich eine höhere Verdichtung erzielt, teilweise sind die Raumdichten aber nicht plausibel.

Eine Übersicht in Tab. 3-25 zeigt die bisher überprüften Varianten und deren Systematik bezüglich der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF). In den meisten Fällen liegt eine systematische Abhängigkeit vor.

Varianten		Anwendung TAVF		
		MPK	WSV	Gyrator
V1	Referenz	✓	✓	(✓)
V2	oberflächenaktiver Zusatz wiedererwärmt	✓	✓	(✓)
V2-1	oberflächenaktiver Zusatz ohne Wiedererwärmung	✓	✓	(✓)
V3	reaktivmodifizierender Zusatz	≈	≈	✓
V4	Zeolith	✓	✓	✓
V5	Schaumbitumen	(✓)	(✓)	(✓)
V6	viskositätsverändernder Zusatz	✓	✓	-
✓ = Ergebnisse plausibel (✓) = Ergebnisse teilweise plausibel ≈ = TAVF funktioniert, Raumdichte kann aber nicht erreicht werden				

Tab. 3-25: Übersicht der Varianten bei Anwendung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF)

Bisher weisen die Marshall-Verdichtung und die Walzsektor-Verdichtung eine Systematik auf, auch wenn die erzielte Verdichtung ggf. nicht direkt mit der Praxis vergleichbar ist, sondern nur korreliert.

Mit dem Gyrator werden bei einer Temperaturabsenkung um 10 °C gegenüber der Referenz für jede temperaturabsenkende Variante höhere Raumdichten erzielt.

3.7 Statistische Auswertung

Neben der Auswertung der erzielten Ergebnisse in Form der Raumdichten und der Temperaturabhängigkeit erfolgt eine statistische Analyse der Streumaße der erzielten Raumdichten. Dazu werden die Variationskoeffizienten (= Standardabweichung / Mittelwert) der ermittelten Raumdichten überprüft. Ein Vergleich der Mittelwerte der Ergebnisse ist nicht zielführend, da diese technisch bedingt auf unterschiedlichen Niveaus liegen. Die Streumaße sind in den folgenden Kapiteln für die unterschiedlichen Verdichtungsgeräte getrennt ausgewertet.

3.7.1 Marshall-Verdichtung

In der Übersicht in Bild 3-49 sind alle Variationskoeffizienten der ermittelten Raumdichten am MPK dargestellt. Dabei sind sowohl Gruppen bestehend aus zwei und fünf Probekörpern dargestellt.

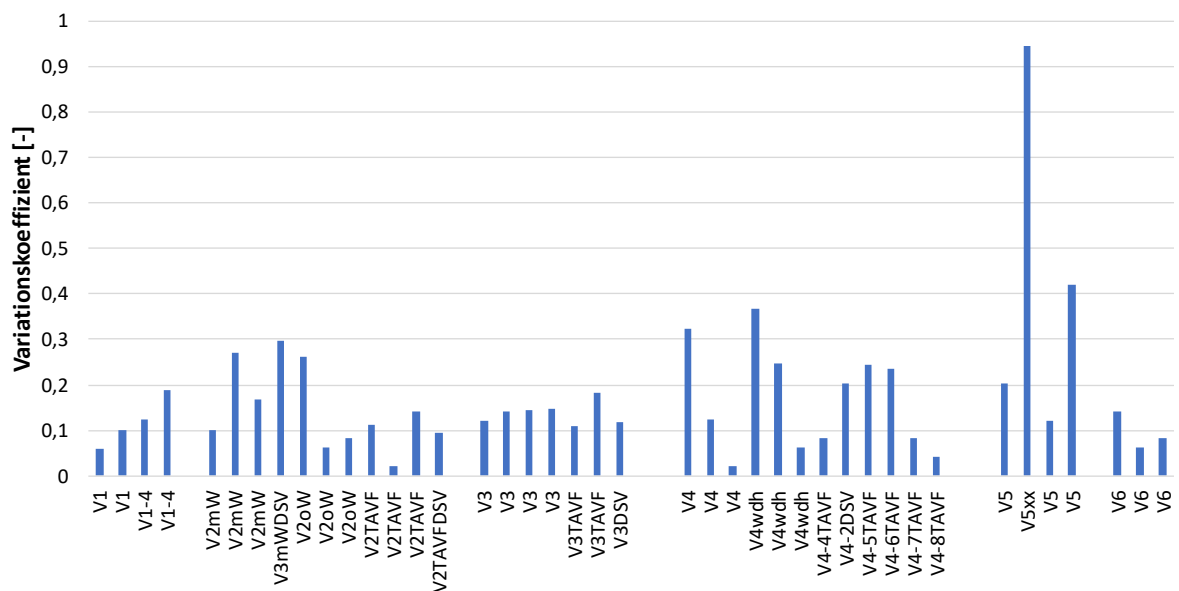


Bild 3-49: Variationskoeffizienten aller Serien von Probekörpern, AC 11 D S, Marshall-Verdichtung

In Bild 3-49 fällt zunächst bei Variante 5 (Schaumbitumen) ein hoher Wert auf, der aber als technischer Ausreißer identifiziert und im Folgenden nicht berücksichtigt wird.

Die Betrachtung der einzelnen temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren lässt keine Abhängigkeiten erkennen. Für alle Zusätze / Verfahren treten sowohl hohe, als auch niedrige Streumaße auf. Eine Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur wird nicht erkannt.

Der Mittelwert der hier erzielten Standardabweichungen beträgt $0,0042 \text{ [g/cm}^3]$ mit einer Standardabweichung von $0,0037 \text{ [g/cm}^3]$. Der Wert von $0,0037$ bedeutet, dass große Streuungen bei den Abweichungen existieren. Die Standardabweichungen sind also teils hoch, teils niedrig; es existiert keine erkennbare Systematik im Streumaß (Bestätigung von Bild 3-49).

Der Mittelwert der Variationskoeffizienten ergibt einen Wert von 0,1721 [%] mit einer Standardabweichung von 0,1526 [%]. Auch hier zeigen sich also große Streuungen im Variationskoeffizienten und bestätigen, dass keine Systematik vorhanden ist.

Im Folgenden werden nur Varianten mit 5 hergestellten Probekörpern betrachtet, da hier präzisere Streumaße ermittelt werden können, siehe Bild 3-50.

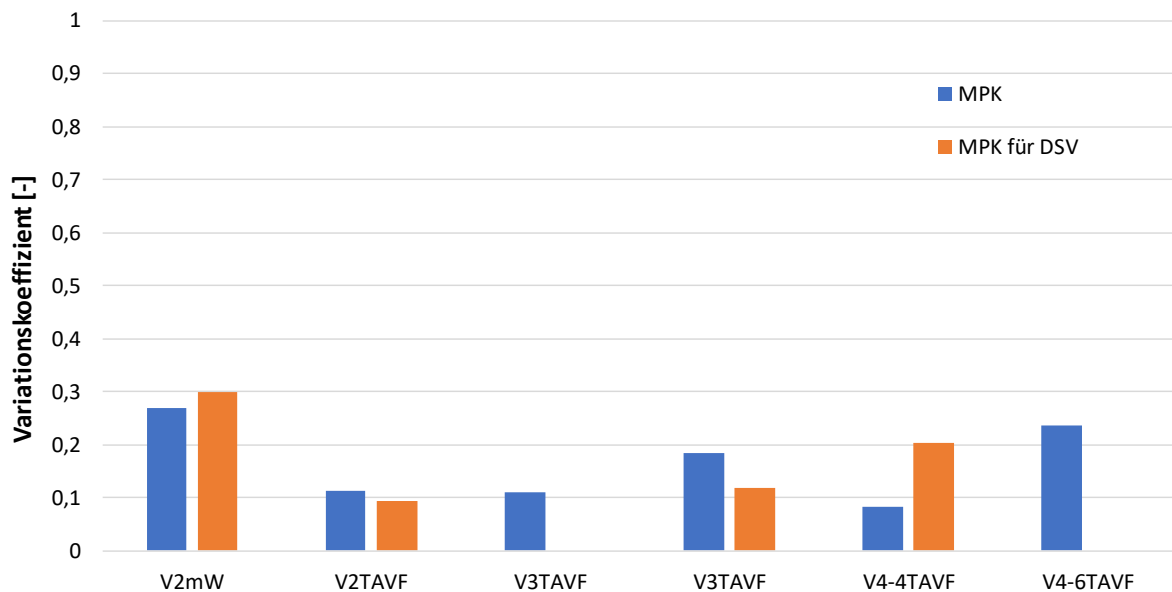


Bild 3-50: Variationskoeffizienten aller Serien von Probekörpern mit 5 Probekörpern, AC 11 D S, Marshall-Verdichtung

In Bild 3-50 weist die nicht praxisrelevante Variante V2 (oberflächenaktiver Zusatz) mit Wiedererwärmung die schlechtesten Streumaße auf, wird aber nicht weiter berücksichtigt. Somit liegen Variationskoeffizienten in einem Bereich bis ca. 0,2 [%], wobei keine Ausreißer existieren.

Der Mittelwert der Standardabweichung dieser 5er Reihen liegt bei 0,0042 g/cm³ mit einer Standardabweichung von 0,0018 g/cm³. Der Mittelwert ist somit gleich dem Mittelwert zuvor, aber es sind deutlich weniger Streuungen in den Standardabweichungen vorhanden. Die Einzelwerte haben damit für jede Serie, d. h. Zusatz / Verfahren, tendenziell eine vergleichbare Streuung.

Der Mittelwert der Variationskoeffizienten liegt bei 0,1705 % mit einer Standardabweichung von 0,0741 %. Auch hier ist der Variationskoeffizient fast gleich, besitzt aber deutlich reduzierte Streumaße. Das lässt auch hier die Schlussfolgerung zu, dass die Streumaße aller Varianten vergleichbar sind.

Es kann somit das Fazit gezogen werden, dass bei der Betrachtung von nur 2 Probekörpern zu große Streumaße ermittelt werden. Da hier mit nicht optimierten Kombinationen von Zusatz und Mischgutsorte sowie bei unterschiedlichen, meist niedrigen, Verdichtungstemperaturen verdichtet wurde, besteht die Gefahr, dass 2 Probekörper die Streumaße nicht repräsentativ wiedergeben.

3.7.2 Walzsektor-Verdichtung

In der Übersicht in Bild 3-51 sind alle Variationskoeffizienten der ermittelten Raumdichten dargestellt. Um statistisch auswertbare Werte zu erhalten, werden jedoch nicht die Raumdichten der Platten (jeweils nur eine Platte), sondern der daraus gebohrten drei Probekörper (\varnothing 100 mm) analysiert.

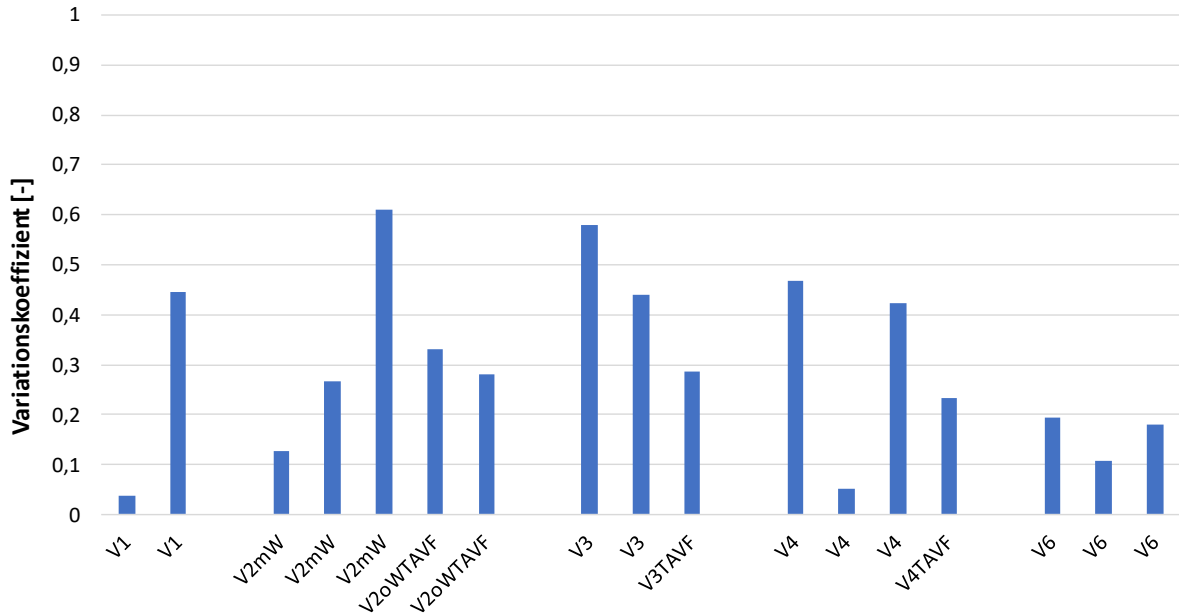


Bild 3-51: Variationskoeffizienten aller Serien von aus Platten gebohrten Probekörpern, AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Auch hier lassen sich für die einzelnen temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren keine Abhängigkeiten erkennen. Für alle Zusätze / Verfahren treten sowohl hohe, als auch niedrige Streumaße auf.

Der Mittelwert der Standardabweichung beträgt hier $0,0073 \text{ g/cm}^3$ mit einer Standardabweichung von $0,0042 \text{ g/cm}^3$. Die Streumaße liegen hier auf einem höheren Niveau gegenüber der Marshall-Verdichtung, streuen aber gleich stark.

Dies zeigt sich auch im Mittelwert der Variationskoeffizienten mit dem Mittelwert von 0,2974 % und einer Standardabweichung von 0,1696 %. Der Variationskoeffizient ist somit deutlich höher gegenüber der Marshall-Verdichtung, streut aber genauso.

Damit liegen insgesamt größere Streumaße vor, im Wesentlichen für alle überprüften Varianten.

3.7.3 Gyrator-Verdichtung

In der Übersicht in Bild 3-52 sind alle Variationskoeffizienten der ermittelten Raumdichten dargestellt. Auch hier sind Gruppen, bestehend aus drei Probekörpern dargestellt.

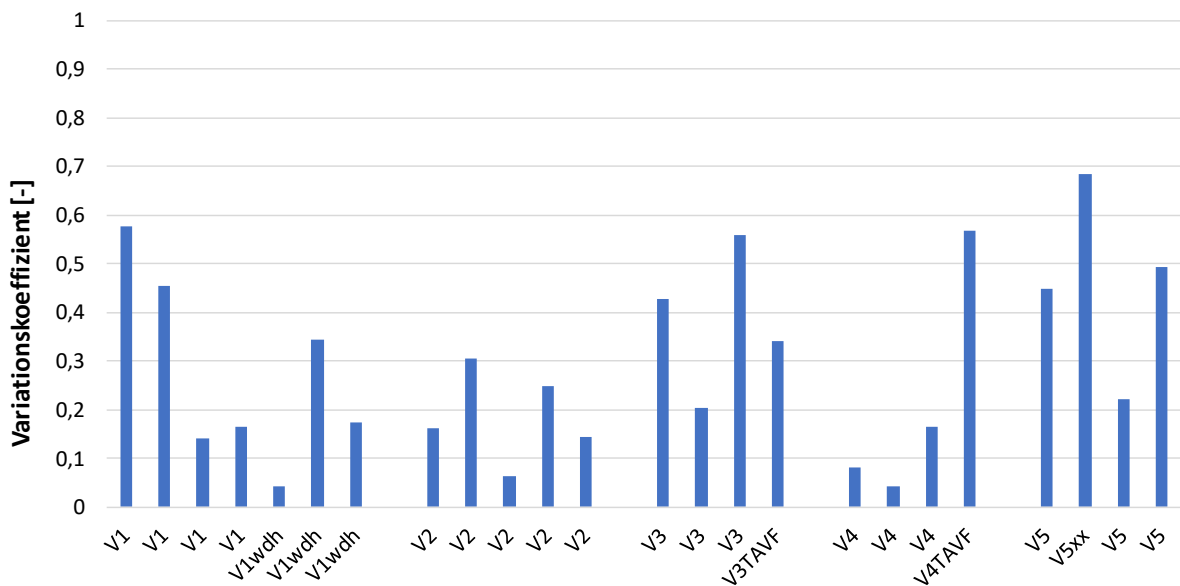


Bild 3-52: Variationskoeffizienten aller Serien von Probekörpern, AC 11 D S, Gyrator-Verdichtung

Auch hier zeigt Bild 3-52, dass keine Systematik bezüglich der Streumaße vorliegt. Der Mittelwert der Standardabweichung liegt bei $0,0071 \text{ g/cm}^3$ mit einer Standardabweichung von $0,0045 \text{ g/cm}^3$. Damit liegen die Standardabweichungen gegenüber der Marshall-Verdichtung auf einem höheren Niveau, streuen aber gleich stark. Dies ist vergleichbar zur Walzsektor-Verdichtung.

Diese Streuungen zeigen sich auch im Mittelwert der Variationskoeffizienten von $0,2936 \%$ und einer Standardabweichung von $0,1872 \%$. Damit liegt der Variationskoeffizient deutlich höher gegenüber der Marshall-Verdichtung, streut aber wiederum genauso stark.

Auch hier liegen insgesamt größere Streumaße vor, im Wesentlichen für alle überprüften Varianten.

3.7.4 Zusammenfassung der statistischen Auswertung

Die zuvor ermittelten Streumaße sind in Tab. 3-26 zusammengefasst.

Merkmal	MPK	MPK-5	WSV	Gyrator
Anzahl	112	50	50	54
Standardabweichung i.M.	0,0042	0,0042	0,0073	0,0071
Standardabweichung StdAbw.	0,0037	0,0018	0,0042	0,0045
Variationskoeffizient i.M.	0,1721	0,1705	0,2971	0,2936
Variationskoeffizient StdAbw.	0,1526	0,0741	0,1696	0,1872

Tab. 3-26: Übersicht der Streumaße Standardabweichung und Variationskoeffizient für die Raumdichten der unterschiedlich hergestellten Varianten

Der Variationskoeffizient als niveaunabhängiges Streumaß weist für die Marshall-Verdichtung annähernd nur halb so große Werte auf, d. h. geringere Schwankungen der Raumdichte innerhalb der Serien hergestellter Probekörper. Dieses Niveau wird erreicht, obwohl größtenteils nur mit zwei Probekörpern die Streumaße ermittelt werden (sehr ungünstige Bedingungen). Wird die Anzahl der Probekörper auf 5 erhöht, können die Streumaße bei der Marshall-Verdichtung weiter reduziert werden.

3.8 Ermittlung des Verformungswiderstands

Neben der erzielten Verdichtung der Probekörper soll auch überprüft werden, ob die Verdichtungsverfahren und die verschiedenen Verfahren zur Temperaturabsenkung den Verformungswiderstand beeinflussen.

Dazu erfolgt mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch eine Überprüfung der Standfestigkeit der Varianten.

Da der ursprünglich geplante Versuchsumfang (Walzsektor-Verdichtung, eine temperaturabgesenkte Variante) keine Aussagen bezüglich der Temperaturabhängigkeiten und der nicht normgerechten Herstellung zuließ, wurden zusätzliche Varianten in den Prüfumfang aufgenommen.

Die Prüfungen wurden gemäß den TP Asphalt-StB Teil 25 B1 durchgeführt, zunächst an aus den Platten gebohrten Probekörpern, nachfolgend auch an Marshall-Probekörpern und Gyrator-Probekörpern. Alle Probekörper wurden dabei auf 60 mm Höhe geschliffen.

3.8.1 Ergebnisse der Walzsektor-Verdichtung

In Tab. 3-27 ist eine Übersicht der Varianten zur Ermittlung des Verformungswiderstands dargestellt.

Varianten		Verdichtungs- temperatur	Anzahl Probekörper
Referenz	V1-145	145 °C	3
	V1-135	135 °C	3
V2 (oberflächenaktiver Zusatz, mit Wiedererwärmung)	V2-135	135 °C	3
	V2-115	115 °C	3
	V2-95	95 °C	3
V2-1 (oberflächenaktiver Zusatz, ohne Wiedererwärmung)	V2-1-115	115 °C	3
V3 (reaktivmodifizierender Zu- satz)	V3-145	145 °C	3
	V3-115	115 °C	3
V4 (Zeolith)	V4-135	135 °C	3
	V4-115	115 °C	3
	V4-95	95 °C	3
V5 (Schaumbitumen)	V5-115	115 °C	4
V6 (VVZ)	V6-135	135 °C	3
	V6-115	115 °C	3
	V6-95	95 °C	3

Tab. 3-27: Übersicht der Variationen AC 11 D S für die Ermittlung des Verformungswiderstands (Walzsektor-Verdichtung)

Bild 3-53 zeigt die ermittelte Anzahl an Lastwechseln im Wendepunkt bzw. bei Versuchs-ende mit den zugehörigen Raumdichten der präparierten Probekörper.

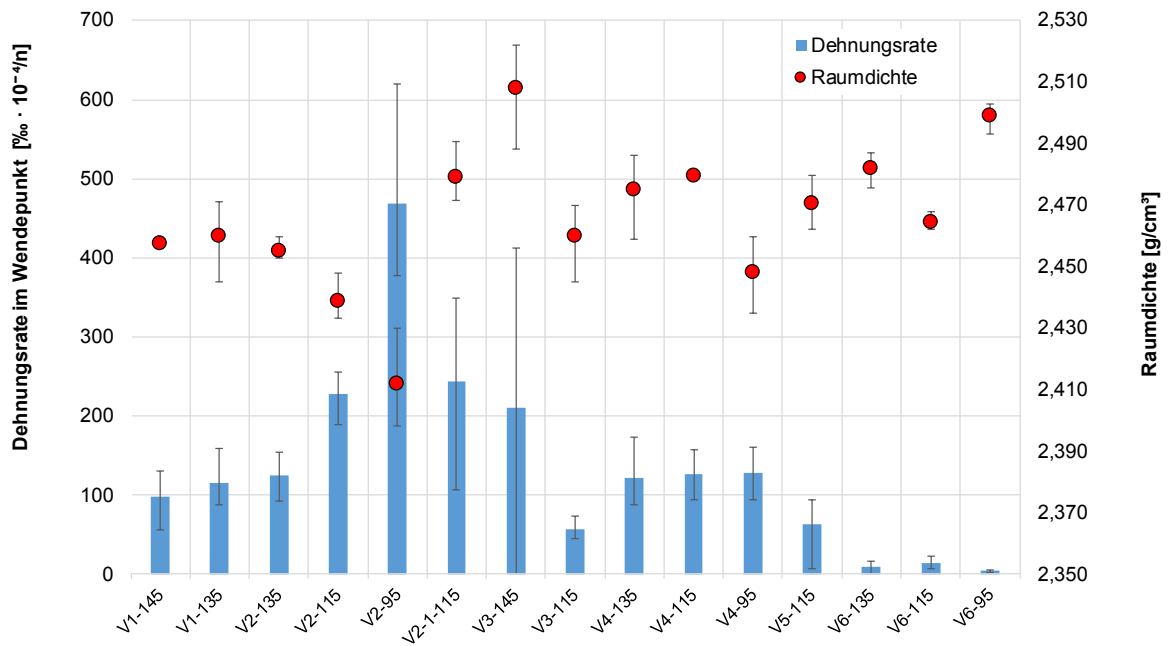


Bild 3-53: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende und Raumdichten der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Die Ergebnisse liegen überwiegend in einem Bereich von ca. 100 bis 250 $\% \cdot 10^{-4}/n$ und weisen damit einen geringen Verformungswiderstand auf. Die Probe V2-95 (oberflächenaktiver Zusatz) fällt durch deutlich größere Werte auf, was der geringeren Raumdichte geschuldet ist. Die zusätzlichen Varianten V6-135, V6-115 und V6-95, also die Varianten mit einem viskositätsveränderten Bindemittel (VVZ), weisen keinen Wendepunkt auf und deutlich geringere Dehnungsraten als die Referenzvariante und auch alle anderen Varianten. Dies zeigt eindeutig eine Erhöhung des Verformungswiderstands bei Anwendung eines viskositätsveränderten Bindemittels. Die Raumdichten dieser Varianten sind jedoch mit denen der anderen Varianten vergleichbar.

Insgesamt weisen die Ergebnisse eine Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur auf, mit Ausnahme der Variante V3-145 (reaktivmodifizierender Zusatz), welche stark streuende Ergebnisse aufweist. Zur Kontrolle sind in Bild 3-54 die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Raumdichte dargestellt.

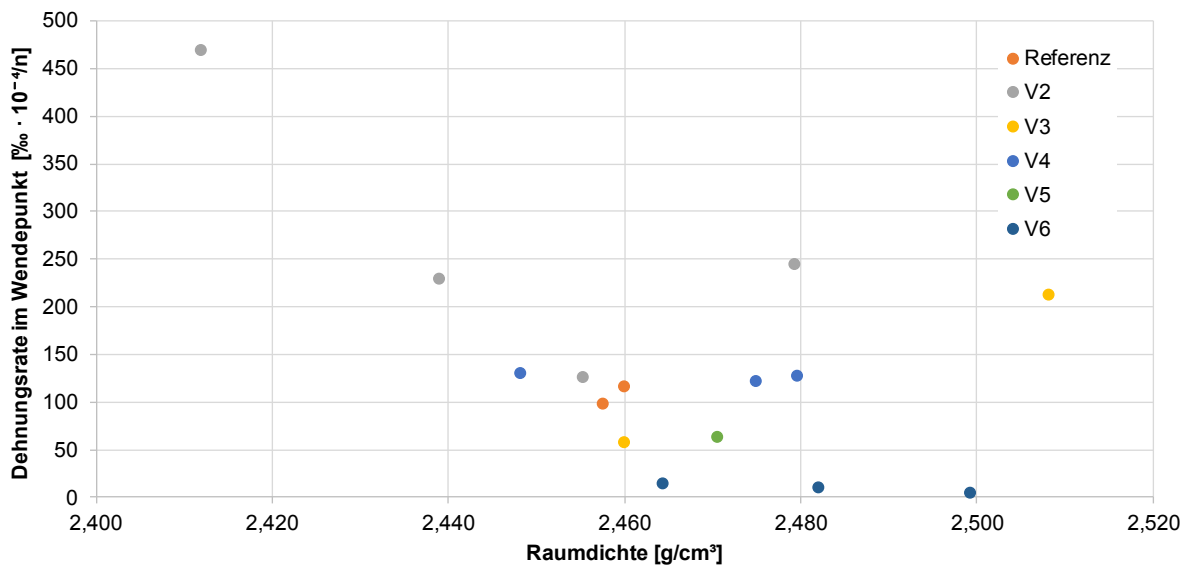


Bild 3-54: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende im Verhältnis zur Raumdichte der Probekörper der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Es zeigt sich, dass unterhalb einer Raumdichte von ca. 2,440 g/cm³ auch der Verformungswiderstand abnimmt. Höhere Werte in der Raumdichte bewirken dagegen kaum eine Veränderung der Dehnungsrate im Wendepunkt. Statistisch können einige Werte als gleich angesehen werden, da sie im Bereich der Wiederholpräzision liegen. Diese wird in Abhängigkeit von der Dehnungsrate hier mit ca. 50 % · 10⁻⁴/n abgeschätzt.

Variante V6 (VVZ) weist – unabhängig von der Raumdichte - einen höheren Verformungswiderstand auf (niedrigste Werte). Als einzige Variante werden hier auch keine Wendepunkte erreicht. Wie zuvor beschrieben, haben die Zusätze offensichtlich eine versteifende Wirkung im Gebrauchstemperaturbereich.

In orange sind die Werte der Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz) eingezeichnet. Trotz der höchsten Raumdichte (V3 bei 145 °C Verdichtungstemperatur) wird eine vergleichsweise schlechte Dehnungsrate erzielt. Bei dieser Variante erreicht lediglich ein Probekörper die 10.000 Lastwechsel (Dehnungsrate 9,1 [% · 10⁴ /n]), während die weiteren beiden den Wendepunkt bereits bei ca. 1.000 Lastwechsel haben. Physikalisch wäre es plausibel, dass das nur der „gute“ Einzelwert repräsentativ ist, jedoch ist diese Aussage mit nur einem Probekörper nicht aussagekräftig. Bei 115 °C Verdichtungstemperatur der gleichen Variante wird eine deutlich niedrigere Raumdichte erzielt, die Dehnungsrate im Wendepunkt ist jedoch vorteilhafter. Eine physikalisch plausible Erklärung gibt es dafür nicht.

Eine ebenfalls eher hohe und nicht plausible Dehnungsrate weist die Variante V2-1 bei 115 °C (oberflächenaktiver Zusatz ohne Wiedererwärmung) auf. Dieses Phänomen soll mit einer weiteren Grafik betrachtet werden.

In Bild 3-55 wird die Dehnung im Wendepunkt dargestellt. Dieses Diagramm zeigt deutlich geringere Unterschiede zur Verformung beim Wendepunkt, wobei die Varianten V6 (viskositätsverändernder Zusatz) ausgeklammert werden müssen, da hier die Dehnungen bei Versuchsende angegeben werden.

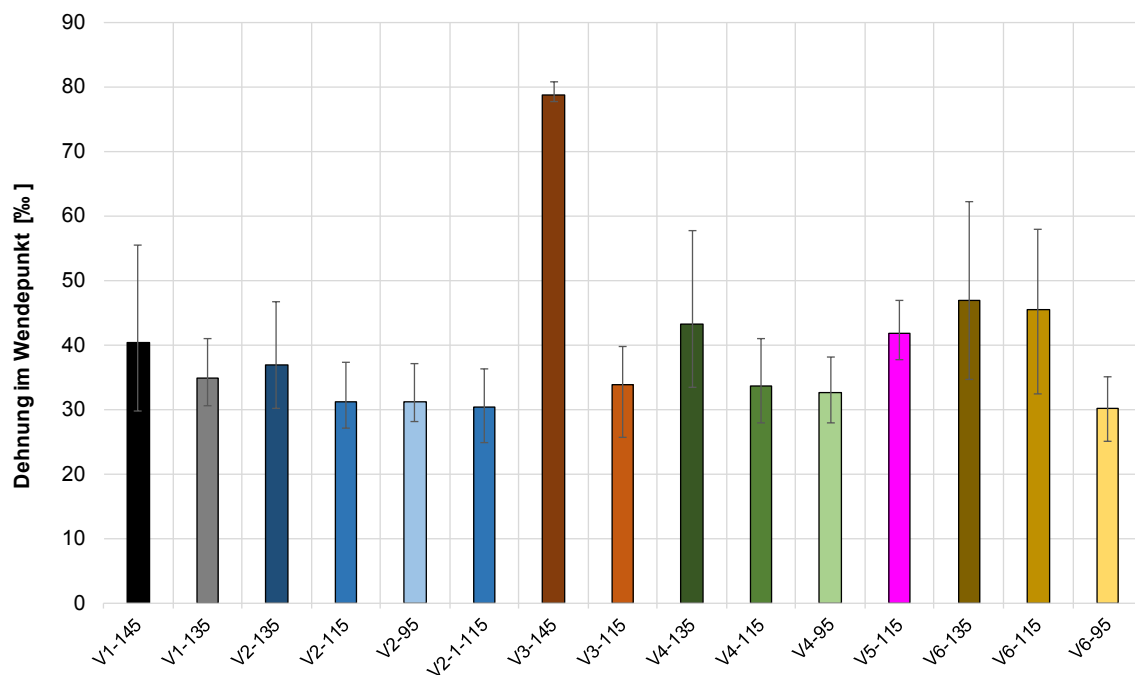


Bild 3-55: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnung im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Die Ausnahme bildet auch hier Variante V3 bei 145 °C (reaktivmodifizierender Zusatz), welche hier auch im Einzelfall das schlechteste Ergebnis darstellt.

Die weiteren Varianten liegen auf einem vergleichbaren Niveau, was bedeutet, dass die Wendepunkte immer zu einer vergleichbaren Dehnung eintreten. Die Probekörper erreichen somit unabhängig vom Zusatz die (annähernd) gleiche Verformung, bevor die überproportionale Verformung (Schädigung) beginnt. Als Schlussfolgerung wäre somit kein bzw. ein kaum versteifender Einfluss der Zusätze vorhanden. Demgegenüber steht weiterhin die Variante V6 mit VVZ, welche eine deutliche Erhöhung des Verformungswiderstands ergibt.

Bild 3-56 zeigt als weitere Information zu den Ergebnissen, die Anzahl der Lastwechsel, bei der die Wendepunkte auftreten.

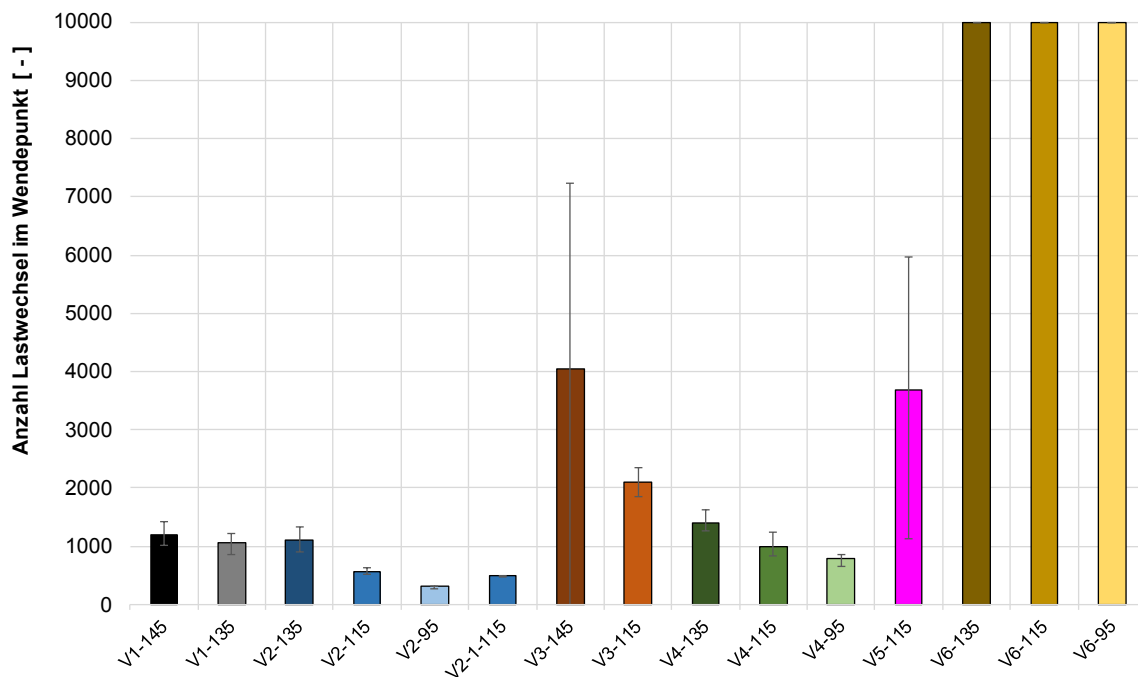


Bild 3-56: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Anzahl der Lastwechsel im Wendepunkt der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

In Bild 3-56 fallen wiederum die Varianten 6 (VVZ) auf, welche keinen Wendepunkt haben und daher 10.000 Lastwechsel erreichen. Weiterhin zeigt Variante V3 (reaktivmodifizierender Zusatz) bei 145 °C Verdichtungstemperatur eine relativ hohe und damit „gute“ Anzahl an Lastwechseln im Wendepunkt an, was in dem einzelnen Ergebnis mit 10.000 Lastwechseln begründet ist. Aber auch Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) bei 115 °C erreicht erst relativ spät den Wendepunkt.

Variante 4 (Zeolith) kann bezüglich der Lage des Wendepunktes mit der Referenzvariante 1 verglichen werden, wogegen Variante 2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei 115 °C, 95 °C und 115 °C ohne Wiedererwärmen recht früh den Wendepunkt erreicht (ungünstiges Verhalten).

Die alleinige Betrachtung des Merkmals Dehnungsrate im Wendepunkt lässt somit keine erschöpfende Betrachtung der Ergebnisse zu. Die in der Prüfvorschrift gedachte Zuordnung „Hohe Dehnungsrate“ = „Wenige Lastwechsel“ = „Schnelles Versagen“ bzw. „Geringe Dehnungsrate“ = „Hohe Lastwechselzahl“ = „Verformungsbeständig“ muss bei der Modifikation nicht immer zutreffend sein.

Diese Aussage verdeutlicht eine Auswertung der Dehnung zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln. Diese Auswertung kann nur im Bereich bis 1.000 Lastwechsel erfolgen, da einige Varianten in diesem Bereich bereits die erlaubten 80 % Dehnung überschreiten. Die so ermittelten Dehnungen sind in Bild 3-57 dargestellt.

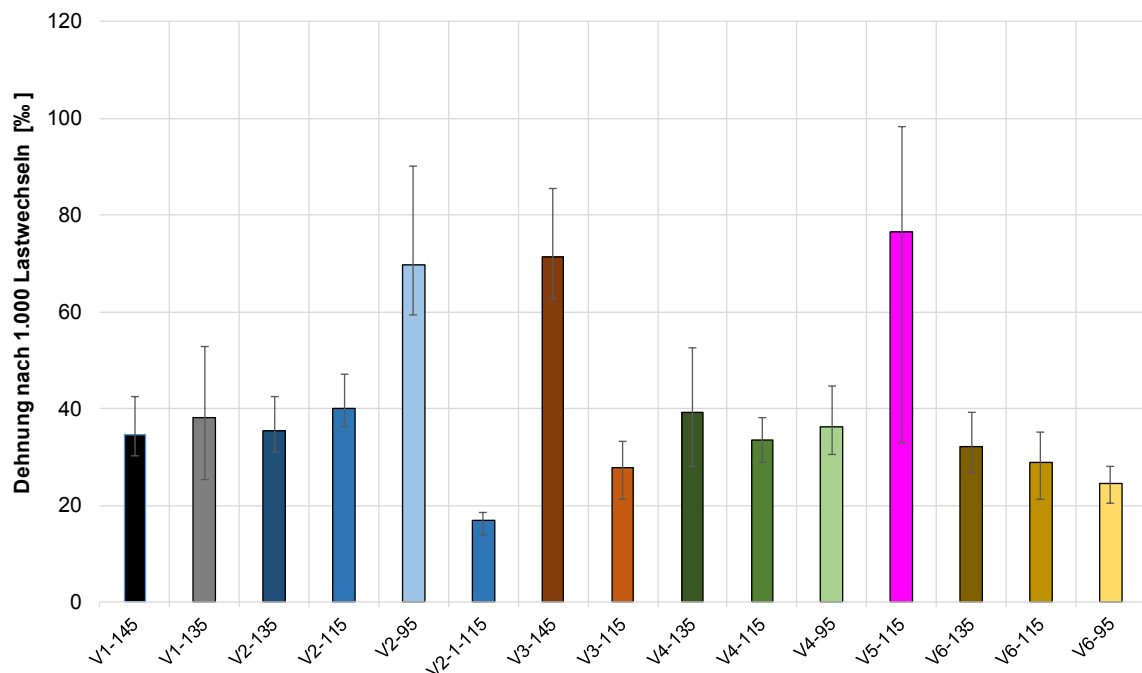


Bild 3-57: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnung nach 1.000 Lastwechseln der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-57 zeigt wiederum, dass in der Anfangsphase des Versuchs einige Varianten bereits hohe Dehnungen aufweisen (V2-95 und V3-145). Dies bestätigt jedoch das Ergebnis der Dehnungsrate im Wendepunkt.

