

# **Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor- Verdichtungsgerätes im Laboratorium**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 48**

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

# **Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor- Verdichtungsgerätes im Laboratorium**

von

Thomas Wörner  
Sandra Bönisch

Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
Technische Universität München

Michael Schmalz  
Patrick Bösel

Institut Dr.-Ing. Gauer  
Ingenieurgesellschaft mbH für bautechnische Prüfungen (IFB)  
Regenstauf

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 48**

**bast**

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

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.201/2002/CGB:**  
Ermittlung eines Kennwertes für die Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes im Laboratorium

### Projektbetreuung

Franz Bommert

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9331

ISBN(10) 3-86509-582-8

ISBN(13) 978-3-86509-582-4

Bergisch Gladbach, Dezember 2006

---

1	EINLEITUNG .....	4
2	AUFGABENSTELLUNG .....	5
2.1	Vorhabensbeschreibung .....	5
2.2	Theoretische Grundlagen .....	6
3	UNTERSUCHUNGSMETHODIK .....	9
3.1	Experimentelles Vorgehen .....	9
3.2	Angewandte Verfahren .....	11
3.2.1	Versuche zur Ermittlung der Verdichtbarkeit .....	11
3.2.2	Versuche zur Ermittlung der Verformungsbeständigkeit.....	17
3.3	Statistische Untersuchungen.....	20
3.4	Untersuchungen zur Präzision der Messdatenerfassung des WSV-Gerätes..	22
4	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE .....	23
4.1	Ergebnisse der Ermittlung der Verdichtbarkeit .....	23
4.1.1	Ergebnisse der Herstellung der Marshallprobekörper.....	23
4.1.2	Ergebnisse der Herstellung der Gyrator-Probekörper .....	24
4.1.3	Ergebnisse der Verdichtung der WSV-Plattenherstellung .....	25
4.2	Ergebnisse der Ermittlung der Verformungsbeständigkeit.....	42
4.2.1	Ergebnisse des Spurbildungsversuches .....	42
4.2.2	Ergebnisse der dynamischen Stempelleindringtiefe.....	44
5	AUSWERTUNG.....	47
5.1	Vergleichende Untersuchungen - Ermittlung eines Kennwertes der Verdichtbarkeit .....	47
5.2	Gesamtauswertung/ Folgerungen .....	51
5.2.1	Auswertung zur Beschreibung der Verdichtbarkeit mit dem Walzsektorverdichtungsgerät .....	51
5.2.2	Ergebnisse der Untersuchung des vermutete Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit .....	56
6	ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN.....	61
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	65

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Schematischer Ablauf des Untersuchungsprogramms .....	9
Abbildung 2:	Walzsektorverdichter (Gerät gesamt).....	13
Abbildung 3:	Walzsektorverdichter (Prinzipskizze) .....	14
Abbildung 4:	Verlauf der Kraft, des Weges und sich der daraus ergebenden Arbeit bei der Verdichtung am Beispiel der Variante ABi 0/16-5,4 .....	15
Abbildung 5:	Verlauf der Verdichtungsarbeit am Beispiel der Variante ABi 0/16-5,4 .....	16
Abbildung 6:	Vergleich der Raumdichteentwicklung am Beispiel der Mischgutvariante AB 0/8-6,5 (oben WSV-Probekörper (Hauptverdichtung), unten Marshall- Probekörper).....	17
Abbildung 7:	Schematische Abbildung des Spurbildungsgerätes .....	18
Abbildung 8:	Standardabweichung der im Rahmen von Vorversuchen ermittelten Verdichtungsarbeit.....	23
Abbildung 9:	D-Werte der untersuchten Mischgutvarianten .....	24
Abbildung 10:	Gegenüberstellung der D-Werte bei unterschiedlicher Verdichtungsenergie.....	24
Abbildung 11:	$D_G$ -Werte der Gyratorverdichtung .....	24
Abbildung 12:	Entwicklung der Raumdichten (normiert) .....	26
Abbildung 13:	maximal erreichte Raumdichten der untersuchten Mischgutvarianten .....	26
Abbildung 14:	Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten bezogen auf die Endraumdichte nach Beendigung des Hauptverdichtungs Vorganges .....	28
Abbildung 15:	Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten bezogen auf die Endraumdichte bei Erreichen der maximalen Raumdichte .....	28
Abbildung 16:	Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten bezogen auf die Endraumdichte nach Beendigung des Entlastungsvorganges .....	28
Abbildung 17:	Darstellung der Probekörperhöhe mit entsprechender Raumdichte- und Hohlraumgehaltsentwicklung .....	29
Abbildung 18:	Qualitative grafische Darstellung der unterschiedlichen Typen der Hohlraumgehaltsentwicklung .....	30
Abbildung 19:	Vergleich der Hohlraumgehalte der WSV- und Marshall-Verdichtung (am Ende der Verdichtung) mit den Grenzen der ZTV Asphalt-StB bzw. ZTVT-StB.....	31
Abbildung 20:	$D_{WSV}$ -Wert (Ermittelt mit den Daten des Hauptverdichtungs Vorganges unter Berücksichtigung der Verdichtung und Entlastung).....	32
Abbildung 21:	Vergleich der Fehlerquadratsumme (FQS) bei der Ermittlung des D-Wertes und des $D_{WSV}$ Wertes.....	33

---

Abbildung 22:	Verdichtungsgrad WSV-Verdichtung am Ende des Verdichtungsvorganges.....	34
Abbildung 23:	Verdichtungsgrad WSV-Verdichtung am Maximum der Verdichtung.....	34
Abbildung 24:	Verdichtungsgrad WSV-Verdichtung am Ende der Entlastung.....	35
Abbildung 25:	Verlauf der Verdichtungsarbeit Vorverdichtung (mittlere Bindemittelgehalte) .....	36
Abbildung 26:	Verlauf der Verdichtungsarbeit Vorverdichtung (mittlere Bindemittelgehalte auf Probekörperhöhe normiert).....	36
Abbildung 27:	Anteil der Vorverdichtung an der Gesamtverdichtung am Beispiel der mittleren Bindemittelgehalte .....	36
Abbildung 28:	Verlauf der Verdichtungsarbeit (Hauptverdichtung, mittlere Bindemittelgehalte)	37
Abbildung 29:	Vergleich der Verdichtungsarbeit bei unterschiedlicher Anzahl an Segmentübergängen.....	38
Abbildung 30:	Beispiele für die Verdichtungsarbeit im Walzsektor-Verdichter [17] .....	38
Abbildung 31:	Vergleich der Verdichtungsarbeit bei unterschiedlicher Probekörperdicke .....	38
Abbildung 32:	Gegenüberstellung der Verdichtungsarbeit bei unterschiedlicher Plattendicke .....	39
Abbildung 33:	Verlauf der Verdichtungsarbeit (Hauptverdichtung, mittlere Bindemittelgehalte) bezogen auf die Probekörperdicke.....	40
Abbildung 34:	Präzision der Messdatenerfassung des WSV anhand der innerhalb der Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse.....	41
Abbildung 35:	Spurrinne, ATS 0/32 C mit 3,5; 4,0; 4,5 M % Bindemittel im Mischgut.....	42
Abbildung 36:	Charakteristische Verläufe der Spurbildung .....	43
Abbildung 37:	Spurrinntiefe bei Versuchsdurchführung Gummirad, Wasserbad 60°C.....	43
Abbildung 38:	Spurrinntiefe bei Versuchsdurchführung, Gummirad, Wasserbad 50°C.....	44
Abbildung 39:	Dynamische Stempeleindringtiefe - Eindringtiefe [mm] am Versuchsende.....	46
Abbildung 40:	Dynamische Stempeleindringtiefe - Dehnung [%] am Versuchsende .....	46
Abbildung 41:	Kurvenanpassung mit der Boltzmann-Konstanten (alle 30 Werte).....	49
Abbildung 42:	Kurvenanpassung mit der Boltzmann-Konstanten (bis zum Erreichen des Maximums der Raumdichte).....	49
Abbildung 43:	Vergleich der Regressionskoeffizienten bei Anpassung mittels Boltzmann Konstanter.....	50
Abbildung 44:	Kennwert für die Verdichtungsarbeit $W_E$	50
Abbildung 45:	Vergleich der Verdichtbarkeit anhand der D Werte der Marshallverdichtung	53
Abbildung 46:	Vergleich der Verdichtbarkeit anhand der $W_E$ Werte der Walzsektorverdichtung	53
Abbildung 47:	Vergleich der Verdichtungskennwerte der Marshall- und Walzsektorverdichtung	54

Abbildung 48:	Vergleich der Verdichtungskennwerte (Marshall- und Walzsektorverdichtung) bezogen auf einen Asphalttyp .....	54
Abbildung 49:	Vergleich der Verdichtungskennwerte Marshall-/Gyratorverdichtung .....	56
Abbildung 50:	Vergleich der Ergebnisse Spurbildung - dynamische Stempeleindringtiefe (Eindringtiefe [mm]) .....	57
Abbildung 51:	Vergleich der Ergebnisse Spurbildung – dynamische Stempeleindringtiefe (Dehnungen [‰]).....	57
Abbildung 52:	Vergleich Verdichtbarkeit – Verformungsbeständigkeit (dynamische Stempeleindringtiefe – $W_E$ -Wert).....	58
Abbildung 53:	Vergleich Verdichtbarkeit – Verformungsbeständigkeit (Spurbildungsversuch – $W_E$ -Werte).....	59

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Zusammensetzung der Mischgutvarianten .....	10
Tabelle 2:	Verdichtungsschema nach Arbeitsanleitung ALP A-StB, Teil 11 (Braunschweiger Modell) .....	15
Tabelle 3:	Einteilung der Mischungsvarianten nach ihrer Verdichtbarkeit.....	30
Tabelle 4:	Vergleich der Mittelwerte der Kurvenmaxima untereinander .....	40
Tabelle 5:	Zusammenstellung der Parameter bei Kurvenanpassung mittels Boltzmann-Konstanter (mittlere Bindemittelgehalte) .....	48
Tabelle 6:	Bestimmtheitsmaße und Darstellung der Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge .....	60

## Kurzfassung - Abstract

### **Ermittlung eines Kennwertes für die Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes im Laboratorium**

Das Walzsektorverdichtungsgerät dient bisher ausschließlich der Herstellung von Probekörpern für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Asphalt. In der vorliegenden Forschungsarbeit sollte untersucht werden, ob sich aus dem beim Walzsektorverdichtungsgerät aufgezeichneten Verdichtungsverlauf Kennwerte zur Beschreibung der Verdichtbarkeit ableiten lassen. Die Plattenherstellung erfolgte nach der „Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt (ALP A-StB), Teil 11: Herstellung von Asphaltprobeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)“.

Das Verdichtungsregime des WSV gliedert sich in Vor- und Hauptverdichtung. Der zur Beschreibung der WSV-Verdichtung ermittelte Kennwert  $W_E$  wurde ausschließlich an der Entwicklung der Verdichtungsarbeit der Hauptverdichtung bestimmt. Für die Auswertung wurde die kumulative Darstellung der Verdichtungsarbeit über die Zahl der Verdichtungsübergänge gewählt. Die dabei entstehenden Kurven las-

sen sich mit der Boltzmann-Funktion annähern.

Der  $W_E$ -Wert bezeichnet das Maximum der aufsummierten Verdichtungsarbeit während der Hauptverdichtung im WSV und charakterisiert nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen die für das jeweilige Mischgut erforderliche Verdichtungsarbeit in Nm/cm.