Demgegenüber zeigt Variante V 2-1-115 (oberflächenaktiver Zusatz, ohne Wiedererwärmung) ein relativ gutes Verhalten in der Startphase, was nicht mit dem Ergebnis nach Prüfvorschrift korreliert.

Auch weisen die Varianten V6 (VVZ) in der Startphase ein eher durchschnittliches Verhalten auf, was aber bereits die wesentliche bleibende Dehnung darstellt.

Die weiteren Varianten liegen nach 1.000 Lastwechseln auf einem vergleichbaren Niveau. Eine Unterscheidung bezüglich der Verdichtungstemperatur ist so nicht möglich.

Aufgrund des vorliegenden Datenmaterials kann die Schlussfolgerungen gezogen werden, dass die Dehnungsrate als Ergebnis eine Differenzierung der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und der Temperaturabhängigkeit ermöglicht, jedoch im Einzelfall auch die Lage des Wendepunktes betrachtet werden sollte. Insgesamt weisen die Varianten mit viskositätsverändernden Zusätzen in Relation sehr gute Verformungswiderstände auf, während die weiteren Varianten zur Referenz ähnliche Verformungswiderstände zeigen.

3.8.2 Ergebnisse der Marshall-Verdichtung

Zum Vergleich der Verdichtungsmethoden wurden zusätzlich auch einige Varianten nach Marshall-Verdichtung mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch (DSV) überprüft (siehe Tab. 3-28). Da diese Prüfungen ursprünglich nicht vorgesehen waren, standen teilweise zu wenig Probekörper zur Verfügung. Um die Informationsbasis zu erweitern wurden dennoch alle Proben geprüft.

Varianten		Verdichtungs- temperatur	Anzahl Probekör- per
Referenz	V1-145	145 °C	1
	V1-135	135 °C	1
V2 (oberflächenaktiver Zusatz mit Wiedererwärmung)	V2-135	135 °C	3
	V2-115	115 °C	-
	V2-95	95 °C	-
V3 (reaktivmodifizierender Zusatz)	V3-145	145 °C	5
V4 (Zeolith)	V4-135	135 °C	3
	V4-115	115 °C	-
	V4-95	95 °C	-
V5 (Schaumbitumen)	V5-135	135 °C	2
	V5-115	115 °C	2
	V5-95	95 °C	2
V6 (VVZ)	V6-130	130 °C	5
	V6-110	110 °C	5

Tab. 3-28: Übersicht der Variationen AC 11 D S für die Ermittlung des Verformungswiderstands (Marshall-Verdichtungsgerät)

Die erzielten Ergebnisse sind in Bild 3-58 dargestellt.

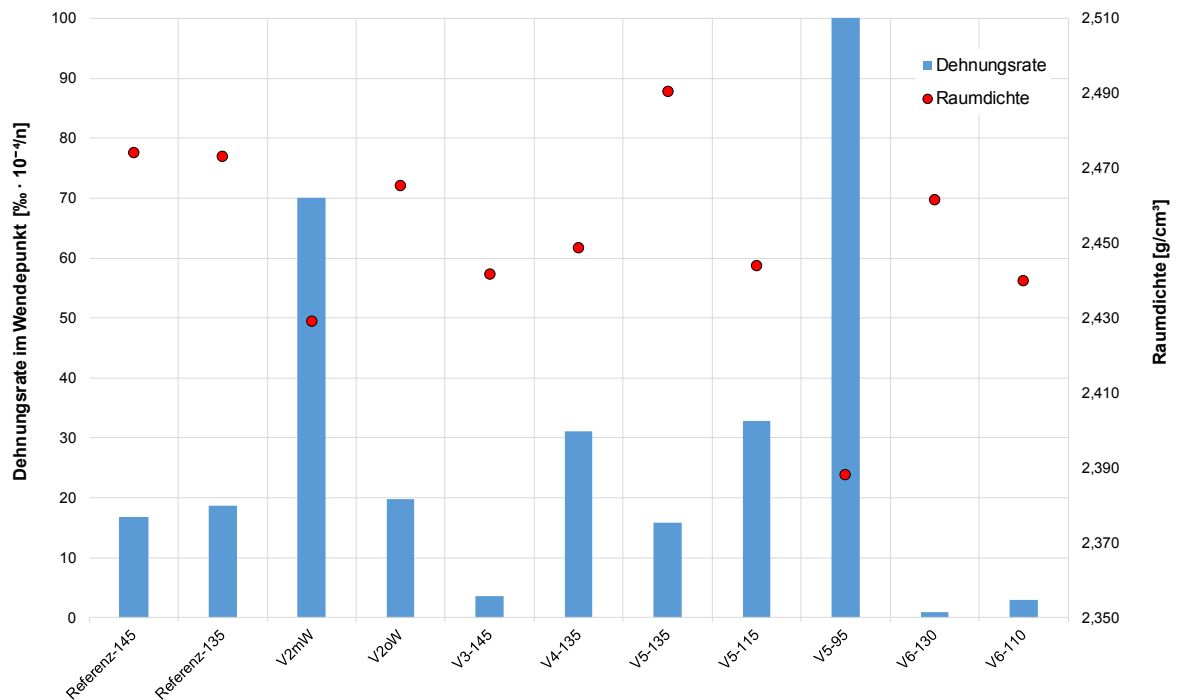


Bild 3-58: Verformungswiderstand: Dehnungsrate im Wendepunkt aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch und entsprechende Raumdichten der Probekörper, AC 11 D S, Marshall-Verdichtungsgerät

Bild 3-58 zeigt grundsätzlich, dass am Marshall-Probekörper deutlich geringere Verformungen und damit Dehnungsraten gegenüber den Varianten aus der Walzsektor-Verdichtung auftreten. Die Varianten V3-145 (reaktivmodifizierender Zusatz), V6-130 (VVZ) und V6-110 (VVZ) erreichen 10.000 Lastwechsel, haben keinen Wendepunkt und weisen somit einen hohen Verformungswiderstand auf.

Variante V2mW (oberflächenaktiver Zusatz mit Wiedererwärmung) weist eine geringe Raumdichte und entsprechend eine hohe Dehnungsrate auf.

Bei der Variante V5 (Schaumbitumen) nimmt die Dehnungsrate erwartungsgemäß mit abnehmender Raumdichte zu. Die Variante V5-95 weist die höchste Dehnungsrate aller Varianten auf. Dies kongruiert mit der deutlich geringeren Raumdichte dieser Variante.

Da hier unterschiedliche temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren überprüft wurden, können die Ergebnisse nur unter Vorbehalt miteinander verglichen werden.

Die Varianten 6 (VVZ) und 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) verändern das Bindemittel und erhöhen die Viskosität, so dass die Ergebnisse plausibel scheinen. Zeolith (Variante V4) bewirkt keine Veränderung im Bitumen. Mit der etwas geringeren Raumdichte werden daher auch etwas höhere Dehnungsraten erzielt.

Dasselbe gilt für die Variante mit Schaumbitumen (V5).

Die Variante 2 (oberflächenaktiver Zusatz) bindet zwar das Bitumen am Gestein, verändert es jedoch nicht.

Unter diesen Gesichtspunkten können die hier untersuchten Varianten als plausibel angesehen werden.

3.8.3 Ergebnisse der Gyrator-Verdichtung

Zusätzlich wurden auch Probekörper, die mittels Gyrator-Verdichtung hergestellt wurden, auf den Widerstand gegen bleibende Verformung anhand des Einaxialen Druck-Schwellversuchs (DSV) geprüft. Da nur 2 Probekörper hergestellt wurden, fand die Prüfung nur an diesen beiden Probekörpern statt. Eine Übersicht über die geprüften Varianten gibt Tab. 3-29.

Varianten		Verdichtungs- temperatur	Anzahl Probekörper
Referenz 1. Mischung	V1-145	145 °C	2
	V1-135	135 °C	2
	V1-125	125 °C	2
	V1-115	115 °C	2
Referenz 2. Mischung	V11-145	145 °C	2
	V11-135	135 °C	2
V2 (oberflächenaktiver Zusatz, ohne Wiedererwärmung)	V2-85	85 °C	5
V3 (reaktiver Zusatz)	V3-105	105 °C	2
	V3-95	95 °C	5
V4 (Zeolith)	V4-95	95 °C	5
V5 (Schaumbitumen)	V5-95	95 °C	5

Tab. 3-29: Übersicht der Variationen AC 11 D S für die Ermittlung des Verformungswiderstands mittels Gyrator-Verdichtung

Die erzielten Ergebnisse sind in Bild 3-59 dargestellt.

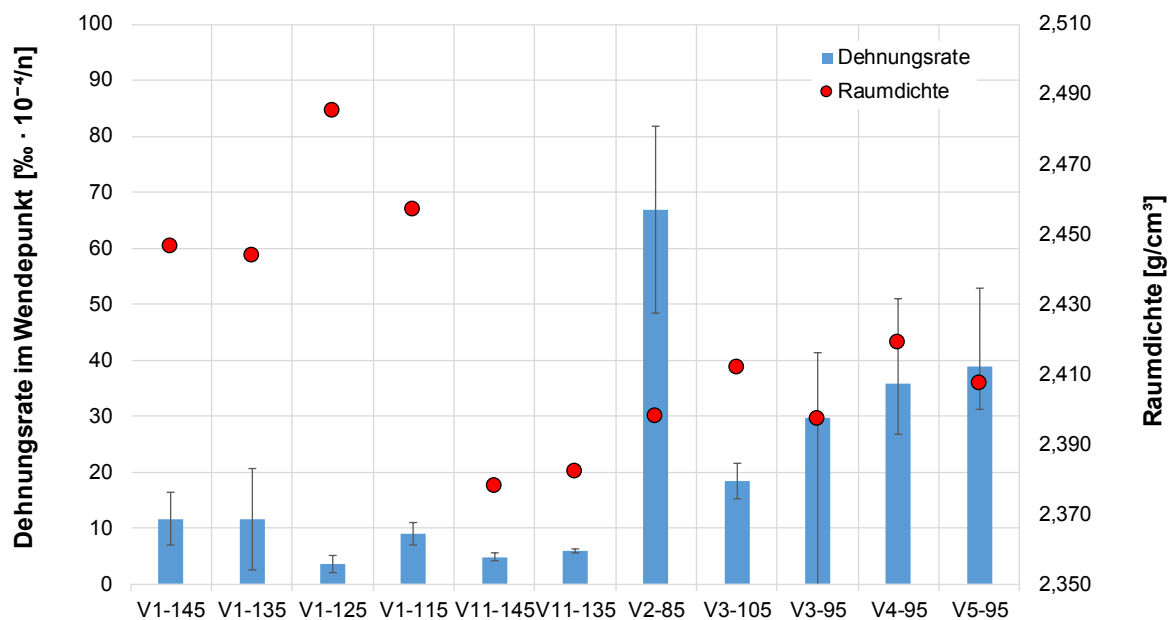


Bild 3-59: Verformungswiderstand: Dehnungsrate im Wendepunkt aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch und Raumdichten der Probekörper AC 11 D S, Gyrator-Verdichtung

Bild 3-59 zeigt, dass die Referenzvarianten aus der 1. Mischgutherstellung (V1) eine deutlich höhere Raumdichte aufweisen als die anderen Varianten. Entsprechend sind die zugehörigen Dehnungsraten im Wendepunkt gering. Die Referenzvarianten aus der 2. Mischgutherstellung (V11) sind jedoch trotz geringerer Raumdichten etwas verformungsresistenter als die Referenz aus der 1. Mischgutherstellung.

Die Varianten V2, V3, V4 und V5 liegen bei Betrachtung der Raumdichte näher am Bereich der Referenz der 2. Mischung. Die Dehnungsraten im Wendepunkt der Varianten V2 bis V5 sind jedoch höher als bei der Referenz V11. Für den Vergleich in der Performance werden die Ergebnisse der ersten Mischgutherstellung herangezogen, da diese eine plausible Abstufung von Raumdichte und Dehnungsrate aufweisen.

Die Variante V2 (oberflächenaktiver Zusatz) hat eine auffällig hohe Dehnungsrate im Wendepunkt. Möglicherweise entsteht hier eine Art „Schmierwirkung“ aufgrund des oberflächenaktiven Zusatzes. Damit wäre der Bindemittelgehalt für diesen Zusatz ggf. zu hoch gewählt.

Die Variante V3 mit dem reaktivmodifizierenden Zusatz zeigt in sich schlüssige Ergebnisse und liegt etwas über der Referenzvariante bezüglich der Raumdichte und damit auch der Dehnungsrate.

Die Variante 4 mit Zeolith und die Variante 5 mit Schaumbitumen sind vergleichbar in ihrer Wirkung und im Verformungsverhalten.

Insgesamt zeigt sich eine bedingt plausible Abhängigkeit von der Raumdichte.

3.8.4 Zusammenfassung zum Verformungswiderstand

Alle überprüften Varianten sind in Tab. 3-30 aufgeführt. Neben der Verdichtungsart und der Verdichtungstemperatur werden die Ergebnisse mit der Referenz der jeweiligen Verdichtungsart verglichen. In der letzten Spalte ist angegeben, ob eine plausible Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur und damit der Raumdichte zu erkennen ist.

Varianten	Verdichtungsart	Verdichtungstemperatur	Vergleich Ergebnis zur Referenz	Abhängigkeit von der Raumdichte?
Referenz	WSV	145 °C	/	Nein
		135 °C		
	Gyr	145 °C		ja
		135 °C		
		125 °C		
		115 °C		
V2 (oberflächenaktiver Zusatz, mit Wiedererwärmung)	WSV	135 °C	O	ja
		115 °C	O	
		95 °C	nv	
V2-1 (oberflächenaktiver Zusatz, ohne Wiedererwärmung)	WSV	115 °C	-	-
	MPK	135 °C	nv	-
	Gyr	85 °C	--	-
V3 (reaktivmodifizierender Zusatz)	WSV	145 °C	-	ja
		115 °C	+	
	MPK	135 °C	(+)	-
		Gyr	105 °C	O
		95 °C	O	
V4 (Zeolith)	WSV	135 °C	O	nein
		115 °C	O	
		95 °C	O	
	MPK	135 °C	nv	-
V5 (Schaumbitumen)	WSV	115 °C	O	-
	Gyr	95 °C	O	-
V6 (VVZ)	WSV	135 °C	++	nein
		115 °C	++	
		95 °C	++	
	MPK	130 °C	(+)	ja
		110 °C	(+)	

nv = nicht vergleichbar, aufgrund der Randbedingungen
+ bzw. ++ = besseres bzw. deutlich besseres Ergebnis im Druck-Schwellversuch
O = gleichbleibendes Ergebnis im Druck-Schwellversuch
- bzw. -- = schlechteres bzw. deutlich schlechteres Ergebnis im Druck-Schwellversuch
(+) = kein direkter Vergleich möglich, aber mit hoher Wahrscheinlichkeit vorteilhafter

Tab. 3-30: Übersicht der Variationen für die Ermittlung des Verformungswiderstands (Walzsektor-Verdichtung, Gyrator-Verdichtung und Marshall-Verdichtung)

Die Variante 6 (VVZ) zeigt durchweg vorteilhaftere Ergebnisse gegenüber der Referenz. Eine Temperaturabhängigkeit ist nur für die Marshall-Verdichtung erkennbar.

Demgegenüber weist Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) nur bedingt eine vorteilhaftere, eher eine gleichbleibende Performance. Die Temperaturabhängigkeit ist gut erkennbar.

Die Varianten mit Zeolith (Variante V4) und Schaumbitumen (Variante V5) weisen eine zur Referenz gleiche Performance auf. Eine Temperaturabhängigkeit konnte nicht nachgewiesen werden, allerdings wurde nur die Walzsektor-Verdichtung systematisch untersucht.

Der Einsatz des oberflächenaktiven Zusatzes (Variante V2) zeigt bei Gyrator-Verdichtung und Walzsektor-Verdichtung eine schlechtere Performance gegenüber der Referenz. Eine Temperaturabhängigkeit kann für die Walzsektor-Verdichtung nachgewiesen werden.

Zusammenfassend lässt die nicht systematische Überprüfung aller Varianten nur bedingt Aussagen zu. Der Verformungswiderstand mittels Druck-Schwellversuch ist oftmals von

der Raumdichte der Probekörper und damit von der Verdichtungstemperatur abhängig, was physikalisch plausibel ist. Tendenziell weisen die oberflächenaktiven Zusätze eine nachteilige Performance auf, während andere temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren vergleichbare Ergebnisse liefern. Demgegenüber zeigt die Variante mit viskositätsveränderndem Zusatz (VVZ) (Variante V6) eindeutig eine vorteilhafte Performance.

3.9 Zusammenfassung der Entwicklung der Vorgehensweise zur Qualitätssicherung

Für eine Beurteilung der weiteren Vorgehensweise sind in Tab. 3-31 die bisher erzielten Ergebnisse und Erfahrungen am AC 11 D S vereinfacht zusammengestellt.

Eigenschaft	MPK	WSV	Gyrator
Temperaturabhängigkeit differenzierbar?	++	+	+
Ergebnisse reproduzierbar? (TAVF funktioniert?)	++	++	+
Streumaße	++	+	+
Handhabung im Labor	++	O	++
Technische Ausstattung	++	O	++ / -
Ausschlusskriterien	-- (keine)	-- (keine)	-- (keine)
Plausibilität bei DSV	+	+	O
„Beste Verdichtung“, 135 °C	+	O	-
„Beste Verdichtung“, 95 °C	-	O	+
+ bzw. ++ = guter bzw. deutlich positiver Einfluss auf die Eigenschaft O = gleichbleibende Einfluss auf die Eigenschaft - bzw. -- = schlechterer bzw. deutlich negativer Einfluss auf die Eigenschaft			

Tab. 3-31: Zusammenfassende Beurteilung der Verdichtungsverfahren für die überprüften AC 11 D S: Marshall-Verdichtung (MPK), Walzsektor-Verdichtung (WSV) und Gyrator-Verdichtung.

Zusammenfassend kann für die hier erzielten Prüfergebnisse festgehalten werden:

- Bezüglich der Temperaturabhängigkeit der erzielten Raumdichten zeigt die Marshall-Verdichtung die beste Differenzierbarkeit. Die Ergebnisse sind reproduzierbar (wie auch bei der WSV).
- Die Raumdichten weisen bei der Marshall-Verdichtung die geringsten Streumaße auf.

- Bezüglich der Handhabung im Labor ist die Herstellung von Asphalt-Probepplatten aufwendiger als von Marshall-Probekörpern, es werden größerer Mengen Mischgut benötigt und die Raumdichtebestimmung an ganzen Asphalt-Probepplatten ist anspruchsvoll.
- In der technischen Ausstattung sind WSV-Geräte nur bedingt in Laboren vorhanden und können ggf. nur nach technischer Nachrüstung eine Verdichtungskurve aufzeichnen. Gyrotoren sind noch seltener in Deutschland im Einsatz.
- Für keines der Verdichtungsgeräte existiert ein Ausschlusskriterium.
- Alle hergestellten Probekörper sind im DSV unauffällig bzw. ergeben zu den erzielten Zusätzen / Verfahren und Raumdichten plausible Ergebnisse.
- Der Gyrotor zeigt insbesondere bei niedrigen Temperaturen (z. B. 95 °C) eine gute Verdichtungswirkung und erzielt hohe Raumdichten. Demgegenüber erzielt die Marshall-Verdichtung im höheren Temperaturbereich (z. B. 135 °C) plausible Raumdichten und gut verdichtete Probekörper.
- Die Gyrotor-Verdichtung zeigt sich hier empfindlich gegenüber geringen Veränderungen in der Sieblinie und in der Reproduzierbarkeit. Auch sind die Versuchsbedingungen nicht vereinheitlicht. Es fehlt der Nachweis, dass mit dem Gyrotor unter gleichen Bedingungen wiederholbar praxisrelevante, d. h. plausible Raumdichten erzielt werden können.

Betrachtet man die Resultate zusammenfassend, stellt sich die Marshall-Verdichtung als vorteilhaft heraus. Die zu erzielenden Raumdichten lassen eine gute Differenzierbarkeit zu und weisen geringe Streumaße auf. Die Performance im Druck-Schwellversuch ist unauffällig, d. h. mit allen überprüften temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren können vergleichbare Probekörper hergestellt werden.

In der internationalen Literatur wird oftmals die Gyrotor-Verdichtung präferiert, da diese eine mit der Praxis vergleichbare Verdichtung erzielt. Auch in diesem Projekt wurde nachgewiesen, dass mit der Gyrotor-Verdichtung prinzipiell eine hohe Raumdichte erreicht werden kann. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus der Praxis ist in diesem Projekt nicht vorgesehen.

4 Anwendungsdemonstration der Vorgehensweise

Die Ermittlung der Verdichtungsfunktion wird im Folgenden anhand von Reihenuntersuchungen validiert und eine Grundlage für einen Bewertungshintergrund geschaffen.

Anhand der erstellten Kategorien (Oberflächenaktive Zusätze, Reaktiv- bzw. Rheologiemodifizierung, Mineralische Zusätze und Schaumbitumen; siehe Bild 2-1) werden an vier weiteren Asphaltarten mindestens zwei Zusätze bzw. Technologien geprüft (8 TA-Asphalt-Varianten). Zusätzlich wird jeweils eine Variante ohne Zusatz als Referenz hergestellt (4 Referenzvarianten).

Tab. 4-1 zeigt den durchgeführten Prüfumfang. Es werden insgesamt 12 Varianten hergestellt.

Variante	Asphaltmischgut	Resultierendes Bindemittel	Zugabe-Bindemittel	Zusatz / Kategorie	Anteil Ausbaupasphalt	PK-Herstellung nach
V10-1	SMA 8 S	25/55-55 A		- (Referenz)	-	TP
V10-2				Oberflächenaktiv 1		TAVF
V10-3				Zeolith		
V20-1	AC 11 D S	50/70		- (Referenz)	20 M.-%	TP
V20-2				Schaumbitumen		TAVF
V20-3				Oberflächenaktiv 2		
V30-1	SMA 16 B S	10/40-65 A		- (Referenz)	30 M.-%	TP
V30-2				Schaumbitumen		TAVF
V30-3				Oberflächenaktiv 3		
V40-1	AC 32 T S	30/45	160/220	- (Referenz)	≥ 60 M.-%	TP
V40-2				Oberflächenaktiv 4		TAVF
V40-3				Zeolith		

Tab. 4-1: Für die Reihenuntersuchung von temperaturreduzierten Asphalten vorgesehene Asphaltmischgut- und Bitumensorten (TAVF: nach Temperatur-Absenkungsverdichtungs-Funktion)

Die Herstellung der TA-Asphalte erfolgt gemäß den Herstellerangaben, mit dem erweiterten Prüfumfang zur Bestimmung der Verdichtungsfunktion (mehrere Temperaturen, Variation der Verdichtungsenergie). Je Variante wird die Verdichtungsfunktion dreifach bestimmt, um daraus Streumaße abzuleiten. So kann statistisch abgesichert die passende Verdichtungstemperatur sowie -energie ermittelt werden.

Nachdem die Verdichtungsfunktionen ermittelt worden sind, werden für jede TA-Asphalt-Variante mindestens fünf Probekörper hergestellt, um daraus weitere Streumaße bezüglich der Zusätze ableiten zu können. Auch hier werden die hergestellten Probekörper dem Einaxialen Druck-Schwellversuch (DSV) unterzogen, um den jeweiligen Verformungswiderstand zu beurteilen.

Es werden 4 chemische Zusätze von unterschiedlichen herstellenden Unternehmen verwendet, die alle der Kategorie „Oberflächenaktive Zusätze“ zugeschrieben werden können (siehe Bild 2-1):

- Oberflächenaktiv 1: V10-2
- Oberflächenaktiv 2: V20-3
- Oberflächenaktiv 3: V30-3
- Oberflächenaktiv 4: V40-2

Die Verfahren mit Schaumbitumen und Zeolith (nur ein herstellendes Unternehmen auf dem Markt) werden nicht variiert.

Die jeweilige Zusammensetzung der vier TA-Asphaltmischgutsorten ist in Tab. 4-2 dargestellt.

Merkm al	SMA 8 S	AC 11 D S	SMA 16 B S	AC 32 T S
Gesteinsart	Kalksteinmehl, Gabbro	Kalksteinmehl, Gabbro	Kalksteinmehl, Gabbro	Kalksteinmehl, Gabbro
resultierendes Bindemittel	25/55-55 A	50/70	10/40-65 A	30/45
Anteil Asphaltgranulat [M.-%]	-	20, RC 1	30, RC 2	60, RC 2
Bindemittelgehalt [M.-%]	7,0	6,0	5,2	3,8
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [M.-%]			
< 45,0				100,0
< 32,5				98,0
< 22,4			100,0	85,5
< 16,0		100,0	95,5	73,0
< 11,2	100,0	97,1	68,9	61,8
< 8,0	92,8	81,5	51,2	55,0
< 5,6	49,4	70,4	43,1	48,1
< 2,0	24,4	46,3	28,9	37,6
< 1,0	19,8	33,1	24,1	31,4
< 0,25	14,2	16,4	13,9	13,8
< 0,125	12,3	11,8	10,5	7,8
< 0,063	10,2	8,1	8,3	5,3

Tab. 4-2: Zusammensetzung der für die Überprüfung hergestellten TA-Asphaltmischgutsorten

Als Ausbauasphalt kommen ein grobkörniges und ein feinkörniges Asphaltgranulat zum Einsatz. Die Zusammensetzung und Klassifizierung nach TL AG-StB 08 der Asphaltgranulate ist in Tab. 4-3 dargestellt.

Merkm al	RC 1	RC 2
Gesteinsart	Rhyolith, Anorthosit, Diabas	Anorthosit, Granit, Kalkstein, Kiessplit
Maximale Stückgröße U	11	22
Bindemittelart	Polymermodifiziertes Bitumen	Straßenbaubitumen
EP RuK [°C]	70,0	73,6
Nadelpenetration (1/10 mm)	18,0	18,4
Bindemittelgehalt [M.-%]	5,8	4,6
Rohdichte [g/cm³]	2,477	2,573
Korngröße [mm]	Siebrückstand [M.-%]	
< 32,5	-	-
< 22,4	-	3,7
< 16,0	-	7,9
< 11,2	4,2	6,8
< 8,0	10,8	7,6
< 5,6	23,3	15,7
< 2,0	13,9	9,6
< 1,0	24,0	28,4
< 0,25	8,4	9,5
< 0,125	4,6	3,9
< 0,063	10,8	7,0

Tab. 4-3: Zusammensetzung der für die Überprüfung verwendeten Asphaltgranulate RC 1 und RC 2

4.1 Ergebnisse der Anwendungsdemonstration

4.1.1 Variante 10 (SMA 8 S)

Nach Herstellung des Referenzmischguts V10-1 (SMA 8 S mit 25/55-55 A) wurden Marshall-Probekörper gemäß Prüfvorschrift bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C hergestellt. Zusätzlich wird die Verdichtungstemperatur um 10 °C und um 20 °C abgesenkt, um die Temperaturabhängigkeit des Referenzmischguts abzuschätzen. Im Weiteren kommen ein oberflächenaktiver Zusatz (V10-2) sowie ein Zeolith (V10-3) zum Einsatz.

Die Zugabe des Zusatzes (V10-2) erfolgt mit einer Dosierung von 0,4 M.-%, bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt, vor der Mischgutherstellung. Gemäß den Herstellerangaben wird der Zusatz für eine Dauer von 15 Minuten mit dem heißen Bindemittel mittels

Flügelrührer homogenisiert und anschließend in den Labormischer zum heißen Gestein gegeben (Mischtemperatur 160 °C).

Die Zugabe von Zeolith (V10-3) erfolgt kurz vor Zugabe des Bindemittels in den Labormischer. Es werden 0,3 M.-% bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt hinzugegeben, wobei der Füllergehalt um diese Menge reduziert wird.

Als Ziel-Raumdichte für die Referenzvariante bei 145 °C wurde anhand der Tauchwägung ermittelt (Mittelwert aus Raumdichte an fünf Marshall-Probekörpern):

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,445 \text{ g/cm}^3$$

Als Toleranz-Bereich für die Ziel-Raumdichte werden wieder $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt, so dass der anzustrebende Raumdichtebereich zwischen $2,420 \text{ g/cm}^3$ bis $2,470 \text{ g/cm}^3$ liegt.

Bei den Varianten V10-2 und V10-3 werden Marshall-Probekörper jeweils bei 135, 120 und 105 °C mit 100 und 400 Schlägen hergestellt, sodass die Ermittlung der Verdichtungs-funktion möglich ist. Bei der Herstellung der Marshall-Probekörper mit 400 Schlägen wird die Dickenänderung der Probekörper aufgezeichnet. Um anhand der Daten aus der Dickenänderung auf die Raumdichten der Tauchwägung zu schließen, wird analog zu Kapitel 3.3 die Verdichtungskurve korrigiert.

Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den verschiedenen Verdichtungstemperaturen sind in der nachfolgenden Tab. 4-4 dargestellt.

Variante 10 SMA 8 S	Verdichtungs- temperatur	Raumdichte (Mittelwerte)	
		100 Schläge	400 Schläge
	°C	g/cm ³	g/cm ³
V10-1 Referenz	145	2,445	-
	135	2,418	-
	125	2,414	-
V10-2 oberflä- chenaktiver Zusatz	135	2,446	2,477
	120	2,412	2,464
	105	2,399	2,443
V10-3 Zeolith	135	2,421	2,466
	120	2,396	2,452
	105	2,368	2,438

Tab. 4-4: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (SMA 8 S) V10-1 (Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V10-3 (Zeolith) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Die ermittelten Raumdichten der Varianten V10-1, V10-2 und V10-3 nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen sind zusätzlich als Balken-diagramm in Bild 4-1 dargestellt.

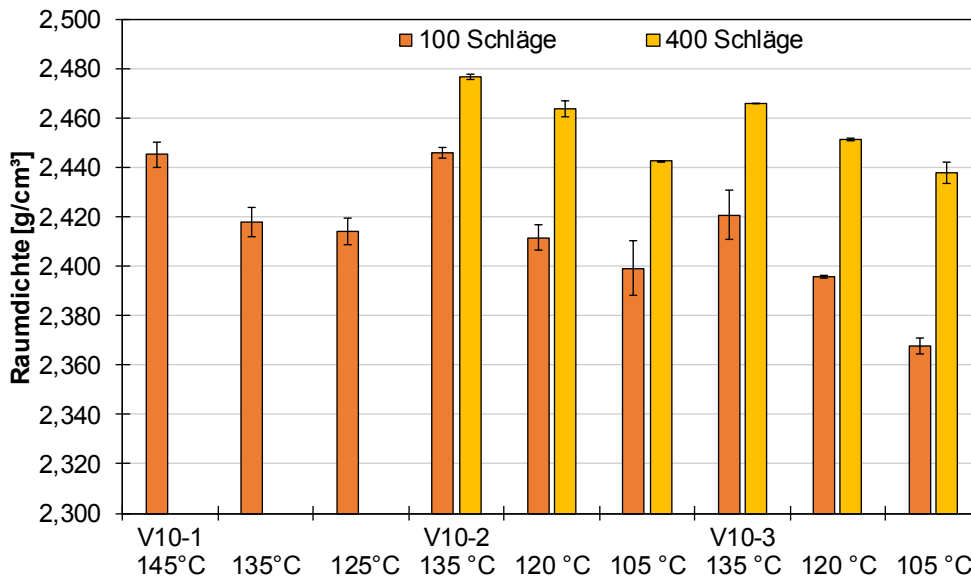


Bild 4-1: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (SMA 8 S) V10-1 (Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V10-3 (Zeolith) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Wie in Bild 4-1 zu erkennen ist, nimmt die Raumdichte wie zu erwarten mit sinkender Verdichtungstemperatur für jede Variante ab. Zudem weisen die Varianten mit 400 Schlägen eine deutlich höhere Raumdichte im Vergleich zu den Varianten bei identischer Verdichtungstemperatur auf. Es sind jedoch auch hier noch Unterschiede in der Raumdichte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur zu erkennen.

In Bild 4-2 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und der Referenz (V10-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die TAVF dargestellt.

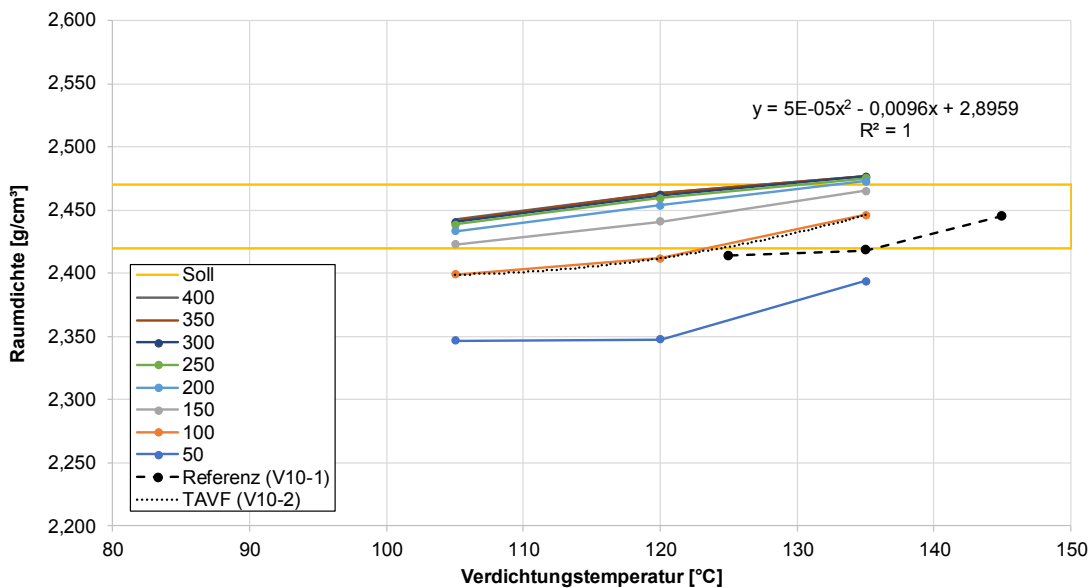


Bild 4-2: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V10-1), SMA 8 S

In Bild 4-2 ist ersichtlich, dass eine Temperaturabsenkung um 10 °C mit einer Verdichtungsenergie von 100 % (= 100 Schläge) unter Anwendung des oberflächenaktiven Zusatzes zu einer vergleichbaren Raumdichte mit der Referenz (V10-1) führt. Der Toleranzbereich der Referenz kann auch noch bei ca. 125 °C und 100 % Verdichtungsenergie erreicht werden. Bei Anwendung von einer Verdichtungsenergie von 150 % kann die Ziel-Raumdichte auch noch bei 120 °C erreicht werden. Bei einer Verdichtungsenergie größer als 200 % sind keine gravierenden Unterschiede in der Raumdichte mehr erkennbar, sodass dies als Grenzwert angesehen werden kann. Die TAVF der Variante V10-2 ist als Polynom 2. Grades dargestellt. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Verdichtungskurven einen physikalisch plausiblen Verlauf aufweisen.

Zur Überprüfung der Verdichtungsfunktion wurde erneut ein TA-Asphaltmischgut der Variante V10-2 hergestellt und anschließend 5 MPK bei der Verdichtungstemperatur 135 °C mit 100 Schlägen, 2 MPK bei 125 °C mit 100 Schlägen sowie 2 MPK bei 120 °C mit 150 Schlägen hergestellt. Die erzielten Mittelwerte der Raumdichten sind in Tab. 4-5 dargestellt.

Variante 10 SMA 8 S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdichte (Mittelwert)
	°C	-	-	g/cm ³
V10-2 oberflächenaktiver zusatz	135	5	2 x 50	2,413
	125	2	2 x 50	2,389
	120	2	2 x 75	2,426

Tab. 4-5: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei den Verdichtungstemperaturen 135, 125 und 120 °C bei variierender Anzahl an Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 8 S

Die Überprüfung der Verdichtungsfunktion ist zudem grafisch in Bild 4-3 dargestellt.