Die Analyse der Dichtemerkmale ( $H_{bit}$ ,  $k$ ) der Probekörper aller untersuchten Mischgutvarianten zeigte, dass die Beschreibung der Verdichtbarkeit mit den derzeitigen Erkenntnissen und den Randbedingungen der Verdichtung nur für mittel und schwer verdichtbare Asphalte plausible Ergebnisse liefert. Ursache für die unzureichende Beschreibung der Verdichtbarkeit leicht verdichtbarer Mischgutvarianten ist einerseits im Verdichtungsregime und andererseits in der aus maschinenbau- und messtechnischen Gründen ungenauen Probekörperhöhenaufzeichnung während der Verdichtung zu sehen. Um auch für diese Asphalte einen Kennwert zur Beschreibung der Verdichtbarkeit mit dem WSV ermitteln zu können, muss das Programm der Verdichtung modifiziert werden.

Der Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit



wurde bei den beiden performanceorientierten Verfahren der dynamischen Stempelindringtiefe und der Spurbildung untersucht. Ein signifikanter Zusammenhang stellt sich hierbei am deutlichsten für den Vergleich des Verdichtungskennwertes  $W_E$  mit der dynamischen Stempelindringtiefe dar.

Der Originalbericht enthält als Anhänge grafische Darstellungen zu den Eignungsprüfungen und der Zusammensetzung der Baustoffgemische (Anhang 1), zur Verdichtbarkeit (Anhang 2), zur Verformbarkeit (Anhang 3) und zum Vergleich Verdichtbarkeit – Verformbarkeit (Anhang 4). Auf die Wiedergabe dieser Anhänge wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die Anhänge im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten.

### **Determining a characteristic value for the ability to compact mastic asphalt using a rolling-compaction machine in the laboratory**

The rolling-compaction machine has, until now, been exclusively used in the production of samples for examining the me-

chanical properties of asphalt. The present research plans to investigate whether characteristic values for describing the ability to compact can be deduced from the compacting process recorded by the rolling-compaction machine. The production of paving stones took place according to the “Instructions for testing asphalt (ALP A-StB), Part 11: Production of sample asphalt paving stones in the laboratory with the rolling-compaction machine (WSV)”.

The WSV compacting system is divided up into preliminary and main compacting. The characteristic value  $W_E$  determined to describe the WSV compacting was found exclusively based on the development of compacting work on the main compacting area. The cumulative representation of the compacting work on the number of changeovers in compacting was selected for the evaluation. The curves formed in the process can be approximated using the Boltzmann function.

The  $W_E$ -value describes the maximum of the total amount of compacting work during the main compacting process in the WSV and characterises the compacting work required for the respective mastic asphalt type in Nm/cm according to the results of the present research.

The analysis of the density properties ( $H_{bit}$ ,  $k$ ) of the samples of all the variations of mastic asphalt showed that the description of the ability to compact only provides plausible results using the present findings and the boundary conditions for compacting for medium types of asphalt and those that are difficult to compact. The reason for the insufficient description of the ability to compact variations of mastic asphalt that are easy to compact is, on the one hand, the compacting system, and, on the other hand, the imprecise record of the level of the sample during compacting for engineering and metrological reasons. The compacting programme must be modified to be able to find a characteristic value for describing the ability to compact with WSV for these types of asphalt as well.

The connection between the ability to compact and the resistance to deformation was investigated in both performance-oriented processes of the dynamic stamp penetration depth and track profile. An important connection is established very clearly here for the comparison of the characteristic value of compacting  $W_E$  with the dynamic stamp penetration depth.

The original report contains graphics as attachments pertaining to the suitability tests and the composition of the material

compounds (annex 1), the compactibility (annex 2), the deformability (annex 3), and the comparison chart of compactibility vs. deformability (annex 4). We decided not to include these attachments with the release at hand again. These graphics are available at the *Bundesanstalt für Straßenwesen* [Federal Highway Research Institute] and can be viewed there. For the benefit and information of the reader, cross references to the annexes were maintained in the report.

## 1 Einleitung

Das Verarbeitungs- und Gebrauchsverhalten von Asphalten wird durch eine Reihe von kompositionellen, technologischen sowie einbautechnischen Faktoren bestimmt. Einen wesentlichen Aspekt im Rahmen der Qualitätssicherung stellt die Verdichtbarkeit dar. Zur Beschreibung der Verdichtbarkeit von Asphalt wird bislang auf das Verfahren nach Arand/Renken, das sich zur Beurteilung der Verdichtbarkeit auf Marshall-Probekörper bezieht, zurückgegriffen [26]. Soll die Verdichtbarkeit von Asphaltbindern oder Asphalttragschichten ermittelt werden, so stößt das Verfahren bei einem Größtkorn über 22 mm, aufgrund der Abmessungen des Probekörpers, an seine geometrischen Grenzen, wenngleich auch für Asphalttragschichten mit einem Größtkorn von 32 mm Marshallprobekörper hergestellt werden können.

Um die Herstellung von Probekörpern mit praxisadäquaten Eigenschaften auch für schwer verdichtbare Mischgutvarianten zu ermöglichen und gleichzeitig das Prinzip der walzenden Verdichtung im Labor umsetzen zu können, wurde von der TU Braunschweig im Rahmen eines Forschungsauftrages [2] das Walzsektorverdichtungsgerät (WSV) entwickelt, mit dem

Asphaltplatten hergestellt werden können, die den großtechnisch auf der Straße eingebauten Asphalten vergleichbare Eigenschaften aufweisen.

Die durch Forschungsarbeiten [4, 2] bestätigte breite Anwendbarkeit der mit dem Walzsektorverdichtungsgerät (WSV) hergestellten Prüfkörper, unter anderem im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen (dynamische Versuche, Versuche zum Kälteverhalten), führte zu einer weiten Verbreitung des Gerätes. Vor dem Hintergrund der Möglichkeit, Prüfkörper mit praxisadäquaten Eigenschaften herstellen zu können, wurde erstmals von Gauer, Schmalz und Hantke [17] von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die während des Herstellungsprozesses aufgezeichneten Rohdaten (Kraft und Weg) für die Beurteilung der Verdichtbarkeit heranzuziehen. Dabei wurde festgestellt, dass sich durch das kumulative Auftragen der Arbeit während des Verdichtungsvorganges charakteristische Kurven ergeben, die eine Unterscheidung der verschiedenen Mischgutsorten erlaubte. Ferner wurde hierbei festgestellt, dass die zu leistende Verdichtungsarbeit von der Probekörperdicke beeinflusst wird.

Die Verdichtbarkeit wird immer auch in Zusammenhang mit der Verformungsbeständigkeit von Asphalten gesehen. Der Annahme liegt der Gedanke zugrunde,

dass ein Mischgut, welches sich schwer verdichten lässt, auch der Verformung durch hohe Verkehrsbelastungen einen großen Widerstand entgegensetzt. Entsprechende Korrelationen wurden für das Verfahren nach Arand/Renken nur ansatzweise erbracht, da – wie eingangs beschrieben – die Aussagekraft der Verdichtbarkeit von Marshallprobekörpern als nur begrenzt angesehen werden kann. Durch den Einsatz des WSV erscheint es jedoch möglich, diesen Lückenschluss zu vollziehen, zumal dies ohne zusätzlichen Laboraufwand zu bewerkstelligen ist.

## **2 Aufgabenstellung**

### **2.1 Vorhabensbeschreibung**

Es wurde vorgeschlagen, mit Hilfe des WSV die während der Plattenherstellung aufgezeichneten Kennwerte für die Verformung und die Kraft bei den einzelnen Übergängen des Walzsektorverdichters mit mathematischen Operationen einer Auswertung zur Beschreibung der Verdichtbarkeit zugänglich zu machen.

Für die Umsetzung dieses Vorhabens sollten einerseits unterschiedliche Asphalte in die Untersuchungen einbezogen werden und andererseits vergleichende Betrachtungen zu den Daten der Verdichtbarkeit mit Hilfe des Marshall-Verfahrens nach

Arand/Renken und denen des Gyrator-Verfahrens gezogen werden, so dass der mit diesen Verfahren vorliegende Bewertungshintergrund genutzt werden kann.

Um den mutmaßlichen Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit experimentell zu untersuchen und bestätigen zu können, wurden zusätzlich performanceorientierte Versuche (Spurbildung und dynamische Stempeleindringtiefe) zur Kennzeichnung der Verformungsbeständigkeit der ausgewählten Asphalte durchgeführt.

Abschließend galt es zu überprüfen, ob das Verdichtungsverfahren der Walzsektorverdichtung für die mathematisch-physikalische Beschreibung der Verdichtbarkeit unterschiedlicher Asphalte geeignet ist und inwiefern sich der Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit anhand des Vergleiches von Verdichtungskennwerten und der Untersuchungsergebnisse der performanceorientierten Verfahren experimentell bestätigen lässt.

Die labortechnischen Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen wurden vom Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München in Zusammenarbeit mit dem Institut Dr.-Ing. Gauer,

Ingenieurgesellschaft mbH für bautechnische Prüfungen (IFB) in Regenstauf durchgeführt.

## 2.2 Theoretische Grundlagen

### Ansätze zur Beschreibung der Verdichtbarkeit

Walzasphalt ist ein komplexes Mehrphasen-Gemisch aus unregelmäßigen Feststoffkörpern, welche in Größe und Form variieren (Gesteine, Füller), mit Luft gefüllten Hohlräumen und einer in ihrer molekularen Zusammensetzung heterogenen Flüssigkeit, die bei Gebrauchstemperaturen zum Teil die Eigenschaften eines Festkörpers besitzt (Bitumen). Die rheologischen Eigenschaften lassen sich deshalb nicht quantitativ aus den Eigenschaften der Ausgangsstoffe und ihrer Anteile ableiten.

Um die Verdichtbarkeit und die dabei stattfindenden Verformungsprozesse wissenschaftlich beschreiben zu können, wurden bereits in den 70er Jahren verschiedene rheologische und mathematische Modellvorstellungen entwickelt.

Die in der Literatur nachzulesenden Ansätze zur Beschreibung des Verdichtungsprozesses lassen sich im Wesentlichen in die Hauptgruppen der physikalisch begründeten und der nicht deterministischen Ansätze unterteilen. Im Folgenden sollen diese

Ansätze kurz erläutert und diskutiert werden.

Die nachfolgend aufgeführten Ansätze beziehen sich auf den Verdichtungsprozess der schlagenden Verdichtung beim Marshall-Verfahren. Von Heinemann [19] konnte jedoch gezeigt werden, dass für die Walzverdichtung prinzipiell dieselben Gesetzmäßigkeiten gelten wie für die schlagende Verdichtung im Laboratorium.

### **Physikalische Ansätze**

#### Logarithmischer Ansatz von Terzaghi [30]

Hypothese:

Die Änderung der Raumdichte  $d\rho_A$ , die mit einer bestimmten Verdichtungsarbeit  $dS$  erreicht werden kann, wird mit zunehmendem Betrag der Verdichtungsarbeit (Schlagzahl  $S$  je Seite) kleiner. Hierbei besteht der folgende proportionale Zusammenhang, wobei  $b$  als Proportionalitätsfaktor eingeführt wird:

$$\frac{d\rho_A}{dS} = \frac{b}{S}$$

Nach Trennung der Variablen und Integration ergibt sich die nachfolgend aufgeführte Gleichung:

$$\rho_A = a + b \cdot \ln S$$

Bei Vorliegen entsprechenden experimentell gewonnenen Datenmaterials lassen sich die Regressionsparameter a und b relativ leicht bestimmen. Der logarithmische Ansatz führt jedoch zu einer theoretisch unendlichen Endraumdicke, was physikalisch nicht gedeutet werden kann. Auch wird bei diesem Ansatz dem Anfangszustand der Verdichtung (Schlagzahl  $S=0$ ) eine Raumdicke von  $\rho_A = -\infty$  zugeordnet, was gleichfalls physikalisch nicht deutbar ist. Die logarithmische Lösung zur Beschreibung des Verdichtungsprozesses kann daher nur in engen Grenzen als gute Näherung betrachtet werden und wird in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.

#### Exponentieller Ansatz von Kezdi [21]

Hypothese:

Die mit einer bestimmten Verdichtungsarbeit  $dS$  erzielbare Dichteänderung  $d\rho_A$  ist vom momentanen Verdichtungszustand abhängig. Dieser wird dabei durch die Differenz zwischen der maximal erreichbaren Raumdicke  $\rho_{A\infty}$  und der vorhandenen Raumdicke  $\rho_A$  bestimmt. Hierbei besteht der folgende proportionale Zusammenhang:

$$\frac{d\rho_A}{dS} = \frac{1}{C} \cdot (\rho_{A\infty} - \rho_A)$$

Nach Trennung der Variablen und beidseitigem integrieren und entlogarithmieren folgt die folgende Gleichung:

$$\rho_A = \rho_{A\infty} + B \cdot e^{-\frac{S}{C}}$$

Bei Grenzwertbetrachtung, also vor Beginn des Verdichtungsprozesses ( $S=0$ ) besitzt die Raumdicke den Anfangswert  $\rho_{A0}$ , woraus für die Größe B folgt:

$$B = \rho_{A0} - \rho_{A\infty}$$

Damit ergibt sich der folgende exponentielle Lösungsansatz:

$$\rho_A(s) = \rho_{A\infty} + (\rho_{A0} - \rho_{A\infty}) \cdot e^{-\frac{S}{C}}$$

Die Exponentialfunktion lässt sich wie folgt interpretieren:

- Das konstante Glied  $\rho_{A\infty}$  gibt die maximal erreichbare Raumdicke an.
- Das exponentielle Glied  $(\rho_{A0} - \rho_{A\infty}) \cdot e^{-\frac{S}{C}}$  gibt die Größe der Zunahme der Raumdicke in Abhängigkeit von der geleisteten Verdichtungsarbeit (Schlagzahl S) an.
- Der konstante Faktor C im negativen Exponenten bestimmt den Betrag, um den die Raumdicke in Abhängigkeit von der Schlagzahl (S) zunimmt. Er kann somit als

universelle Größe zur Charakterisierung der Verdichtbarkeit eines Asphaltes angesehen werden.

Wie sich nachweisen lässt, ist es für die exponentielle Lösung nicht möglich, die erforderlichen drei Normalgleichungen zur Berechnung der Regressionsparameter zu formulieren. Daher muss die Berechnung auf der Basis von nur zwei Normalgleichungen iterativ durch Minimierung der Summe der Abstandsquadrate mit Hilfe eines Rechenprogramms oder mit Hilfe von Näherungslösungen erfolgen.

### **Nicht deterministische Ansätze**

Polynom zweiten Grades (Heinemann, Heitkamp und Gragger [18,19,20])

Mit dem allgemein quadratischen Ansatz der Form

$$\rho_A = a + b \cdot S + C \cdot S^2$$

kann das Verdichtungsverhalten gleichkörniger Stoffe gut beschrieben werden. Für Asphaltgemische scheint dieser Ansatz jedoch unbrauchbar, da er bei höheren Verdichtungsarbeiten ein physikalisch nicht plausibles und daher kaum interpretierbares Maximum durchläuft. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass sich eine umso günstigere Annäherung der Funktion

an die experimentell ermittelte Kurve ergibt, je mehr Glieder der Funktion angehängt werden. Jedoch sind hier Grenzen der physikalischen Interpretation gesetzt. Der Polynomische Ansatz muss daher für die weiteren Betrachtungen ebenfalls verworfen werden.

Polynom unbestimmten Grades (Heitkamp [20])

$$\rho_A = a + b \cdot S + C \cdot S^D$$

In [26] wurden von Renken die aufgeführten Ansätze miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung der Verdichtbarkeit bei der schlagenden Verdichtung des Marshall-Verfahrens bewertet. Bezüglich der Untersuchung der Summe der Abstandsquadrate (FQS) der Gruppenmittelwerte um die Regressionskurven in Abhängigkeit von der Anzahl der Verdichtungsschläge S konnte eine deutliche Unterscheidung der vier Ansätze festgestellt werden.

Für die Untersuchung der schlagenden Verdichtung wurde der exponentielle Ansatz als plausibel und physikalisch interpretierbar angesehen.[26]

### 3 Untersuchungsmethodik

#### 3.1 Experimentelles Vorgehen

Ziel des Forschungsauftrages ist die Ermittlung eines Kennwertes, mit dem bei der Herstellung von Laborplatten mit dem WSV Aussagen zur Verdichtbarkeit getroffen werden können. In Abbildung 1 ist der schematische Untersuchungsablauf dargestellt. Für die Untersuchungen wurden Asphaltmischgutvarianten ausgewählt, wel-

che eine große Bandbreite hinsichtlich der Verdichtungseigenschaften erwarten ließen.

Es sind Asphaltdeck-, -binder- sowie -tragschichten in die Untersuchungen einbezogen worden, die neben der Variation der Mineralstoffe und Bindemittel auch jeweils mit drei verschiedenen Bindemittelgehalten untersucht wurden. Die einzelnen Asphaltvarianten sind in Tabelle 1 dargestellt.

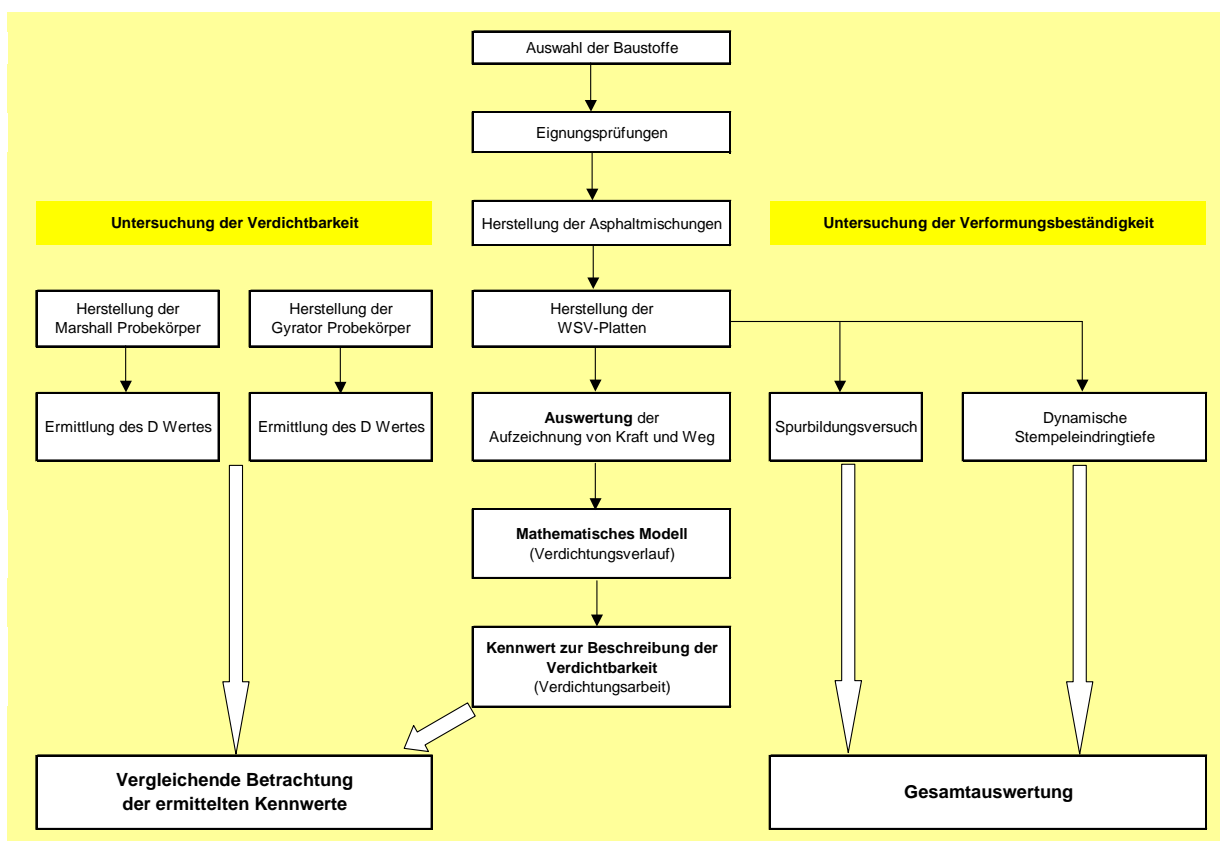


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des Untersuchungsprogramms



	Mischgut- variante	Mineral- stoffart	Bindemittelart und -sorte	Bindemittelgehalt [M%]		
Asphaltbeton	0/8	Granitedelsplitt	70/100	6,0	6,5	7,0
	0/11S	Granitedelsplitt	50/70	5,5	6,0	6,5
Splittmastixasphalt	0/8	Granitedelsplitt	70/100	6,5	7,0	7,5
	0/11S	Granitedelsplitt	PmB 45A	6,0	6,5	7,0
Asphaltbinder	0/16	Granitedelsplitt	50/70	4,4	4,9	5,4
	0/22S	Granitedelsplitt	PmB 45A	3,8	4,3	4,8
Asphalttragschicht	0/32 C	Kies	50/70	3,5	4,0	4,5
	0/32 CS	Kiessplitt	50/70	3,5	4,0	4,5

**Tabelle 1:** Zusammensetzung der Mischgutvarianten

In Tabelle 1 sind auch die Ausgangsstoffe für die einzelnen Mischgutvarianten dargestellt. Um die Verdichtungseigenschaften der ausgewählten Asphalte möglichst stark zu variieren, wurde neben der Verwendung von PmB bei Splittmastixasphalt und Asphaltbinder jede Mischgutvariante mit drei verschiedenen Bindemittelgehalten hergestellt. Als Mineralstoffe wurden regional anstehender Granitedelsplitt und Kiessplitt sowie Kies gewählt. Eine genaue mischgutspezifische Zusammensetzung ist den Eignungsprüfungen im Anhang 9.1 zu entnehmen.

Um die Verdichtbarkeit zu untersuchen, ist der Ablauf des Verdichtens im Walzsektorverdichter (WSV) näher zu analysieren. Der WSV zeichnet während der Verdichtung bei jedem Übergang des Segments die Daten der auf das zu verdichtende Mischgut wirkenden Kraft des Segmentes und dessen momentane Höhe auf. Aus diesen

Daten lässt sich so für jeden Verdichtungsschritt die verrichtete Arbeit ermitteln. Anschließend soll dann aus dem erzeugten Verdichtungsverlauf ein mathematisches Modell entwickelt werden, aus dem sich ein Kennwert zur Beschreibung der mischgutspezifischen Verdichtungseigenschaften für die walzende Verdichtung ableiten lässt.