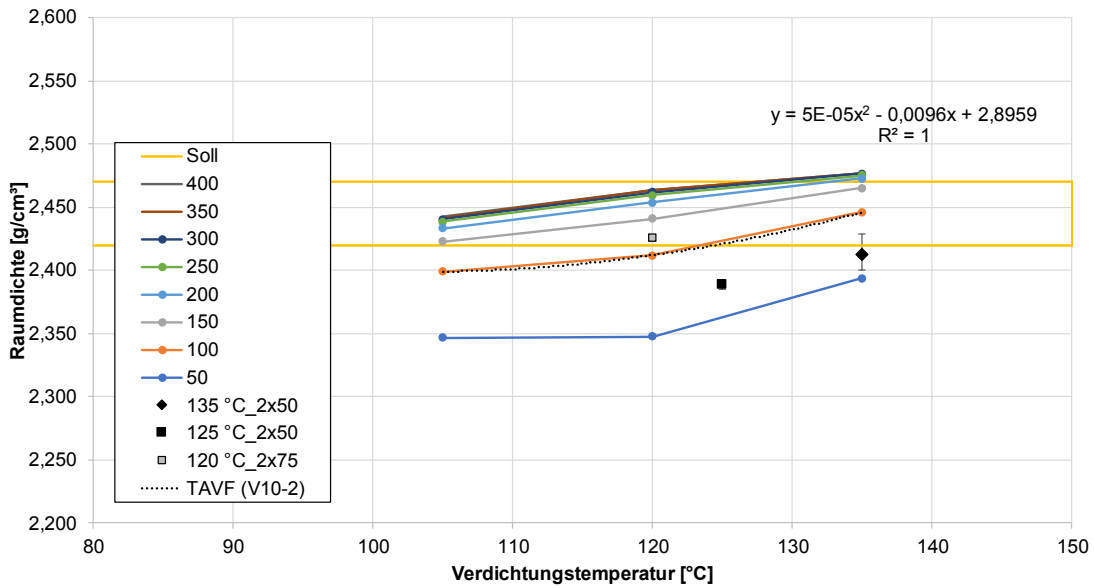


Bild 4-3: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei drei Temperaturen (135, 125 und 120 °C) und bei 100 bzw. 150 Verdichtungsschlägen, SMA 8 S

Die ermittelten Raumdichten zur Überprüfung der TAVF weisen Abweichungen zu den erwarteten Werten auf und liegen alle auf einem niedrigeren Niveau. Die erzielte Raumdichte bei 120 °C mit 150 Schlägen liegt nahe an der Referenz und wird damit als praktisch gleich angesehen, während die Raumdichten bei 125 °C und 135 °C außerhalb der Prüfstreuung liegen. Die Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur ist jedoch plausibel.

Eine anschließende Überprüfung des Mischguts ergab keine Abweichung in der Korngrößenverteilung, dasselbe gilt für den Bindemittelgehalt und den Erweichungspunkt Ring und Kugel. Entsprechend können diese Abweichungen physikalisch nicht eindeutig geklärt werden. Hier müsste in umfangreichen Versuchsreihen überprüft werden, ob und welche Einflüsse bei der Zugabe dieses Zusatzes für diese Effekte ursächlich sind.

In Bild 4-4 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V10-3 (Zeolith) und der Referenz (V10-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die TAVF dargestellt.

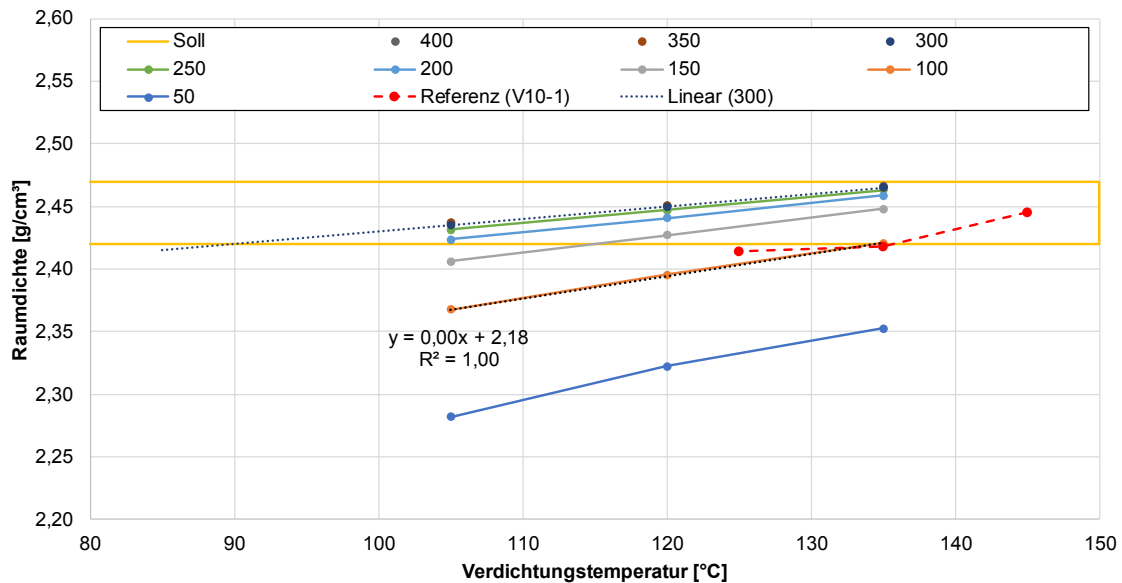


Bild 4-4: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V10-3 (Zeolith) im Vergleich zur Referenzvariante (V10-1), SMA 8 S

In der Abbildung ist zu erkennen, dass mit einer Verdichtungsenergie von 100 % unter Anwendung von Zeolith die Raumdichte auf einem Niveau mit der Referenzvariante V10-1 bei der gleichen Temperatur liegt. Es ist entsprechend keine temperaturabsenkende Wirkung von Zeolith erkennbar. Die Abnahme der Raumdichten (und die TAVF) weisen einen annähernd linearen Verlauf auf. Bei Erhöhung der Verdichtungsenergie auf 150 % kann laut TAVF eine Temperaturabsenkung um 10 °C ermöglicht werden. Eine maximale Temperaturabsenkung um 55 °C auf 90 °C ist nur mit einer Verdichtungsenergie von mindestens 300 % möglich.

Dieser Effekt wurde bereits von Radenberg (2004) gefunden und mit der geringen Menge Zeolith bzw. Wasserdampf in Relation zur Oberfläche begründet.

Zur Überprüfung der ermittelten TAVF wurde erneut Mischgut der Variante V10-3 (Zeolith) hergestellt. Aufgrund der nicht erkennbaren temperaturabsenkenden Wirkung wurden 5 MPK bei einer Temperatur von 145 °C und 2 MPK bei einer Temperatur von 135 °C und 150 Schlägen (150 % Verdichtungsenergie) hergestellt. Die erzielten Mittelwerte der Raumdichten sind in Tab. 4-6 dargestellt.

Variante 10 SMA 8 S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdichte (Mittelwert)
	°C	-	-	g/cm ³
V10-3 Zeolith	145	5	2 x 50	2,450
	135	2	2 x 75	2,457

Tab. 4-6: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V10-3 (Zeolith) bei den Verdichtungstemperaturen 145 und 135 °C bei variierender Anzahl an Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 8 S

Die Überprüfung der Verdichtungsfunktion ist zudem grafisch in Bild 4-5 dargestellt.

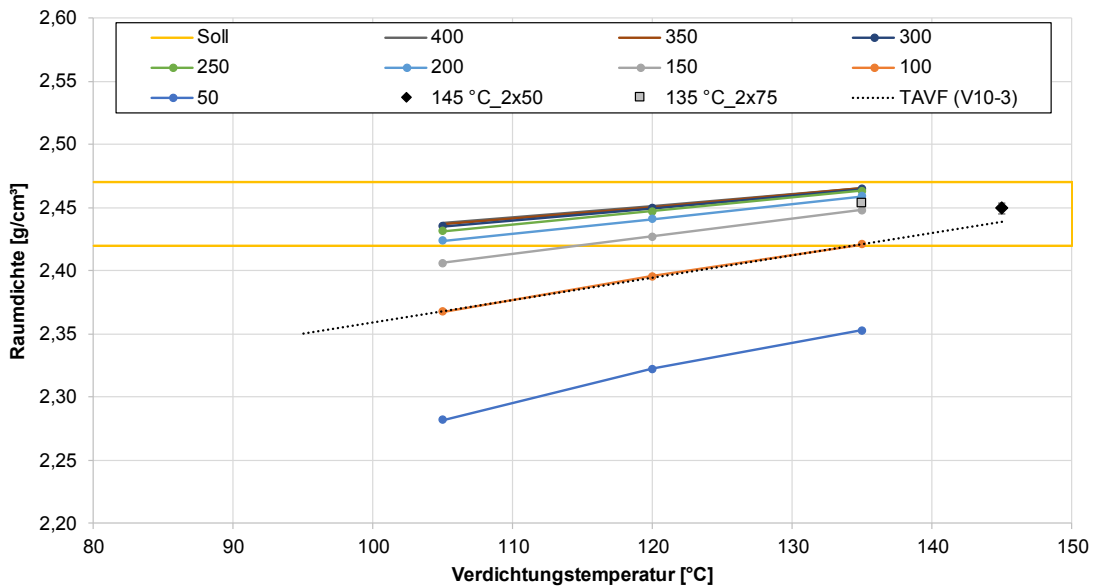


Bild 4-5: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion der Variante V10-3 (Zeolith) bei zwei Temperaturen (145 und 135 °C) und bei 100 bzw. 150 Verdichtungsschlägen, SMA 8 S

Wie in Bild 4-5 erkennbar, kann die TAVF und damit die zuvor ermittelten Raumdichten bestätigt werden. Die Raumdichte bei 145 °C und einer Verdichtungsenergie von 100 % liegt nahezu auf dem linearen Verlauf der TAVF und auch bei 135 °C liegt die Raumdichte auf einer Linie mit der TAVF für eine Verdichtungsenergie von 150 %. Entsprechend ist eine Temperaturabsenkung in diesem Fall nur unter Anwendung einer höheren Verdichtungsenergie möglich.

4.1.2 Variante 20 (AC 11 D S)

Nach Herstellung des Referenzvariante V20-1 (AC 11 D S mit 20 M.-% Asphaltgranulat (RC 1) und Frischbindemittel 50/70) wurden Marshall-Probekörper gemäß Prüfvorschrift bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C hergestellt. Zusätzlich wurde die Verdichtungs-temperatur um 10, 20 und 30 °C abgesenkt, um die Temperaturabhängigkeit des Referenzmischguts abzuschätzen. Im Weiteren kam Schaumbitumen (Variante V20-2) sowie ein oberflächenaktiver Zusatz (Variante V20-3) zum Einsatz.

Die Mischgutherstellung sowie die anschließende Herstellung der MPK der Variante mit Schaumbitumen (Variante V20-2) erfolgten an der Universität Kassel (siehe Kapitel 1.3.5).

Im Rahmen der Mischgutherstellung der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) wurde der Zusatz nach Herstellerangaben mit einer Dosierung von 0,4 M.-% bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt in das heiße Frischbindemittel für ein paar Sekunden händisch eingerührt. Nach Zugabe der heißen Gesteinskörnung und des Asphaltgranulats in den Labormischer erfolgte die Zugabe des Bindemittel-Zusatz-Gemisches. Anschließend wurde für ca. 3 min bis zur vollständigen Umhüllung bei ca. 160 °C gemischt.

Als Ziel-Raumdichte für die Referenzvariante bei 135 °C wurde anhand der Tauchwägung folgender Wert ermittelt (Mittelwert aus Raumdichte an fünf Marshall-Probekörpern):

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,496 \text{ g/cm}^3$$

Als Toleranz-Bereich für die Ziel-Raumdichte wurden wieder $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt, so dass der anzustrebende Raumdichtebereich zwischen $2,471 \text{ g/cm}^3$ bis $2,521 \text{ g/cm}^3$ liegt.

Mit der Variante V20-2 (Schaumbitumen) wurden Marshall-Probekörper jeweils bei 135, 125 und 115 °C und mit der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei 135 °C, 120 °C und 105 °C, jeweils mit 100 und 400 Schlägen, hergestellt. Bei der Herstellung der Marshall-Probekörper mit 400 Schlägen wurde die Dickenänderung der Probekörper aufgezeichnet. Um anhand der Daten aus der Dickenänderung auf die Raumdichten der Tauchwägung zu schließen, wurde analog zu Kapitel 3.3 die Verdichtungskurve korrigiert.

Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den verschiedenen Verdichtungstemperaturen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Variante 20 AC 11 D S	Verdichtungs- temperatur	Raumdichte (Mittelwerte)	
		100 Schläge	400 Schläge
	°C	g/cm^3	g/cm^3
V20-1 Referenz	135	2,496	2,533
	125	2,485	2,524
	115	2,483	2,525
	105	2,452	2,519
V20-2 Schaumbi- tumen	135	2,490	2,541
	125	2,494	2,516
	115	2,471	2,513
V20-3 oberflä- chenaktiver Zusatz	135	2,512	2,539
	120	2,502	2,530
	105	2,473	2,525

Tab. 4-7: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (AC 11 D S) V20-1 (Referenzvariante), V20-2 (Schaumbitumen) und V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Die ermittelten Raumdichten der Varianten V20-1, V20-2 und V20-3 nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen sind zusätzlich als Balkendiagramm im folgenden Bild 4-6 dargestellt.

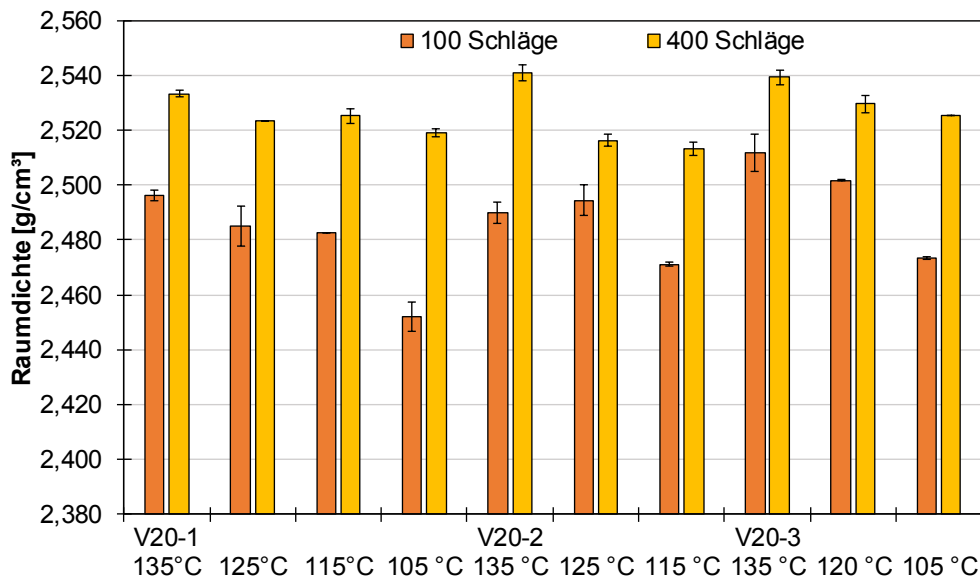


Bild 4-6: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (AC 11 D S) V20-1 (Referenz), V20-2 (Schaumbitumen) und V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Die Raumdichte der Referenzvariante V20-1 nimmt mit abnehmender Verdichtungstemperatur ab, wobei dieser Effekt mit 400 Schlägen kaum auftritt.

Bei der Variante V20-2 (Schaumbitumen) liegen die Raumdichten bei 135 °C und 125 °C (100 Schläge) auf einem gleichen Niveau, wohingegen die Raumdichte bei 115 °C deutlich abfällt. Insgesamt zeigt sich aber eine abnehmende Raumdichte in Abhängigkeit von der geringeren Verdichtungstemperatur.

Die Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) weist dagegen für alle überprüften Verdichtungsbedingungen eine systematische Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur auf.

Auf Grundlage dieser Raumdichten bei 100 und 400 Schlägen wurden die Temperatur-Ab-senkungs-Verdichtungs-Funktionen (TAVF) der Varianten V20-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V20-3 (Schaumbitumen) erstellt.

In Bild 4-7 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V20-2 (Schaumbitumen) und der Referenzvariante (V20-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die TAVF dargestellt.

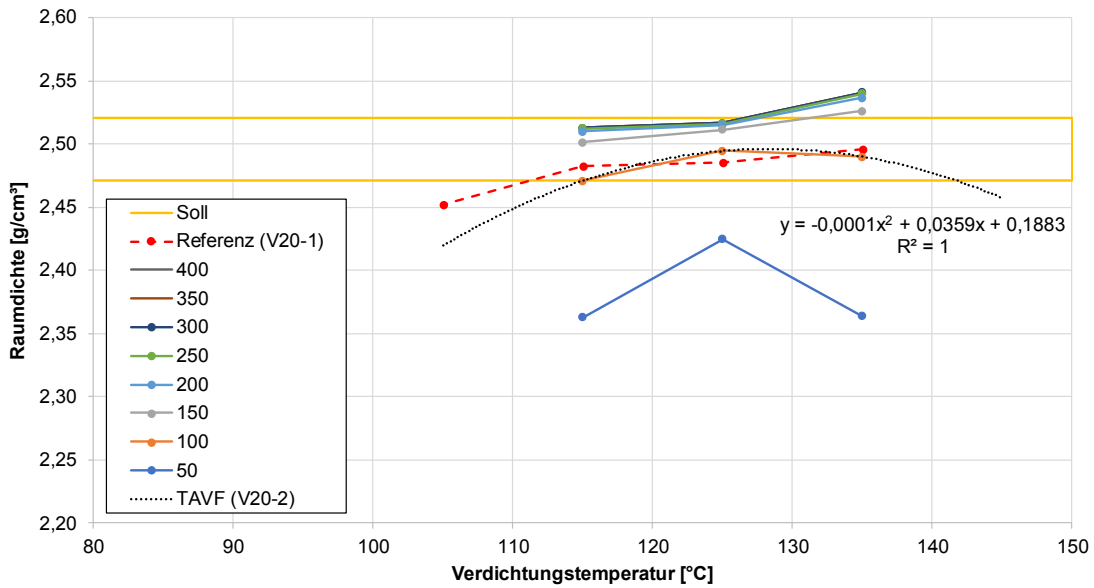


Bild 4-7: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V20-2 (Schaumbitumen) im Vergleich zur Referenzvariante (V20-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 11 D S

Wie in Bild 4-7 zu erkennen ist, sind die Raumdichten der Referenzvariante (V20-1) und der Variante mit Schaumbitumen V20-2 nahezu identisch bei den Verdichtungstemperaturen 135 °C, 125 °C und 155 °C bei einer Verdichtungsenergie von 100 % (= 100 Schläge). Für die TAVF ergibt sich ein Polynom 2. Grades mit einer konkaven Form. Dies hängt damit zusammen, dass die Raumdichte bei 125 °C höher als die Raumdichte bei 135 °C ist. Diese Unterschiede in der Raumdichte sind jedoch vernachlässigbar klein bzw. liegen in der Wiederholpräzision des Verfahrens zur Bestimmung der Raumdichte.

Die Überprüfung der TAVF erfolgte entsprechend bei einer Temperatur von 125 °C. Hierzu wurde erneut Mischgut der Variante V20-2 (Schaumbitumen) hergestellt und anschließend fünf MPK geschlagen. Die erzielten Mittelwerte der Raumdichten sind in Tab. 4-8 dargestellt.

Variante 20 SMA 8 S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdichte (Mittelwert)
	°C	-	-	g/cm ³
V20-2 Schaumbitumen	125	5	2 x 50	2,476

Tab. 4-8: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V20-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von 125 °C und 100 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 11 D S

Die Überprüfung der Verdichtungsfunktion ist zudem grafisch in Bild 4-8 dargestellt.

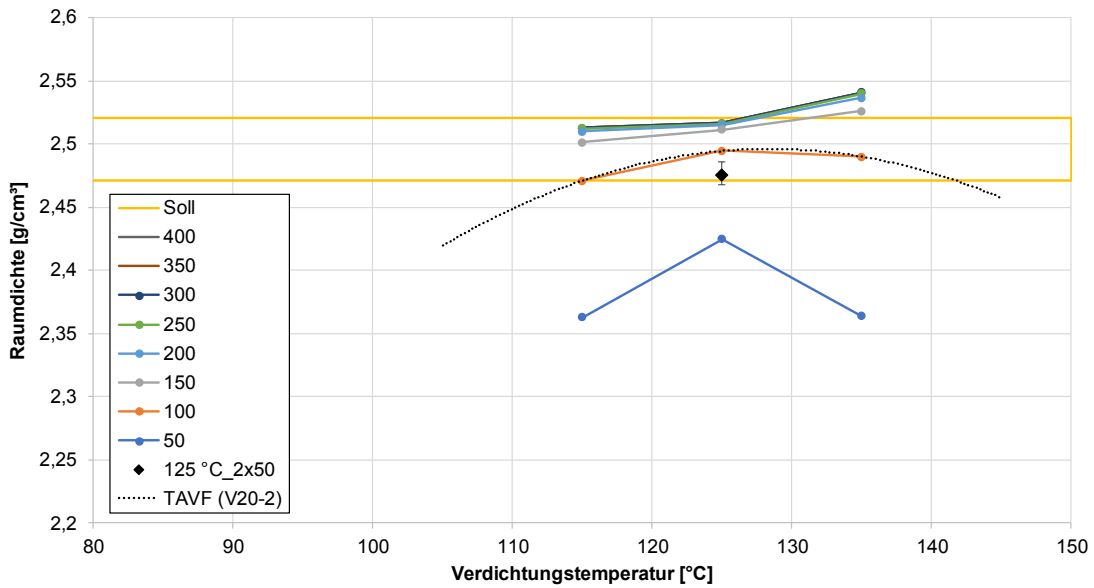


Bild 4-8: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V20-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von 125 °C und 100 Verdichtungsschlägen, AC 11 D S

Wie in Bild 4-8 erkennbar, liegt die ermittelte Raumdichte nahe dem zu erzielendem Niveau, innerhalb der Prüftoleranzen. Demnach ist eine Temperaturabsenkung mit üblicher Verdichtungsenergie möglich.

In Bild 4-9 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) und der Referenzvariante (V20-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) dargestellt.

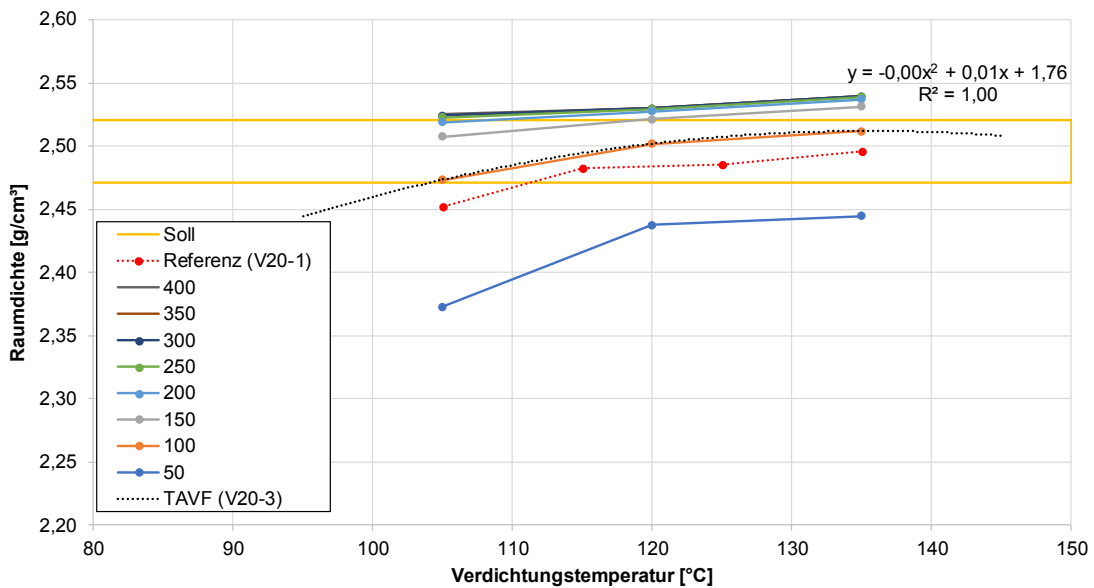


Bild 4-9: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V20-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 11 D S

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Raumdichte der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) auf einem etwas höheren Niveau liegt als die Raumdichte der Referenzvariante V20-1. Bei einer Verdichtungsenergie von 100 % und einer Temperaturabsenkung um 10 °C wird für die Variante V20-3 eine zur Referenzvariante vergleichbare Raumdichte erreicht. Auch bei einer Temperaturabsenkung um 30 °C und 100 % Verdichtungsenergie liegt die Raumdichte der Variante V20-3 noch im Toleranzbereich der Referenzvariante. Die TAVF weist einen nahezu linearen Verlauf auf, die mittels eines Polynom 2. Grades angenähert werden kann.

Im nachfolgenden Schritt wurde die TAVF der Variante V20-3 anhand von weiteren Untersuchungen überprüft. Hierzu wurde erneut Mischgut unter Zugabe des oberflächenaktiven Zusatzes hergestellt und anschließend bei unterschiedlichen Verdichtungsenergien mit variierender Verdichtungsenergie hergestellt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-9 dargestellt.

Variante 20 SMA 8 S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdichte (Mittelwert)
	°C	-	-	g/cm ³
V20-3 oberflächenaktiver Zusatz	120	5	2 x 50	2,479
	105	2	2 x 75	2,493

Tab. 4-9: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei den Verdichtungsenergien 120 und 135 °C bei variierender Anzahl an Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 11 D S

Die Überprüfung der Verdichtungsenergienfunktion ist zudem grafisch in Bild 4-10 dargestellt.

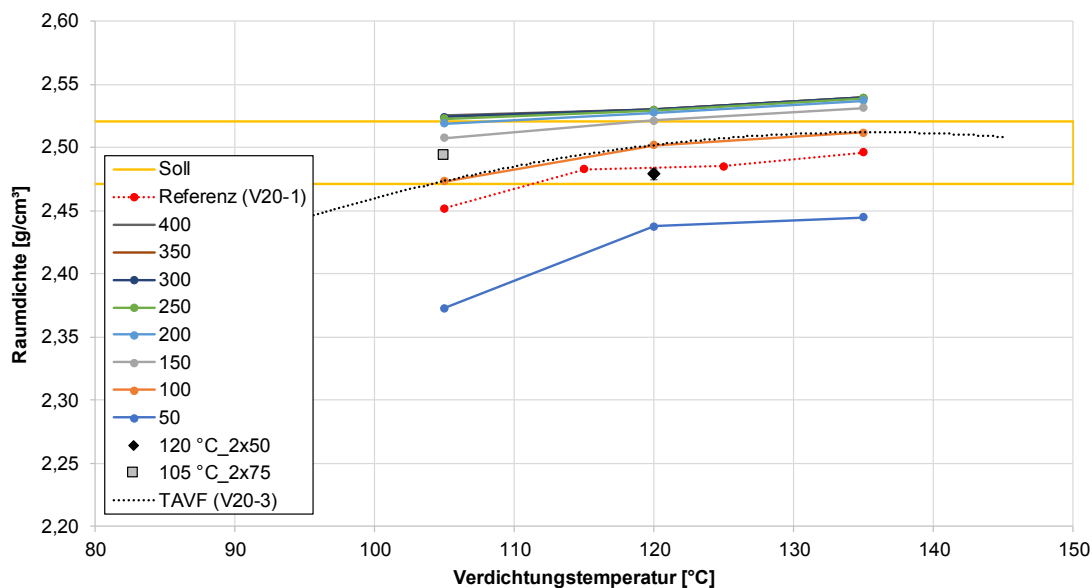


Bild 4-10: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei 120 °C und 100 Verdichtungsschlägen und bei 105 °C mit 150 Verdichtungsschlägen, AC 11 D S

Wie in Bild 4-10 erkennbar, liegt die ermittelte Raumdichte bei 120 °C und 100 Schlägen etwas unterhalb des erwarteten Wertes, jedoch nahe dem zu erzielendem Niveau und innerhalb der Prüftoleranz. Demnach ist eine Temperaturabsenkung mit üblicher Verdichtungsenergie möglich. Die erzielte Raumdichte bei 105 °C mit 150 % Verdichtungsenergie (=150 Schlägen) liegt nahe an der Ziel-Raumdichte und wird damit als praktisch gleich angesehen.

4.1.3 Variante 30 (SMA 16 B S)

Nach Herstellung des Referenzmischguts V30-1 (SMA 16 B S mit 30 M.-% Asphaltgranulat (RC 2) und Frischbindemittel 10/40-65 A) wurden Marshall-Probekörper gemäß Prüfvorschrift bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C hergestellt. Zusätzlich wurde die Verdichtungstemperatur um 15 und 30 °C abgesenkt, um die Temperaturabhängigkeit des Referenzmischguts abzuschätzen. Im Weiteren kamen die Schaumbitumen-Technologie (Variante V30-2) sowie ein oberflächenaktiver Zusatz (Variante V30-3) zum Einsatz.

Die Mischgutherstellung sowie die anschließende Herstellung der MPK der Variante mit Schaumbitumen (Variante V30-2) erfolgten an der Universität Kassel (siehe Kapitel 1.3.5).

Im Rahmen der Mischgutherstellung der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) wurde der Zusatz nach Herstellerangaben mit einer Dosierung von 0,5 M.-% bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt in das heiße Frischbindemittel für ein paar Sekunden händisch eingerührt. Nach Zugabe der heißen Gesteinskörnung und des Asphaltgranulats in den Labormischer erfolgte die Zugabe des Bindemittel-Zusatz-Gemisches. Anschließend wurde für ca. 3 min bis zur vollständigen Umhüllung bei ca. 160 °C gemischt.

Als Ziel-Raumdichte für die Referenzvariante V30-1 bei 145 °C wurde anhand der Tauchwägung folgender Wert ermittelt (Mittelwert aus Raumdichte an fünf Marshall-Probekörpern):

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,488 \text{ g/cm}^3$$

Als Toleranz-Bereich für die Ziel-Raumdichte wurden wieder $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt, so dass der anzustrebende Raumdichtebereich zwischen $2,471 \text{ g/cm}^3$ bis $2,513 \text{ g/cm}^3$ liegt.

Für die Referenzvariante wurde ebenfalls die Verdichtungstemperatur reduziert (auf 130 °C und 105 °C), um das Verdichtungsprinzip zu überprüfen und eine bessere Vergleichbarkeit zu den anderen Varianten zu ermöglichen.

Mit der Variante V30-2 (Schaumbitumen) wurden Marshall-Probekörper jeweils bei einer Verdichtungstemperatur von 130, 120 und 105 °C und mit der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei 135 °C, 120 °C und 105 °C, jeweils mit 100 und 400 Schlägen, hergestellt. Bei der Herstellung der Marshall-Probekörper mit 400 Schlägen wurde die Dickenänderung der Probekörper aufgezeichnet. Um anhand der Daten aus der Dickenänderung auf die Raumdichten der Tauchwägung zu schließen, wurde analog zu Kapitel 3.3 die Verdichtungskurve korrigiert.

Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den verschiedenen Verdichtungstemperaturen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Variante 30 SMA 16 B S	Verdichtungs- temperatur	Raumdichte (Mittelwerte)	
		100 Schläge	400 Schläge
	°C	g/cm ³	g/cm ³
V30-1 Referenz	145	2,488	2,521
	130	2,480	2,504
	105	2,427	2,487
V30-2 Schaumbi- tumen	135	2,491	2,529
	120	2,456	2,482
	105	2,418	2,474
V30-3 oberflä- chenaktiver Zusatz	135	2,473	2,516
	120	2,454	2,488
	105	2,412	2,476

Tab. 4-10: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (SMA 16 B S) V30-1 (Referenzvariante), V30-2 (Schaumbitumen) und V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Die ermittelten Raumdichten der Varianten V30-1 (Referenzvariante), V30-2 (Schaumbitumen) und V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen sind zusätzlich als Balkendiagramm in der folgenden Abbildung dargestellt.

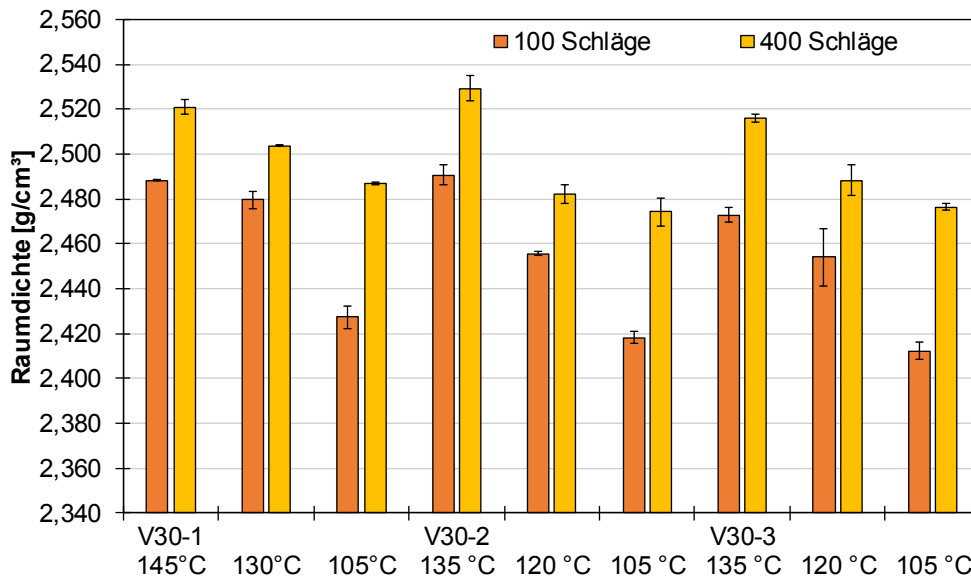


Bild 4-11: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (SMA 16 B S) V30-1 (Referenzvariante), V30-2 (Schaumbitumen) und V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Wie in Bild 4-11 zu erkennen ist, nimmt die Raumdichte wie zu erwarten mit sinkender Verdichtungstemperatur für jede Variante ab. Zudem weisen die Varianten mit 400 Schlägen eine deutlich höhere Raumdichte im Vergleich zu den Varianten bei identischer Verdichtungstemperatur auf. Es sind Unterschiede in der Raumdichte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur zu erkennen.

In Bild 4-12 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V30-2 (Schaumbitumen) und der Referenzvariante (V30-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) dargestellt.

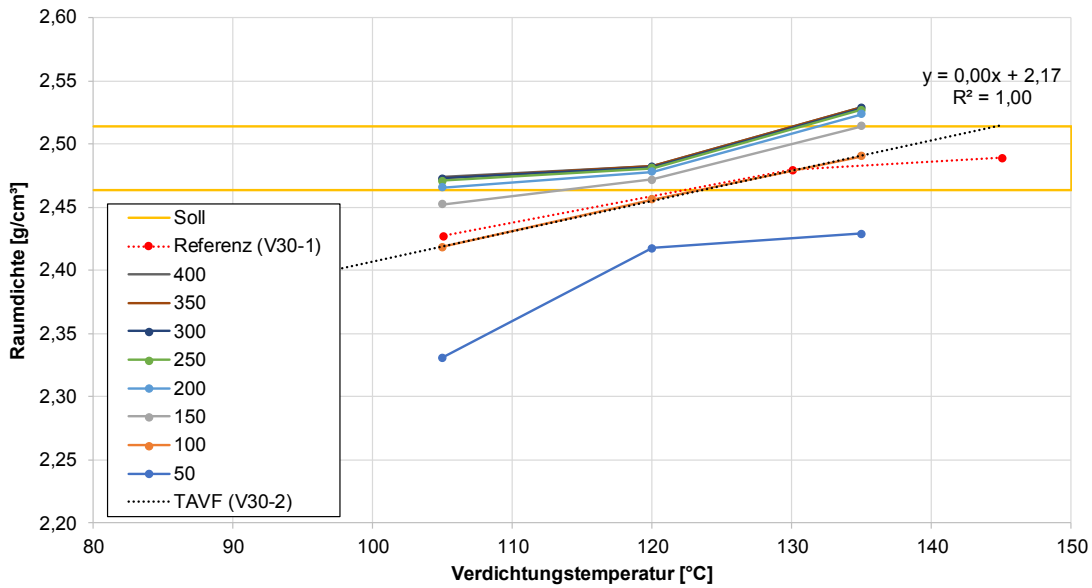


Bild 4-12: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V30-2 (Schaumbitumen) im Vergleich zur Referenzvariante (V30-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), SMA 16 B S

In Bild 4-12 ist zu erkennen, dass bei einer um 10 °C reduzierten Verdichtungstemperatur mit einer Verdichtungsenergie von 100 % unter Anwendung der Schaumbitumen-Technologie die Raumdichte auf einem Niveau mit der Referenzvariante V20-1 bei 145 °C liegt. Es ist die temperaturabsenkende Wirkung erkennbar. Bei geringeren Verdichtungstemperaturen sind die Raumdichten bei 100 % Verdichtungsenergie der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nahezu identisch zur Referenzvariante. Bei weiterer Verringerung der Verdichtungstemperatur, ohne zusätzliche Verdichtungsenergie, kann keine temperaturabsenkende Wirkung mehr erreicht werden.

Die Abnahme der Raumdichten (und die TAVF) weisen einen annähernd linearen Verlauf auf. Bei Erhöhung der Verdichtungsenergie auf 150 % kann gemäß TAVF eine Temperaturabsenkung um bis zu 25 °C ermöglicht werden.

Zur Überprüfung der TAVF wurde erneut Mischgut der Variante V30-2 (Schaumbitumen) hergestellt und fünf MPK bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C hergestellt. Das Ergebnis ist in Tab. 4-11 dargestellt.

Variante 30 SMA 16 B S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdichte (Mittelwert)
	°C	-	-	g/cm ³
V30-2 Schaumbitumen	135	5	2 x 50	2,470

Tab. 4-11: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V30-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 16 B S

Die Überprüfung der Verdichtungs-funktion ist zudem grafisch in Bild 4-13 dargestellt.

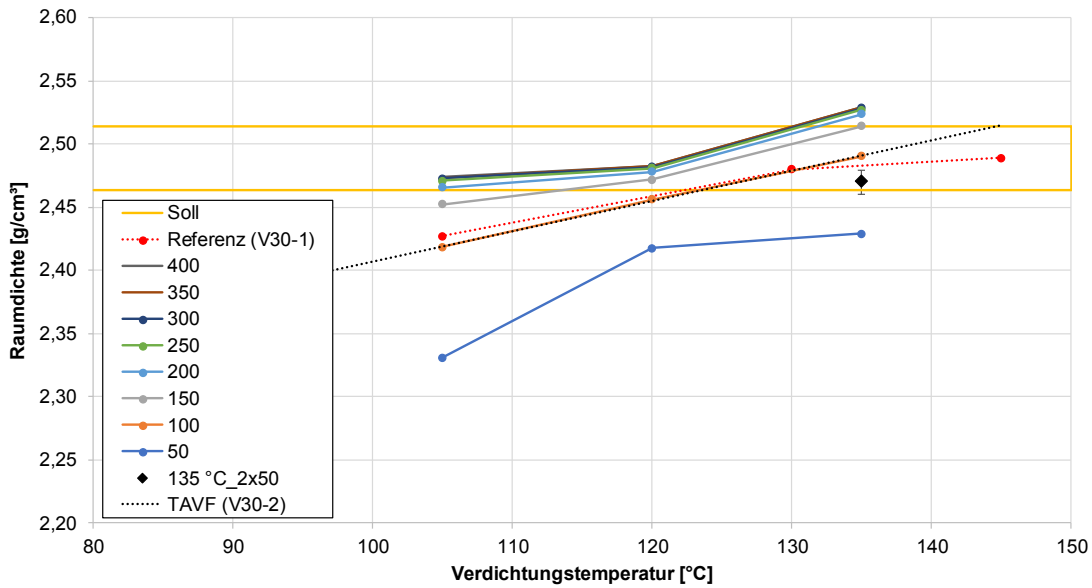


Bild 4-13: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V30-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Verdichtungsschlägen, SMA 16 B S

Wie in Bild 4-13 erkennbar, liegt die ermittelte Raumdichte etwas unterhalb des erwarteten Wertes, jedoch nahe dem zu erzielendem Niveau und innerhalb der Prüftoleranz. Demnach ist eine Temperaturabsenkung um 10 °C mit üblicher Verdichtungsenergie möglich.

In Bild 4-14 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) und der Referenzvariante (V30-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die TAVF dargestellt.

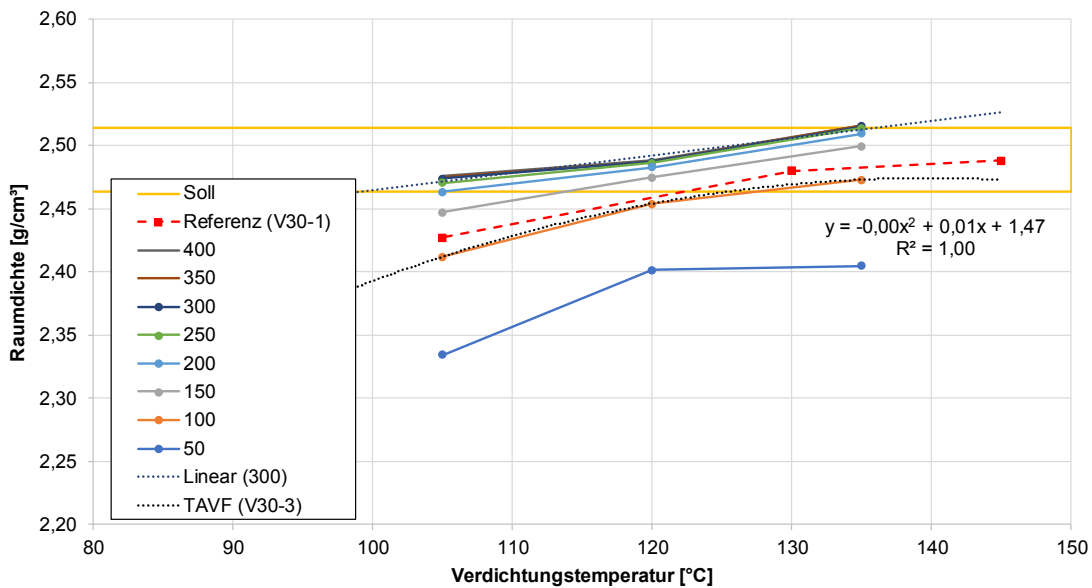


Bild 4-14: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V30-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), SMA 16 B S

Die Raumdichten der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) liegen nahe unterhalb der Raumdichten der Referenzvariante V30-1. Entsprechend ist keine temperaturabsenkende Wirkung des Zusatzes bei 100 % Verdichtungsenergie erkennbar. Die Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) wird durch ein Polynom 2. Grades dargestellt, welches nahezu linear verläuft. Bei einer Verdichtungsenergie von 150 % kann, unter Anwendung der TAVF, eine Temperaturabsenkung um 10 °C ermöglicht werden. Eine maximale Temperaturabsenkung auf 100 °C ist bei einer Verdichtungsenergie von 300 % bei Anwendung der TAVF möglich.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden erneut Mischgut der Variante V30-3 und anschließend fünf MPK bei 145 °C und 100 Schlägen (100 % Verdichtungsenergie) und zwei MPK bei 135 °C und 150 Schlägen (150 % Verdichtungsenergie) hergestellt, sodass die TAVF mittels 2 Verdichtungsszenarien überprüft werden konnte. Das Ergebnis ist in Tab. 4-12 und im Bild 4-15 dargestellt.

Variante 30 SMA 16 B S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdicke (Mittelwert)
	°C	-	-	g/cm ³
V30-3 oberflächenaktiver Zusatz	145	5	2 x 50	2,509
	135	2	2 x 75	2,507

Tab. 4-12: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Schlägen sowie bei 135 °C und 150 Verdichtungsschlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 16 B S

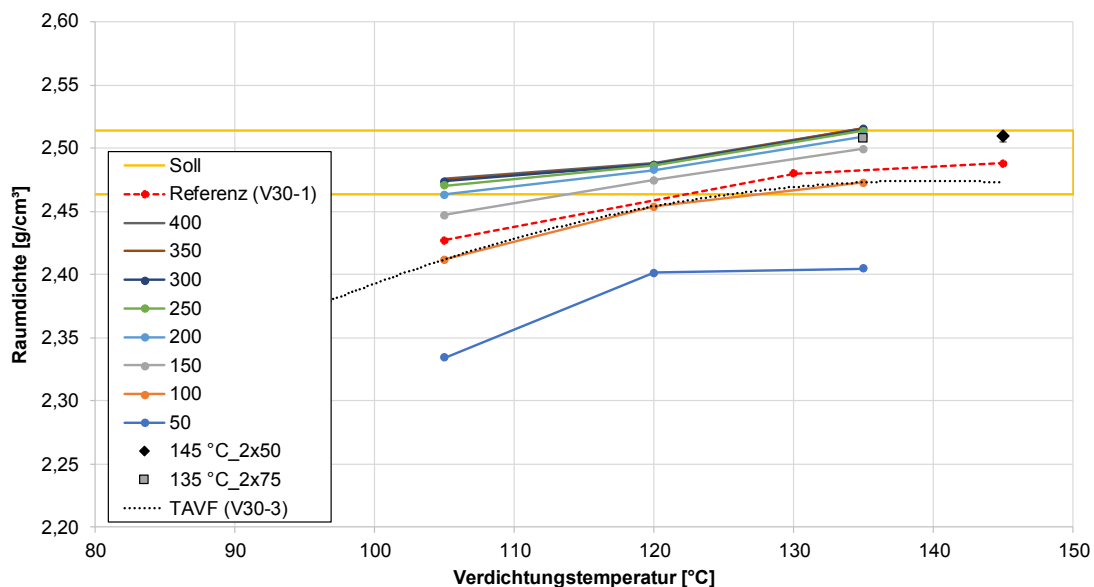


Bild 4-15: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Verdichtungsschlägen sowie bei 135 °C und 150 Verdichtungsschlägen, SMA 16 B S

Wie in Bild 4-15 erkennbar, werden die TAVF und damit die zuvor ermittelten Raumdichten bestätigt. Die Raumdichte bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und einer Verdichtungsenergie von 100 % liegt oberhalb der TAVF, aber innerhalb der Wiederholpräzision. Bei 145 °C zeigt sich somit ein etwas höherer Verdichtungseffekt unter Anwendung des oberflächenaktiven Zusatzes.

Bei 135 °C Verdichtungstemperatur wird die Raumdichte der TAVF für eine Verdichtungsenergie von 150 % bestätigt. Die Verifikation der Raumdichten zeigt, dass mit der Wiederholung höhere Raumdichten erzielt werden und so eine Temperaturabsenkung möglich ist, während die Werte zur Ermittlung der TAVF dies nur unter Anwendung einer höheren Verdichtungsenergie zeigen.

4.1.4 Variante 40 (AC 32 T S)

Nach Herstellung des Referenzmischguts V40-1 (AC 32 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat (RC 2) und Frischbindemittel 160/200) wurden Marshall-Probekörper gemäß Prüfvorschrift bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C hergestellt. Zusätzlich wurde die Verdichtungstemperatur um 10 und 20 °C abgesenkt, um die Temperaturabhängigkeit des Referenzmischguts abzuschätzen. Im Weiteren kamen ein oberflächenaktiver Zusatz (Variante V40-2) sowie ein Zeolith (Variante V40-3) zum Einsatz.

Im Rahmen der Mischgutherstellung der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) wurde der Zusatz nach Herstellerangaben mit einer Dosierung von 0,5 M.-% bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt in das heiße Frischbindemittel für ein paar Sekunden händisch eingerührt. Nach Zugabe der heißen Gesteinskörnung und des Asphaltgranulats in den Labormischer erfolgte die Zugabe des Bindemittel-Zusatz-Gemisches. Anschließend wurde für ca. 3 min bis zur vollständigen Umhüllung bei ca. 160 °C gemischt.

Die Zugabe von Zeolith (Variante V40-3) erfolgte kurz vor Zugabe des Bindemittels in den Labormischer. Es wurden 0,3 M.-% bezogen auf das gesamte Mischgut hinzugegeben, wobei der Füllergehalt normalerweise um diese Menge zu reduzieren ist. In diesem Fall wurde jedoch, aufgrund der hohen Asphaltgranulat-Menge, kein frischer Füller hinzugegeben, sodass nur eine minimale Zugabemenge von Zeolith „on top“ erfolgte.

Als Ziel-Raumdichte für die Referenzvariante V40-1 bei 135 °C wurde anhand der Tauchwägung folgender Wert ermittelt (Mittelwert aus Raumdichte an fünf Marshall-Probekörpern):

$$\rho_{\text{Ref}} = 2,488 \text{ g/cm}^3$$

Als Toleranz-Bereich für die Ziel-Raumdichte wurden wieder $\pm 0,025 \text{ g/cm}^3$ angesetzt, so dass der anzustrebende Raumdichtebereich zwischen $2,471 \text{ g/cm}^3$ bis $2,513 \text{ g/cm}^3$ liegt.

Bei den Varianten V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V40-3 (Zeolith) wurden Marshall-Probekörper jeweils bei einer Verdichtungstemperatur von 135, 120 und 105 °C und mit 100 bzw. 400 Schlägen hergestellt. Bei der Herstellung der Marshall-Probekörper mit 400 Schlägen wurde die Dickenänderung der Probekörper aufgezeichnet. Um anhand der Daten aus der Dickenänderung auf die Raumdichten der Tauchwägung zu schließen, wurde analog zu Kapitel 3.3 die Verdichtungskurve korrigiert.

Die ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper über die Tauchwägung nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den verschiedenen Verdichtungstemperaturen sind in der nachfolgenden Tab. 4-13 dargestellt.

Variante 40 AC 32 T S	Verdichtungs- temperatur	Raumdichte (Mittelwerte)	
		100 Schläge	400 Schläge
	°C	g/cm ³	g/cm ³
V40-1 Referenz	135	2,488	-
	125	2,443	-
	115	2,424	-
V40-2 oberflä- chenaktiver Zusatz	135	2,480	2,510
	120	2,463	2,489
	105	2,434	2,475
V40-3 Zeolith	135	2,486	2,511
	120	2,454	2,485
	105	2,445	2,476

Tab. 4-13: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (AC 32 T S) V40-1 (Referenzvariante), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V40-3 (Zeolith) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Die ermittelten Raumdichten der Varianten V40-1 (Referenzvariante), V40-2 (Zeolith) und V40-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nach 100 bzw. 400 Schlägen bei den unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen sind zusätzlich als Balkendiagramm in Bild 4-16 dargestellt.

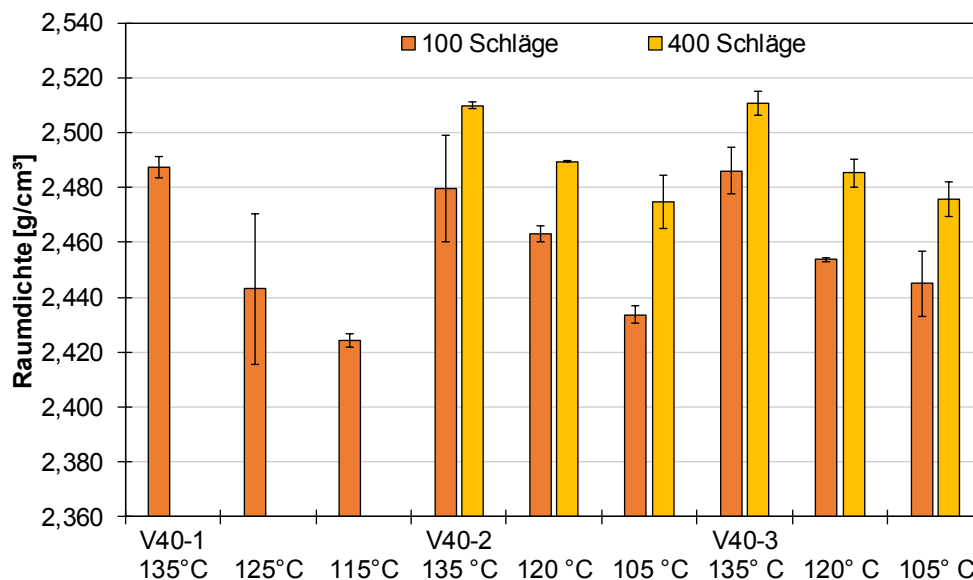


Bild 4-16: Raumdichten in g/cm³ der Varianten (AC 32 T S) V40-1 (Referenzvariante), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V40-3 (Zeolith) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Wie in Bild 4-16 zu erkennen ist, nimmt die Raumdichte wie zu erwarten mit sinkender Verdichtungstemperatur für jede Variante ab. Zudem weisen die Varianten mit 400 Schlägen eine deutlich höhere Raumdichte im Vergleich zu den Varianten bei identischer Verdichtungstemperatur. Es sind jedoch auch hier Unterschiede in der Raumdichte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur zu erkennen.

In Bild 4-17 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und der Referenzvariante (V40-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungstemperaturen sowie die TAVF dargestellt.

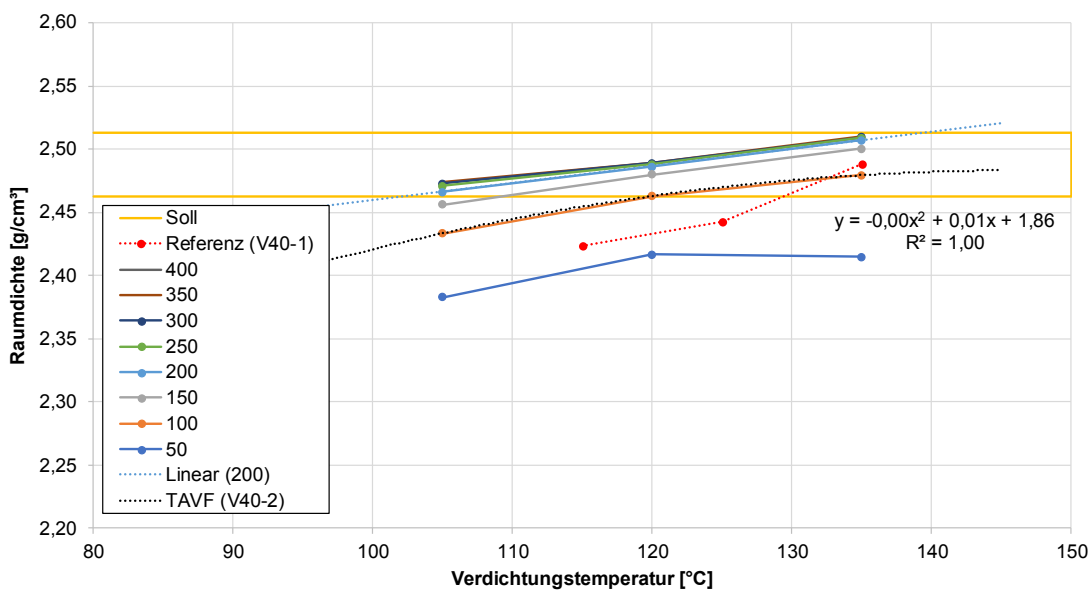


Bild 4-17: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V40-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 32 T S

Die Raumdichte der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C liegt auf einem Niveau mit der Referenzvariante (V40-1). Entsprechend ist für die Standard-Verdichtungstemperatur kein temperaturabsenkender Effekt in Form einer höheren Raumdichte erkennbar. Jedoch zeigt sich ein flacherer Verlauf der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) bei niedrigeren Verdichtungstemperaturen im Vergleich zur Referenz. Die Raumdichten der Referenz nehmen mit abnehmender Verdichtungstemperatur im Vergleich zur Variante V40-2 stärker ab. Bei einer Verdichtungstemperatur von 120 °C und einer Verdichtungsenergie von 150 % liegt die Raumdichte noch im Bereich der Referenz bei 135 °C. Entsprechend ist laut TAVF eine Absenkung der Temperatur unter Anwendung einer höheren Verdichtungsenergie möglich. Die maximale Temperaturabsenkung auf 100 °C bzw. um 35 °C kann laut TAVF durch Anwendung von 200 Verdichtungsschlägen (entspricht 200 % Verdichtungsenergie) gerade noch erreicht werden.

Zur Überprüfung der TAVF wurde erneut Mischgut der Variante V40-2 und anschließend MPK hergestellt. Dabei wurden zum einen fünf MPK bei 135 °C mit jeweils 100 Verdichtungsschlägen, 2 weitere MPK bei 120 °C mit 150 Verdichtungsschlägen und 2 MPK bei

115 °C und 200 Verdichtungsschlägen hergestellt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-14 und in Bild 4-18 dargestellt.

Variante 40 AC 32 T S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdicke (Mittelwert)	Raumdicke Standardabweichung
	°C	-	-	g/cm ³	g/cm ³
V40-2 oberflächenaktiver Zusatz	135	5	2 x 50	2,483	0,0080
	120	2	2 x 75	2,466	0,0065
	115	2	4 x 50	2,461	0,0085

Tab. 4-14: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Schlägen und bei 120 °C und 150 Verdichtungsschlägen sowie bei 115 °C und 200 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 32 T S

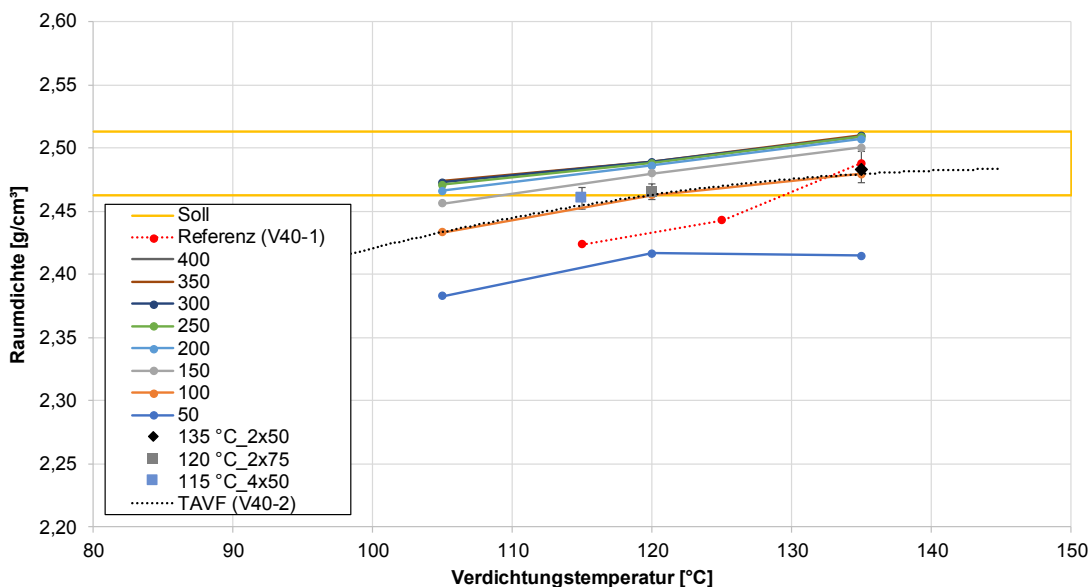


Bild 4-18: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Verdichtungsschlägen, 120 °C und 150 Schlägen und bei 115 °C mit 200 Schlägen, AC 32 T S

Wie in Bild 4-18 zu erkennen ist, liegt die Raumdicke bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C im erwarteten Bereich, sodass die Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) diesbezüglich bestätigt wird. Die Annahme, dass bei höherer Verdichtungsenergie die Temperatur so weit abgesenkt werden kann, dass der gewählte Raumdicke-Toleranzbereich weiterhin erreicht wird, gilt nur eingeschränkt. Die Raumdicke für eine Verdichtungstemperatur von 120 °C bei einer Verdichtungsenergie von 150 % liegt etwas unterhalb des erwarteten Niveaus. Dasselbe gilt für die ermittelte Raumdicke bei 115 °C und 200 % Verdichtungsenergie. Entsprechend ist der Einfluss der höheren Verdichtungsenergie bei dieser (Mischgut)-Variante eher gering einzuschätzen.

In Bild 4-19 sind die erzielten Raumdichten (nach Korrektur) der Variante V40-3 (Zeolith) und der Referenzvariante (V40-1) über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge) bei den drei gewählten Verdichtungs-temperaturen sowie die TAVF dargestellt.

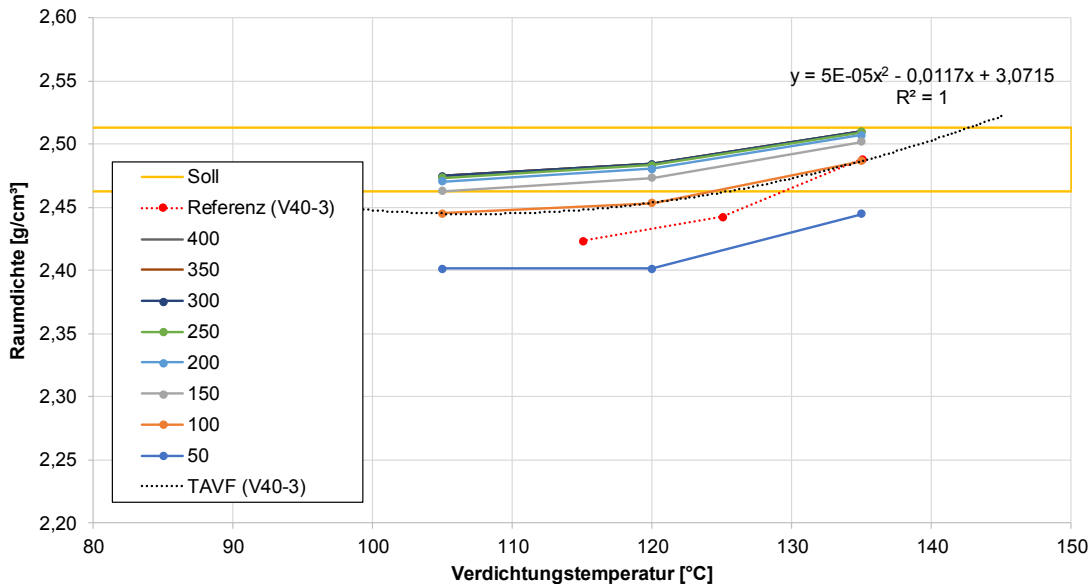


Bild 4-19: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungs-temperaturen der Variante V40-3 (Zeolith) im Vergleich zur Referenzvariante (V40-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 32 T S

Die Raumdichte der Variante V40-3 (Zeolith) bei einer Verdichtungs-temperatur von 135 °C liegt wiederum auf einem Niveau mit der Referenzvariante (V40-1). Entsprechend ist für die Standard-Verdichtungs-temperatur kein temperaturabsenkender Effekt in Form einer höheren Raumdichte erkennbar. Jedoch zeigt sich auch hier ein flacherer Verlauf der TAVF bei niedrigeren Verdichtungs-temperaturen, im Vergleich zur Referenz. Dies ist kongruent zum Verlauf der TAVF der Variante V40-2.

Bei einer Verdichtungs-temperatur von 120 °C und einer Verdichtungs-energie von 150 % liegt die Raumdichte noch im Toleranz-Bereich der Referenzvariante bei einer Verdichtungs-temperatur von 135 °C. Entsprechend ist laut TAVF eine Absenkung der Temperatur unter Anwendung einer höheren Verdichtungs-energie möglich. Die maximale Temperaturabsenkung auf 100 °C bzw. um 35 °C kann laut TAVF durch Anwendung von 200 Verdichtungs-schlägen (entspricht 200 % Verdichtungs-energie) erreicht werden.

Zur Überprüfung der TAVF wurde erneut Mischgut der Variante V40-3 (Zeolith) und anschließend MPK hergestellt. Dabei wurden zum einen fünf MPK bei 135 °C mit jeweils 100 Verdichtungs-schlägen, 2 weitere MPK bei 120 °C mit 150 Verdichtungs-schlägen und 2 MPK bei 115 °C und 200 Verdichtungs-schlägen hergestellt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-15 und in Bild 4-20 dargestellt.

Variante 40 AC 32 T S	Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdicke (Mittelwert)	Raumdicke Standardabweichung
	°C	-	-	g/cm ³	g/cm ³
V40-3 Zeolith	135	5	2 x 50	2,481	0,0127
	120	2	2 x 75	2,469	0,0065
	115	2	2 x 100	2,451	0,0165

Tab. 4-15: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V40-3 (Zeolith) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Schlägen und bei 120 °C und 150 Verdichtungsschlägen sowie bei 115 °C und 200 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 32 T S

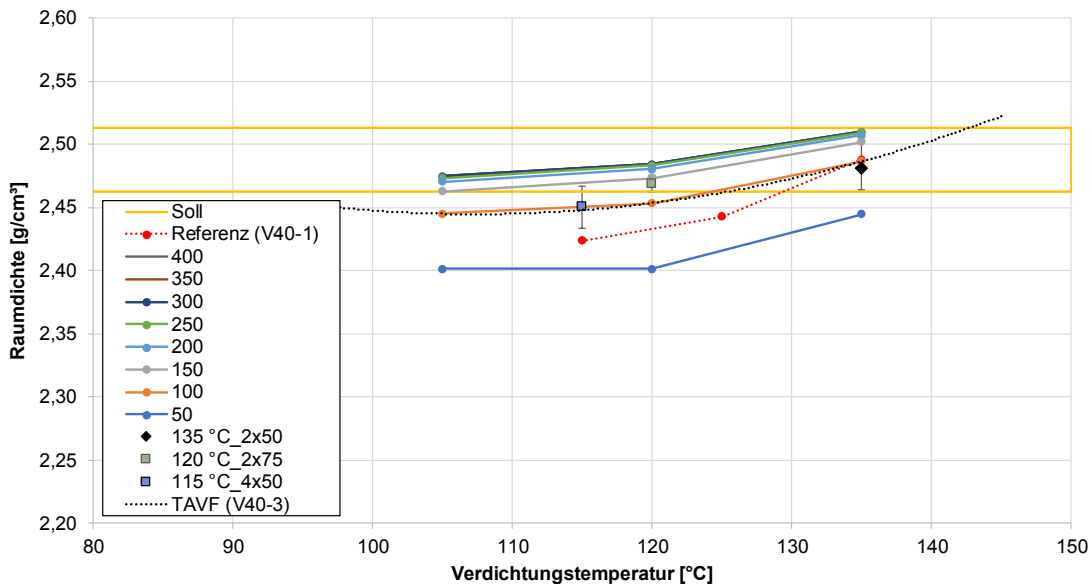


Bild 4-20: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V40-3 (Zeolith) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Verdichtungsschlägen, 120 °C und 150 Schlägen und bei 115 °C mit 200 Schlägen, AC 32 T S

Wie in Bild 4-20 zu erkennen ist, liegt die Raumdicke bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C im erwarteten Bereich, sodass die TAVF diesbezüglich bestätigt wird. Dies gilt auch für die Raumdicke bei 120 °C und einer Verdichtungsenergie von 150 %. Bei einer Verdichtungstemperatur von 115 °C und einer Verdichtungsenergie von 200 % liegt die ermittelte Raumdicke unter dem erwarteten Niveau. Entsprechend gilt die TAVF für geringere Verdichtungstemperaturen mit höher Verdichtungsenergie nur eingeschränkt.

Als Ursache für die „spät“, d. h. erst bei niedrigen Verdichtungstemperaturen, einsetzende Wirkung des temperaturabsenkenden Zusatzes wird das relativ weiche, frische Bindemittel vermutet, welches die Effekte der Temperaturabsenkung bei einer Verdichtungstemperatur von 130 °C überdeckt.

4.1.5 Zusammenfassung Raumdichte

Die erzielten Ergebnisse sind in Tab. 4-16 zusammengefasst.

Varianten		Anwendung TAVF
V10 SMA 8 S	Referenz	-
	oberflächenaktiver Zusatz	✓
	Zeolith	(✓)
V20 AC 11 D S	Referenz	-
	Schaumbitumen	(✓)
	oberflächenaktiver Zusatz	✓
V30 SMA 16 B S	Referenz	-
	Schaumbitumen	(✓)
	oberflächenaktiver Zusatz	(✓)
V40 AC 32 T S	Referenz	-
	oberflächenaktiver Zusatz	(✓)
	Zeolith	✓
✓ = Ergebnisse plausibel (✓) = Ergebnisse prinzipiell plausibel - = Referenz		

Tab. 4-16: Übersicht der Varianten bei Anwendung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF)

Der Tab. 4-16 kann entnommen werden, dass grundsätzlich für alle überprüften Varianten das Prinzip der Verdichtungsfunktion TAVF angewandt werden kann. Die Ziel-Raumdichten werden nur bedingt bei abgesenkten Temperaturen erreicht.

Als kritisch erweist sich die Kombination aus Splittmastixasphalt SMA 8 S und Zeolith. Hier konnte schon (Radenberg 2004) über Probleme berichten. Auch beim SMA 16 B S konnten keine Vorteile erzielt werden. Möglicherweise ist hier die Wirkweise vergleichbar zu SMA 8 S.

Auch die Varianten mit Schaumbitumen (bei AC 11 D S und SMA 16 B S) zeigten keine Vorteile bezüglich der Temperaturabsenkung. Möglicherweise ist die Zwischenlagerung des Bitumens suboptimal.

Für das Tragschichtmischgut der Sorte AC 32 T S wurde erst bei tiefen Temperaturen ein Vorteil erreicht, unabhängig vom Zusatz. Hier wird das weiche Zugabebitumen als ursächlich angesehen. Bei hohen Temperaturen ist es sehr weich und überdeckt damit die Effekte der Temperaturabsenkung. Insbesondere beim Zeolith wurde bewusst mit minimalen Zugabemengen gearbeitet, so dass hier noch Optimierungspotenzial besteht.

Generell wurde hier keine Optimierung bezüglich der Komposition von Zusatz und Mischgut vorgenommen. Es wurde die vorgegebene Menge an Zusatz hinzugegeben ohne diese zu variieren. Auch könnte das Mischgut in Bezug auf den jeweiligen Zusatz weiter optimiert werden (z. B. bezüglich Bindemittel, Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung). All dies erfolgte im Projekt nicht. Denn das Ziel war es, für ein Mischgut die Wirkung unterschiedlicher Zusätze hinsichtlich der Verdichtung zu beurteilen.

4.1.6 Statistische Auswertung

Über die statistische Auswertung wurde überprüft, ob mit dem Verfahren der Marshall-Verdichtung für alle temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren gleichmäßige und damit

reproduzierbare Raumdichten der Probekörper erzeugt werden. Als Streumaß wurde dabei die Standardabweichung der Raumdichten jeder Variante bei einer Verdichtungstemperatur herangezogen, siehe Tab. 4-17. Es könnte auch mit dem Variationskoeffizienten gearbeitet werden, jedoch würden dann mögliche Abhängigkeiten von der Verdichtungstemperatur schlechter erkannt.

Varianten		Verdichtungstemperatur	Anzahl MPK	Anzahl Schläge	Raumdichte (Mittelwert)	Raumdichte Standardabweichung
		°C	-	-	g/cm ³	g/cm ³
SMA 8 S	V10-1 Referenz	145	5	2 x 50	2,445	0,0037
		135	3	2 x 50	2,418	0,0057
		125	3	2 x 50	2,414	0,0052
	V10-2 Oberflächenaktiv	135	5	2 x 50	2,413	0,0123
		125	2	2 x 50	2,389	0,0059
		120	2	2 x 75	2,426	0,0003
	V10-3 Zeolith	145	5	2 x 50	2,450	0,0036
		135	2	2 x 75	2,457	0,0041
	AC 11 D S	V20-1 Referenz	135	5	2 x 50	2,490
125			2	2 x 50	2,485	0,0105
115			2	2 x 50	2,483	0,0000
105			2	2 x 50	2,452	0,0075
V20-2 Schaumbitumen		125	5	2 x 50	2,476	0,0077
		120	5	2 x 50	2,479	0,0033
V20-3 Oberflächenaktiv		105	2	2 x 75	2,493	0,0038
		145	5	2 x 50	2,489	0,0101
SMA 16 B S	V30-1 Referenz	130	2	2 x 50	2,480	0,0054
		105	2	2 x 50	2,427	0,0069
		135	5	2 x 50	2,470	0,0077
	V30-2 Schaumbitumen	145	5	2 x 50	2,509	0,0028
		135	2	2 x 75	2,507	0,0014
	V30-3 Oberflächenaktiv	135	2	2 x 50	2,488	0,0055
125		2	2 x 50	2,443	0,0389	
AC 32 T S	V40-1 Referenz	115	2	2 x 50	2,424	0,0035
		135	5	2 x 50	2,483	0,0089
		120	2	2 x 75	2,466	0,0095
	V40-2 Oberflächenaktiv	115	2	4 x 50	2,461	0,0119
		135	5	2 x 50	2,481	0,0142
		120	2	2 x 75	2,469	0,0091
	V40-3 Zeolith	115	2	2 x 100	2,451	0,0228

Tab. 4-17: Übersicht der Streumaße (Standardabweichungen) der überprüften Raumdichten der Varianten V10 bis V40, hergestellt mit dem Marshall-Verdichtungsgerät.

In einem ersten Schritt erfolgte die Überprüfung der Standardabweichungen für Varianten mit 5 Probekörpern, welche gemäß der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) für die abgesenkte Verdichtungstemperatur hergestellt wurden. Diese Ergebnisse sind in Bild 4-21 dargestellt.

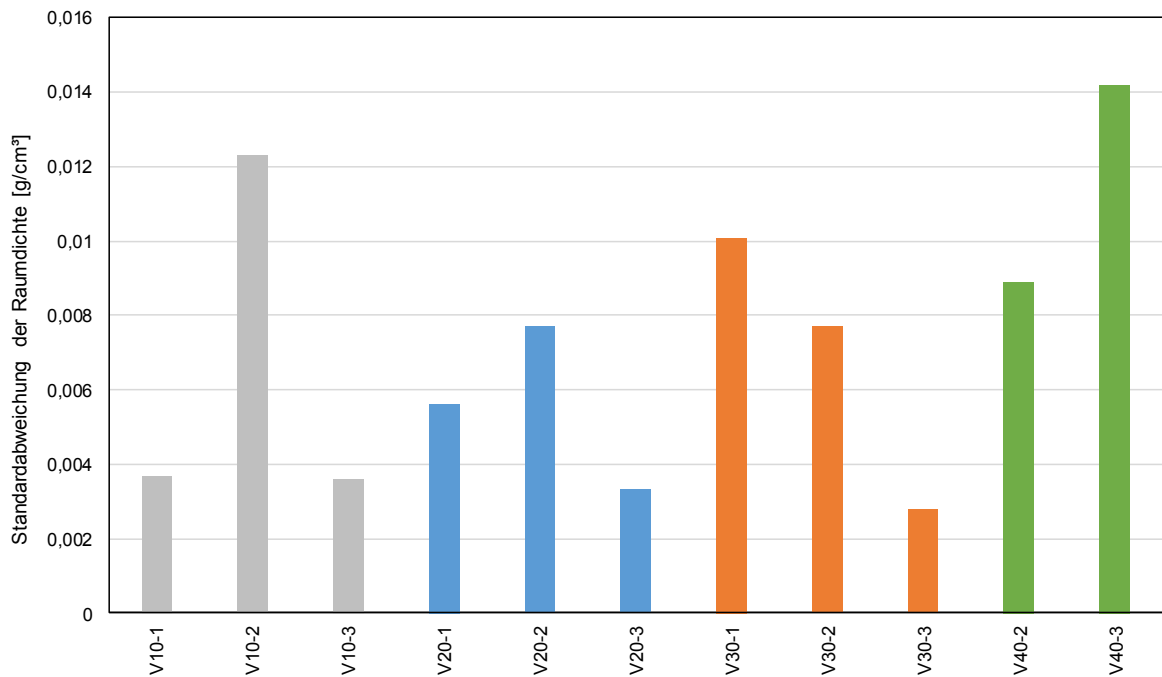


Bild 4-21: Vergleich der Streumaße (Standardabweichungen) an temperaturabgesenkten Varianten mit 5 Marshall-Probekörpern: Varianten V10-1 (SMA 8 S Referenz), V20-1 (AC 11 D S Referenz), V30-1 (SMA 16 B S Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V10-3 (Zeolith), V20-2 (Schaumbitumen), V30-2 (Schaumbitumen), V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-3 (Zeolith)

Eine Rangfolge der höchsten 7 Streumaße (von 11) in Bild 4-21 ergibt die Reihung:

1. V40-3, AC 32 T S mit Zeolith
2. V10-2, SMA 8 S mit oberflächenaktivem Zusatz
3. V30-1, SMA 16 B S Referenz
4. V40-2, AC 32 T S mit oberflächenaktivem Zusatz
5. V20-2, AC 11 D S und
V30-2, SMA 16 B S jeweils mit Schaumbitumen
6. V20-1, AC 11 D S Referenz

Die geringsten Streumaße weisen die folgenden Varianten auf:

- V10-1, SMA 8 S Referenz
- V10-3, SMA 8 S mit Zeolith
- V20-3, AC 11 D S mit oberflächenaktivem Zusatz und
- V30-3, SMA 16 B S mit oberflächenaktivem Zusatz

Sowohl die Reihung der höchsten als auch die Gruppe der geringsten Streumaße weisen keine Systematik auf. Weder Mischgutsorte noch temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren sind auffällig.