Die durch das Verfahren von Arand/Renken bekannte Beurteilung der Verdichtbarkeit durch den D-Wert soll hier vergleichend als Grundlage zur Bestimmung eines Kennwertes für die Walzsektorverdichtung herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde zunächst an jeder Asphaltvariante der D-Wert bestimmt; ergänzend wurden die D-Werte für den Gyratorprobekörper ermittelt.

Der Vergleich der D-Werte mit dem ermittelten Kennwert der walzenden Verdichtung gibt dann Aufschluss darüber, ob sich das Verfahren der Walzsektorverdichtung

zur Beschreibung der Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut eignet.

Der zweite Schwerpunkt des Forschungsvorhabens beinhaltet die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit. Hierzu wurden an den hergestellten WSV-Platten bzw. daraus gewonnenen Proben performanceorientierte Prüfungen (Spurbildung und dynamische Stempeleindringtiefe) durchgeführt.

Ein Vergleich der Verformungseigenschaften mit den Verdichtungskennwerten sollte die Frage beantworten, ob verformungsresistente Beläge auch im Allgemeinen schwer verdichtbar sind und sich dies auch bei den bislang noch nicht ausreichend untersuchten Binder- und Tragschichtvarianten bestätigt.

## **3.2 Angewandte Verfahren**

### **3.2.1 Versuche zur Ermittlung der Verdichtbarkeit**

#### **3.2.1.1 Verdichtbarkeit mit dem Marshall-Verfahren (D-Wert)**

Gemäß der in [7] geschilderten Verfahrensweise kann mit dem Marshall-Verfahren über die Dickenänderung eines Probekörpers die Verdichtbarkeit von Walzasphalt abgeschätzt werden. Hierbei wird die Dicke des Probekörpers nach jedem Verdichtungsschlag fortlaufend er-

fasst. Die experimentell gewonnenen Daten für die Kehrwerte der Probekörperdicken in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit werden anschließend durch eine Exponentialfunktion angenähert. Zur Bestimmung eines Einzelwertes für die Verdichtbarkeit wird ein Marshall-Probekörper mit 100 Verdichtungsschlägen je Probekörperseite hergestellt und unter Zuhilfenahme der fortlaufend registrierten Dickenänderung, der Probekörperenddicke und erreichten Raumdichte zum Zeitpunkt des Verdichtungsendes, die Probekörperdicke nach jedem Verdichtungsschlag berechnet. Als Ergebnis der Bestimmung der Verdichtbarkeit gilt das arithmetische Mittel aus drei Einzelwerten (drei Marshallprobekörpern). Die Versuchsauswertung, Ermittlung des D-Wertes, erfolgt über rechnergestützte Datenverarbeitung.

#### **3.2.1.2 Verdichtbarkeit mit dem Gyrotor-Verfahren ( $D_G$ -Wert)**

Der Gyrotor dient der Nachahmung der Verdichtungsverhältnisse, die auf der Straße durch Walzen und unter Verkehr herrschen. Diese bestehen aus Druckkräften durch das Eigengewicht der Fahrzeuge sowie aus horizontalen Scherkräften durch das Schieben der Walzen und das Walken der Fahrzeugreifen. Bei allen Gyrotortypen wird ein zylindrischer Probekörper mit der Höhe  $H$  in seiner Rotationsachse durch

einen konstanten Druck  $P$  belastet und um diese mit einer bestimmten Umdrehungszahl  $n$  gedreht, während der Probekörper gleichzeitig um einen Neigungswinkel ausgelenkt wird. Das Verfahren kann verwendet werden für:

- die Herstellung von Probekörpern mit einer vorgegebenen Höhe und einer bestimmten Dichte für die nachfolgende Prüfung ihrer mechanischen Eigenschaften;
- die Ableitung einer Kurve der Raumdichteentwicklung in Abhängigkeit von der Umdrehungsanzahl;
- die Ermittlung des Hohlraumgehaltes bei einer vorgegebenen Umdrehungszahl.

Mit folgenden Randbedingungen wurde bei der Verdichtung gearbeitet:

- Umdrehungsgeschwindigkeit:  $\omega = 30$  U/min
- Verdichtungsdruck: 600 kPa
- Anstellwinkel  $\varphi = 1^\circ$
- Probekörperdurchmesser  $d = 100$  mm
- Verdichtungstemperatur  $T = 135$  bzw.  $145^\circ\text{C}$
- Anzahl der Umdrehungen : 400

Die Herstellung der Gyrator-Probekörper erfolgte analog der in [31,32] angegebenen Verfahrensweise. Mit Hilfe der bei der Gyrator-Probekörperherstellung erhaltenen

Daten der Höhenabnahme infolge des Verdichtungs Vorganges wurde analog der Ermittlung des  $D$ -Wertes beim Marshall-Verfahren auch die gyratorische Verdichtbarkeit ausgewertet. Der sich ergebende Verdichtungskennwert wird im Folgenden als  $D_G$ -Wert bezeichnet. Als Ergebnis der Bestimmung der Verdichtbarkeit gilt das arithmetische Mittel aus zwei Einzelwerten (zwei Gyratorprobekörpern).

### **3.2.1.3 Verdichtbarkeit mit dem WSV-Gerät ( $D_{\text{WSV}}$ -Wert)**

Das Walzsektorverdichtungsverfahren dient der Herstellung von Asphaltprobekörpern im Laboratorium. Es wurde ursprünglich nicht als Prüfgerät zur Ermittlung und Auswertung von Verdichtungsdaten konzipiert sondern ausschließlich zur Herstellung von Asphaltprobeplatten mit praxisadäquaten Eigenschaften entwickelt. Durch die im Vergleich zum Marshall- und Gyratorversuch vergleichsweise großen Probekörperabmessungen ist es neben der Herstellung von Deckschichten auch möglich, mit diesem Gerät Binder- und Tragschichten im Labormaßstab nachzufahren.

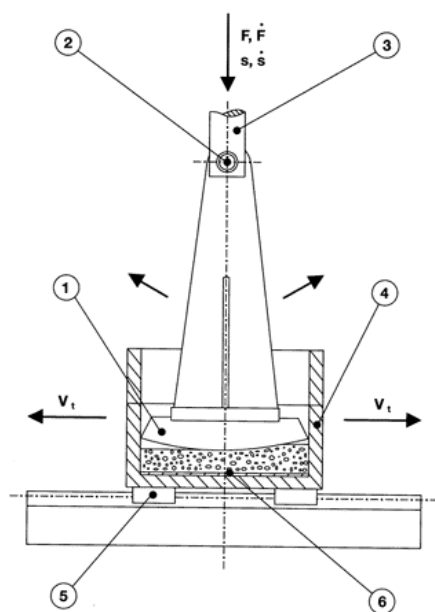
### Aufbau und Funktionsweise des Gerätes:

Das WSV-Gerät besteht im Wesentlichen aus einer Form zum Einfüllen und Verdichten des Asphaltmischgutes, dem beheizten Verdichtungssegment und einer automatischen Steuervorrichtung zur Regelung des Verdichtungsprozesses. Das Asphaltmischgut wird lose in die rechteckige Verdichtungsform eingefüllt und bei definierter Laststeigerung und definierten Temperaturverhältnissen (die Mischgutvarianten mit B50/70 und B70/100 wurden bei einer Verdichtungstemperatur von  $T = 135 \pm 5^\circ\text{C}$  und die Varianten mit PmB 45 bei  $T = 145 \pm 5^\circ\text{C}$  verdichtet) zunächst weggeregelt vorverdichtet. Die Hauptverdichtung erfolgt dann kraftgeregelt. Während der Walzverdichtung wird die auf einen Schlitten montierte Verdichtungsform translatorisch hin und her bewegt, wobei der auf den Kreismittelpunkt fixierte Sektor des Walzkörpers mitgeführt wird und der Bogen des Segmentes auf der Asphaltoberfläche eine wiegeartige Bewegung vollzieht. Das Funktionsprinzip der Verdichtung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Verdichtung erfolgt nach einem über entsprechende Software geregelten Management nach dem in der Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 11: Herstellung von Asphaltprobepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) [8, 9] genau

beschriebenen und nachfolgend erläuterten Verfahren. Die dort angegebene Walzübergangszahl von  $n=15$  stellt erfahrungsgemäß sicher, dass auch schwerer verdichtbare Asphaltgemische auf ein Dichtniveau oberhalb von  $k = 98 \%$  verdichtet werden (vgl. 4.1.3.4). Während der Verdichtung werden bei jedem Übergang des Walzsegmentes die momentan wirkende Kraft und die Höhe des Segmentes an die Steuereinheit übertragen. Diese Daten können im Anschluss an den Verdichtungsprozess zur Auswertung in einen Rechner eingelesen werden.



**Abbildung 2:** Walzsektorverdichter (Gerät gesamt)



- (1) Beheizbarer Walzsektor mit Stahlbandage
- (2) Drehmittelpunkt
- (3) Weg- und kraftregelbare Belastungseinrichtung
- (4) Beheizbare Verdichtungsform auf horizontal beweglichem Schlitten
- (5) Schlitten
- (6) Einlegeblech zum Herausnehmen der fertigen Asphaltprobeplatte aus der Form

**Abbildung 3:** Walzsektorverdichter (Prinzipskizze)

### Methodik der Verdichtung:

Die Steuereinrichtung des Gerätes ermöglicht verschiedene Ablaufvarianten der kraft- und/oder weggeregelten Verdichtung.

Die Vorgehensweise der Verdichtung erfolgt gem. der in der Arbeitsanleitung [9] angegebenen Systematik und gliedert sich in zwei Phasen und insgesamt sechs Einzelvorgänge, die im Folgenden näher erläutert werden. Die bezüglich der Verdichtung angegebenen Daten beziehen sich auf eine Plattenbreite von 26 cm.

### 1. Phase: Vorverdichtung (weggeregelt)

Die eingefüllte Probenmenge wird zunächst durch das Walzsegment weggeregelt vorverdichtet. Beim Vorgang der „Vorbelastung“ wird das Mischgut zunächst mit einer Vorschubrate von 0,5 mm pro Übergang so lange belastet, bis sich eine maximale Kraft (Widerstand) am Segment von  $F_{MAX} = 2,6$  kN einstellt.

An diesen Arbeitsschritt schließt sich der Vorgang des „Halten“ und der des „Entlastens“ an. Beim „Halten“ wird für 5 Segmentübergänge die zuvor erreichte Kraft konstant gehalten. Anschließend wird die Oberfläche in Wegschritten von 0,5 mm je Segmentübergang so lange entlastet, bis die Probe völlig spannungsfrei ist.