Als Tendenz kann erkannt werden, dass das Asphaltmischgut AC 32 T S eher hohe Streumaße aufweist, was bereits in der Präzision des Prüfverfahrens (Abhängigkeit von groben Kornanteilen > 11,2 mm) berücksichtigt ist.

Auffällig ist, dass die beiden Varianten, welche mit der Schaumbitumen-Technologie hergestellt wurden, zufällig ein gleiches Streumaß aufweisen.

Nach der Prüfvorschrift beträgt die Standardabweichung für die kritischen Einzelwerte $0,0108 \text{ g/cm}^3$ mit einer Spannweite von $d = 0,030 \text{ g/cm}^3$. Diese Spannweite wäre bei der Variante V40-3 überschritten (bei Variante V10-2 nicht, trotz der ermittelten Standardabweichung). Die Spannweite gilt jedoch nur für 2 Probekörper ($0,0108 \times 2,77$), bei 5 Probekörpern vergrößert sich die Spannweite auf ($0,0108 \times 3,86 =$) $0,042 \text{ g/cm}^3$. Damit würde die Spannweite der Variante V40-3 mit $0,040 \text{ g/cm}^2$ wieder innerhalb der kritischen Spannweite liegen.

In Bild 4-22 sind alle Standardabweichungen dargestellt.

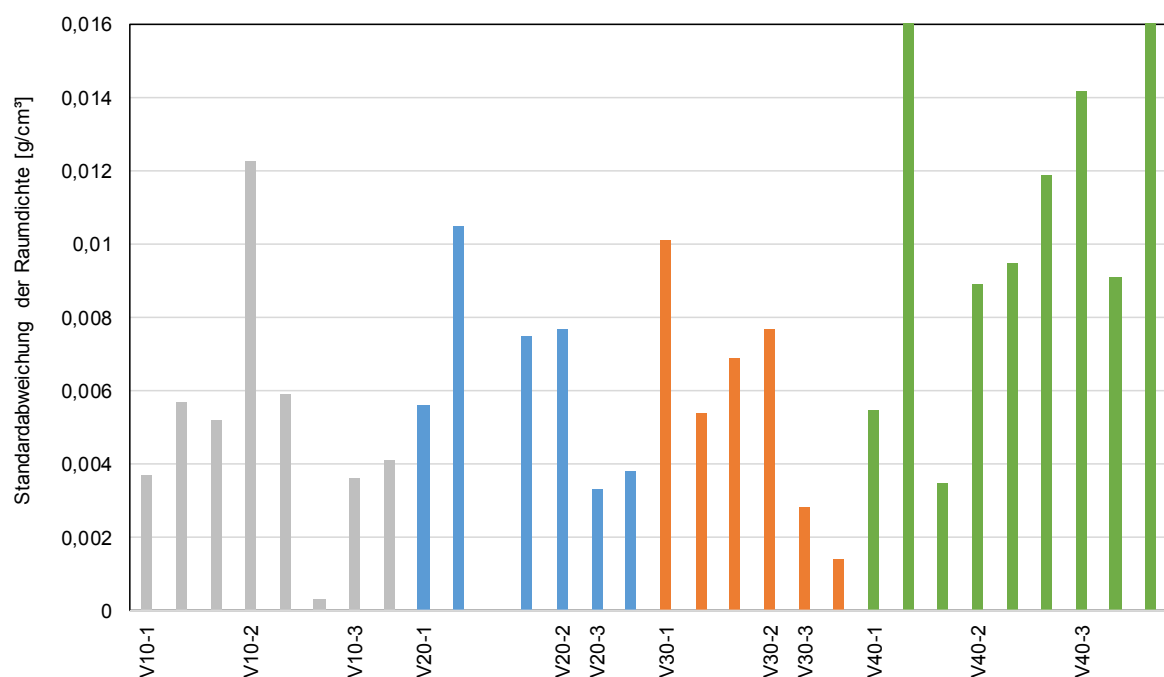


Bild 4-22: Vergleich der Streumaße (Standardabweichungen) aller temperaturabgesenkten Varianten der Anwendungsdemonstration, Marshall-Probekörper: Varianten V10-1 (SMA 8 S Referenz), V20-1 (AC 11 D S Referenz), V30-1 (SMA 16 B S Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V10-3 (Zeolith), V20-2 (Schaumbitumen), V30-2 (Schaumbitumen), V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-1 (AC 32 T S Referenz), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-3 (Zeolith)

Auch die Standardabweichungen in Bild 4-22 zeigen keine systematischen Abhängigkeiten. Es ist zu beachten, dass bis auf die Variante V40-3 bei 115 °C alle Einzelwerte innerhalb der kritischen Spannweite liegen. Somit können trotz von der Prüfvorschrift abweichender Verdichtungstemperaturen, abweichender Anzahl an Verdichtungsschlägen und unterschiedlicher temperaturabsenkender Zusätze / Verfahren noch ausreichend präzise Probekörper hergestellt werden.

Augenscheinlich weisen die Raumdichten der Varianten V40 (AC 32 T S) insgesamt höhere Streumaße auf. Innerhalb der Varianten ist jedoch keine Systematik erkennbar.

Daher werden zunächst die Mittelwerte über die Standardabweichungen einer Variante und damit einer Mischgutsorte, für alle temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren innerhalb dieser Variante, gebildet:

- V10 0,0051 g/cm³
- V20 0,0055 g/cm³
- V30 0,0057 g/cm³
- V40 0,0138 g/cm³

Hierbei fällt auf, dass die Variante V40 (AC 32 T S mit 60 % AG) tatsächlich höhere Streumaße aufweist, was als plausibel angesehen wird.

Betrachtet man die Mittelwerte über die Standardabweichungen eines Zusatzes / Verfahrens, für alle überprüften Mischgutsorten, so ergeben sich folgende Werte:

- Referenz (12 x) 0,0085 g/cm³
- Oberflächenaktive Zusätze (10 x) 0,0060 g/cm³
- Zeolith (4 x) 0,0108 g/cm³
- Schaumbitumen (2 x) 0,0077 g/cm³

Hier fällt auf, dass bei Einsatz von Zeolith höhere Streumaße entstehen. Dies ist den Varianten V40-3 mit AC 32 T S geschuldet, welche generell höhere Streumaße aufweisen. Da somit die Hälfte der Werte ein hohes Niveau aufweist, steigt auch der Mittelwert entsprechend an. Bei den oberflächenaktiven Zusätzen sind es nur 3 Varianten AC 32 T S (V40-2) von 10 Varianten gesamt, so dass der Einfluss nicht so deutlich wird. Ohne AC 32 T S würden diese Zusätze die geringsten Streumaße aufweisen.

Zusammenfassend führt die statistische Auswertung zu folgenden Ergebnissen:

- Der Einsatz der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren bewirkt für alle überprüften Mischgutsorten bei der Herstellung der Marshall-Probekörper keine signifikante Erhöhung der Streumaße für die Raumdichte.
- Für die untersuchten Mischgutsorten bewirkt der Einsatz von Zusätzen / Verfahren bei der Herstellung der Marshall-Probekörper keine signifikante Erhöhung der Streumaße für die Raumdichte.
- Trotz von der Prüfvorschrift abweichender Verdichtungsbedingungen, in Kombination mit den temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren, erfolgt kein signifikanter Anstieg in den Streumaßen.

Damit erweist sich die Marshall-Verdichtung bezüglich der Raumdichte als robust gegenüber Änderungen im Prüf- bzw. Verdichtungsverfahren.

4.2 Verformungswiderstand

4.2.1 V10 - SMA 8 S

Wie auch zuvor besteht das Referenzmischgut V10-1 aus einem SMA 8 S mit 25/55-55 A. Für die Variante V10-2 wurde ein oberflächenaktiver Zusatz eingemischt und für die Variante V10-3 wurde Zeolith zugegeben.

Zusammen mit den Überprüfungen der TAVF aus Kapitel 4.1 wurden folgende Varianten hergestellt und anschließend mittels Druck-Schwellversuch getestet (siehe Tab. 4-18):

Variante		Verdichtungs- temperatur [°C]	Verdichtungs- energie [21 NM]	Anzahl Probekörper im DSV [-]	Raumdicke Mittelwert [g/cm ³]
V10-1-145	Referenz	145	2 x 50	5	2,436
V10-1-135		135	2 x 50	3	2,409
V10-1-125		125	2 x 50	3	2,406
V10-2-135	Oberflächen- aktiver Zusatz	135	2 x 50	2	2,432
V10-2-120		120	2 x 50	2	2,401
V10-2-105		105	2 x 50	2	2,393
V10-2-135a		135	2 x 50	5	2,397
V10-2-125		125	2 x 50	2	2,381
V10-2-120a		120	2 x 75	2	2,419
V10-3-135	Zeolith	135	2 x 50	2	2,403
V10-3-120		120	2 x 50	2	2,381
V10-3-105		105	2 x 50	2	2,353
V10-3-145		145	2 x 50	5	2,445
V10-3-135a		135	2 x 75	2	2,451

Tab. 4-18: Liste der hergestellten Variationen für Variante V10 – SMA 8 S: Referenzvariante V10-1, Variante V10-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V10-3 mit Zeolith

Die Ergebnisse aus den Druck-Schwellversuchen und die zugehörigen Raumdichten der Probekörper der Variante V10-1 bis V10-3 sind in Bild 4-23 dargestellt.

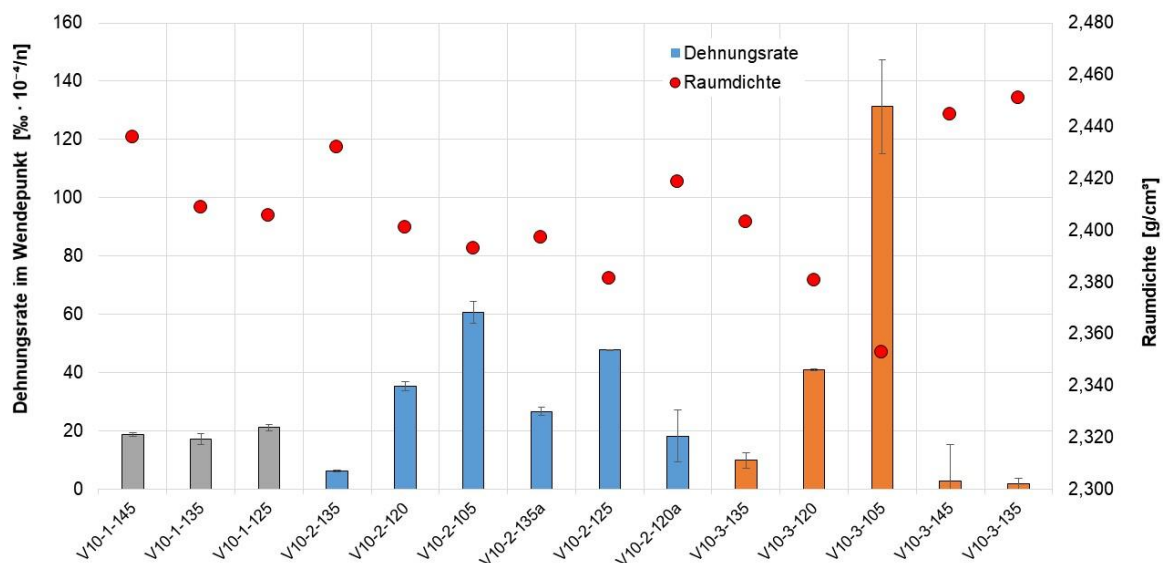


Bild 4-23: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V10 (SMA 8 S): Referenzvariante V10-1, Variante V10-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V10-3 mit Zeolith

Die Referenzvariante V10-1 zeigt mit der Dehnungsrate kaum Abhängigkeiten von der Raumdicke und damit von der Verdichtungstemperatur.

Die Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) zeigt generell eine plausible Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur und der Raumdicke. Die Varianten V10-2-135 und V10-2-120a mit den höchsten Raumdichten weisen auch die geringsten Dehnungsraten auf. Die Varianten mit den geringsten Raumdichten weisen höhere Dehnungsraten auf.

Für die Varianten V10-3 mit Zeolith zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur und der Raumdichte. Die höchsten Raumdichten weisen die geringsten Dehnungsraten auf und umgekehrt.

In Bild 4-24 sind zusätzlich die Dehnungsraten im Wendepunkt im Verhältnis zur Raumdichte der Probekörper der Variante V10 dargestellt, um eine mögliche Korrelation der Dehnungsrate mit der Raumdichte zu überprüfen.

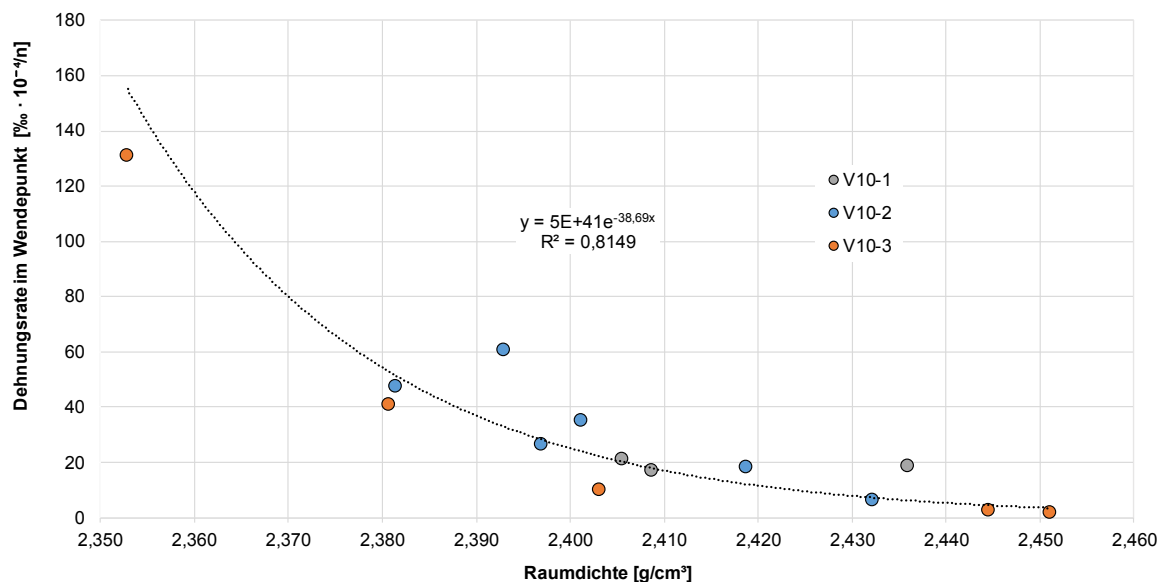


Bild 4-24: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V10 (SMA 8 S): Referenzvariante V10-1, Variante V10-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V10-3 mit Zeolith, jeweils mit unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Mit einem Bestimmtheitsmaß von > 80 % besteht ein exponentieller Zusammenhang. Weiterhin kann mit Bild 4-24 nachgewiesen werden, dass bei vergleichbarer oder niedrigerer Raumdichte gegenüber der Referenzvariante (2,435 g/cm³) mit beiden temperaturabgesenkten Varianten V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V 10-3 (Schaumbitumen) auch ein vergleichbarer bis höherer Verformungswiderstand erreicht wird. Ab einer Raumdichte von ca. 2,40 g/cm³ werden höhere Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte erzielt.

4.2.2 V20 - AC 11 D S

Das Referenzmischgut V20-1 besteht wiederum aus einem AC 11 D S mit einem Straßenbaubitumen 50/70 und 20 M.-% Ausbauphase. Für die Variante V20-2 wurde mit Schaumbitumen gearbeitet und für die Varianten V20-3 wurde ein oberflächenaktiver Zusatz eingemischt.

Zusammen mit den Überprüfungen der TAVF wurden die folgenden Varianten im Druck-Schwellversuch getestet (s. Tab. 4-19).

Variante		Verdichtungs- temperatur [°C]	Verdichtungs- energie [21 NM]	Anzahl Probekörper im DSV [-]	Raumdichte Mittelwert [g/cm³]
V20-1-135	Referenz	135	2 x 50	2	2,498
V20-1-135a		135	2 x 50	5	2,483
V20-1-125		125	2 x 50	2	2,484
V20-1-115		115	2 x 50	2	2,478
V20-1-105		105	2 x 50	2	2,447
V20-2-125	Schaum- bitumen	125	2 x 50	5	2,475
V20-3-135	Oberflächen- aktiver Zusatz	135	2 x 50	2	2,507
V20-3-120		120	2 x 50	2	2,497
V20-3-105		105	2 x 50	2	2,467
V20-3-120a		120	2 x 50	5	2,477
V20-3-105a		105	2 x 75	2	2,489

Tab. 4-19: Liste der hergestellten Variationen für Variante V20 – AC 11 D S: Referenzvariante V20-1, Variante V20-2 mit Schaumbitumen, Variante V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Die Ergebnisse aus den Druck-Schwellversuchen und die zugehörigen Raumdichten der Probekörper der Variante V10-1 bis V10-3 sind in Bild 4-25 dargestellt.

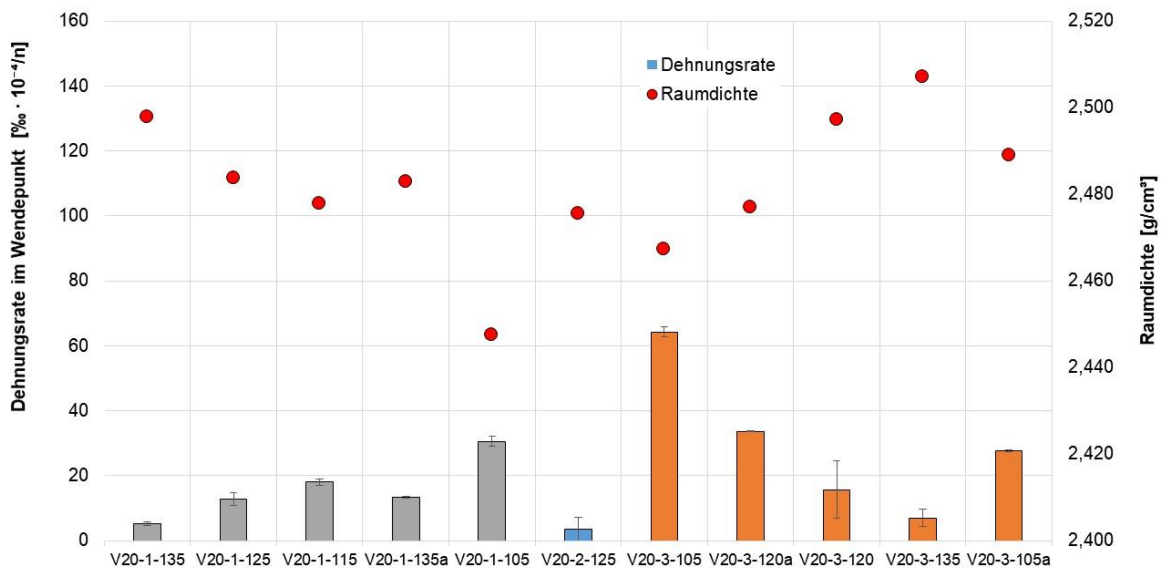


Bild 4-25: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V20 (AC 11 D S): Referenzvariante V20-1, Variante V20-2 mit Schaumbitumen, Variante V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Die Referenzvariante V20-1 zeigt mit der Dehnungsrate eine Abhängigkeit von der Raumdicthe und damit auch von der Verdichtungstemperatur. Die Wiederholung bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C (V10-1-135a) zeigt eine geringere Raumdicthe, aber plausible Dehnungsraten.

Bei Variante V20-2 (Schaumbitumen) wurde nur die Wiederholung bei 125 °C zur Validierung der TAVF geprüft. Die Variante zeigt in Relation zur Referenz eine etwas geringere Raumdicthe, aber eine etwas vorteilhaftere Dehnungsrate.

Für die Varianten V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) wurde eine deutliche Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur und damit von der Raumdicthe ermittelt. Die höchsten

Raumdichten weisen die geringsten Dehnungsraten auf und umgekehrt. Insgesamt weist diese Variante gegenüber der Referenzvariante etwas höhere Dehnungsraten auf.

In Bild 4-26 sind zusätzlich die Dehnungsraten im Wendepunkt im Verhältnis zu den Raumdichten der Probekörper dargestellt, um eine mögliche Korrelation der Dehnungsrate mit der Raumdichte zu überprüfen.

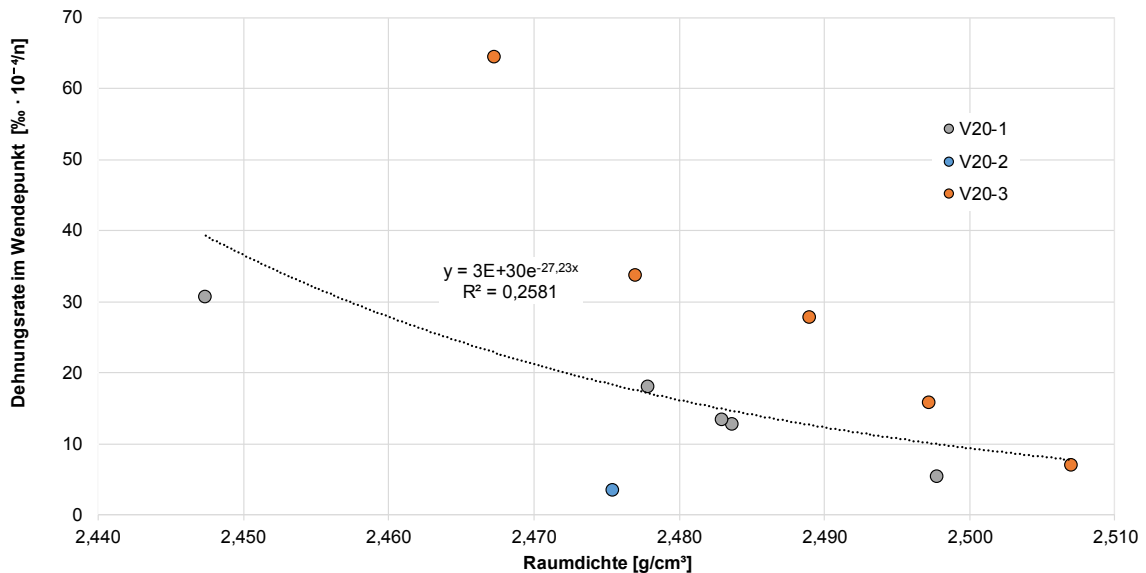


Bild 4-26: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raum-dichte, Variante V20 (AC 11 D S): Referenzvariante V20-1, Variante V20-2 mit Schaumbitumen, V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz, jeweils bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Das Bestimmtheitsmaß lässt hier keine eindeutige Korrelation erkennen. Weiterhin kann mit Bild 4-26 nachgewiesen werden, dass trotz geringerer Raum-dichte zur Referenzvariante (2,498 g/cm³) mit der Schaumbitumen-Variante (2,475 g/cm³) ein höherer Verformungswiderstand erreicht wird. Die Variante V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz weist bei gleicher Raum-dichte durchgängig ein schlechteres Niveau auf.

4.2.3 V30 - SMA 16 B S

Das Referenzmischgut V30-1 besteht hier wiederum aus einem SMA 16 B S mit 25/55-55 A und 30 M.-% Ausbaumasphalt. Für die Variante V30-2 wurde ein Schaumbitumen eingesetzt. Die Variante V30-3 wurde mit einem oberflächenaktiven Zusatz hergestellt.

Zusammen mit den Überprüfungen der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) wurden die folgenden Varianten im Druck-Schwellversuch überprüft (s. Tab. 4-20).

Variante		Verdichtungs- temperatur [°C]	Verdichtungs- energie [21 NM]	Anzahl Probekörper im DSV [-]	Raumdichte Mittelwert [g/cm³]
V30-1-145	Referenz	145	2 x 50	2	2,497
V30-1-130		130	2 x 50	5	2,494
V30-1-105		105	2 x 50	2	2,440
V30-1-145a		145	2 x 50	5	2,480
V30-1-120		120	2 x 63	2	2,451
V30-2-135	Schaum- bitumen	135	2 x 50	5	2,470
V30-3-135	Oberflächen- aktiver Zusatz	135	2 x 50	2	2,469
V30-3-120		120	2 x 50	2	2,448
V30-3-105		105	2 x 50	2	2,403
V30-3-145		145	2 x 50	5	2,506
V30-3-135a		135	2 x 75	2	2,503

Tab. 4-20: Liste der hergestellten Variationen für Variante V30 – SMA 16 B S: Referenzvariante V30-1, Variante V30-2 mit Schaumbitumen, Variante V30-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Die Ergebnisse aus den Druck-Schwellversuchen und die zugehörigen Raumdichten der Probekörper der Varianten V30-1 bis V30-3 sind in Bild 4-27 dargestellt.

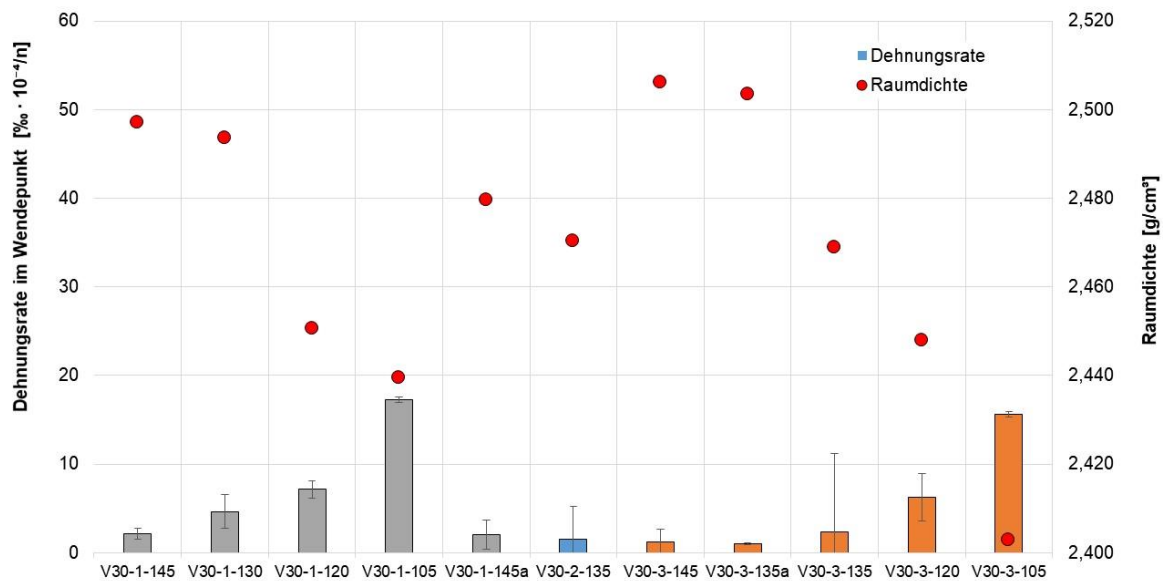


Bild 4-27: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V30 (SMA 16 B S): Referenzvariante V30-1, Variante V30-2 mit Schaumbitumen, Variante V30-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Die Referenzvariante V30-1 zeigt mit der Dehnungsrate Abhängigkeiten von der Raumdichte und damit von der Verdichtungstemperatur. Die Wiederholung bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C (V30-1-145a) zeigt zwar eine geringere Raumdichte aber vergleichbare Dehnungsraten zur Variante V30-1-145 zuvor.

Für die Variante V30-2 (Schaumbitumen) wurde nur die Wiederholung bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C zur Validierung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funk (TAVF) geprüft. Die Variante zeigt in Relation zur Referenzvariante eine etwas geringere Raumdichte, aber eine gleiche Dehnungsrate.

Für die Varianten V30-3 mit dem oberflächenaktiven Zusatz konnte eine deutliche Abhängigkeit von der Temperatur und der Raumdichte ermittelt werden. Die höchsten Raumdichten weisen die geringsten Dehnungsraten auf und umgekehrt. Bei vergleichbarer Raumdichte zur Referenzvariante wurden auch gleiche Dehnungsraten erzielt.

In Bild 4-28 sind die Dehnungsraten im Wendepunkt im Verhältnis zur Raumdichte der Probekörper der Variante V30 dargestellt, so dass mögliche Korrelationen der Dehnungsrate mit der Raumdichte überprüft werden können.

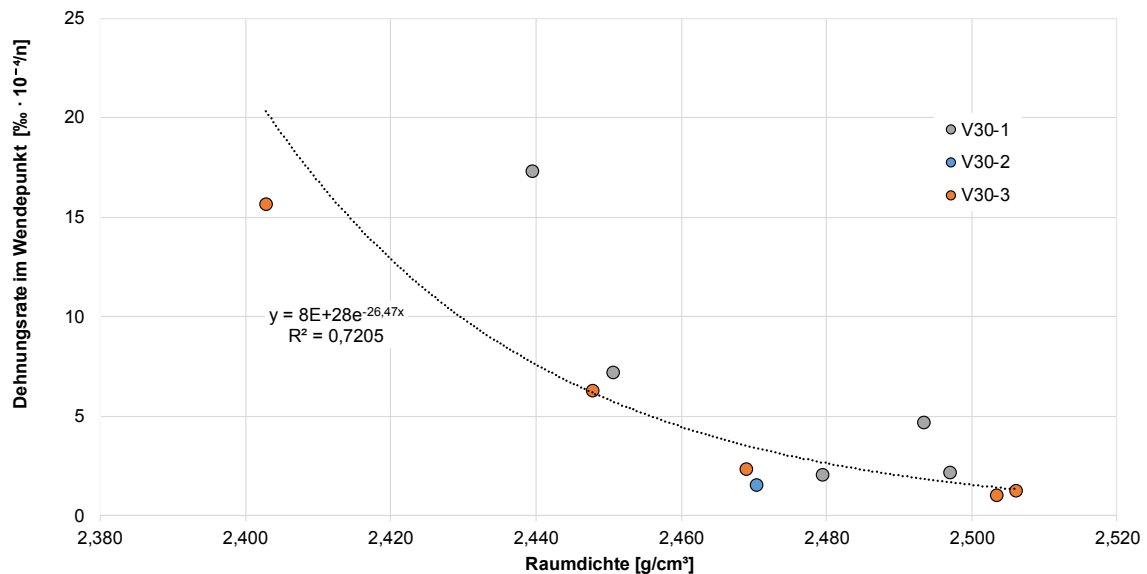


Bild 4-28: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V30 (SMA 16 B S): Referenzvariante V30-1, Variante V30-2 mit Schaumbitumen, V30-3 mit oberflächenaktivem Zusatz, jeweils bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Trotz des Bestimmtheitsmaßes von „nur“ 72 % liegt hier eine Abhängigkeit der Dehnungsraten von der Raumdichte vor, wobei die niedrigste (nicht praxisnahe) Verdichtungstemperatur der Referenzvariante als Ausreißer zu betrachten ist. Weiterhin kann mit Bild 4-28 nachgewiesen werden, dass bei vergleichbarer oder niedrigerer Raumdichte zur Referenzvariante (2,497 g/cm³) mit beiden (temperaturabgesenkten) Varianten auch ein vergleichbarer bis höherer Verformungswiderstand erreicht wird. Ab einer Raumdichte von ca. 2,46 g/cm³ werden dann höhere Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte erzielt.

4.2.4 V40 – AC 32 T S

Wie in Kapitel 4.1 besteht das Referenzmischgut V40-1 aus einem AC 32 T S mit Zugabebindemittel 160/220 und 60 M.-% Ausbauasphalt. Für die Variante V40-2 wurde ein oberflächenaktiver Zusatz eingemischt (bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt) und für die Variante V40-3 wurde Zeolith (bezogen aufs gesamte Mischgut) zugegeben.

Zusammen mit den Überprüfungen der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) wurden folgende Varianten hergestellt (siehe Tab. 4-21 und Bild 4-29):

Variante		Verdichtungs- temperatur [°C]	Verdichtungs- energie [21 NM]	Anzahl Probekörper im DSV [-]	Raumdicke Mittelwert [g/cm ³]
V40-1-135	Referenz	135	2 x 50	2	2,497
V40-1-125		125	2 x 50	2	2,459
V40-1-115		115	2 x 50	2	2,440
V40-2-135	Oberflächen- aktiver Zusatz	135	2 x 50	2	2,495
V40-2-120		120	2 x 50	2	2,476
V40-2-105		105	2 x 50	2	2,451
V40-2-135a		135	2 x 50	5	2,494
V40-2-120a		120	2 x 75	2	2,471
V40-2-115		115	4 x 50	2	2,475
V40-3-135	Zeolith	135	2 x 50	2	2,496
V40-3-120		120	2 x 50	2	2,465
V40-3-105		105	2 x 50	2	2,453
V40-3-135a		135	2 x 50	5	2,489
V40-3-120a		120	2 x 75	2	2,481
V40-3-115		115	4 x 50	2	2,466

Tab. 4-21: Liste der hergestellten Variationen für Variante V40 – AC 32 T S: Referenzvariante V40-1, Variante V40-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V40-3 mit Zeolith

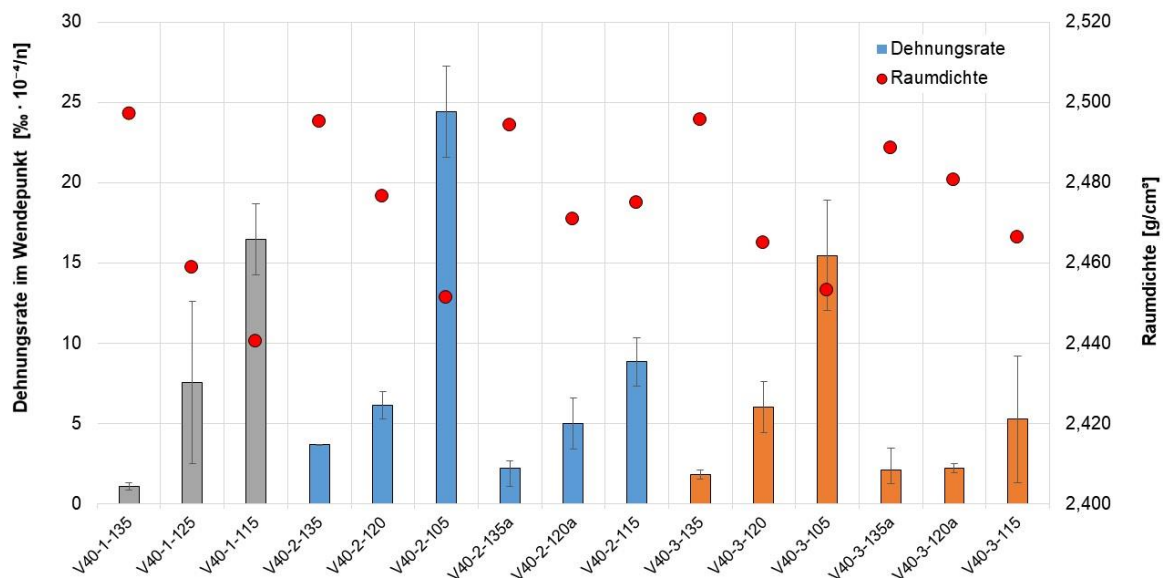


Bild 4-29: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V40 (AC 32 T S): Referenzvariante V40-1, Variante V40-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V40-3 mit Zeolith

Die Referenzvariante V40-1 zeigt mit der Dehnungsrate eine deutliche Abhängigkeit von der Raumdicke und damit von der Verdichtungs-temperatur. Die Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) zeigt mit den Wiederholungen (a-Varianten) ein mit der Referenzvariante vergleichbares Niveau. Auch die Varianten V40-3 mit Zeolith liegen in der gleichen Größenordnung und weisen eine Abhängigkeit von der Raumdicke resp. Verdichtungs-temperatur auf.

Mit Bild 4-30 werden die Dehnungsraten im Wendepunkt im Verhältnis zur Raumdicke der Probekörper der Variante V40 dargestellt, um mögliche Korrelationen der Dehnungsrate mit der Raumdicke zu überprüfen.

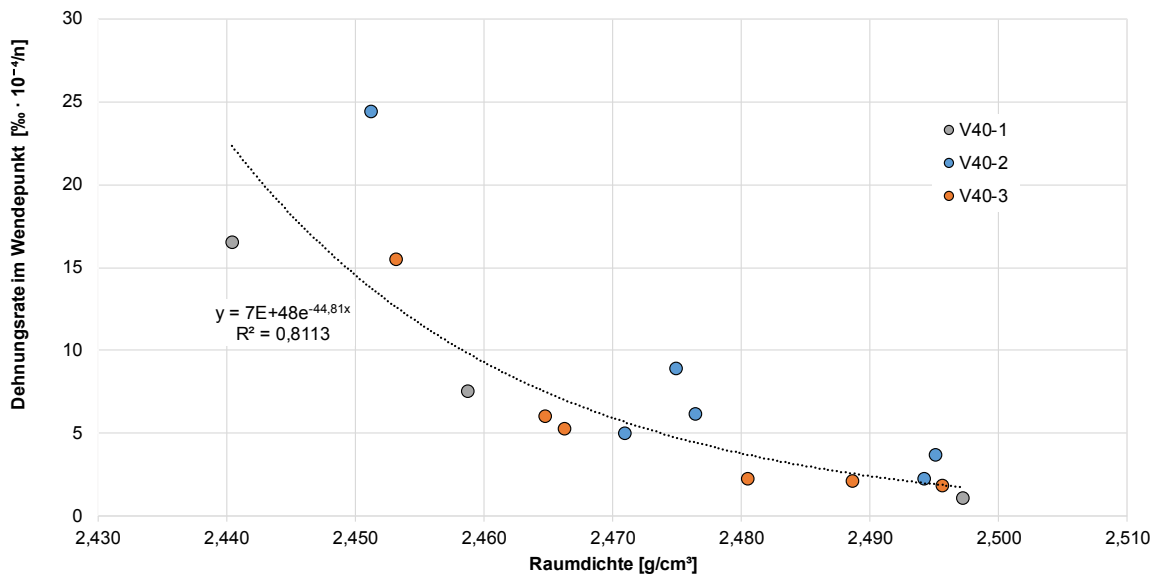


Bild 4-30: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V40 (AC 32 T S) : Referenzvariante V40-1, Variante V40-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V40-3 mit Zeolith, jeweils bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Hier liegt mit einem Bestimmtheitsmaß von 81 % eine gute Abhängigkeit der Dehnungsrate von der Raumdichte und damit von der Verdichtungstemperatur vor. Weiterhin kann mit Bild 4-30 nachgewiesen werden, dass bei vergleichbarer Raumdichte zur Referenzvariante (2,497 g/cm³) mit beiden Varianten V40-2 und V40-3 auch ein vergleichbarer Verformungswiderstand erreicht wird, unabhängig von der Art der Temperaturabsenkung. Variante V40-3 (Zeolith) erzielt auch bei geringerer Raumdichte vergleichbare Dehnungsraten.

Für die bisherige Vorgehensweise zeigte das hier eingesetzte Asphaltmischgut bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C (Standard) keine Vorteile für temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren. Jedoch konnten bei weiter abgesenkten Temperaturen höhere Raumdichten gegenüber der Referenzvariante erzielt werden. Damit wird auch ein höherer Verformungswiderstand gegenüber der Referenzvariante erzielt.

4.2.5 Zusammenfassung zum Verformungswiderstand

Zu den hier untersuchten temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren kann festgehalten werden:

- Werden oberflächenaktive Zusätze eingesetzt, kann die Verdichtungstemperatur um wenigstens 10 °C abgesenkt werden, ohne dass es Einschränkungen im Verformungswiderstand gibt. Eine Ausnahme ist das Asphaltmischgut AC 32 T S. Hier wird nur bedingt eine Absenkung erreicht, so dass auch nur bedingt Vorteile zu erzielen sind. Der Verformungswiderstand bleibt auf einem gleichen Niveau.
- Der Einsatz von Zeolith wurde an zwei Varianten überprüft und lässt eine Temperaturabsenkung zu, ohne Nachteile im Hinblick auf den Verformungswiderstand. Auch hier ist AC 32 T S die Ausnahme, jedoch bei gleichem resultierenden Verformungswiderstand.

- Zwei weitere Varianten wurden mit dem Schaumbitumen-Verfahren hergestellt. Hier kann prinzipiell eine Temperaturabsenkung erfolgen. Der daraus resultierende Verformungswiderstand wurde als gleichwertig oder höher ermittelt.

Tab. 4-22 gibt die Resultate in zusammengefasster Form wieder. Beim Verformungswiderstand werden bei Unterschiede $< 10 \text{‰} \cdot 10^{-4}/n$ als gleich angesehen.

Zusatz / Verfahren	Mischgutsorte	Temperaturabsenkung möglich?	Verformungswiderstand bei Temperaturabsenkung
Oberflächenaktiv	SMA 8 S	Ja	Gleich bis höher
	AC 11 D S	Ja	Gleich
	SMA 16 B S	Ja	Gleich
	AC 32 T S	nein	Gleich
Zeolith	SMA 8 S	Ja	Gleich
	AC 32 T S	nein	Gleich
Schaumbitumen	SMA 16 B S	Ja / nein	Höher
	AC 11 D S	Ja / nein	Höher

Tab. 4-22: Übersicht der eingesetzten temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und Mischgutsorten und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand ermittelt im Druck-Schwellversuch

Tab. 4-23 zeigt zusammenfassend die Abhängigkeit der Mischgutsorte von der Art der Temperaturabsenkung.

Mischgutsorte	Zusatz / Verfahren	Temperaturabsenkung möglich?	Verformungswiderstand bei Temperaturabsenkung
SMA 8 S	Oberflächenaktiv	Ja	Gleich bis höher
	Zeolith	Ja	Gleich
AC 11 D S	Oberflächenaktiv	Ja	Gleich
	Schaumbitumen	Ja/nein	Höher
SMA 16 B S	Oberflächenaktiv	Ja	Gleich
	Schaumbitumen	Ja/nein	Höher
AC 32 T S	Oberflächenaktiv	Nein	Gleich
	Zeolith	Nein	Gleich

Tab. 4-23: Übersicht der eingesetzten Mischgutsorten und temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand ermittelt im Druck-Schwellversuch

Es ist zu erkennen, dass eine Temperaturabsenkung prinzipiell für alle untersuchten Mischgutsorten möglich ist, mit der Ausnahme des AC 32 T S. Bei diesem Mischgut wurden in Relation nur geringe Mengen an temperaturabsenkenden Zusätzen eingesetzt, da diese sich auf den in Relation geringen Gesamtbindemittelgehalt beziehen. Daher ist eine Temperaturabsenkung nur bedingt möglich. Der Einsatz der Zusätze bewirkt keine nachteilige Veränderung des Verformungswiderstands.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Einsatz von temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren für die hier untersuchten Varianten keine nachteiligen Auswirkungen auf den Verformungswiderstand im Druck-Schwellversuch hat.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es folgt eine Zusammenfassung der Resultate aus den Kapiteln 3 und 4. Zunächst werden die Ergebnisse der Prüfungen zur geplanten Verdichtungsfunktion und zum weiteren Vorgehen zusammengefasst. Es folgen die Validierungen an unterschiedlichen Mischgutsorten und den temperaturabsenkenden Zusätzen /Verfahren.

5.1 Verarbeitbarkeit am AC 11 D S

Die Mischarbeiten wurden an einem Asphaltmischgut der Sorte AC 11 D S aufgezeichnet, der jeweils ohne Zusatz (Referenzvariante), mit einem oberflächenaktiven Zusatz, einem reaktivmodifizierenden Zusatz und der Zugabe von Zeolith hergestellt wurde. Der Mischprozess mit Schaumbitumen fand an der Universität in Kassel statt, wo keine Drehmomentaufnahme zur Verfügung stand.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Referenzvariante die größte Mischarbeit benötigt. Für den oberflächenaktiven Zusatz wurde eine deutlich geringere Mischarbeit benötigt, trotz einer geringeren Mischtemperatur. Die geringsten Mischarbeiten benötigten die Mischungen mit reaktivmodifizierendem Zusatz und mit Zeolith, welche jeweils bei gleicher Mischtemperatur der Referenzvariante gemischt wurden.

Alle eingesetzten Zusätze zeigten keine Auffälligkeiten während des Mischprozesses.

Über die Drehmomentaufnahme konnte anhand des hier eingesetzten AC 11 D S eindeutig ein positiver Effekt der temperaturabsenkenden Zusätze bestätigt werden.

Die Aufnahme der Mischarbeit wird aber nicht weiter als Qualitätskriterium berücksichtigt. Zum einen aufgrund der seltenen und teuren Prüftechnik, zum anderen sind die Eigenschaften der aus dem Mischgut hergestellten Probekörper entscheidend.

5.2 Verdichtungsfunktion am AC 11 D S

Die geplante Verdichtungsfunktion in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur und der Verdichtungsleistung konnte für das Marshall-Verdichtungsgerät, das Walzsektor-Verdichtungsgerät und den Gyrator für unterschiedliche temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren sicher ermittelt werden.

Da bei der jeweiligen Verdichtung die Raumdichte über die Dickenänderung bestimmt wird, muss diese noch korrigiert werden, um die physikalischen Unterschiede zur Tauchwägung auszugleichen. Dazu werden jeweils Probekörper mit der Standard-Verdichtung und mit einer maximalen Verdichtung hergestellt (Beispiel Marshall-Verdichtungsgerät: 2 x 50 Schläge und 2 x 200 Schläge). Diese Korrektur funktioniert unabhängig vom Verdichtungsgerät.

Der Nachweis einer temperaturabsenkenden Wirkung wurde mit allen Verdichtungsgeräten an einem Asphaltmischgut der Sorte AC 11 D S mit unterschiedlichen temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren überprüft. Zum Einsatz kamen (neben der Referenzvariante) ein oberflächenaktiver Zusatz, ein reaktivmodifizierender Zusatz, Zeolith, das Schaumbitumen-Verfahren und viskositätsverändernde Bindemittel.

Während für die Marshall-Verdichtung eine plausible Abhängigkeit von der Verdichtungs-temperatur und -leistung beobachtet wurde, waren die erzielten Raumdichten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät und dem Gyrator nicht immer plausibel. Die Reproduzierbarkeit war für alle drei Verdichtungsgeräte überwiegend vorhanden, wies jedoch Vorteile für das Marshall-Verfahren auf. Die mit dem Gyrator erzielten Probekörper wiesen im Regelfall die höchsten Raumdichten auf.

Das Streumaß war für die Marshall-Verdichtung am geringsten. Das Walzsektor-Verdichtungsgerät und der Gyrator wiesen vergleichbare Streuungen auf. Veränderungen aufgrund der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren konnten nicht ermittelt werden.

Weiterhin wurde der Verformungswiderstand mittels des Einaxialen Druck-Schwellversuchs überprüft. Neben den regelkonformen Probekörpern aus Asphalt-Probepplatten wurden zusätzlich Marshall- und Gyrator-Probekörper untersucht. Dabei wiesen sowohl die Probekörper aus der Walzsektor-Verdichtung als auch jene aus der Marshall-Verdichtung plausible Ergebnisse auf, während die Gyrator-Probekörper teilweise unplausibel reagierten. Generell zeigten die Varianten mit viskositätsveränderten Bitumen einen deutlich höheren Verformungswiderstand, was den Erwartungen entsprach. Die weiteren temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren zeigten außer eine hohe Raumdichte keine weitere Wirkung auf den Verformungswiderstand im Gebrauchstemperaturbereich des Asphalts.

Für das weitere Vorgehen wurden neben der Systematik bezüglich der Verdichtungsfunktion die Streumaße, der Verformungswiderstand sowie die Handhabung und die technische Ausstattung im Labor herangezogen. Ein Ausschlusskriterium konnte für kein Verdichtungsgerät gefunden werden.

In Summe erwies sich damit das Marshall-Verdichtungsgerät als geeignete Verdichtung mit einer guten Spreizung bezüglich der Verdichtungstemperaturen, geringen Streumaßen und als technisch günstig und einfach in der Handhabung. Die damit temperaturabgesenkt hergestellten Probekörper waren bezüglich des Verformungswiderstands unauffällig.

5.3 Validierung an weiteren Mischgutsorten

Die Validierung des bisherigen Vorgehens erfolgte an weiteren 4 Asphaltmischgutsorten: SMA 8 S, AC 11 D S (20 % AG), SMA 16 B S (30 % AG) und AC 32 T S (60 % AG).

Mit jeder Asphaltmischgutsorte wurden 3 Varianten hergestellt, neben der Referenzvariante zwei temperaturabgesenkte Varianten, für die oberflächenaktiven Zusätze jeweils mit Produkten unterschiedlicher Hersteller.

Die Verdichtungsfunktion zur Temperaturabsenkung konnte für alle Varianten problemlos bestimmt werden. Jedoch waren die Auswirkungen der Temperaturabsenkung unterschiedlich.

Für das Asphaltmischgut SMA 8 S konnte mit dem oberflächenaktiven Zusatz eine Temperaturabsenkung einfach realisiert werden. Der Einsatz von Zeolith funktionierte prinzipiell,

brachte jedoch keine Vorteile (siehe auch (Radenberg 2004)). Da der Zusatz nicht optimal auf das Asphaltmischgut abgestimmt wurde, besteht hier prinzipiell noch Potenzial.

Auch für das Asphaltmischgut AC 11 D S konnte mit dem oberflächenaktiven Zusatz eine Temperaturabsenkung einfach realisiert werden. Hier brachte der Einsatz der Schaumbitumen-Technologie keine Vorteile. Diese Technologie muss aber im Labor noch optimiert werden.

Dementsprechend konnte mit der Schaumbitumen-Technologie beim Asphaltmischgut SMA 16 B S ebenfalls kein Vorteil erzielt werden. Mit dem oberflächenaktiven Zusatz wurde ebenfalls kaum ein Effekt zur Temperaturabsenkung realisiert. Hier ist zu überprüfen, ob dieses Produkt einen Einzelfall darstellt. Auch müsste überprüft werden, ob z. B. die Zugabemengen oder die Zusammensetzung des Asphaltmischguts optimiert werden können.

Für das Asphaltmischgut AC 32 T S wurde die Temperaturabsenkung sowohl mit Zeolith, als auch mit dem oberflächenaktiven Zusatz nachgewiesen, jedoch erst bei Temperaturen unterhalb von ca. 130 °C. Es ist möglich, dass bei diesem Mischgut bei 135 °C primär noch das frische weiche Bindemittel bei der Verdichtung wirkt und so die Effekte der Zusätze überdeckt.

Die Überprüfung der Streumaße der Raumdichten der Marshall-Probekörper zeigte, dass mit allen Asphaltmischgutsorten und Kombinationen der Temperaturabsenkung die Präzision des (Mess-)Verfahrens eingehalten wurde. Es treten also keine übermäßigen Streuungen aufgrund der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren auf.

Auch hier wurde der Verformungswiderstand mittels des Einaxialen Druck-Schwellversuchs überprüft, allerdings nur an MPK. Die Prüfungen ergaben, dass die Verformungswiderstände aller Varianten gleich oder höher waren, als jene der jeweiligen Referenzvariante. Die Schaumbitumenvarianten erwiesen sich dabei für beide überprüften Varianten als vorteilhaft. Die temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren erwiesen sich als unproblematisch bezüglich des Verformungswiderstands.

5.4 Zusammenfassung

Anhand der hier überprüften Varianten kann festgehalten werden:

- Die Erstellung einer Verdichtungsfunktion, in Abhängigkeit von Verdichtungstemperatur und -energie, war mit allen Verdichtungsgeräten und allen temperaturabsenkenden Varianten AC 11 D S möglich.
- Die temperaturabgesenkt hergestellten Varianten AC 11 D S aller Verdichtungsgeräte waren bezüglich des Verformungswiderstands nicht auffällig.
- Aufgrund der geringeren Streumaße und der guten Differenzierbarkeit der Raumdichten wurde das Marshall-Verdichtungsgerät für das weitere Vorgehen ausgewählt.
- Die Validierung an vier Asphaltmischgutsorten mit unterschiedlichen Zusätzen / Verfahren war prinzipiell erfolgreich, auch wenn nicht immer ein temperaturabsenkender Effekt nachgewiesen werden konnte.
- Sowohl die Streumaße, als auch die Verformungswiderstände der hergestellten Marshall-Probekörper wiesen keine Auffälligkeiten auf.

Mit diesem Projekt wurde eine große Bandbreite an temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren ausgeführt. Dabei konnten nicht alle Probleme und Besonderheiten der einzelnen temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren berücksichtigt werden. Daher entsprechen auch nicht alle Ergebnisse dem möglichen Potential der Zusätze / Verfahren.

Zusätzlich gilt zu beachten:

- Es wurde mit kleinsten Mengen an Zeolith gearbeitet. Es wurden teilweise wenige Gramm, auf 1 Nachkommastelle eingewogen, zugegeben. Diese geringen Mengen müssen gleichmäßig im Asphaltmischgut verteilt werden, um effektiv zu wirken. Gleiches gilt für die oberflächenaktiven Zusätze.
- Die Schaumbitumen-Technologie befindet sich im Labor noch im Optimierungsstadium. Ein Einspritzen in den Labormischer war nicht möglich, das Bindemittel musste zwischengelagert werden. Mögliche Einflüsse dieser Methode sind nicht bekannt.
- An diesem Projekt haben zwei getrennte Labore gearbeitet, welche größtenteils die gleiche Zusammensetzung des Asphaltmischguts berücksichtigten, da fertige Gesteinskörnungsmischungen geliefert wurden. Dennoch variierte das Vorgehen im Mischprozess etwas, was einen möglichen Einfluss auf die resultierende Verdichtungswirkung haben kann.
- Die Verdichtung mittels Gyrator ist nicht standardisiert. Es ist zu überprüfen, ob mit den hier gewählten Versuchsbedingungen eine allgemein gültige, d. h. für alle Asphaltmischgutsorten praktikable Verdichtung erzielt werden kann.

6 Qualitätssicherungs-Konzept

Das resultierende Qualitätssicherungs-Konzept besteht zunächst aus einer Kategorisierung der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren. Basierend auf diesen wesentlichen Kategorien wird das Vorgehen im Labor angepasst. Dabei werden die aktuell in den Gremien der FGSV erarbeiteten Vorgehensweisen berücksichtigt.

6.1 Kategorisierung von Methoden der Temperaturabsenkung

Die folgende Kategorisierung unterscheidet temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren nach ihrem Wirkprinzip und bezüglich der Bearbeitung im Labor. Die Kategorienbezeichnung erfolgt mittels folgender Kürzel, die jeweils durch Bindestriche aneinandergereiht werden:

1. Wirkungsweise (V/M/S/O/R/A)
2. Absenkung der Temperatur im Rahmen einer Erstprüfung, ggf. mit Zusatz K/H/ Absenkung der Temperatur bei der Wiedererwärmung (z. B. bei Kontrollprüfungen), ggf. mit Zusatz T
3. Information zum Herstellungsprozess (G/B/N)
4. Mögliche zusätzliche Funktionen (Rj/H)

Tab. 6-1 zeigt den Vorschlag der möglichen Kürzel.

Daraus können sich folgende Kategorien ergeben, wie nachfolgend beispielhaft dargestellt:

- **V-10/10-N**
Viskositätsveränderndes Bitumen nach TL VBit-StB 22 (z. B. 15/25 VL) - Verdichtungstemperatur bei Mischgutherstellung um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung um 10 °C abgesenkt – Betriebsfertiges Produkt, „normale“ Herstellung
- **O-10/0-B**
Oberflächenaktiver Zusatz - Verdichtungstemperatur bei Mischgutherstellung um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung nicht abgesenkt - Zugabemenge wird vom Gesamtbindemittelgehalt abgezogen
- **M-10/0T-G**
Mineralischer Zusatz (Zeolith) – Verdichtungstemperatur bei Mischgutherstellung wird um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung wird nicht abgesenkt, Mischgut ist zu trocknen - Zugabemenge wird auf Gestein-/Füllergehalt zugeschlagen bzw. vom Füllergehalt abgezogen
- **S-0K/0T-N**
Schaumbitumen – Verdichtungstemperatur bei Mischgutherstellung wird nicht abgesenkt, Verfahren wird nicht angewandt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung wird nicht abgesenkt, Mischgut ist zu trocknen – „normale“ Herstellung

- **R-10/0-B-H**
 Reaktiv- bzw. rheologiemodifizierender Zusatz - Verdichtungstemperatur bei Herstellung wird um 10 °C abgesenkt / Verdichtungstemperatur nach Wiedererwärmung wird nicht abgesenkt – Zugabemenge wird vom Gesamtbindemittelgehalt abgezogen – Herstellerangaben unbedingt beachten

Wirkungsweise		Absenkung der Verdichtungstemperatur, Herstellung		Absenkung der Verdichtungstemperatur, Wiedererwärmung		Zugabe im Herstellungsprozess		Zusätzliche Funktionen	
V	Viskositätsverändernde Zusätze (Organische Zusätze, Wachse), nach TL VBit	10	Beispiel: Bitumen 15/25 VL Temperatur 125 °C statt 135 °C	Bsp.: 10 oder H	Beispiel: Bitumen 15/25 VL Temperatur 125 °C statt 135 °C oder Herstellerangaben beachten	G	Zugabemenge mit Abzug vom Gesteinskörnungsgemisch (z. B. Zeolith)	Rj	Zusätzliche Funktion: Rejuvenator (Verjüngungsmittel)
M	Mineralische Zusätze	K	Kein Zusatz bzw. Verfahren wird bei der Herstellung im Labor nicht angewendet	T	Wiedererwärmtes Mischgut muss getrocknet werden (insbesondere bei Schaumbitumen, Zeolithe)	B	Zugabemenge mit Abzug vom Gesamtbindemittelgehalt (z. B. oberflächenaktiver Zusatz)	H	Herstellerangaben beachten
S	Schaumbitumen	H	Herstellerangaben beachten			N	„Normaler“ Mischprozess - Keine Berücksichtigung im Herstellungsprozess, Betriebsfertige Produkte		
O	Oberflächenaktiv bzw. grenzflächenwirksam								
R	Reaktiv- bzw. rheologiemodifizierung								
A	Andere Wirkungsweise								

Tab. 6-1: Vorschlag zur Kategorisierung von Zusätzen / Verfahren für die Temperaturabsenkung

Hinweis: Die Zugabemenge wird entweder auf das gesamte Bindemittel im resultierenden Mischgut oder auf die gesamte Menge Mischgut (Zeolith) bezogen und nicht in die Kategorisierung aufgenommen.

6.2 Vorgehen im Labor

Das Vorgehen im Labor umfasst die Erarbeitung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion und die aktuell in den Gremien der FGSV erarbeiteten Vorgehensweisen.

Es wird empfohlen, für alle temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren wie folgt vorzugehen:

1. Festlegen eines zu erreichenden Hohlraumgehaltes und damit einer zu erreichenden Ziel-Raumdichte
2. a) Herstellen von Mischgut für 12 MPK gemäß TP Asphalt-StB, Teil 35 A
b) Verdichtung von Probekörpern bei unterschiedlichen Temperaturen mit Aufnahme der Dickenänderung nach TP Asphalt-StB, Teil 10 B
c) Bestimmung der Raumdichte nach TP Asphalt-StB, Teil 6
3. Auswertung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF)

6.2.1 Festlegung Hohlraumgehalt

Für ein herzustellendes Asphaltmischgut wird üblicherweise über die TL Asphalt-StB ein Bereich für den Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper gefordert. Über diesen Ziel-Hohlraumgehalt wird die geforderte Ziel-Raumdichte des MPK festgelegt. Dazu muss ebenfalls die Rohdichte des Mischguts bekannt sein. Diese kann z. B. dem nicht temperaturabgesenkten Asphaltmischgut entnommen werden. Üblicherweise verändern die temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren die Rohdichte nicht bzw. in vernachlässigbarem Ausmaß, so dass diese als gleich zum nicht temperaturabgesenkten Asphaltmischgut angesehen wird.

6.2.2 Herstellen von Mischgut

Es werden jeweils mindestens 4 Probekörper bei 3 unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen hergestellt. Somit wird Asphaltmischgut für 12 Marshall-Probekörper benötigt.

Die Zugabe der Zusätze und eine mögliche Veränderung im Mischprozess erfolgen immer gemäß den Herstellerangaben. Die Mischtemperatur kann ebenfalls nach Herstellerangaben verändert werden.

6.2.3 Verdichtung

Es müssen jeweils mindestens 4 Probekörper bei 3 unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen hergestellt werden.

Als Verdichtungstemperaturen (inkl. Toleranzen) werden für Bitumen nach TL Bit-StB (oder TL VBit-StB) vorgeschlagen (s. Tab. 6-2):

Verdichtungstemperaturen	
Polymermodifizierte Bitumen	Straßenbaubitumen
135 ±5 °C	125 ±5 °C
115 ±5 °C	105 ±5 °C
95 ±5 °C	85 ±5 °C

Tab. 6-2: Vorschlag für Verdichtungstemperaturen zur Herstellung von temperaturabgesenkten Asphalten

Je Verdichtungstemperatur werden 2 Probekörper mit 2 x 50 Schlägen hergestellt, um eine Referenzraumdichte über die Tauchwägung zu erhalten.

Je Verdichtungstemperatur werden weitere 2 Probekörper mit 8 x 50 Schlägen hergestellt (mit mehrmaligem Wenden), um eine maximale Raumdichte zu erhalten. Dabei wird die Dickenänderung der Probekörper aufgezeichnet.

Für jeden Probekörper wird die Raumdichte (über die Dickenänderung) aufgezeichnet und (später) die Exponentialfunktion nach TP Asphalt-StB, Teil 10B berechnet. Der Parameter T (Verdichtungswiderstand) wird benötigt.

Die Raumdichten der insgesamt 12 Probekörper werden nach TP Asphalt-StB, Teil 6 über die Tauchwägung bestimmt und entsprechend gemittelt.

6.2.4 Auswertung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion

Für die Auswertung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) muss die Raumdichte aus der Tauchwägung über die Anzahl an Schlägen berechnet werden.

Dazu werden anhand der aufgezeichneten Änderungen der Dicke der Probekörper die Raumdichte je Schlag berechnet, analog zum Ausmessverfahren. Anschließend wird für jeden Probekörper über die Anzahl an Schlägen eine Exponentialfunktion in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10B berechnet (Funktion 2). Im Gegensatz zur TP Asphalt-StB, Teil 10B wird hier direkt mit der Raumdichte gerechnet, nicht mit der reziproken Dicke. Der Parameter T wird dann aus 2 Ergebnissen gemittelt (arithmetischer Mittelwert).

$$\rho(S) = a - b \times e^{S/T} \quad (2)$$

Mit: $\rho(S)$ = Berechnete Dichte über die Anzahl an Schlägen S
 a = End-Raumdichte nach 400 Schlägen (hier über Dickenänderung)
 b = Differenz der Start-Raumdichte und End-Raumdichte
 S = Anzahl der Schläge [21 Nm]
 T = Verdichtungswiderstand [21 Nm]

Für die Probekörper mit 100 und 400 Schlägen Verdichtungsenergie werden per Tauchwägung die Raumdichten bestimmt und entsprechend die Mittelwerte für 2 Einzelwerte.

Mit den so erhaltenen zwei Raumdichten je Verdichtungstemperatur wird jetzt eine Exponentialfunktion (Korrektur genannt) nach dem gleichen Schema wie zuvor berechnet. Dabei wird der zuvor ermittelte Parameter T sowie die ermittelte Raumdichte (Tauchwägung) nach 400 Schlägen als Parameter a fixiert. Es wird also nur durch Regression der Parameter b bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß beträgt immer 100 %, da nur 2 Punkte (Raumdichten bei 100 und 400 Schlägen) zur Verfügung stehen, siehe dazu Bild 6-1.

Hinweis: Diese Korrektur entspricht nicht einer Parallelverschiebung der ursprünglichen Regressionsfunktion! Eine Parallelverschiebung repräsentiert nicht den tatsächlichen Verdichtungsvorgang.

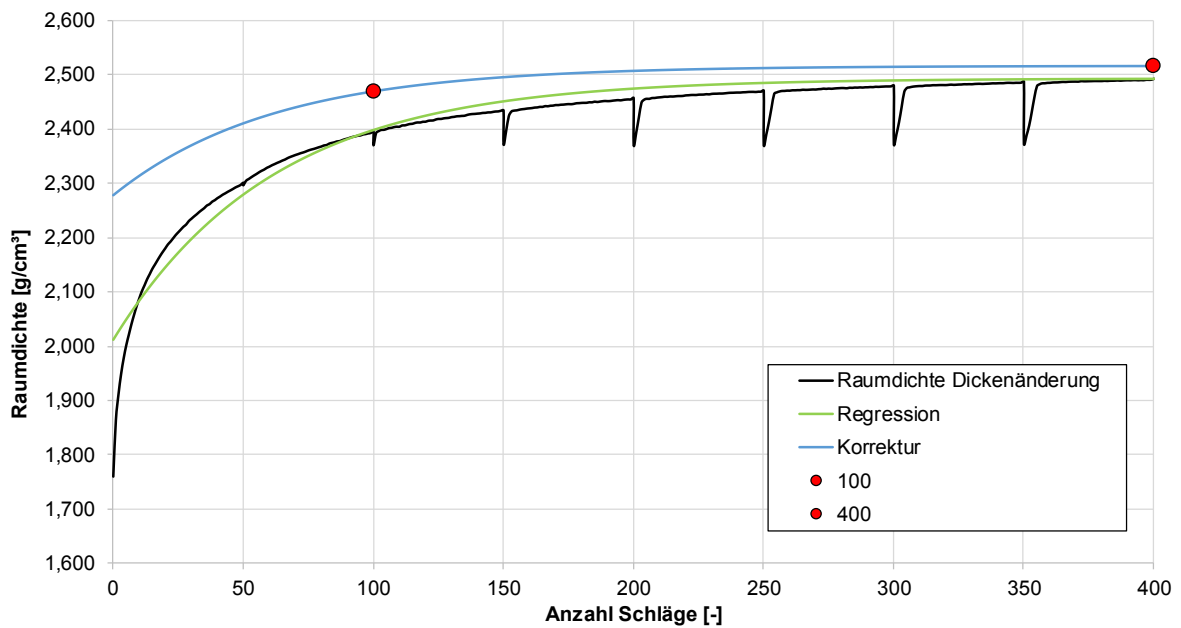


Bild 6-1: Korrektur der Raumdichte, bestimmt über die Dickenänderung, auf Werte, bestimmt über die Tauchwägung

Diese Kurve stellt die Raumdichte über die Anzahl an Schlägen bei einer bestimmten Verdichtungstemperatur dar. Diese Korrektur wird für alle Verdichtungstemperaturen angewandt. Danach können die Raumdichten für eine bestimmte Anzahl an Schlägen über die Temperatur aufgetragen werden, wie in Bild 6-2 dargestellt. Es sollten mindestens die Raumdichten nach 50, 100, 150, 200 Schlägen dargestellt werden.

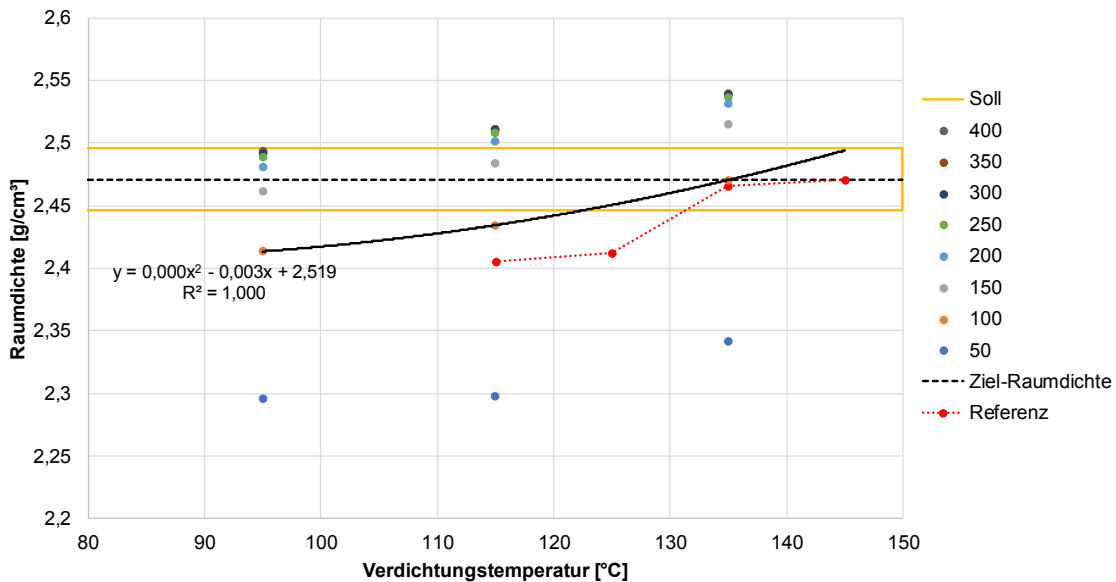


Bild 6-2: Erzielte Raumdichten (nach Tauchwägung) über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge

Die Punkte für die Raumdichten bei gleicher Anzahl von Verdichtungsschlägen, insbesondere bei der Standard-Verdichtung von 100 Schlägen, können miteinander verbunden

werden. Hier bietet sich ein Polynom 2. Grades an (Bestimmtheitsmaß immer 100 %). Dieses Polynom stellt die Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) dar.

Weiterhin wird die Ziel-Raumdichte, ggf. mit einem Toleranzbereich, als Parallele zur Abszisse (Temperatur) eingetragen. Jetzt kann abgelesen werden, bei welcher Temperatur diese Raumdichte mit 100 Schlägen erreicht wird. Weiterhin kann abgelesen werden, welche Verdichtungsarbeit aufgewendet werden muss, um bei einer gewünschten Temperatur die Ziel-Raumdichte zu erhalten. Wird die TAVF bei 400 Schlägen eingezeichnet, kann auch die Temperatur bestimmt werden, bei der die gewünschte Raumdichte, trotz hoher Verdichtungsleistung, nicht mehr zu erreichen ist.

6.2.5 Hinweise, Anmerkungen

Gegenüber der im Labor bestimmten Verdichtungstemperatur kann in der Praxis oftmals auch eine geringere Verdichtungstemperatur eingesetzt werden. Dies liegt an den unterschiedlichen Verdichtungsprinzipien von Walz- und Marshall-Verdichtung. Ein Abgleich war im Projekt nicht vorgesehen.

Die folgende Tabelle 6-3 zeigt das geplante, pragmatische Vorgehen bzgl. der Temperaturabsenkung im Labor und dem Vorgehen in der Baupraxis. Es besteht die Möglichkeit, dass in der Praxis niedrigere Verdichtungstemperaturen gegenüber dem geplanten Laborverfahren erreicht werden. Damit könnte die Laborverdichtung höhere Raumdichten gegenüber der Praxis erzielen, was im aktuellen Regelwerk zu einer Vertragsabweichung bzgl. des Verdichtungsgrades und des Hohlraumgehaltes führen kann.

TA Asphalt, Verfahren	Verdichtung des Asphaltmischguts		
	Labor		Praxis
	Erstprüfung	Kontrollprüfung	
VVZ	Temperaturabsenkung um 10 K	Temperaturabsenkung um 10 K	Temperaturabsenkungen oft um mehr als 10 K möglich
Mineralische Zusätze	Temperaturabsenkung um 10 K	Ohne Temperaturabsenkung, Trocknung des Mischguts	Temperaturabsenkungen oft um mehr als 10 K möglich
Oberflächenaktive Zusätze	Temperaturabsenkung um 10 K	Kein einheitliches Vorgehen Ist keine Wirksamkeit mehr vorhanden: Ohne Temperaturabsenkung	Temperaturabsenkungen oft um mehr als 10 K möglich
Schaumbitumen	Ohne Temperaturabsenkung	Ohne Temperaturabsenkung, Trocknung des Mischguts	Mit Temperaturabsenkung soweit wie möglich

Tab. 6-3: Geplantes Vorgehen bzgl. der Verdichtungstemperatur im Labor und in der Baupraxis

Das Schaumbitumenverfahren stellt hier eine Ausnahme dar. Da hier keine chemischen oder rheologischen Veränderungen im Bindemittel auftreten sollten, müssten im Labor (ohne Temperaturabsenkung) und in der Praxis (mit Temperaturabsenkung) gleiche Raumdichten erzielt werden. Allerdings muss hier das Asphaltmischgut nach der Wiedererwärmung Trocknen, was insbesondere innerhalb der WPK zu Problemen führen kann. Soll dagegen der Nachweis einer Temperaturabsenkung unter Hilfe weiterer Zusätze erfolgen, sollte unbedingt mit der temperaturabsenkenden Technologie, also Schaumbitumen + Zusatz, im Labor gearbeitet werden.

Für viele temperaturabsenkende Maßnahmen werden derzeit 10 K zur Temperaturabsenkung vorgeschlagen. Mit dem hier vorgestellten Vorgehen kann ein mögliches größeres Potenzial im Labor nachgewiesen werden. So kann bereits im Vorfeld auf mögliche Probleme bezüglich des Verdichtungsgrades hingewiesen werden:

- Eine Absenkung der Verdichtungstemperatur um „nur“ 10 K im Labor könnte bei TA-Asphalten zu einer hohen Raumdichte und damit geringem Hohlraumgehalt am MPK führen. Wird das Mischgut in der Praxis jedoch bei einer Temperaturabsenkung von z. B. 20 K regelkonform verdichtet, d. h. der Hohlraumgehalt der Schicht entspricht den Anforderungen der ZTV Asphalt-StB, könnte trotzdem eine Abweichung des Verdichtungsgrades auftreten.
- Weiterhin kann die pauschale Absenkung von 10 K im Labor dazu führen, dass auch in situ „nur“ diese 10 K verwirklicht werden. So wird das mögliche Potenzial eines TA-Asphalts nicht ausgereizt. Auch steht der Nachweis aus, dass diese Absenkung in situ den Anforderungen für die Grenzwerte der Aerosole genügt.

Es besteht die Gefahr, dass die pauschale Vorgabe von Verdichtungstemperaturen im Labor zu einer Abkopplung von der möglichen Verdichtung in situ führt. Da dieses Problem vertragsrelevant ist, sollte in den entsprechenden Gremien für die Regelwerke eine Lösung hierfür erarbeitet werden.

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung

Vom Ausschuss für Gefahrstoffe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin wurde für Ende 2019 ein neuer Grenzwert für Asphaltstäube und Aerosole beim Einbau von Asphaltmischgut festgelegt, der zur Folge hat, dass neben technischen Lösungen am Asphaltfertiger (Absaugreinrichtung) auch der Asphaltmischguteinbau temperaturabgesenkt erfolgen muss.

Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass eine Temperaturabsenkung die mechanische und funktionelle Qualität sowie das Gebrauchsverhalten und die Dauerhaftigkeit des temperaturabgesenkten hergestellten Asphaltmischguts nicht gefährdet.

Mit diesem Forschungsprojekt wurde das Ziel verfolgt, für vielversprechende Zusätze und Technologien zur Herstellung von Temperaturabgesenkten Asphalten (TA-Asphalte) jeglicher Art, ein ganzheitliches Qualitätssicherungssystem im Labor zu erstellen, welches in das Technische Regelwerk integriert werden kann.

Derzeit existieren verschiedene Technologien, welche ihren Nachweis der Temperaturabsenkung auf unterschiedliche Weise demonstrieren. So muss ggf. die Zugabe der Zusätze nach speziellen Methoden erfolgen, teilweise kann die Mischtemperatur abgesenkt werden oder als Verdichtungsgerät wird der Gyrator eingesetzt. Hier existiert kein einheitliches Vorgehen, um unterschiedliche oder auch gleiche Technologien zu vergleichen.