### 2. Phase: Hauptverdichtung (kraftgeregelt)

An die weggeregelte Vorverdichtung schließt sich die kraftgeregelte Hauptverdichtung an, die durch den Vorgang des „Glättens“ eingeleitet wird. Bei diesem Vorgang wird die Probe zunächst während 15 Übergängen mit einer konstanten Kraft von  $F = 0,52$  kN belastet. Anschließend erfolgt die eigentliche, kraftgeregelte Hauptverdichtung, bei der die Probe erneut 15 Segmentübergängen ausgesetzt und dabei verdichtet wird. Bei jedem Übergang wird die Belastung um  $\Delta F = 1,3$  kN erhöht, bis die maximale Last von 19,5 kN erreicht

ist. Hierauf folgt der Vorgang des „Entlastens“, bei dem gleichfalls in 15 kraftgeregelten Übergängen die Probe bis zur absoluten Spannungsfreiheit entlastet wird. Die während des gesamten Verdichtungsvorganges aufgezeichneten Daten von Kraft und Weg werden anschließend von der Steuereinrichtung an den Rechner übertragen

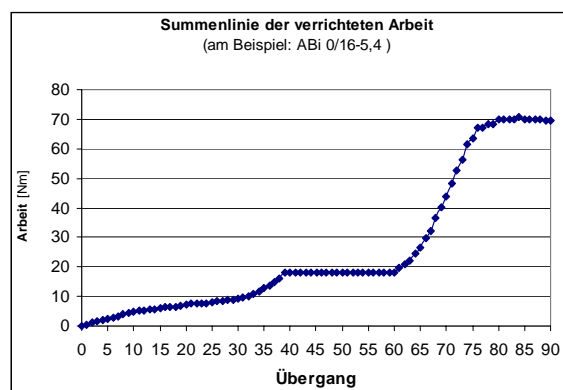
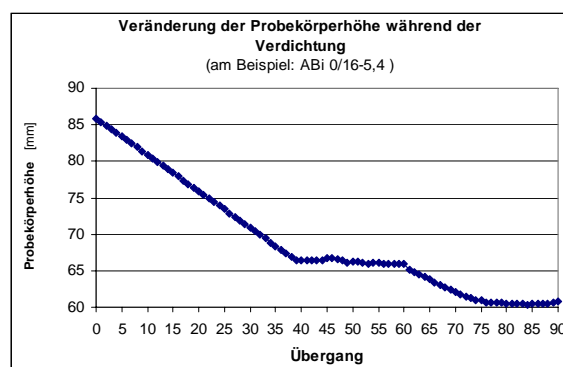
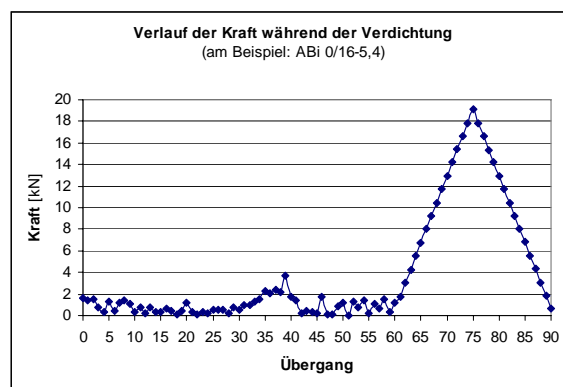
In Tabelle 2 sind die Verdichtungsrandbedingungen der einzelnen Arbeitsschritte zusammengefasst. Abbildung 4 zeigt für die einzelnen Arbeitsschritte des Verdichtungsprogramms den Verlauf der Kraft, der Probekörperhöhenabnahme und den sich daraus ergebenden summarischen Verlauf der in den Probekörper investierten Verdichtungsarbeit.

Phase	Vorgang	Weg	Kraft	Anzahl der Übergänge des Segments
Vorverdichtung	Vorbelastung	0,5 mm/Übergang	$F_{max} = 2,6 \text{ kN}$	bis $F_{max}$ erreicht ist (abhängig vom Mischgut)
	Halten	konstant	$F = 2,6 \text{ kN}$	5
	Entlasten	0,5 mm/Übergang	$F = 2,6 \text{ kN}$	bis $F = 0 \text{ kN}$ erreicht ist (abhängig vom Mischgut)
Hauptverdichtung	Glätten	konstant	$F = 0,52 \text{ kN}$ (entspr. $0,02 \text{ kN/cm}$ Plattenbreite)	15 Übergänge
	Verdichtung		$\Delta F = 1,3 \text{ kN}$ (bis $F_{max} = 19,5 \text{ kN}$ erreicht ist)	15 Übergänge
	Entlastung		$\Delta F = -1,3 \text{ kN}$ (bis $F = 0 \text{ kN}$ erreicht ist)	15 Übergänge

**Tabelle 2:** Verdichtungsschema nach Arbeitsanleitung ALP A-StB, Teil 11 (Braunschweiger Modell)

Aus den aufgezeichneten Daten der Kraft und der daraus resultierenden Probekörperhöhe lässt sich infolge Multiplikation zu

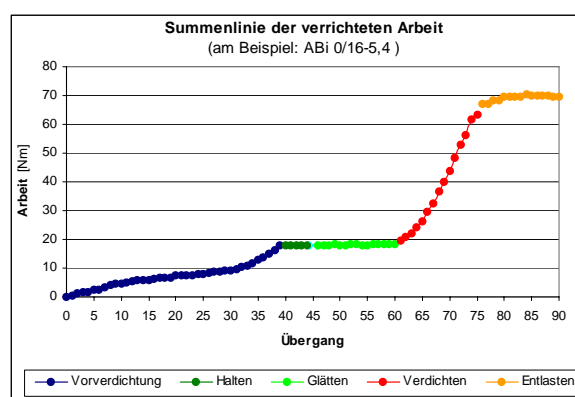
jedem Zeitpunkt des Verdichtungsvorganges die in den Probekörper eingebrachte Verdichtungsarbeit ermitteln. In der Abbildung 5 ist die so ermittelte Summenlinie der aufgetragenen Verdichtungsarbeit der einzelnen Arbeitsschritte farblich differenziert exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 4:** Verlauf der Kraft, des Weges und sich der daraus ergebenden Arbeit bei der Verdichtung am Beispiel der Variante ABI 0/16-5,4

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Arbeit der Vorverdichtung nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtverdichtungsarbeit hat. Während des „Halten“ und „Glättens“ wird keine zusätzliche Arbeit aufgewendet. Der eigentliche Verdichtungsprozess vollzieht sich während der Phase der Hauptverdichtung beim Vorgang des „Verdichten“ und teilweise beim Vorgang der „Entlastung“. Da bei der Entlastung die Krafteinwirkung nur schrittweise wieder entzogen wird, findet eine vollständige Rückstellung der Probe nicht sofort statt. Infolge der während der Entlastung noch andauernden verminderten Krafteinwirkung steigt - abhängig von der zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen Verdichtungswilligkeit der Mischgutvariante - die Verdichtungsarbeit weiter an. Um den Verdichtungsprozess der zu untersuchenden Mischgutvarianten ganzheitlich zu betrachten, ist es notwendig, diesen Anstieg in die Auswertung mit einzubeziehen.

Während bei der Hauptverdichtung bei jeder Mischgutvariante eine gleiche Anzahl an Segmentübergängen bei einer definierten Lastaufbringung stattfindet, ist die Anzahl der Übergänge bei der Vorverdichtung abhängig vom Zeitpunkt, zu dem sich der Widerstand von 2,6 kN auf der verdichteten Oberfläche einstellt.



**Abbildung 5:** Verlauf der Verdichtungsarbeit am Beispiel der Variante ABi 0/16-5,4

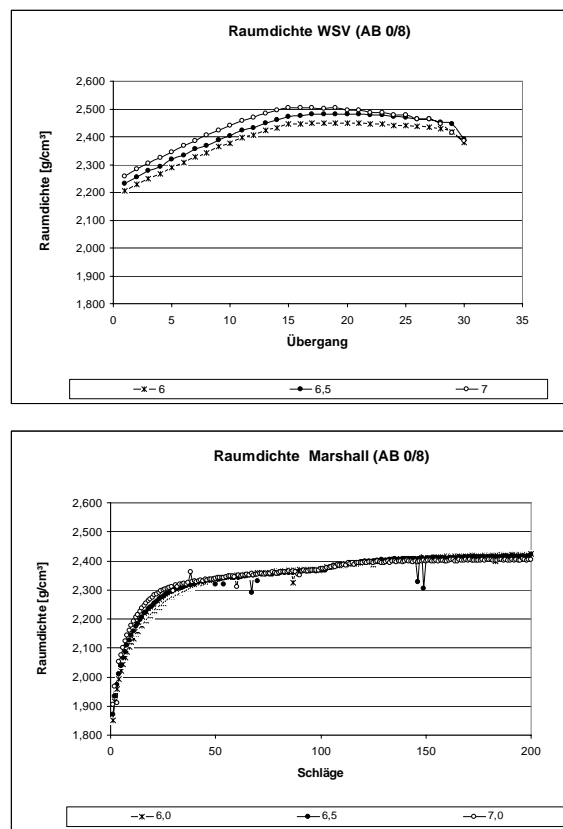
Die Zeit bis zur Beendigung des Verdichtungsvorganges der Vorverdichtung ist jedoch nicht nur mischgutspezifisch sondern hängt wesentlich auch von der Art der manuellen Einbringung (Temperatur, ebene Verteilung auf der Oberfläche) des Mischgutes in die Form ab. Dieser Einfluss ist nicht unerheblich, da das Verhältnis der zu verdichtenden Probekörperoberfläche im Vergleich zur Dicke der Platte hierbei wesentlich größer als bei dem Marshall- oder Gyratorprobekörpern ist. Im Gegensatz zur Hauptverdichtung wird durch die die Einbringung des Mischgutes in situ durch den Fertiger repräsentierende Vorverdichtung auch nur ein vergleichsweise geringer Verdichtungsgrad erreicht. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen beider Verdichtungs Vorgänge und der mischgutspezifisch verschiedenen Länge der Vorverdichtung lassen sich die einzelnen Summenlinien unterschiedlicher Mischungsvarianten nicht kongruent betrach-

ten. Aus diesem Grund werden für die weiterführenden Auswertungen im Kapitel 4 Vorverdichtungs- und Hauptverdichtungs-vorgang getrennt analysiert.

Analog der Ermittlung des Verdichtungskennwertes  $D$  bei der Herstellung von Marshall-Probekörpern lässt sich auch bei der Walzsektor-Verdichtung über die Dickenänderung eines Probekörpers während der Verdichtung die Verdichtbarkeit von Walzasphalt abschätzen. Der hierbei ermittelte Verdichtungskennwert wird als  $D_{WSV}$ -Wert bezeichnet. Als Ergebnis der Bestimmung der Verdichtbarkeit gilt in diesem Vorhaben das arithmetische Mittel aus sechs Einzelwerten (sechs WSV-Platten), da auf diesem Weg auch eine orientierende Bewertung der Präzision erfolgen kann.

Im Gegensatz zum Verdichtungsprozess der Marshall-Verdichtung, bei der sich die Raumdicke des Probekörpers am Ende der Messdatenaufzeichnung des Verdichtungs-vorganges einer theoretischen Endraumdicke annähert, findet bei der Walzsektor-Verdichtung durch den Entlastungsprozess eine Entspannung des Probekörpers statt, welche zu einem Anstieg der Probekörperhöhe und einer damit verbundenen Abfall der Raumdicke führt (Abbildung 8).

Die Entwicklung der Raumdicke während des Hauptverdichtungsprozesses unter Bezugnahme der Endraumdicke des



**Abbildung 6:** Vergleich der Raumdickeentwicklung am Beispiel der Mischgutvariante AB 0/8-6,5 (oben WSV-Probekörper (Hauptverdichtung), unten Marshall-Probekörper)

fertigen Probekörpers kann daher anders als beim Marshall- oder Gyrator-Verfahren zu unplausiblen Ergebnissen führen.