Mit diesem Projekt wurde ein Vorgehen entwickelt, das es ermöglicht alle derzeit anwendbaren Technologien der Temperaturabsenkung im Labor unter gleichen Bedingungen bewerten zu können bzw. das Potential der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren aufzuzeigen.

Dazu wurden zunächst alle praktikablen Technologien zur Herstellung von TA Asphalten nach ihrer Wirkungsweise wie folgt zusammengestellt:

- Hauptkategorie „Chemische Zusätze“
 - Oberflächenaktive Zusätze, die an der Grenzfläche zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung wirken und für eine bessere Verarbeitbarkeit und Verdichtung bei verringerter Temperatur sorgen sollen (Kürzel O).
 - Rheologie- bzw. reaktivmodifizierende Zusätze, welche in die Struktur der Bindemittel eingreifen (Kürzel R).
- Hauptkategorie „Viskositätsverändernde Zusätze“ (VVZ)
Hierzu zählen organische Zusätze, zu denen die verschiedenen Wachsmodifizierungen gehören. Diese sind im Untersuchungsumfang nicht enthalten, da sie als technisch ausgereift und ausreichend erprobt gelten und betriebsfertig zu beziehen sind (Kürzel V).
- Hauptkategorie „Vergrößerung des Bindemittelvolumens“

- Mineralische Zusätze bringen über Zeolithe Wasser in das Mischgut, welches beim Mischprozess verdampft und so zu einer leichteren Verarbeitung führt (Kürzel M).
- Schaumbitumen wird dem heißen Bitumen Wasser zugeführt, welches verdampft und das Bitumen aufschäumt. Dadurch wird das Bitumen leichter verarbeitbar (Kürzel S).

In einem ersten Schritt wurden die oben genannten temperaturabsenkenden Technologien kategorisiert. Die Kategorisierung soll helfen, auf einen Blick einen temperaturabsenkenden Zusatz bzw. ein Verfahren vom Wirkprinzip und bezüglich der Bearbeitung im Labor zu erfassen.

Die Kategorien gliedern sich in 4 durch Bindestriche gereichte Kürzel:

1. Wirkungsweise (V/M/S/O/R/A)
2. Absenkung der Temperatur im Rahmen einer Erstprüfung, ggf. mit Zusatz (KH) / Absenkung der Temperatur bei der Wiedererwärmung, ggf. mit Zusatz (T)
3. Information zum Herstellungsprozess (G/B/N)
4. Mögliche zusätzliche Funktionen (Rj/H)

Ein Beispiel für ein betriebsfertiges Bitumen nach TL VBit-StB 22 (z. B. 15/25 VL) wäre die Bezeichnung: **V-10/10-N**.

Um das Potential von TA-Technologien im Labor darzulegen wurde ein einheitliches Vorgehen unter Variation der Verdichtungstemperatur und der Verdichtungsenergie für unterschiedliche Verdichtungsgeräte überprüft. Dazu wurden TA-Asphalte der Kategorien bzw. Wirkungsweisen M, S, O und R im Labor gemischt, an den drei Gerätetypen (Marshall-Verdichtungsgerät, Walzsektor-Verdichtungsgerät, Gyrator) verdichtet und die Temperaturabhängigkeit über einen funktionalen Zusammenhang bewertet.

Zunächst wurde überprüft und bewertet, ob und wie das geplante Vorgehen für unterschiedliche temperaturabsenkende Zusätze / Verfahren und unterschiedliche Verdichtungsgeräte realisierbar ist.

Das Vorgehen gliedert sich in die 3 Schritte:

1. Festlegung einer Ziel-Raumdichte bzw. eines Ziel-Hohlraumgehalts
2. a) Herstellen des Asphaltmischguts
b) Verdichten von mind. 12 Probekörpern bei unterschiedlichen Temperaturen und maximaler Verdichtungsenergie
c) anschließende Raumdichtebestimmung
3. Auswertung der Raumdichten über eine Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion

Dazu wurde ein Asphaltmischgut der Sorte AC 11 D S (ohne Mitverwendung von Asphaltgranulat) eingesetzt, welcher entsprechend den vier zu überprüfenden Technologien zur Temperaturabsenkung modifiziert wurde, ohne Änderungen in der Zusammensetzung. Somit wurden 5 Asphalte (Referenz + 4 TA-Asphalte) überprüft.

Für die Verdichtung wurden das Marshall-Verdichtungsgerät, das Walzsektor-Verdichtungsgerät und der Gyrator eingesetzt. Für jedes Verdichtungsgerät wurde mit dem Referenzmaterial ein Zielwert für die später mit den TA-Asphalten zu erzielende Raumdichte

resp. erzielenden Hohlraumgehalt festgelegt. Zusätzlich wurde bereits beim Referenzmischgut die Verdichtungstemperatur abgesenkt, um die Temperaturabhängigkeit des Materials abzuschätzen.

Im Weiteren kamen ein oberflächenaktiver Zusatz, ein reaktiv- bzw. rheologiemodifizierender Zusatz und Zeolith zum Einsatz. Zudem wurde eine Asphaltmischgutvariante mittels Schaumbitumen-Technologie hergestellt. Später wurde noch eine Variante mit viskositätsveränderndem Bitumen nach TL VBit-StB in das Programm aufgenommen, um die Eignung für alle relevanten TA-Technologien nachzuweisen.

Die hergestellten Varianten mit den Mischtemperaturen und Verdichtungstemperaturen sind in Tab. 7-1 dargestellt.

Variante AC 11 D S	Misch- temperatur	Zusatz, Verdichtungstemperatur	Verdichtung plausibel ?		
			MPK	WSV	Gyrator
1-1	160 °C	Referenz, 145 °C	✓	✓	(✓)
1-2		Referenz, 135 °C			
1-3		Referenz, 125 °C			
1-4		Referenz, 115 °C			
2-1	140 °C	oberflächenaktiver Zusatz, 135 °C	✓	✓	✓
2-2		oberflächenaktiver Zusatz, 115 °C			
2-3		oberflächenaktiver Zusatz, 95 °C			
3-1	160 °C	reaktivmodifizierender Zusatz, 135 °C	≈	≈	✓
3-2		reaktivmodifizierender Zusatz, 115 °C			
3-3		reaktivmodifizierender Zusatz, 95 °C			
4-1	160 °C	Zeolith, 135 °C	✓	✓	✓
4-2		Zeolith, 115 °C			
4-3		Zeolith, 95 °C			
5-1	140 °C	Schaumbitumen, 135 °C	(✓)	(✓)	(✓)
5-2		Schaumbitumen, 115 °C			
5-3		Schaumbitumen, 95 °C			
6-1	160 °C	PmB 25/45 VL, 145 °C	✓	✓	-
6-2		PmB 25/45 VL, 135 °C			
✓ = Ergebnisse plausibel (✓) = Ergebnisse teilweise plausibel ≈ = Funktionale Bewertung realisiert, Ziel-Raumdicke teilweise nicht erreicht					

Tab. 7-1: Übersicht der Variationen für die Herstellung von Asphaltprobekörpern zur Ermittlung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion an einem AC 11 D S und Plausibilitätskontrolle

Bereits während des Mischprozesses wurde das Drehmoment im Labormischer aufgezeichnet und die jeweiligen Mischarbeiten ausgewertet. Der Mischprozess mit Schaumbitumen fand an der Universität Kassel statt, wo keine Drehmomentaufnahme zur Verfü-

gung stand. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Referenzvariante die größte Mischarbeit benötigt. Für den oberflächenaktiven Zusatz wird eine deutlich geringere Mischarbeit benötigt, trotz einer abgesenkten Mischtemperatur. Die geringsten Mischarbeiten benötigen die Mischungen mit reaktivmodifizierendem Zusatz und mit Zeolith, welche jedoch bei gleicher Mischtemperatur wie die Referenzvariante gemischt wurden. Es konnte somit eindeutig ein positiver Effekt der temperaturabsenkenden Zusätze bestätigt werden. Die eingesetzten Zusätze zeigten keine Auffälligkeiten während des Mischprozesses.

Im Weiteren wird die Aufnahme der Mischarbeit jedoch nicht weiter als Qualitätskriterium berücksichtigt. Zum einen aufgrund der seltenen und teuren Prüftechnik, zum anderen sind die Eigenschaften der aus dem Mischgut hergestellten Probekörper entscheidend.

Wie Tab 7-32 zeigt, erfolgte die Variation von Verdichtungstemperatur und Verdichtungsenergie an allen 3 Verdichtungsgeräten. Die so zu erzielenden Raumdichten sollten über einen funktionalen Zusammenhang („Verdichtungsfunktion“) beschrieben werden. Ein Beispiel gibt Bild 7-1.

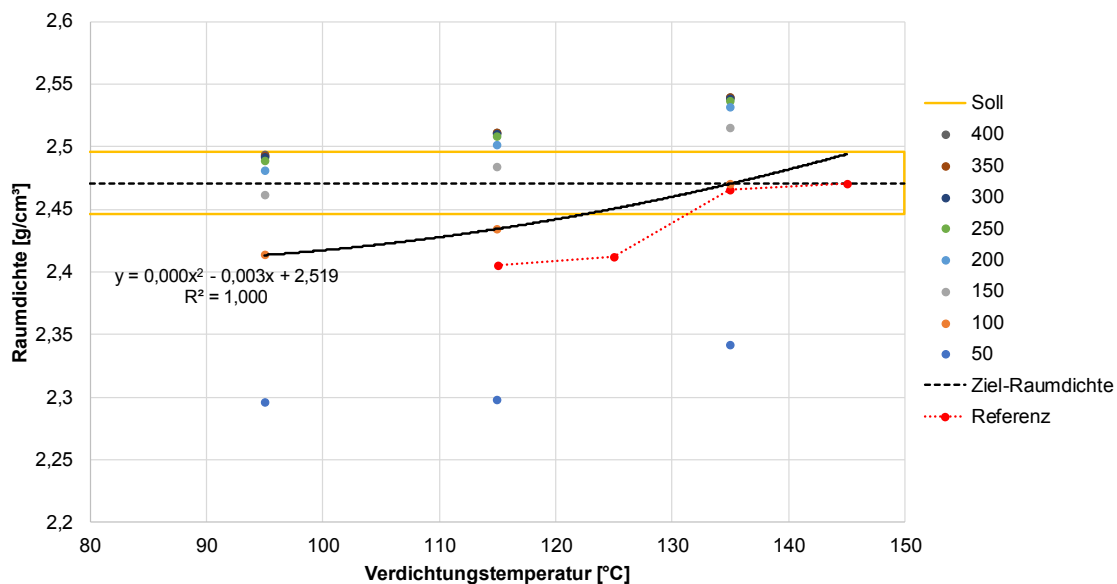


Bild 7-1: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge (AC 11 D S mit oberflächenaktivem Zusatz, Marshall-Verdichtungsgerät)

Es wurden für drei Verdichtungstemperaturen (135, 115 und 95 °C) Probekörper bis zu einer maximalen Raumdichte (400 Schläge) verdichtet. Entlang der Verdichtungsfunktion (Polynom 2. Grades) für 100 Schläge, kann der Grafik entnommen werden, bei welcher Temperatur eine Ziel-Raumdicke erreicht werden kann (hier: 135 °C). Wird die Verdichtungsfunktion auf die maximale Raumdichte angesetzt, kann auch entnommen werden, unterhalb welcher Temperatur die Zielraumdicke nicht mehr erreicht werden kann (hier: 80 °C).

Da bei der jeweiligen Verdichtung die Raumdichte über die Dickenänderung bestimmt wurde, muss diese noch korrigiert werden, um die physikalischen Unterschiede zur Tauchwägung auszugleichen. Dazu wurden jeweils Probekörper mit der Standard-Verdichtung und mit einer maximalen Verdichtung hergestellt (Beispiel Marshall-Verdichtungsgerät: 2

x 50 Schläge und 8 x 50 Schläge). Über eine Formel analog der TP Asphalt-StB, Teil 10 B erhält man den Verdichtungswiderstand, welcher auf die Ergebnisse der Tauchwägung angewandt wird. Diese Korrektur funktioniert unabhängig vom Verdichtungsgerät.

Während die Marshallverdichtung plausible Abhängigkeiten von der Verdichtungstemperatur und -arbeit ausweisen, waren die erzielten Raumdichten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät und dem Gyrator nicht immer plausibel. Die Reproduzierbarkeit war für alle drei Verdichtungsgeräte überwiegend vorhanden. Die mit dem Gyrator erzielten Probekörper wiesen im Regelfall die höchsten (und ggf. praxisnahe) Raumdichten auf.

Die Betrachtung der Streumaße wies beim Marshall-Verdichtungsgerät die geringsten Streuungen nach. Das Walzsektor-Verdichtungsgerät und der Gyrator wiesen vergleichbare Streuungen auf. Veränderungen in den Streumaßen aufgrund der temperaturabsenkenden Zusätze oder Verfahren konnten nicht ermittelt werden.

Als letztes Kriterium wurde der Verformungswiderstand mittels des Einaxialen Druck-Schwellversuchs überprüft. Neben den regelkonformen Probekörpern aus Asphalt-Probleplatten wurden zusätzlich Marshall- und Gyrator-Probekörper untersucht. Dabei wiesen sowohl die Probekörper aus der Walzsektor-Verdichtung als auch der Marshall-Verdichtung plausible Ergebnisse auf, während die Gyrator-Probekörper teilweise unplausibel reagierten. Generell zeigte sich, dass die Proben mit viskositätsveränderten (VVZ) Bitumen einen deutlich höheren Verformungswiderstand aufwiesen, was auch den Erwartungen entsprach. Die weiteren temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren konnten erwartungsgemäß kaum Vorteile nachweisen, da dies auch nicht Ziel dieser Modifikationen ist. Die überprüften TA-Technologien bewirkten aber auch keine nachteilige Performance bezüglich des Verformungswiderstands.

Für die weitere Bewertung wurden neben der Systematik bezüglich der Verdichtungsfunktion die Kriterien Streumaß, Verformungswiderstand sowie die Handhabung und die technische Ausstattung im Labor berücksichtigt. Ein Ausschlusskriterium konnte für kein Verdichtungsgerät gefunden werden.

Zusammenfassend wurde die Verdichtung mit dem Marshall-Verdichtungsgerät als geeignete Laborverdichtungsmethode angesehen, mit einer guten Spreizung bezüglich der Verdichtungstemperaturen, mit geringen Streumaßen und technisch günstig und einfach in der Handhabung. Die damit temperaturabgesenkt hergestellten Probekörper waren bezüglich des Verformungswiderstands unauffällig.

Abschließend erfolgte die Validierung des Vorgehens an weiteren vier Asphaltmischgutsorten, welche teilweise als problematisch für die Temperaturabsenkung angesehen werden: SMA 8 S, AC 11 D S (20 % AG), SMA 16 B S (30 % AG) und AC 32 T S (60 % AG).

Für jede Asphaltmischgutsorte wurden 3 Varianten hergestellt; neben der Referenzvariante zwei temperaturabgesenkte Varianten. Für die oberflächenaktiven Zusätze wurden jeweils Produkte unterschiedlicher Hersteller eingesetzt. Tab. 7-2 zeigt die Varianten in der Übersicht.

Mischguts-orte	Zusatz / Verfahren	Temperaturabsenkung möglich?	Funktionaler Zusammenhang?	Verformungswiderstand bei Temperaturabsenkung
SMA 8 S	Referenz	-	-	-
	Oberflächenaktiv	Ja	Ja	Gleich bis höher
	Zeolith	Ja	Ja	Gleich
AC 11 D S	Referenz	-	-	-
	Oberflächenaktiv	Ja	Ja	Gleich
	Schaumbitumen	Ja/nein	Ja	Höher
SMA 16 B S	Referenz	-	-	-
	Oberflächenaktiv	Ja	Ja	Gleich
	Schaumbitumen	Ja/nein	Ja	Höher
AC 32 T S	Referenz	-	-	-
	Oberflächenaktiv	Nein	Ja	Gleich
	Zeolith	Nein	Ja	Gleich
Verformungswiderstand: Unterschiede $< 10 \text{‰} \cdot 10^{-4} / n$ werden als gleich angesehen				

Tab. 7-2: Übersicht der eingesetzten Asphaltmischgutsorten und temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand ermittelt im Druck-Schwellversuch

Die Verdichtungsfunktion zur Temperaturabsenkung konnte für alle Varianten problemlos bestimmt werden. Jedoch waren die Auswirkungen zur Temperaturabsenkung durchaus unterschiedlich:

- Der Einsatz von Zeolith in Kombination mit Splittmastixasphalt funktioniert prinzipiell, brachte jedoch keine Vorteile, siehe auch (Radenberg 2004).
- Der Einsatz der Schaumbitumen-Technologie brachte hier keine Vorteile. Allerdings hat die Schaumbitumen-Technik im Labor noch Optimierungspotenzial.
- Bei den oberflächenaktiven Zusätzen wurden teilweise kaum Effekte zur Temperaturabsenkung realisiert. Hier wäre im Einzelfall noch zu überprüfen, ob dieses Produkt z. B. in Kombination mit dem gewählten Asphaltmischgut bzw. Bitumen nicht optimal reagiert. Auch müsste überprüft werden, ob z. B. die Zugabemengen oder die Zusammensetzung des Asphaltmischguts optimiert werden können.
- Für das Asphaltmischgut AC 32 T S wurde die Temperaturabsenkung sowohl mit Zeolith, als auch mit dem oberflächenaktiven Zusatz nachgewiesen, jedoch erst bei Temperaturen unterhalb von ca. 130 °C. Es besteht die Möglichkeit, dass das hier eingesetzte oberflächenaktive Produkt nicht optimal an das Mischgut angepasst wurde. Weiterhin ist es möglich, dass bei diesem Asphaltmischgut bei 135 °C primär noch das frische, weiche Bindemittel bei der Verdichtung wirkt und so die Effekte der Zusätze überdeckt.

Die Überprüfung der Streumaße für die Raumdichten der Marshall-Probekörper zeigte, dass mit allen Asphaltmischgutsorten und Kombinationen der Temperaturabsenkung die Präzision des (Mess-)Verfahrens eingehalten wurde. Es treten also keine übermäßigen Streuungen aufgrund der temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren auf.

Auch hier wurde der Verformungswiderstand mittels des Einaxialen Druck-Schwellversuchs überprüft, allerdings nur an MPK. Die Prüfungen ergaben, dass die Verformungswi-

derstände aller Varianten gleich oder höher waren, als jene der jeweilige Referenzvarianten. Die Schaumbitumenvarianten erwiesen sich dabei für beide überprüften Varianten als vorteilhaft. Die temperaturabsenkenden Zusätze oder Verfahren zeigten sich als unproblematisch bezüglich des Verformungswiderstands.

Anhand aller hier überprüften Varianten für TA-Asphalte kann festgehalten werden:

- Die Erstellung einer Verdichtungsfunktion in Abhängigkeit von der Verdichtungs-temperatur und -energie ist mit allen Verdichtungsgeräten und allen temperaturabsenkenden Technologien für das hier eingesetzte Asphaltmischgut AC 11 D S möglich.
- Die temperaturabgesenkt hergestellten Varianten an Asphaltmischgut AC 11 D S sind bezüglich des Verformungswiderstands unauffällig, unabhängig vom Verdichtungsgerät.
- Aufgrund der geringen Streumaße und der guten Differenzierbarkeit der Raumdichten wird das Marshall-Verdichtungsgerät für den Einsatz im Labor vorgeschlagen. Es wird ausdrücklich erwähnt, dass mit dem Gyrator höhere Raumdichten erzielt werden können, das Verdichtungsverfahren jedoch noch weiter überprüft werden muss.
- Die Validierung an vier Asphaltmischgutsorten mit unterschiedlichen temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren war erfolgreich, auch wenn nicht immer ein temperaturabsenkender Effekt nachgewiesen werden konnte. Dazu müssen Zusatz und Asphaltmischgut aufeinander abgestimmt werden, was hier nur bedingt erfolgte.
- Sowohl die Streumaße als auch die Verformungswiderstände aller hergestellten Marshall-Probekörper weisen keine Auffälligkeiten auf.

Mit diesem Projekt wurde eine große Bandbreite an temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren überprüft. Dabei konnten nicht alle Besonderheiten der einzelnen Zusätze / Verfahren berücksichtigt werden. Hier stand ein Vergleich mit einheitlichen Asphaltmischgutvarianten im Vordergrund, so dass das jeweilige Asphaltmischgut bezüglich der Zusätze oder Verfahren nicht optimiert wurde. Daher entsprechen auch nicht alle Ergebnisse dem möglichen Potential der Zusätze / Verfahren.

Insgesamt kann mit dem hier vorgestellten und überprüften Vorgehen zur Herstellung von Probekörpern im Labor für unterschiedliche TA-Technologien deren Potential einheitlich beschrieben werden, ohne signifikante Auswirkungen bezüglich der Performance oder den Streumaßen.

7.2 Identifizierte Problemstellungen

Mit diesem Projekt wurde eine große Bandbreite an temperaturabsenkenden Zusätzen / Verfahren erprobt. Dabei konnten nicht alle Probleme und Besonderheiten der einzelnen Zusätze / Verfahren berücksichtigt werden. Folgende Probleme bzw. Anregungen wurden aufgenommen:

- Es wird mit kleinsten Mengen an Zeolith gearbeitet. Hier werden teilweise wenige Gramm, auf 1 Nachkommastelle abzuwiegen, zugegeben. Diese geringen Mengen müssen dann gleichmäßig im Asphaltmischgut verteilt werden, um effektiv zu wirken. Gleiches gilt für die oberflächenaktiven Zusätze.

- Die Schaumbitumen-Technologie befindet sich im Labor im Optimierungsstadium. Ein Einspritzen in den Labormischer ist derzeit nicht möglich, das aufgeschäumte Bindemittel muss manuell in den Mischer überführt werden, wodurch bereits ein Abbau des Bitumenschaums bis zum Kontakt mit den Gesteinskörnungen einhergeht. Mögliche Einflüsse dieser Methode sind nicht bekannt.
- An diesem Projekt haben zwei getrennte Labore gearbeitet, welche größtenteils zwar die gleiche Zusammensetzung des Asphaltmischguts berücksichtigten, da fertige Gesteinskörnungsmischungen geliefert wurden. Dennoch variierte das Vorgehen im Mischprozess etwas, was einen möglichen Einfluss auf die Verdichtung hat.
- Die Gyrator-Verdichtung ist im Deutschen Regelwerk nicht ausreichend standardisiert. Es ist zu überprüfen, ob mit den hier gewählten Versuchsbedingungen eine allgemein gültige, d. h. für alle Mischgutsorten praktikable Verdichtung erzielt werden kann.
- In Deutschland fehlen zur Verdichtung von temperaturabgesenkten Asphalten langjährige Erfahrungen und der Bezug zur Praxis. Es ist bekannt, dass in der Praxis höhere Raumdichten gegenüber dem Labor erzielt werden können. Es besteht die Gefahr, dass sich die Laborverfahren von der Praxis abkoppeln. Insbesondere die Regelung im Labor pauschal nur um 10 K abzusenken (und in der Praxis um z. B. 20 K) kann zu Verfälschungen bezüglich der vertragsrelevanten Kennwerte Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt führen.
- Offenporige Asphalte wurden nicht untersucht. Das Vorgehen wird mit dieser Asphaltmischgutsorte als problematisch angesehen.

Literatur

Barthel, F, Fleischel, O, Michels, J & Schatz, W 2023, 'Geringe Einsatzmenge, große Wirkung', *Asphalt & Bitumen*, no. 01, pp. 18–21.

BASF, *Butonal® 5126. Neue Wege zur Höchstleistung*, BASF.

Bonaquist, R 2011, *Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt*, National Academies Press, Washington, D.C. [09 August 2022].

Bundesanstalt für Straßenwesen 2017, *Erfahrungssammlung über die Verwendung von Fertigprodukten und Zusätzen zur Temperaturabsenkung von Asphalt*, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach.

Caputo, P, Abe, AA, Loise, V, Porto, M, Calandra, P, Angelico, R & Oliviero Rossi, C 2020, 'The Role of Additives in Warm Mix Asphalt Technology: An Insight into Their Mechanisms of Improving an Emerging Technology', *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, vol. 10.

Carreño Gómez, NH, Bokern, S & Oeser, M 2020, 'Reaktivmodifizierung von Bitumen', *Asphalt & Bitumen*, vol. 6, no. 2, pp. 32–35.

Carreño Gómez, NH & Oeser, M 2021, 'Investigation on the use of a novel chemical bitumen additive with reclaimed asphalt and at lower mix production and construction temperatures: a case study', *Road Materials and Pavement Design*, 22, Sup. 1: EATA 2021, S641-S661.

Carreño Gómez, NH, Oeser, M & Fleischel, O 2021, 'Chemical modification of bitumen with novel isocyanate-based additive to enhance asphalt performance', *Construction and Building Materials*, vol. 301.

Carreño Gómez, NH, Renken, L, Schatz, W, Zeilinger, M, Bokern, S, Fleischel, O & Oeser, M 2021, 'New type of chemical modification of asphalt binders to enhance the performance of flexible pavements'. *7th E&E Congress Proceedings*, Paper 40.

D'Angelo, J, Harm, E, Bartoszek, J, Baumgardner, G, Corrigan, M, Cowsert, J, Harman, T, Jamshidi, M, Jones, W, Newcomb, D, Prowell, BD, Sines, R & Yeaton, B 2008, *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, Alexandria, USA. Available from: http://www.warmmixasphalt.org/submissions/68_20080223_fhwa-pl-08-007.pdf [09 August 2022].

DAV 2009, *Temperaturabgesenkte Asphalte. Ratschläge aus der Praxis für die Praxis*, Bonn.

DAV 2021, *Niedrigtemperaturasphalt (NTA). Technisches Informationspapier*, Deutscher Asphaltverband e. V. (DAV), Bonn.

EAPA 2014, *The use of Warm Mix Asphalt. EAPA - Position Paper*.

Europäisches Komitee für Normung (CEN) 2020, *Asphalt - Prüfverfahren - Teil 31: Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator-Verdichter*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, vol. 93.080.20, 12697-31.

Fleischel, O, Michels, J & Schatz, W 2022, 'Warmasphalt mit B2Last', *Asphalt & Bitumen*, vol. 8, no. 2, pp. 48–51.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2005, *Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau*, FGSV Verlag, Köln, vol. 636, KRC.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007, *Technische Prüfverfahren für Asphalt - Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)*, FGSV Verlag, Köln, 756/33, Asphalt-StB, Teil 33.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010a, *Technische Prüfverfahren für Asphalt - Teil 10 A: Verdichtungswiderstand mit Hilfe des Marshall-Verdichtungsgerätes - Verfahren A: Änderung der Raumdichte*, FGSV Verlag, Köln, Asphalt-StB, Teil 10 A.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010b, *Technische Prüfverfahren für Asphalt - Teil 10 B: Verdichtungswiderstand mit Hilfe des Marshall-Verdichtungsgerätes - Verfahren B: Änderung der Probekörperdicke*, FGSV Verlag, Köln, Asphalt-StB, Teil 10 B.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2021, *Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt*, FGSV Verlag, Köln, vol. 766, TA.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2022, *Technische Prüfverfahren für Asphalt - Teil 25 B 1: Einaxialer Druck-Schwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme*, FGSV Verlag, Köln, Asphalt-StB, Teil 25 B 1.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2023, *Technische Prüfverfahren für Asphalt - Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern*, FGSV Verlag, Köln, 756/6, Asphalt-StB, Teil 6.

Hamzah, MO, Golchin, B & Tye, CT 2013, 'Determination of the optimum binder content of warm mix asphalt incorporating Rediset using response surface method', *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1328–1336. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813005412>.

Hinrichs, B 2021, 'Butonal 5126. Flexibel bleiben am Asphaltmischwerk', *Asphalt*, vol. 57, no. 8, pp. 56–58.

Kakar, MR, Hamzah, MO, Akhtar, MN & Woodward, D 2016, 'Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive', *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2342–2353. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615015735>.

Kakar, MRK, Refaa, Z, Bueno, M, Worlitschek, Stamatiou, A & Partl, MN 2018, 'Effect of Tetradecane as low temperature phase change material on bitumen properties'.

Kheradmand, B, Muniandy, R, Hua, LT, Yunus, RB & Solouki, A 2014, 'An overview of the emerging warm mix asphalt technology', *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 79–94.

Klüter, I, Büchner, J, Büchner, S & Wistuba, MP 2020, 'Labortechnische Betrachtung der Temperaturabsenkung auf Bindemittel-, Mastix- und Asphaltebene', *Straße und Autobahn*, vol. 71, no. 11, pp. 904–914.

Krass, K & Nyatanyi, I 2001, 'Einsatz von Schaumbitumen in Entwicklungsländern', *bitumen!*, *Magazin der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V.*, no. 3, pp. 86–90.

Lindquist, V & Lindquist, T, *THE KGOIII METHOD*, KGO MIXING AB. Available from: <https://kgo.se/> [16 January 2025].

Martin, AE, Arambula, E, Yin, F, Cucalon, LG, Chowdhury, A, Lytton, R, Epps, J, Estakhri, C & Park, ES 2014, *Evaluation of the Moisture Susceptibility of WMA Technologies*. *NCHRP Report 763*, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C.

- Michels, J 2022, 'Studie belegt Nachhaltigkeit von reaktivmodifiziertem Asphalt', *Straße und Autobahn*, vol. 73, no. 5, pp. 426–427.
- Nelken, E 2021, 'Chemische Warmmischadditive machen den Asphaltbelag kompakter ohne Plastifizierung', *Straße und Autobahn*, vol. 72, no. 8, pp. 684–686.
- Neutag, L 2021, *Emissionsreduzierte Asphalte - Qualität, Aerosole, Einbau*, Online.
- Newcomb, DE, Arambula, E, Yin, F, Zhang, J, Bhasin, A, Li, W & Arega, Z 2015, *Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications*, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C.
- Oeser, M 2020, 'Zielgerichtete Performancesteigerung von Bitumen durch Reaktivmodifizierung'.
- Olard, F, Le Noan, C, Beduneau, E & Romier, A 2008, 'Low energy asphalts for sustainable road construction'. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Low-energy-asphalts-for-sustainable-road-Olard-Noan/c65e7d1462aae722814a06c601e89af867443c07>.
- Oliveira, JR, Silva, HM, Abreu, LP & Fernandes, SR 2013, 'Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures', *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 15–22.
- Pereira, R, Almeida-Costa, A, Duarte, C & Benta, A 2018, 'Warm mix asphalt: Chemical additives' effects on bitumen properties and limestone aggregates mixture compactibility', *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 285–299. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417300639>.
- Prowell, BD, Hurley, GC & Frank, B 2012, *Warm-Mix Asphalt: Best Practices. 3rd Edition*.
- Radenberg, M 2004, *Möglichkeiten und Grenzen der Temperaturabsenkung bei Herstellung und Einbau von Walzasphaltnischgut. Schlussbericht Nr. 12551 N/1, i A. der AIF*.
- Ringleb, A & Herzberg, B 2012, *Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs / Einfluss der Mischgutherstellung im Labor auf die resultierenden Asphalteeigenschaften*.
- Rubio, MC, Martínez, G, Baena, L & Moreno, F 2012, 'Warm mix asphalt: an overview', *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp. 76–84. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611004926>.
- Schatz, W, Michels, J & Carreño Gómez, NH 2021, 'Praxisbericht eines viskositätsverändernden Additivs', *Asphalt*, vol. 56., no. 3, pp. 12–19.
- Sengoz, B, Topal, A & Gorkem, C 2013, 'Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives', *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 242–252. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813001438>.
- Täube, A 2021, 'Temperaturabgesenkter Asphalt. Verfahren, Chancen, Risiken', *Asphalt*, vol. 8, pp. 16–21.
- Tutu, KA & Tuffour, YA 2016, 'Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review', *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 06, no. 02, pp. 84–93. Available from: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=64340>.
- Vaitkus, A, Čygas, D, Laurinavičius, A & Perveneckas, Z 2009, 'Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania', *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 80–86. Available from: <https://bjrbe-journals.rtu.lv/article/view/1822-427X.2009.4.80-86>.

Vaitkus, A, Vorobjovas, V & Žalimienė, L, 'The research on use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures' in *XXVII International Baltic Road Conference, 24-26 August, 2009, Riga, Latvia*. Available from: <https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/132769>.

Wiegand, M 2022, *Laboruntersuchungen der Möglichkeiten zur Reduzierung der Herstellungstemperatur von Asphalt durch Schaumbitumen*. Masterarbeit, Kassel.

Willmeroth, K 2023, *Oberflächenaktive Additive – ebenfalls eine Möglichkeit zur Temperaturabsenkung*, Willingen.

Wirth, W & Opel, A 2008, *Herstellung von Niedrigtemperaturasphalt (Walzasphalt) unter Verwendung von Schaumbitumen: "Schaumbitumen-Heißmischgut"*. Schlussbericht Nr. 14749 N, i.A. der AIF. Available from: https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/forschungsberichte/aif_14749_n_schaumbitumen.pdf [01 August 2022].

Yu, H, Leng, Z, Dong, Z, Tan, Z, Guo, F & Yan, J 2018, 'Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives', *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 392–401.

Bilder

Das Bild aus dem FGSV-Regelwerk: Nr. 756, TP Asphalt-StB, Ausgabe 2007 ist mit Erlaubnis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerks bzw. der Veröffentlichung ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

Bild 1-1: Energieverbrauch für verschiedene Asphaltkonzepte (schematisch) (Olard et al. (2008), Vaitkus, Vorobjovas & Žalimienė (2009))

Bild 1-2: Prinzipbeispiel zur Erzielung einer gewünschten Raumdichte (hier: 2,500 g/cm³): Mögliches Temperaturfenster bei Einsatz von 100 % der Verdichtungsenergie

Bild 1-3: Prinzipbeispiel zur Erzielung einer gewünschten Raumdichte (hier: 2,500 g/cm³): Temperaturfenster bei Erhöhung der Verdichtungsenergie (200 % bzw. 250 %) und abnehmender Temperatur

Bild 1-4: Im Labor eingesetzter, handelsüblicher, Gegenlauf-Zwangsmischer mit Aufzeichnung der Mischarbeit

Bild 1-5: Beispiel für die grafische Auswertung der Mischarbeit, getrennt für Trommel und Rührer des Labormischers

Bild 1-6: Beispiel für die Änderung der Probekörperdicke und der Raumdichte beim Marshall-Verdichtungsgerät mit Drehung der Probe alle 50 Schläge (zwischen 100 und 400 Schlägen)

Bild 1-7: Verdichtung mit dem Gyrator: Exemplarische Darstellung des Verlaufs der Probekörperhöhe und der daraus berechneten Raumdichte des Probekörpers

Bild 1-8: Prinzipskizze des Walzsektor-Verdichtungsgeräts (TP Asphalt-StB, Teil 33 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2007))

Bild 1-9: Plattendicke (rot) und aufgebrauchte Kraft (blau) je cm Plattenbreite während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerät, weggeregelter Vorverdichtung, kraftgeregelte Hauptverdichtung (Ringleb & Herzberg 2012)

Bild 1-10: Schematische Veranschaulichung von Expansion und Halbwertzeit (M KRC - Anhang 2 - Bild 2)

Bild 1-11: Direktes Einspritzen von Schaumbitumen aus dem Schaumbitumen-Apparat (rechts) in den Labormischer (links)

Bild 1-12: Herstellung von Asphaltmischgut mittels Schaumbitumen: In Vorversuchen eingestellte und resultierende Bindemittelmenge [g] bei Einsatz der Sprühlanze

Bild 1-13: Herstellung von Asphaltmischgut mittels Schaumbitumen: In Vorversuchen resultierende Bindemittelmenge [%] bei Einsatz der Sprühlanze

Bild 2-1: Einteilung einiger Zusätze zur Temperaturabsenkung von Asphaltmischgut nach der Wirkungsweise in Anlehnung an Täube (2021) inkl. hier nicht untersuchter VVZ

Bild 2-2: Prinzip der Vernetzungshilfe von oberflächenaktiven Zusätzen (Willmeroth 2023)

Bild 2-3: Reaktivmodifizierung des Bitumens mittels B2Last (Oeser 2020)

Bild 3-1: Addierte Mischarbeit von Trommel und Rührer über die Zeit für die überprüften Varianten (VVZ = viskositätsverändernder Zusatz)

Bild 3-2: Über die Anzahl an Schlägen berechnete Raumdichte (Messwerte) und über die Tauchwägung korrigierte Raumdichte (Korrektur) der Referenz bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C

Bild 3-3: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Referenz

Bild 3-4: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2 mit 100 Schlägen und Wiedererwärmung und V2-1 ohne Wiedererwärmung)

Bild 3-5: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge (V2-1, ohne Wiedererwärmung des Mischguts)

Bild 3-6: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion bei 135 °C mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2-1)

Bild 3-7: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (V3)

Bild 3-8: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (V3)

Bild 3-9: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion bei 115 °C mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (V3)

Bild 3-10: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem Zeolith (V4)

Bild 3-11: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (V4), Kurve für 100 Verdichtungsschläge mit Zeolith (V4)

Bild 3-12: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion der Variante V4 (Zeolith)

Bild 3-13: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit Schaumbitumen (V5)

Bild 3-14: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Gerade für 100 Verdichtungsschläge (Variante V5 Schaumbitumen)

Bild 3-15: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V6 viskositätsverändernder Zusatz), Gerade für 100 Verdichtungsschläge

Bild 3-16: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen (von 50 bis 400 Schläge in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V6 viskositätsverändernder Zusatz), Gerade für 100 Verdichtungsschläge

Bild 3-17: Beispiel für die aufgebrauchten bzw. gemessenen Kräfte und Wege bei einer vorschriftsgerechten Verdichtung von Asphalt-Probeplatten im Walzsektor-Verdichtungsgerät.

Bild 3-18: Beispiel für die aufgebrauchten bzw. gemessenen Kräfte und Wege bei der angepassten Verdichtung (200 zusätzliche Übergänge bei 15 kN) von Asphalt-Probeplatten im Walzsektor-Verdichtungsgerät.

Bild 3-19: Berechnete Raumdichten über die Anzahl der Übergänge bei unterschiedlichen Temperaturen bei Einsatz des oberflächenaktiven Zusatzes (V2, mit Wiedererwärmung)

Bild 3-20: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V2-1 oberflächenaktiver Zusatz)

Bild 3-21: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurven für übliche und maximale Verdichtung (Variante V2 oberflächenaktiver Zusatz)

Bild 3-22: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion für die Walzsektor-Verdichtung der Variante 2 (oberflächenaktiver Zusatz)

Bild 3-23: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz)

Bild 3-24: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurven für übliche und maximale Verdichtung (Variante V3 reaktivmodifizierender Zusatz)

Bild 3-25: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V4 Zeolith)

Bild 3-26: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für Standard-Verdichtung (Variante V4 Zeolith)

Bild 3-27: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion für die Walzsektor-Verdichtung der Variante V4 (Zeolith)

Bild 3-28: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Überrollungen (1 und 108) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V5 Schaumbitumen)

Bild 3-29: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Übergänge (1 bis 150) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (V6 viskositätsverändernder Zusatz)

Bild 3-30: Über die Anzahl an Gyrationen berechnete Raumdichte (Raumdichte Dickenänderung, schwarze Linie) und über die Tauchwägung korrigierte Raumdichte (Korrektur, blaue Linie) der Referenzvariante (V1) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C

Bild 3-31: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Referenzvariante (V1)

Bild 3-32: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem oberflächenaktiven Zusatz (Variante V2)

Bild 3-33: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Gyrationen (Variante V2 oberflächenaktiver Zusatz)

Bild 3-34: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit dem reaktivmodifizierenden Zusatz (Variante V3)

Bild 3-35: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsgyrationen (Variante V3 reaktivmodifizierender Zusatz)

Bild 3-36: Erzielte Raumdichten über die Anzahl der Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsgyrationen (Variante V3 reaktivmodifizierender Zusatz)

Bild 3-37: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit Zeolith (Variante V4)

Bild 3-38: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V4 Zeolith), Gerade für 100 Gyrationen

Bild 3-39: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen (Variante V4 Zeolith), Gerade für 100 Gyrationen

Bild 3-40: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen mit Schaumbitumen (Variante V5)

Bild 3-41: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Gyrationen (50 bis 400 in 50er Schritten) bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen für Variante V5 Schaumbitumen, Kurve für 100 Gyrationen

Bild 3-42: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C für alle Asphaltvarianten AC 11 D S (Referenzvariante V1, Varianten V2 bis V6)

Bild 3-43: Erzielte Raumdichten nach Maximal-Verdichtung bei 135 °C für alle Asphaltvarianten AC 11 D S

Bild 3-44: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V2 – AC 11 D S, Oberflächenaktiver Zusatz

Bild 3-45: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V3- AC 11 D S, reaktivmodifizierender Zusatz

Bild 3-46: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V4 – AC 11 D S, Zeolith

Bild 3-47: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V5 – AC 11 D S, Schaumbitumen

Bild 3-48: Erzielte Raumdichten nach Standard-Verdichtung der Variante V6 – AC 11 D S, viskositätsverändernder Zusatz

Bild 3-49: Variationskoeffizienten aller Serien von Probekörpern, AC 11 D S, Marshall-Verdichtung

Bild 3-50: Variationskoeffizienten aller Serien von Probekörpern mit 5 Probekörpern, AC 11 D S, Marshall-Verdichtung

Bild 3-51: Variationskoeffizienten aller Serien von aus Platten gebohrten Probekörpern, AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-52: Variationskoeffizienten aller Serien von Probekörpern, AC 11 D S, Gyrator-Verdichtung

Bild 3-53: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende und Raumdichten der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-54: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende im Verhältnis zur Raumdichte der Probekörper der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-55: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnung im Wendepunkt bzw. bei Versuchsende der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-56: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Anzahl der Lastwechsel im Wendepunkt der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-57: Verformungswiderstand: Druck-Schwellversuch, Dehnung nach 1.000 Lastwechseln der geprüften Varianten AC 11 D S, Walzsektor-Verdichtung

Bild 3-58: Verformungswiderstand: Dehnungsrate im Wendepunkt aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch und entsprechende Raumdichten der Probekörper, AC 11 D S, Marshall-Verdichtungsgerät

Bild 3-59: Verformungswiderstand: Dehnungsrate im Wendepunkt aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch und Raumdichten der Probekörper AC 11 D S, Gyrator-Verdichtung

Bild 4-1: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (SMA 8 S) V10-1 (Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V10-3 (Zeolith) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Bild 4-2: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V10-1), SMA 8 S

Bild 4-3: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei drei Temperaturen (135, 125 und 120 °C) und bei 100 bzw. 150 Verdichtungsschlägen, SMA 8 S

Bild 4-4: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V10-3 (Zeolith) im Vergleich zur Referenzvariante (V10-1), SMA 8 S

Bild 4-5: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion der Variante V10-3 (Zeolith) bei zwei Temperaturen (145 und 135 °C) und bei 100 bzw. 150 Verdichtungsschlägen, SMA 8 S

Bild 4-6: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (AC 11 D S) V20-1 (Referenz), V20-2 (Schaumbitumen) und V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Bild 4-7: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V20-2 (Schaumbitumen) im Vergleich zur Referenzvariante (V20-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 11 D S

Bild 4-8: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V20-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von $125\text{ }^\circ\text{C}$ und 100 Verdichtungsschlägen, AC 11 D S

Bild 4-9: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V20-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 11 D S

Bild 4-10: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei $120\text{ }^\circ\text{C}$ und 100 Verdichtungsschlägen und bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ mit 150 Verdichtungsschlägen, AC 11 D S

Bild 4-11: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (SMA 16 B S) V30-1 (Referenzvariante), V30-2 (Schaumbitumen) und V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Bild 4-12: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V30-2 (Schaumbitumen) im Vergleich zur Referenzvariante (V30-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), SMA 16 B S

Bild 4-13: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V30-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von $135\text{ }^\circ\text{C}$ und 100 Verdichtungsschlägen, SMA 16 B S

Bild 4-14: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V30-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), SMA 16 B S

Bild 4-15: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von $145\text{ }^\circ\text{C}$ und 100 Verdichtungsschlägen sowie bei $135\text{ }^\circ\text{C}$ und 150 Verdichtungsschlägen, SMA 16 B S

Bild 4-16: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (AC 32 T S) V40-1 (Referenzvariante), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V40-3 (Zeolith) in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen bei 100 und 400 Schlägen

Bild 4-17: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) im Vergleich zur Referenzvariante (V40-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 32 T S

Bild 4-18: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Verdichtungsschlägen, 120 °C und 150 Schlägen und bei 115 °C mit 200 Schlägen, AC 32 T S

Bild 4-19: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen der Variante V40-3 (Zeolith) im Vergleich zur Referenzvariante (V40-1) und Darstellung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF), AC 32 T S

Bild 4-20: Überprüfung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF) der Variante V40-3 (Zeolith) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Verdichtungsschlägen, 120 °C und 150 Schlägen und bei 115 °C mit 200 Schlägen, AC 32 T S

Bild 4-21: Vergleich der Streumaße (Standardabweichungen) an temperaturabgesenkten Varianten mit 5 Marshall-Probekörpern: Varianten V10-1 (SMA 8 S Referenz), V20-1 (AC 11 D S Referenz), V30-1 (SMA 16 B S Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V10-3 (Zeolith), V20-2 (Schaumbitumen), V30-2 (Schaumbitumen), V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-3 (Zeolith)

Bild 4-22: Vergleich der Streumaße (Standardabweichungen) aller temperaturabgesenkten Varianten der Anwendungsdemonstration, Marshall-Probekörper: Varianten V10-1 (SMA 8 S Referenz), V20-1 (AC 11 D S Referenz), V30-1 (SMA 16 B S Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V10-3 (Zeolith), V20-2 (Schaumbitumen), V30-2 (Schaumbitumen), V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-1 (AC 32 T S Referenz), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz), V40-3 (Zeolith)

Bild 4-23: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V10 (SMA 8 S): Referenzvariante V10-1, Variante V10-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V10-3 mit Zeolith

Bild 4-24: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V10 (SMA 8 S): Referenzvariante V10-1, Variante V10-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V10-3 mit Zeolith, jeweils mit unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Bild 4-25: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V20 (AC 11 D S): Referenzvariante V20-1, Variante V20-2 mit Schaumbitumen, Variante V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Bild 4-26: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V20 (AC 11 D S): Referenzvariante V20-1, Variante V20-2 mit Schaumbitumen, V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz, jeweils bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Bild 4-27: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V30 (SMA 16 B S): Referenzvariante V30-1, Variante V30-2 mit Schaumbitumen, Variante V30-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Bild 4-28: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V30 (SMA 16 B S): Referenzvariante V30-1, Variante V30-2 mit Schaumbitumen, V30-3 mit oberflächenaktivem Zusatz, jeweils bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Bild 4-29: Verformungswiderstand: Dehnungsraten und Raumdichten der Variante V40 (AC 32 T S): Referenzvariante V40-1, Variante V40-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V40-3 mit Zeolith

Bild 4-30: Verformungswiderstand: Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Raumdichte, Variante V40 (AC 32 T S) : Referenzvariante V40-1, Variante V40-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V40-3 mit Zeolith, jeweils bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen

Bild 6-1: Korrektur der Raumdichte, bestimmt über die Dickenänderung, auf Werte, bestimmt über die Tauchwägung

Bild 6-2: Erzielte Raumdichten (nach Tauchwägung) über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge

Bild 7-1: Erzielte Raumdichten über die Anzahl an Schlägen bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen, Kurve für 100 Verdichtungsschläge (AC 11 D S mit oberflächenaktivem Zusatz, Marshall-Verdichtungsgerät)

Tabellen

Tab. 2-1: Zusammenstellung einiger auf dem Markt verfügbarer Zusätze zur Temperaturabsenkung im Asphaltstraßenbau (nicht vollständig; Stand: November 2024), Teil 1

Tab. 2-2: Zusammenstellung einiger auf dem Markt verfügbarer Zusätze zur Temperaturabsenkung im Asphaltstraßenbau (nicht vollständig; Stand: November 2024), Teil 2

Tab. 2-3: Kategorien für Zusätze / Verfahren zur Temperaturabsenkung und deren Bezeichnung mittels Kürzel

Tab. 3-1: Zusammensetzung der für die Überprüfung eingesetzten Referenz-Mischgutsorte AC 11 D S

Tab. 3-2: Übersicht der Varianten an TA-Asphalt zur Ermittlung der Verdichtungsfunktion

Tab. 3-3: Ergebnisse der visuellen Kontrolle beim Mischvorgang

Tab. 3-4: Übersicht der mittleren Raumdichten am Marshall-Probekörper der Referenzvariante (V1) nach 100 und 400 Schlägen

Tab. 3-5: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2 und V2-1) nach 100 Schlägen

Tab. 3-6: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2) nach 400 Schlägen

Tab. 3-7: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit dem reaktivmodifizierenden Zusatz (V3) nach 100 Schlägen und 400 Schlägen

Tab. 3-8: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit Zeolith (V4) nach 100 und 400 Schlägen

Tab. 3-9: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit Zeolith (V4) bei verschiedenen Temperaturen mit unterschiedlicher Anzahl von Schlägen

Tab. 3-10: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper mit Schaumbitumen (V5) nach 100 und 400 Schlägen

Tab. 3-11: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Marshall-Probekörper der Variante 6 nach 100 und 400 Schlägen

Tab. 3-12: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walsektor-verdichteten Platten der Referenzvariante (V1)

Tab. 3-13: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walsektor-verdichteten Platten der Varianten 2 und 2-1 nach Standard-Verdichtung

Tab. 3-14: Übersicht der ermittelten Raumdichten an den Asphalt-Probepplatten mit dem oberflächenaktiven Zusatz (V2) nach ca. 200 Überrollungen im Walsektor-Verdichtungsgerät

- Tab. 3-15: Übersicht der ermittelten Raumdichten an WSV-Platten der Variante 3 (reaktivmodifizierender Zusatz) nach Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen
- Tab. 3-16: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten Platten der Variante 4 (Zeolith) nach Standard-Verdichtung und nach 200 Übergängen
- Tab. 3-17: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten -Platten der Variante 5 (Schaumbitumen) nach Standard-Verdichtung und bei maximal möglicher Verdichtung
- Tab. 3-18: Übersicht der ermittelten Raumdichten an walzsektor-verdichteten Platten der Variante 6 (viskositätsverändernder Zusatz) nach Standard-Verdichtung und bei maximal möglicher Verdichtung
- Tab. 3-19: Übersicht der mittleren Raumdichten am Gyrator-Probekörper der Referenzvariante (V1) nach 100 und 400 Gyrationen
- Tab. 3-20: Wiederholung der Referenzvariante (V1): Übersicht der mittleren Raumdichten am Gyrator-Probekörper nach 100 und 400 Gyrationen
- Tab. 3-21: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit dem oberflächenaktiven Zusatz (Variante V2) nach 100 und 400 Gyrationen
- Tab. 3-22: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit dem reaktivmodifizierendem Zusatz (Variante V3) nach 100 und 400 Gyrationen
- Tab. 3-23: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit Zeolith (Variante V4) nach 100 und 400 Gyrationen
- Tab. 3-24: Übersicht der ermittelten Raumdichten am Gyrator-Probekörper mit Schaumbitumen (Variante V5) nach 100 und 400 Gyrationen
- Tab. 3-25: Übersicht der Varianten bei Anwendung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF)
- Tab. 3-26: Übersicht der Streumaße Standardabweichung und Variationskoeffizient für die Raumdichten der unterschiedlich hergestellten Varianten
- Tab. 3-27: Übersicht der Variationen AC 11 D S für die Ermittlung des Verformungswiderstands (Walzsektor-Verdichtung)
- Tab. 3-28: Übersicht der Variationen AC 11 D S für die Ermittlung des Verformungswiderstands (Marshall-Verdichtungsgerät)
- Tab. 3-29: Übersicht der Variationen AC 11 D S für die Ermittlung des Verformungswiderstands mittels Gyrator-Verdichtung
- Tab. 3-30: Übersicht der Variationen für die Ermittlung des Verformungswiderstands (Walzsektor-Verdichtung, Gyrator-Verdichtung und Marshall-Verdichtung)
- Tab. 3-31: Zusammenfassende Beurteilung der Verdichtungsverfahren für die überprüften AC 11 D S: Marshall-Verdichtung (MPK), Walzsektor-Verdichtung (WSV) und Gyrator-Verdichtung
- Tab. 4-1: Für die Reihenuntersuchung von temperaturreduzierten Asphalten vorgesehene Asphaltmischgut- und Bitumensorten (TAVF: nach Temperatur-Absenkungsverdichtungs-Funktion)

Tab. 4-2: Zusammensetzung der für die Überprüfung hergestellten TA-Asphaltmischgutsorten

Tab. 4-3: Zusammensetzung der für die Überprüfung verwendeten Asphaltgranulate RC 1 und RC 2

Tab. 4-4: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (SMA 8 S) V10-1 (Referenz), V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V10-3 (Zeolith) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Tab. 4-5: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V10-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei den Verdichtungstemperaturen 135, 125 und 120 °C bei variierender Anzahl an Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 8 S

Tab. 4-6: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V10-3 (Zeolith) bei den Verdichtungstemperaturen 145 und 135 °C bei variierender Anzahl an Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 8 S

Tab. 4-7: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (AC 11 D S) V20-1 (Referenzvariante), V20-2 (Schaumbitumen) und V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Tab. 4-8: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V20-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von 125 °C und 100 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 11 D S

Tab. 4-9: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V20-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei den Verdichtungstemperaturen 120 und 135 °C bei variierender Anzahl an Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 11 D S

Tab. 4-10: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (SMA 16 B S) V30-1 (Referenzvariante), V30-2 (Schaumbitumen) und V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Tab. 4-11: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V30-2 (Schaumbitumen) bei einer Verdichtungstemperatur von 135 °C und 100 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 16 B S

Tab. 4-12: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V30-3 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Schlägen sowie bei 135 °C und 150 Verdichtungsschlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, SMA 16 B S

Tab. 4-13: Raumdichten in g/cm^3 der Varianten (AC 32 T S) V40-1 (Referenzvariante), V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) und V40-3 (Zeolith) nach 100 bzw. 400 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät

Tab. 4-14: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V40-2 (oberflächenaktiver Zusatz) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Schlägen und bei 120 °C und 150 Verdichtungsschlägen sowie bei 115 °C und 200 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 32 T S

Tab. 4-15: Erzielte Mittelwerte der Raumdichten der Variante V40-3 (Zeolith) bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C und 100 Schlägen und bei 120 °C und 150 Verdichtungsschlägen sowie bei 115 °C und 200 Schlägen im Marshall-Verdichtungsgerät, AC 32 T S

Tab. 4-16: Übersicht der Varianten bei Anwendung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion (TAVF)

Tab. 4-17: Übersicht der Streumaße (Standardabweichungen) der überprüften Raumdichten der Varianten V10 bis V40, hergestellt mit dem Marshall-Verdichtungsgerät.

Tab. 4-18: Liste der hergestellten Variationen für Variante V10 – SMA 8 S: Referenzvariante V10-1, Variante V10-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V10-3 mit Zeolith

Tab. 4-19: Liste der hergestellten Variationen für Variante V20 – AC 11 D S: Referenzvariante V20-1, Variante V20-2 mit Schaumbitumen, Variante V20-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Tab. 4-20: Liste der hergestellten Variationen für Variante V30 – SMA 16 B S: Referenzvariante V30-1, Variante V30-2 mit Schaumbitumen, Variante V30-3 mit oberflächenaktivem Zusatz

Tab. 4-21: Liste der hergestellten Variationen für Variante V40 – AC 32 T S: Referenzvariante V40-1, Variante V40-2 mit oberflächenaktivem Zusatz, Variante V40-3 mit Zeolith

Tab. 4-22: Übersicht der eingesetzten temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und Mischgutsorten und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand ermittelt im Druck-Schwellversuch

Tab. 4-23: Übersicht der eingesetzten Mischgutsorten und temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand ermittelt im Druck-Schwellversuch

Tab. 6-1: Vorschlag zur Kategorisierung von Zusätzen / Verfahren für die Temperaturabsenkung

Tab. 6-2: Vorschlag für Verdichtungstemperaturen zur Herstellung von temperaturabgesenkten Asphalten

Tab. 6-3: Geplantes Vorgehen bzgl. der Verdichtungstemperatur im Labor und in der Baupraxis

Tab. 7-1: Übersicht der Variationen für die Herstellung von Asphaltprobekörpern zur Ermittlung der Temperatur-Absenkungs-Verdichtungs-Funktion an einem AC 11 D S und Plausibilitätskontrolle

Tab. 7-2: Übersicht der eingesetzten Asphaltmischgutsorten und temperaturabsenkenden Zusätze / Verfahren und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand ermittelt im Druck-Schwellversuch

Anhang

Anhang 1.1

Kennzeichnung der Probe:
 Art der Probe:
 Äußere Beschaffenheit:

Referenz V1
 Mischgut
 gleichmäßig umhüllt

Zusammensetzung

Gesamtbindemittelgehalt [M.-%]
 Löslicher+Unlöslicher Gehalt [M.-%]
 Gesteinskörnungsgehalt [M.-%]

Eigenschaften des extr. Bindemittels

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
 Elastische Rückstellung [%]
 Dehnweg [cm]

Gesteinskörnungsgemisch

Gesteinsart > 2,0 mm
 Grobkornanteil > 8,0 mm [M.-%]

	Ist	Soll	±Toleranz	Abw.		
Gesamtbindemittelgehalt [M.-%]	6,3	6,1	5,7 – 6,5	-		
Löslicher+Unlöslicher Gehalt [M.-%]	6,11 + 0,20					
Gesteinskörnungsgehalt [M.-%]	93,7					
		25/55-55 A				
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	62,6		≤ 71	-		
Elastische Rückstellung [%]	74	≥ 40				
Dehnweg [cm]						
Gesteinskörnungsgemisch	Gabbro	Gabbro				
Gesteinsart > 2,0 mm				-		
Grobkornanteil > 8,0 mm [M.-%]	13,0	15,0	10-20	-		
Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]				
Füller 0-0,063	7,3	7,3	7,3	7,0	5,0-9,0	-
0,063-0,125	3,0	10,3	10,3	10,0	7,0-17,0	-
0,125-0,25	4,3	14,6				
Feine 0,25-1,0	14,3	28,9				
Körnung 1,0-2,0	15,2	44,1	44,1	45,0	40,0-50,0	-
Grobe 2,0-5,6	26,0	70,1				
Körnung 5,6-8,0	16,9	87,0	87,0	83,0	70,0-85,0	2,0
8,0-11,2	10,8	97,8	97,8	95,0	90,0-100,0	
11,2-16,0	2,2	100,0				
16,0-22,4						
22,4-31,5						
31,5-45,0						-
Eigenschaften der Probekörper						
Raumdicke (DRY) [g/cm³]	2,471					
Rohdicke [g/cm³]	2,595					
Hohlraumgehalt V [Vol.-%]	4,8	2,5-3,5	1,5-4,5			0,3
Fiktiver Hohlraumgehalt VMA [Vol.-%]	20,0					
Hohlraumfüllungsgrad VFB [%]	75,9					
Eindringtiefe [mm]	-					
Zunahme der Eindringtiefe [mm]	-					

Anhang 1.2

Kennzeichnung der Probe:
 Art der Probe:
 Äußere Beschaffenheit:

oberflächenaktiver Zusatz V2
 Mischgut
 gleichmäßig umhüllt

Zusammensetzung

Gesamtbindemittelgehalt [M.-%] 6,3

Löslicher+Unlöslicher Gehalt [M.-%] 6,08 + 0,20

Gesteinskörnungsgehalt [M.-%] 93,7

Eigenschaften des extr. Bindemittels

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] 62,4

Elastische Rückstellung [%] 74

Dehnweg [cm]

Gesteinskörnungsgemisch

Gesteinsart > 2,0 mm

Grobkornanteil > 8,0 mm [M.-%] 15,2

Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]
Füller 0-0,063	7,4	7,4
Feine Körnung 0,063-0,125	2,8	10,2
	4,1	14,3
	13,9	28,2
Körnung 1,0-2,0	14,3	42,5
Grobe Körnung 2,0-5,6	27,3	69,8
	15,0	84,8
	13,2	98,0
	2,0	100,0

Eigenschaften der Probekörper

Raumdicke (DRY) [g/cm³] 2,524

Rohdicke [g/cm³] 2,582

Hohlraumgehalt V [Vol.-%] 2,2

Fiktiver Hohlraumgehalt VMA [Vol.-%] 17,7

Hohlraumfüllungsgrad VFB [%] 87,6

Eindringtiefe [mm] -

Zunahme der Eindringtiefe [mm] -

Ist	Soll	±Toleranz	Abw.
6,3	6,1	5,7 – 6,5	-
6,08 + 0,20			
93,7			
25/55-55 A			
62,4		≤ 71	-
74	≥ 40		
Gabbro	Gabbro		
15,2	15,0	10-20	-
7,4	7,0	5,0-9,0	-
10,2	10,0	7,0-17,0	-
42,5	45,0	40,0-50,0	-
84,8	83,0	70,0-85,0	-
98,0	95,0	90,0-100,0	-
2,524			
2,582			
2,2	2,5-3,5	1,5-4,5	-
17,7			
87,6			
-			
-			

Anhang 1.3

Kennzeichnung der Probe:
 Art der Probe:
 Äußere Beschaffenheit:

Reaktivmodifizierung V3
 Mischgut
 gleichmäßig umhüllt

Zusammensetzung

Gesamtbindemittelgehalt [M.-%]
 Löslicher+Unlöslicher Gehalt [M.-%]
 Gesteinskörnungsgehalt [M.-%]

Eigenschaften des extr. Bindemittels

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
 Elastische Rückstellung [%]
 Dehnweg [cm]

Gesteinskörnungsgemisch

Gesteinsart > 2,0 mm
 Grobkornanteil > 8,0 mm [M.-%]

Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]
Füller 0-0,063	7,2	7,2
Feine Körnung	0,063-0,125	3,0
	0,125-0,25	4,3
	0,25-1,0	14,1
Grobe Körnung	1,0-2,0	13,7
	2,0-5,6	25,8
Körnung	5,6-8,0	15,4
	8,0-11,2	13,8
	11,2-16,0	1,7
	16,0-22,4	
	22,4-31,5	
	31,5-45,0	

Ist	Soll	±Toleranz	Abw.
6,2	6,1	5,7 – 6,5	-
5,95 + 0,25			
93,8			
25/55-55 A *			
62,8		≤ 71	-
20	≥ 40		20
Gabbro	Gabbro		
15,5	15,0	10-20	-
Eigenschaften der Probekörper			
Raumdicke (DRY) [g/cm³]	2,449		
Rohdicke [g/cm³]	2,600		
Hohlraumgehalt V [Vol.-%]	5,8	2,5-3,5	1,3
Fiktiver Hohlraumgehalt VMA [Vol.-%]	20,6		
Hohlraumfüllungsgrad VFB [%]	71,9		
Eindringtiefe [mm]	-		
Zunahme der Eindringtiefe [mm]	-		

* als Basisbitumen diente ein Straßenbaubitumen 50/70

Anhang 1.4

Kennzeichnung der Probe:
 Art der Probe:
 Äußere Beschaffenheit:

Zeolith V4
 Mischgut
 gleichmäßig umhüllt

Zusammensetzung

Gesamtbindemittelgehalt [M.-%] 6,3

Löslicher+Unlöslicher Gehalt [M.-%] 6,08 + 0,20

Gesteinskörnungsgehalt [M.-%] 93,7

Eigenschaften des extr. Bindemittels

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] 61,6

Elastische Rückstellung [%] 77

Dehnweg [cm]

Gesteinskörnungsgemisch

Gesteinsart > 2,0 mm

Grobkornanteil > 8,0 mm [M.-%] 16,9

Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]
Füller 0-0,063	7,4	7,4
Feine Körnung 0,063-0,125	3,1	10,5
	4,1	14,6
	13,3	27,9
Körnung 1,0-2,0	14,3	42,1
Grobe Körnung 2,0-5,6	27,1	69,2
	13,8	83,0
	15,1	98,2
	1,8	100,0

Eigenschaften der Probekörper

Raumdicke (DRY); 135 °C Verdichtung [g/cm³] 2,481

Rohdicke [g/cm³] 2,575

Hohlraumgehalt V [Vol.-%] 3,7

Fiktiver Hohlraumgehalt VMA [Vol.-%] 18,9

Hohlraumfüllungsgrad VFB [%] 80,6

Eindringtiefe [mm] -

Zunahme der Eindringtiefe [mm] -

Ist	Soll	±Toleranz	Abw.
6,3	6,1	5,7 – 6,5	-
6,08 + 0,20			
93,7			
25/55-55 A			
61,6		≤ 71	-
77	≥ 40		-
Gabbro	Gabbro		
16,9	15,0	10-20	-
7,4	7,0	5,0-9,0	-
10,5	10,0	7,0-17,0	-
42,1	45,0	40,0-50,0	-
83,0	83,0	70,0-85,0	-
98,2	95,0	90,0-100,0	-
2,481			
2,575			
3,7	2,5-3,5	1,5-4,5	-
18,9			
80,6			
-			
-			

Anhang 1.5

Kennzeichnung der Probe:
 Art der Probe:
 Äußere Beschaffenheit:

Viskositätsverändernder Zusatz V6
 Mischgut
 gleichmäßig umhüllt

Zusammensetzung

Gesamtbindemittelgehalt [M.-%] 6,3
 Löslicher+Unlöslicher Gehalt [M.-%] 6,13 + 0,21
 Gesteinskörnungsgehalt [M.-%] 93,7

Eigenschaften des extr. Bindemittels

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] 78,7
 Elastische Rückstellung [%] 77
 Dehnweg [cm]

Gesteinskörnungsgemisch

Gesteinsart > 2,0 mm
 Grobkornanteil > 8,0 mm [M.-%]

Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]
Füller 0-0,063	7,7	7,7
0,063-0,125	4,8	12,5
	2,7	15,2
Feine 0,125-0,25	14,1	29,3
Körnung 1,0-2,0	14,5	43,8
Grobe 2,0-5,6	24,8	68,6
	14,4	83,0
Körnung 5,6-8,0	15,2	98,2
	1,8	100,0
16,0-22,4		
22,4-31,5		
31,5-45,0		

Eigenschaften der Probekörper

Raumdicke (DRY); 135 °C Verdichtung [g/cm³]
 Rohdicke [g/cm³] 2,557
 Hohlraumgehalt V [Vol.-%] 3,0
 Fiktiver Hohlraumgehalt VMA [Vol.-%] 18,3
 Hohlraumfüllungsgrad VFB [%] 83,8
 Eindringtiefe [mm] -
 Zunahme der Eindringtiefe [mm] -

Ist	Soll	±Toleranz	Abw.																																																																																								
6,3	6,1	5,7 – 6,5	-																																																																																								
6,13 + 0,21																																																																																											
93,7																																																																																											
25/45 VL																																																																																											
78,7			-																																																																																								
77	≥ 40		-																																																																																								
Gabbro	Gabbro																																																																																										
17,0	15,0	10-20	-																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kornklasse [mm]</th> <th>Anteil [%]</th> <th>Sieblinie [%]</th> <th>Ist</th> <th>Soll</th> <th>±Toleranz</th> <th>Abw.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Füller 0-0,063</td> <td>7,7</td> <td>7,7</td> <td>7,7</td> <td>7,0</td> <td>5,0-9,0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">0,063-0,125</td> <td>4,8</td> <td>12,5</td> <td>12,5</td> <td>10,0</td> <td>7,0-17,0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>2,7</td> <td>15,2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Feine 0,125-0,25</td> <td>14,1</td> <td>29,3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Körnung 1,0-2,0</td> <td>14,5</td> <td>43,8</td> <td>43,8</td> <td>45,0</td> <td>40,0-50,0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Grobe 2,0-5,6</td> <td>24,8</td> <td>68,6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>14,4</td> <td>83,0</td> <td>83,0</td> <td>83,0</td> <td>70,0-85,0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Körnung 5,6-8,0</td> <td>15,2</td> <td>98,2</td> <td>98,2</td> <td>95,0</td> <td>90,0-100,0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>1,8</td> <td>100,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>16,0-22,4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>22,4-31,5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>31,5-45,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]	Ist	Soll	±Toleranz	Abw.	Füller 0-0,063	7,7	7,7	7,7	7,0	5,0-9,0	-	0,063-0,125	4,8	12,5	12,5	10,0	7,0-17,0	-	2,7	15,2					Feine 0,125-0,25	14,1	29,3					Körnung 1,0-2,0	14,5	43,8	43,8	45,0	40,0-50,0	-	Grobe 2,0-5,6	24,8	68,6					14,4	83,0	83,0	83,0	70,0-85,0	-	Körnung 5,6-8,0	15,2	98,2	98,2	95,0	90,0-100,0	-	1,8	100,0					16,0-22,4							22,4-31,5							31,5-45,0						
Kornklasse [mm]	Anteil [%]	Sieblinie [%]	Ist	Soll	±Toleranz	Abw.																																																																																					
Füller 0-0,063	7,7	7,7	7,7	7,0	5,0-9,0	-																																																																																					
0,063-0,125	4,8	12,5	12,5	10,0	7,0-17,0	-																																																																																					
	2,7	15,2																																																																																									
Feine 0,125-0,25	14,1	29,3																																																																																									
Körnung 1,0-2,0	14,5	43,8	43,8	45,0	40,0-50,0	-																																																																																					
Grobe 2,0-5,6	24,8	68,6																																																																																									
	14,4	83,0	83,0	83,0	70,0-85,0	-																																																																																					
Körnung 5,6-8,0	15,2	98,2	98,2	95,0	90,0-100,0	-																																																																																					
	1,8	100,0																																																																																									
16,0-22,4																																																																																											
22,4-31,5																																																																																											
31,5-45,0																																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Eigenschaft</th> <th>Einheit</th> <th>Ist</th> <th>Soll</th> <th>±Toleranz</th> <th>Abw.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Raumdicke (DRY); 135 °C Verdichtung</td> <td>[g/cm³]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rohdicke</td> <td>[g/cm³]</td> <td>2,557</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hohlraumgehalt V</td> <td>[Vol.-%]</td> <td>3,0</td> <td>2,5-3,5</td> <td>1,5-4,5</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Fiktiver Hohlraumgehalt VMA</td> <td>[Vol.-%]</td> <td>18,3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hohlraumfüllungsgrad VFB</td> <td>[%]</td> <td>83,8</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Eindringtiefe</td> <td>[mm]</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zunahme der Eindringtiefe</td> <td>[mm]</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Eigenschaft	Einheit	Ist	Soll	±Toleranz	Abw.	Raumdicke (DRY); 135 °C Verdichtung	[g/cm³]					Rohdicke	[g/cm³]	2,557				Hohlraumgehalt V	[Vol.-%]	3,0	2,5-3,5	1,5-4,5	-	Fiktiver Hohlraumgehalt VMA	[Vol.-%]	18,3				Hohlraumfüllungsgrad VFB	[%]	83,8				Eindringtiefe	[mm]	-				Zunahme der Eindringtiefe	[mm]	-																																											
Eigenschaft	Einheit	Ist	Soll	±Toleranz	Abw.																																																																																						
Raumdicke (DRY); 135 °C Verdichtung	[g/cm³]																																																																																										
Rohdicke	[g/cm³]	2,557																																																																																									
Hohlraumgehalt V	[Vol.-%]	3,0	2,5-3,5	1,5-4,5	-																																																																																						
Fiktiver Hohlraumgehalt VMA	[Vol.-%]	18,3																																																																																									
Hohlraumfüllungsgrad VFB	[%]	83,8																																																																																									
Eindringtiefe	[mm]	-																																																																																									
Zunahme der Eindringtiefe	[mm]	-																																																																																									

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Straßenwesen“

2025

S 211: Literaturstudie zur Nachhaltigkeit im Straßenbau

Carreño, Schmitz, Kemper, Cypra, Holldorb

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

S 212: Einfluss von temporär auftretendem Grundwasser auf die Standsicherheit von Straßeneinschnittsböschungen

Denne, Festag, Gattermann

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

S 213: Einfluss der Pendelbewegung der Fahrzeuge des Schwerverkehrs auf die Beanspruchung und Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen

Uhlig, Schlimper, Seeger, Zeißler, Wellner, Blasl, Kathmann, Scharrenbroich, Roggendorf, Haas

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

S 214: Kritikalitätsanalyse für die Bundesverkehrswege als Baustein der Klimawirkungsanalyse

Burg, Franken, Gebhardt, Hewel, Schrempp

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

S 215: Erstellung eines Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung und zur Prognose des Verhaltens von Pflasterbefestigungen

Wellner, Zeißler, Spanier, Blasl

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

S 216: Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

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

S 217: Untersuchung zur Wirksamkeit der Anstrichmittel zwischen Asphaltsschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes

Böhm, Middendorf, Kempf, Krause

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

S 218: Zur experimentellen Bestimmung der Wärmedehnzahl von Beton im Straßenbau

Spilker

20,50 €

S 219: Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

Renken, Lehmkuhl, Neumann, Liu, Ulrich

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

S 220: Neue Prüfverfahren und -parameter: Übertragung des Bewertungshintergrundes des Verformungswiderstandes von Walzasphalt für die vertragliche Anwendung von Performance-Anforderungen

Radenberg, Dominik, Nytus, Müller

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

S 221: Entwicklung von Asphaltsschichten für Straßen und Brückenbeläge unter extremen Klimaeinwirkungen

Plachkova-Dzhurova, Heide-Dörr, Ulrich

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

S 222: Langfristige Schwermetalleinbindung in Böden und Ersatzbaustoffen durch Behandlung mit Bindemitteln

Lin

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

S 223: Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums

Radenberg, Breddemann, Holzwarth, Schmidt, Rudi, Stephan

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

S 224: Baupraktische Erprobung von Straßenbetonen mit Innenhydrophobierung

Weise, Fladt

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

S 225: Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt

Wörner, Eickhoff, Patzak, Hilbig

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

S 226: Untersuchung zur Charakterisierung von Bitumen („BEZIBIT“)

Wistuba, Büchner, Sigwarth, Mollenhauer, Wetekam, Rudi

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

S 227: Optimierung von Verfahren zur Prüfung von Füller-Bitumen-Gemischen mit dem Dynamischen Scherrheometer

Wistuba, Büchner, Trifunović

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

S 228: Bewertung und Optimierung der Herstellungs- und Verschlussvarianten von Trenching-Schnitten im Asphaltoberbau sowie Beurteilung der Auswirkungen im Lebenszyklus der Straße

Alte-Teigeler, Zeissler, Gerowski

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

S 229: Ermittlung der Vergleichs- und Wiederholstreubereiche bei der Erfassung von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Berthold, Großmann, Heimrich, Naber, Frohböse, Villaret

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

2026

S 230: Grundlagen zur Ermittlung des dimensionierungsrelevanten Achslastkollektivs für das kommunale Straßennetz

Kathmann, Müller, Kucera, Uhlig, Seeger, Schlimper, Sokol, Hauptmann, Žitnik

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

S 231: Lokale Analyse und Kartierung von potenziellen Überflutungsflächen im Bundesfernstraßennetz von Nordrhein-Westfalen in Folge von Starkregenereignissen (Blue-Spot-Analyse)

Büche, Assmann, Huber, Henrichs, Pulgrabja

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

S 232: Zusammenhänge zwischen dynamischen Achslasten und Tragfähigkeitsmessungen (Asphaltstraßen) mit dem TSD

Sivapatham, Esser, Schrödter, Balck, Tutka

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

S 233: Entwicklung einer Prüfsystematik für die Qualitätssicherung von temperaturreduzierten Asphalten

Büchler, Kollmus, Wistuba, Mollenhauer, Wetekam

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG


Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

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

www.schuenemann-verlag.de

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



ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-932-1
<https://doi.org/10.60850/bericht-s233>
www.bast.de