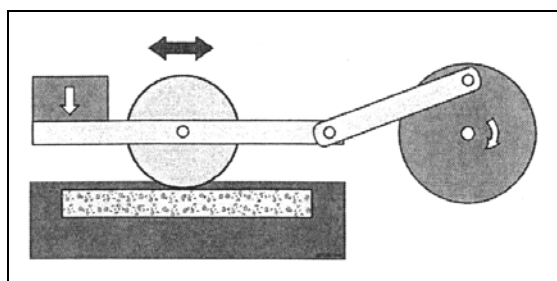
### 3.2.2 Versuche zur Ermittlung der Verformungsbeständigkeit

#### 3.2.2.1 Spurbildungsversuch (gem. [10])

Im Spurbildungsversuch soll der Widerstand der mit dem WSV-Gerät hergestellten Asphaltprobekörper gegen Verformung durch wiederholte Belastung bestimmt werden. Hierfür werden zwei in einem Metallrahmen unverschieblich gelagerte



Asphaltplatten durch ein hin und her rollendes Stahlrad wiederholt belastet. Diese Bewegung wird durch einen exzentrischen Antrieb mittels eines Schwungrades erreicht. Die Prüfräder sind jeweils an einem schwenkbaren Lastarm angebaut, an dessen freiem Ende die Prüflast aufgelegt wird (siehe Abbildung 7). Unter der wiederholten Belastung bildet sich eine Spurrinne aus, deren Tiefe über die Änderung der Höhenlage der Achse des Belastungsrades von einem induktiven Wegaufnehmer gemessen und per Computer abhängig von der Anzahl der Überrollungen aufgezeichnet wird.



**Abbildung 7:** Schematische Abbildung des Spurbildungsgerätes

In einem Versuchsdurchlauf werden zeitgleich zwei Probekörper geprüft, welche vor und während des Prüfvorganges im Wasserbad temperiert werden. Entgegen den in der DIN EN 12697-22 geforderten Bedingungen wurden die Versuche innerhalb dieser Forschungsarbeit gemäß dem Verfahrensablauf der noch gültigen „TPA-StB, Teil Spurbildungsversuch, Bestim-

mung der Spurrinnentiefe im Wasserbad“ [10] durchgeführt. Bei der Prüfung wurde die Probeoberfläche zunächst mit einem Stahlrad bei einer Temperatur des Wasserbades von 50 °C 20.000 mal überfahren. Da sich herausstellte, dass mit diesen Versuchsbedingungen keine sinnvollen Ergebnisse an den zu untersuchenden Mischungsvarianten erzielt werden können, wurden die Versuche erneut mit modifizierten Randbedingungen durchgeführt. Alle Mischungsvarianten sind dann mit einem Gummirad im Wasserbad bei 60°C und einige darüber hinaus auch bei 50°C geprüft worden.

Kennwert des Spurbildungsversuches ist die Spurtiefe. Diese wird als Mittelwert aus mindestens 25 Einzelmessungen der mittleren 100 mm der Rollstrecke (Mittelpunkt  $\pm 50$  mm) ermittelt. Begonnen werden die Aufzeichnungen der Spurrinnentiefen nach einer Vorbelastung von 10 Überrollungen. Bis zu der 100sten Überrollung wird nach jeweils 10 Überrollungen, bis zur 1000sten nach jeweils 20 Überrollungen und anschließend nach jeweils 100 Überrollungen ein Wert aufgezeichnet. Die gesamte Rollstrecke des Rades beträgt 230 mm und wird 53 mal in der Minute zurückgelegt. Der Versuch wird entweder nach 20.000 Überrollungen oder nach Erreichen einer Spurrinnentiefe von 20 mm beendet.

Die Versuchsbedingungen, die diese TPA vorgeben, sind auf den Nachweis der Verformungsbeständigkeit standfester Binderschichten abgestimmt. Bislang liegen jedoch auch Prüferfahrungen für Gussasphalt, Splittmastixasphalt und Asphaltbeton bis zu einem Größtkorn von 22 mm vor. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens sind darüber hinaus auch Asphalttragschichten untersucht worden. Als Ergebnis der Bestimmung der Spurbildung gilt in allen Fällen das arithmetische Mittel aus zwei Einzelwerten (zwei WSV Platten)

### **3.2.2.2 Dynamische Stempeleindringtiefe**

Eine weitere Möglichkeit, die Verformungsbeständigkeit der Asphalte mit einem performanceorientierten Versuch zu analysieren, besteht in der Untersuchung der dynamischen Stempeleindringtiefe. Das Versuchsprinzip des dynamischen Stempeleindringversuchs besteht darin, eine zylindrische Asphaltprobeplatte (Durchmesser 225 mm) axial über ein mit einem Kugelgelenk verbundenen Stempel (Durchmesser 80 mm) mit einer sinusförmigen Druckspannung zu belasten. Die Probe wird vor dem Versuch mindestens 2 Stunden in einem Wärmeschrank oder der Klimakammer der Prüfmaschine auf die erforderliche Prüftemperatur (50°C) erwärmt.

Mit Hilfe dieses Prüfverfahrens ist es möglich den Verformungswiderstand von Walzasphalten unter praxisnahen Randbedingungen zu bewerten, da die Dicke des Probekörpers der jeweiligen Schichtdicke des Asphaltes in der Straße entspricht und innerhalb der Probe eine Lastableitung erfolgen kann, da der Probendurchmesser deutlich größer als der Durchmesser des Stempels zur Lasteinbringung ist.

Ergebnis des dynamischen Stempeleindringversuches ist die durch Quotientenbildung aus bleibender Stempeleindringtiefe [mm] und ursprünglicher Probekörperhöhe [mm] ermittelte, bleibende Dehnung in ‰ nach 10.000 Lastwechseln.

Für die im Rahmen dieses Forschungsauftrages untersuchten WSV-Platten wurden hierbei die folgenden Prüfbedingungen festgelegt.

#### Probekörperabmessungen:

Um eine optimale gleichmäßige Krafteinleitung in den Probekörper zu gewährleisten, wurden alle Probekörper vor Versuchsbeginn auf Ober- und Unterseite planparallel geschliffen. Die sich daraus im Mittel ergebenden mittleren Probekörperhöhen sind nachfolgend aufgelistet. Die Probekörperhöhen jedes Prüfkörpers sind in den Tabellen im Anhang aufgeführt.

Höhe:

SMA und AB:	i.M. 36,3 mm
Tragschichtvarianten:	i.M. 112,6 mm
AB 0/16:	i.M. 56,7 mm
ABi 0/22S:	i.M. 77,8 mm

Durchmesser: 225 mm

(abweichend von den in [23] vorgeschlagenen Versuchsbedingungen 200 mm)

Prüftemperatur: 50°C

Stempeldurchmesser: 80 mm

Belastungsart: sinusförmiger Lastimpuls von 0,2 s Dauer mit einer Lastpause von 1,5 s Dauer

Unterspannung: 0,02 MPa

Oberspannung: 0,8 MPa

Versuchsdauer: 10.000 Lastwechsel (entspricht 4,7 h) bzw. Abbruch des Versuches bei Erreichen der Eindringtiefe von 5,0mm

Ergebnis: bleibende Verformung (Dehnung) nach 10.000 Lastwechsel in %

### 3.3 Statistische Untersuchungen

Für die in dieser Forschungsarbeit experimentell ermittelten Kenngrößen liegen Rohdatensätze aus Prüfergebnissen mit in der Regel sechs Einzelwerten (WSV) vor. Diese Rohdatensätze werden zunächst mit

Hilfe von Ausreißertests auf das Vorhandensein abweichender Messwerte überprüft. Nach Identifizierung etwaiger Ausreißer und deren ersatzloser Streichung werden aus den verträglichen Messwerten einer Messreihe als Ergebnis das arithmetische Mittel und als Streumaß die zugehörige Standardabweichung berechnet.

Zur Beantwortung der Frage, ob und gegebenenfalls welchen Einfluss das Verfahren der Probekörperherstellung auf ein Messergebnis besitzt, werden Mittelwertvergleiche durchgeführt. Um die Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Verdichtbarkeit und der Verformbarkeit der unterschiedlichen Messverfahren zu untersuchen, sind bivariate Korrelationsuntersuchungen nach Pearson durchgeführt worden.

Die hierbei mit einer statistischen Sicherheit von  $S = 0,95$ , d.h. einer Irrtumsbeziehungswise Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  erhaltenen Zusammenhänge werden als signifikant, die mit einer Irrtumsbeziehungswise Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,01$  ermittelten Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) werden als sehr signifikant eingestuft.

#### Ausreißerprüfung

Die Identifizierung ausreißerverdächtiger Einzelwerte innerhalb der Messreihe erfolgt in Anlehnung an das „Merkblatt über

die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Behandlung von abweichenden Messwerten (Ausreißern)“ [11]. Sämtliche Ausreißerverfahren setzen Normalverteilung der Messwerte voraus.

Die drei nachfolgend beschriebenen, varianzabhängigen Ausreißerverfahren berücksichtigen bei der Berechnung der Prüfgröße Mittelwert und Standardabweichung der Messwerte und verwenden somit die Gesamtinformation, die in der Messreihe enthalten ist. Die  $n$  Messwerte einer Messreihe werden zunächst der Größe nach zunehmend geordnet:  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n$ .

Bei der Suche nach Ausreißern innerhalb der Stichprobe sind dann, dem Merkblatt zufolge, der Reihe nach folgende Fälle zu unterscheiden:

Fall 1: Der größte oder der kleinste Messwert ist ausreißerverdächtig (T-Test)

Die Prüfgröße lautet dann für den größten

$$\text{Messwert } x_n: T_{\max} = T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}$$

beziehungsweise für den kleinsten Mess-

$$\text{wert } x_1: T_{\min} = T_1 = \frac{x_n - x_1}{s}$$

mit  $\bar{x}$  = arithmetisches Mittel der Messreihe und  
 $s$  = Standardabweichung der Messreihe

Überschreitet die Prüfgröße den im Merkblatt angegebenen Schwellenwert  $T$ , so

wird der geprüfte Messwert als echter Ausreißer ausgeschaltet.

Fall 2: Sowohl der größte als auch der kleinste Messwert einer Messreihe sind ausreißerverdächtig (David-Test)

Die Prüfgröße berechnet sich in diesem

$$\text{Fall zu: } \frac{a}{s} = T_{1,n} = T_1 = \frac{x_n - x_1}{s}$$

Überschreitet die Prüfgröße  $T_{1,n}$  den tabellierten Schwellenwert  $T$  des Merkblattes, so wird zunächst geprüft, ob sowohl der kleinste als auch der größte Messwert um etwa gleich große Beträge vom Mittelwert abweichen. Das wird angenommen, wenn die Differenz zwischen den beiden Unterschiedsbeträgen kleiner als 5% des gemeinsamen Mittels ist. In diesem Fall werden beide Messwerte als echte Ausreißer verworfen. Ist die Differenz zwischen den beiden Unterschiedsbeträgen größer als 5%, so ist der am weitesten vom Mittelwert entfernt liegende Messwert als Ausreißer identifiziert.

Fall 3: Entweder die beiden größten oder die beiden kleinsten Messwerte einer Messreihe sind ausreißerverdächtig (Grubbs Test)

Für diesen Test lautet die Prüfgröße für die beiden größten Messwerte:

$$T_{n,n-1} = \frac{S_{n,n-1}^2}{s^2}$$

Beziehungsweise für die beiden kleinsten Messwerte:

$$T_{1,2} = \frac{S_{1,2}^2}{s^2}$$

Die Berechnung der Quotienten ist umfangreich und kann dem Merkblatt entnommen werden. Unterschreitet die Prüfgröße den Schwellenwert T der Testverteilung des Merkblattes, so sind die geprüften Messwerte als echte Ausreißer eingestuft und zu verwerfen.

Die Ergebnisse der Ausreißerprüfungen wurden anhand von Boxplot Diagrammen dargestellt. Diese befinden sich im Anhang 9.2.1 und 9.2.5.2. Ein aufgrund der Fälle 1 bis 3 als Ausreißer ausgewiesener Messwert wird in Klammern gesetzt und bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt. Die um den abweichenden Messwert reduzierte Messreihe wird sodann erneut mit den vorgenannten Prüfverfahren auf weitere ausreißerverdächtige Werte untersucht.

#### Korrelationsanalyse

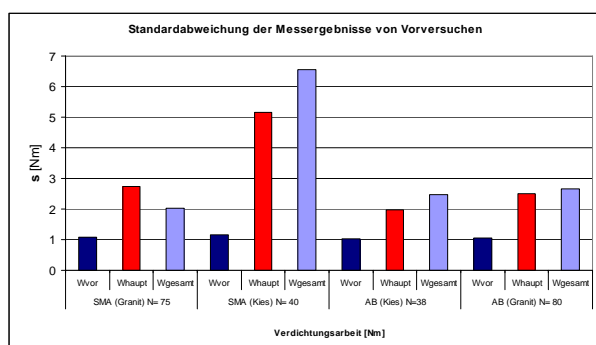
Die Untersuchung von Zusammenhängen erfolgte über den Vergleich der gemittelten Einzelwerte zweier Messreihen. Mit Hilfe des Signifikanztests mit dem Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ( $\rho$ ) wurden die ermittelten Bestimmtheitsmaße anschließend auf Signifikanz untersucht.

### **3.4 Untersuchungen zur Präzision der Messdatenerfassung des WSV-Gerätes**

#### Standardabweichung der Messergebnisse des WSV-Gerätes

Um die Präzision der Messdatenerfassung des WSV-Gerätes einschätzen zu können, wurden im Rahmen von Vorversuchen an zwei Asphaltbetonen und zwei Splittmastixasphalten mit den Mineralstoffen Kies- und Granitedelsplitt die Standardabweichungen der Verdichtungsarbeit zum Zeitpunkt der Vor-, Haupt und Gesamtverdichtung bei identischem Untersuchungsprogramm bestimmt. Die in Abbildung 8 dargestellten Standardabweichungen basieren auf N=38 bis 80 Messergebnissen. Die Standardabweichungen der Verdichtungsarbeit in den vier Messkollektiven repräsentieren sowohl Messtoleranzen als auch die Verschiedenheit der einzelnen Prüfkörper des jeweiligen Messkollektivs.

Die Standardabweichungen der weggeregelten Vorverdichtungsarbeit ( $W_{\text{vor}}$ ) sind in allen vier untersuchten Messkollektiven sehr gering. Betrachtet man die Auswertung der kraftgeregelten Hauptverdichtungsarbeit ( $W_{\text{haupt}}$ ) und der sich kumulativ ergebenden Gesamtverdichtungsarbeit ( $W_{\text{gesamt}}$ ), so ist im Vergleich zur Vorverdichtung mindestens eine Verdoppelung der Werte festzustellen.



**Abbildung 8:** Standardabweichung der im Rahmen von Vorversuchen ermittelten Verdichtungsarbeit

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Ermittlung der Verdichtbarkeit

Um ein umfassendes Bild der Verdichtungseigenschaften der ausgewählten Mischgutvarianten zeichnen zu können, wurden neben der Walzsektorverdichtung die beiden bekannten Verfahren der Marshallverdichtung und der Gyratorverdichtung herangezogen. Im Folgenden sollen die hierbei gewonnenen Ergebnisse erläutert werden.

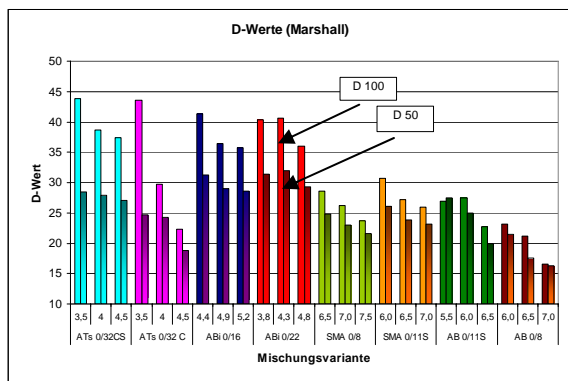
#### 4.1.1 Ergebnisse der Herstellung der Marshallprobekörper

Zur Beschreibung der Verdichtbarkeit eines Marshallkörpers wird der D-Wert nach Arand/Renken ermittelt [26]. Im Rahmen der Eignungsprüfung ist hierzu zunächst der D-Wert infolge zweimal 50 Schlägen ( $D_{50}$ ) auf den Probekörper bestimmt worden. Untersuchungsergebnisse aus bereits abgeschlossenen Forschungsarbeiten haben

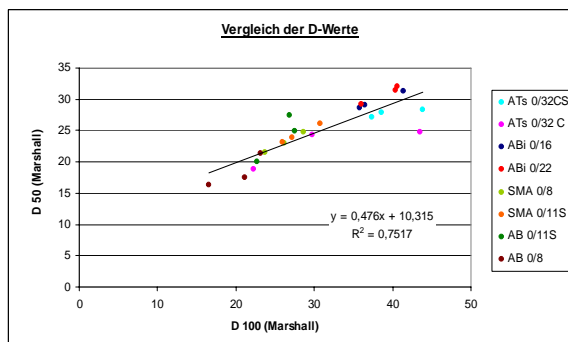
bereits gezeigt, dass dieser D-Wert zur Charakterisierung der Verdichtbarkeit nicht geeignet ist, da durch die geringe Schlagzahl die maximale Verdichtung nicht erreicht werden kann. Zur Ermittlung einer möglichst genauen Beschreibung der Verdichtbarkeit mittels Marshallverdichtung wurde aus diesem Grund für alle zu untersuchenden Mischungen der  $D_{100}$ -Wert ermittelt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellt. Betrachtet man die D-Werte einer Asphaltvariante, so ist in nahezu allen Fällen ein Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Bindemittelgehalt zu erkennen. Der D-Wert, als Maßzahl für die Verdichtbarkeit, nimmt mit steigendem Bindemittelanteil im Mischgut erwartungsgemäß ab. Besonders deutlich zeigt sich dieser Zusammenhang an den Asphaltbeton-, Splittmastix- und Asphalttragschichtvarianten. Aufgrund der im Anhang 9.2.1 dargestellten Streubreite der Untersuchungsergebnisse ist diese Bindemittelabhängigkeit auch bei den Binderschichten zu vermuten. Mit den zur Mittelwertbildung hierfür herangezogenen 3 Prüfergebnissen je Mischgutvariante lässt sich aufgrund der Messtoleranz keine gegenteilige Aussage ableiten.

Aus der Gegenüberstellung der D-Werte in Abbildung 10 wird ebenfalls deutlich, dass der  $D_{50}$ -Wert zur Charakterisierung der Verdichtbarkeit ungeeignet ist. Die Wahl

der Asphaltvarianten lässt hier eine große Spannweite der Verdichtbarkeit vermuten, die der  $D_{50}$ -Wert anders als der  $D_{100}$ -Wert nicht widerspiegelt. Diese bereits bekannte Erkenntnis wird hierdurch erneut bestätigt.



**Abbildung 9:** D-Werte der untersuchten Mischgutvarianten

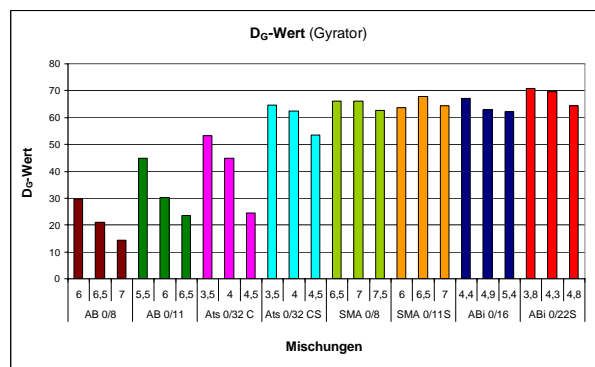


**Abbildung 10:** Gegenüberstellung der D-Werte bei unterschiedlicher Verdichtungsenergie

### 4.1.2 Ergebnisse der Herstellung der Gyrator-Probekörper

Bei der Verdichtung des Gyratorprobekörpers wurde der  $D_G$  -Wert als Maßzahl für die Verdichtbarkeit herangezogen. Im Gegensatz zum Marshallprobekörper werden hier die Messwerte der Probekörperhöhenabnahme von 400 Umdrehungen zur Er-

mittlung des  $D_G$ -Wertes herangezogen. In der nachfolgenden Abbildung 11 sind die Einzelergebnisse des  $D_G$ -Wertes dargestellt.



**Abbildung 11:**  $D_G$ -Werte der Gyratorverdichtung

Auch hier zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Bindemittelgehalt. Wie bei der schlagenden Verdichtung des Marshallprobekörpers nimmt der  $D_G$ -Wert mit steigendem Bindemittelanteil ab, d.h. je höher der Bindemittelanteil im Mischgut, desto geringer ist die bis zum Erreichen der theoretischen Endraumdicke benötigte Verdichtungsarbeit. Hier ist dieser Zusammenhang ebenfalls bei den Asphaltbetonen und Asphalttragschichten besonders ausgeprägt und zeigt sich weniger bei den Asphaltbindern, kaum bei den Splittmastixasphalten.

### **4.1.3 Ergebnisse der Verdichtung der WSV-Plattenherstellung**

Da der Arbeitsablauf bei der Verdichtung mit dem Walzsektorverdichter durch die zweigeteilte Arbeitsweise komplexer als dies bei den Verfahren der Marshall- und Gyratorverdichtung der Fall ist, war es notwendig, zur Beschreibung der einzelnen Mischgutvarianten den Prozess der Verdichtung genauer zu analysieren.

Zunächst soll daher auf den Hohlraumgehalt und die Raumdichte der hergestellten Probekörper eingegangen werden.

#### **4.1.3.1 Entwicklung der Raumdichte**

Nachfolgend ist in Abbildung 12 die Entwicklung der Raumdichte während des Vorgangs der Hauptverdichtung und Entlastung mittels WSV für die mittleren Bindemittelgehalte und in Abbildung 13 die maximal erreichten Raumdichten aller Untersuchungsvarianten dargestellt. Die Raumdichteentwicklung wurde durch Rückrechnung der durch Tauchwägung [gem. 5] ermittelten Endraumdichte des fertigen Probekörpers ermittelt.

Die Entwicklung der Raumdichte während der Vorverdichtung wird aufgrund des starken manuellen Einflusses bei der Einbringung des Mischgutes in die Form und der nur geringen Kraftwirkung während der Vorverdichtung nicht weiter betrachtet.

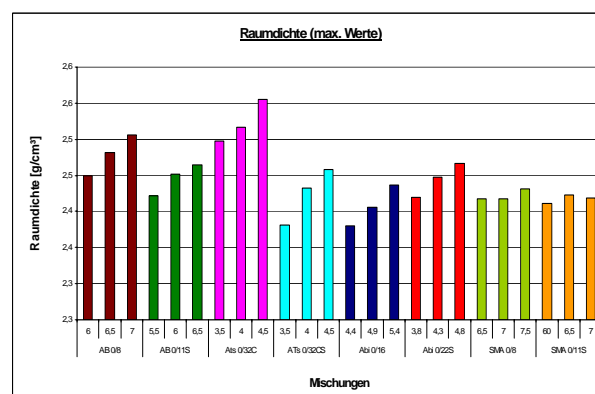
Die Zunahme der Dichte, die mit einem Walzübergang erreicht werden kann, ist zu Beginn des Verdichtungsprozesses verhältnismäßig groß und nimmt zum Ende der Verdichtung kontinuierlich ab. Grundsätzlich lassen sich leicht und schwer verdichtbare Walzasphaltnmischungen unterscheiden. Asphaltarten, die zu Beginn des Verdichtungsprozesses eine große Dichteänderung erfahren und schon bald ihre Dichte kaum noch ändern, werden als leicht verdichtbar bezeichnet [12, 14]. Asphaltmischgutsorten, deren Dichtezuwachs zu Beginn des Verdichtungsprozesses geringer ausfällt, die dafür aber nach einer größeren Anzahl an Walzübergängen noch Dichteänderungen erfahren können, werden als schwer verdichtbar bezeichnet, da zum Erreichen der Enddichte eine höhere Verdichtungsarbeit zu verrichten ist.

Infolge der Vorverdichtung besitzt jedes Mischgut eine individuelle Anfangsraumdichte. Um die Entwicklung der Raumdichte während der Hauptverdichtung der einzelnen Mischgutvarianten miteinander vergleichen zu können, wurden die einzelnen Kurven normiert, d.h. die Raumdichte zu Beginn des Hauptverdichtungs Vorganges wurde auf 0 gesetzt. Hierdurch kann ein Vergleich des Anstiegs der Raumdichte infolge der Hauptverdichtung und damit eine Aussage zur Verdichtungswilligkeit



jeder einzelnen Mischgutvariante getroffen werden.

In Abbildung 13 sind die maximal erreichten Raumdichten aller untersuchten Mischgutvarianten dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt bei nahezu allen Mischgutvarianten eine Zunahme der erreichten maximalen Raumdichte bei steigendem Bindemittelgehalt an (vgl. auch Anhang 9.2.2). Weniger ausgeprägt ist dieser Zusammenhang bei den Splittmastixasphaltemischungen.



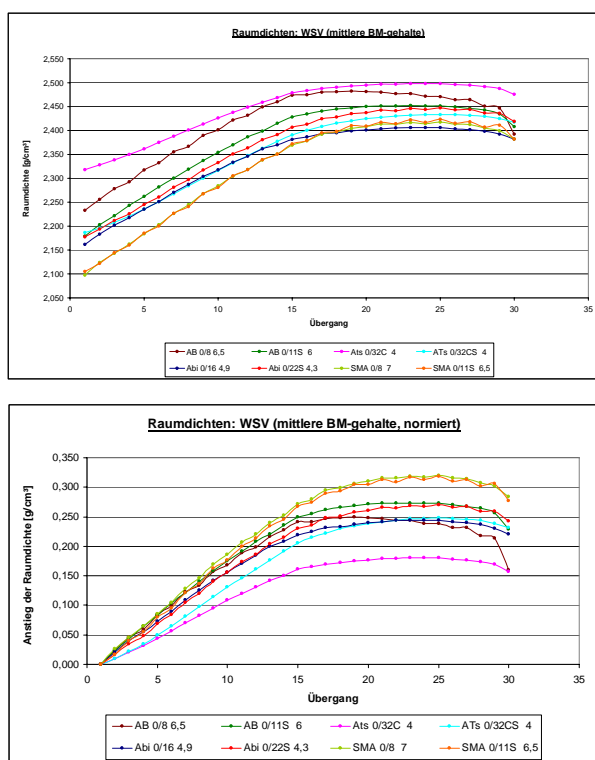
**Abbildung 13:** maximal erreichte Raumdichten der untersuchten Mischgutvarianten

#### 4.1.3.2 Entwicklung des Hohlraumgehaltes

Nachfolgend sind die Hohlraumgehalte aller Mischgutvarianten zum Zeitpunkt der Beendigung des Hauptverdichtungsvorganges (Abbildung 14), bei Erreichen der maximalen Raumdichte (Abbildung 15) und zum Zeitpunkt der Beendigung des Entlastungsvorganges bezogen auf die Endraumdichte des jeweiligen Probekörpers dargestellt (Abbildung 18).

Es fällt auf, dass sich bei einigen Mischgutvarianten durch Rückrechnung der Probenhöhe unter Bezugnahme auf den fertigen Probekörper negative Hohlraumgehalte ergeben (vgl. auch Anhang 9.2.3). Eine Erklärung für diese in Abbildung 16 und 17 dargestellten negativen Messwerte lässt sich durch eine möglichen methodenspezifische Messdifferenz wie folgt geben:

Gleitet das Walzsegment über die zu verdichtende Probekörperoberfläche, so wird



**Abbildung 12:** Entwicklung der Raumdichten (normiert)

zunächst das Mischgut gleichmäßig über die Probekörperlängsachse verdichtet. Die Raumdichte steigt erst schnell, dann langsamer an, bis sich eine maximale Raumdichte einstellt. Wie Erfahrungen bei der Verdichtung von Asphaltprobeplatten mit dem WSV zeigen, kann die Raumdichte über das Volumen der Asphaltprobeplatte ungleichmäßig verteilt sein, so dass sie beispielsweise im Kernbereich der Platte bis zu 1,5% über der mittleren Raumdichte liegt [9].

Aufgrund der längeren Verweildauer des Segmentes in den Randbereichen kann es infolge von Verdrängung des Mischgutes zu Aufzeichnung von Probekörperhöhen- daten kommen, welche zeitlich begrenzt erheblich unter denen des fertigen Probekörpers liegen. Der Einfluss dieser Messwerte ist nicht unerheblich. Auf der dem Segment abgewandten Seite kommt es gleichzeitig zu einer messtechnisch nicht erfassten Wulstbildung. Eine wahrscheinliche Erklärung für die Erfassung negativer Hohlraumgehalte lässt sich demzufolge durch die Verdrängung von Mischgut und das Hin- und Herschieben eines Wulstes auf der Probekörperoberfläche beschreiben (vgl. hierzu auch [29]). Dieses Phänomen wird hauptsächlich bei leicht verdichtbaren Mischgutvarianten beobachtet (vgl. Tabelle 3 und Abbildung 18). Der während des Verdichtungs Vorganges sehr starke

Abfall der Höhendaten führt zu einer unrealistisch hohen Raumdichte (siehe Auswertung Verdichtungsgrad, Kapitel 4.1.3.3 und Anhang 9.2.3) und den unten dargestellten sehr niedrigen und in einigen Fällen sogar negativen Hohlraumgehalten. (Abbildung 14 bis Abbildung 17).

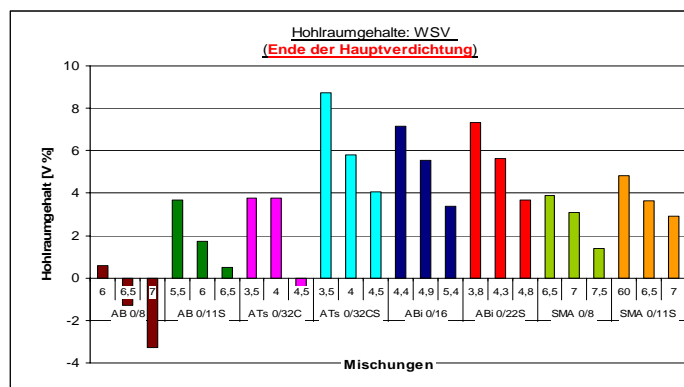
Um diese methodenspezifische Messdifferenz einschätzen und den Verdichtungs Vorgang auswerten zu können, ist es daher notwendig, den gesamten Verlauf der Verdichtung bis zum Ende der Entlastung des Probekörpers zu betrachten.

Neben der Verschiebung des Materials während des Verdichtungsprozesses spielt auch die Elastizität der Mischung eine Rolle. Die Verdichtung jedes Mischgutes setzt sich aus einem elastischen und einem plastischen Verformungsanteil zusammen. Bei ordnungsgemäß verdichtetem Mischgut mit großem elastischen Verformungsanteil liegt der Hohlraumgehalt am Ende der Verdichtung innerhalb der geforderten Grenzwerte, auch wenn er während des Verdichtungsprozesses darunter sinken und rechnerisch sogar negative Werte annehmen kann. Mischgut mit großen plastischen Anteilen kann im Gegensatz dazu bei gleicher Verdichtungsenergie überverdichtet werden.

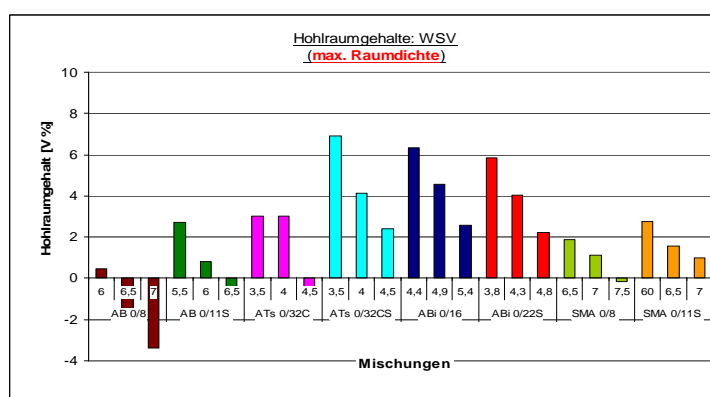
Aussagen zu absoluter Raumdichte und Hohlraumgehalt der Probekörper der Mischgutvarianten können daher nur an-

hand der Daten der Probekörperhöhe der fertigen Platte und nicht zum Zeitpunkt der maximalen Verdichtung (analog dem Marshall- oder Gyrotorverfahren) ermittelt werden.

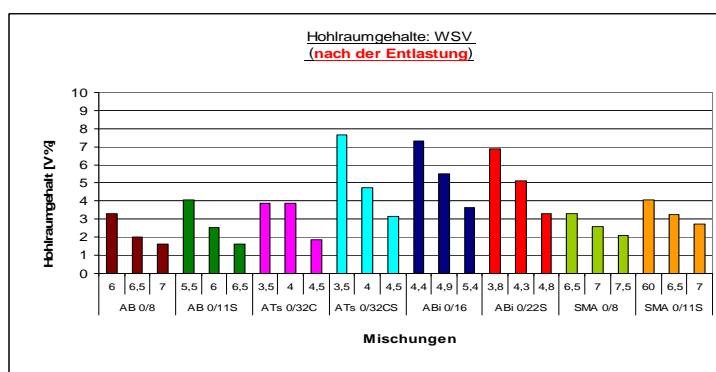
Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 16 und im Anhang 9.2.3 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass mit steigendem Bindemittelgehalt der Hohlraumgehalt aller Mischgutvarianten abnimmt.



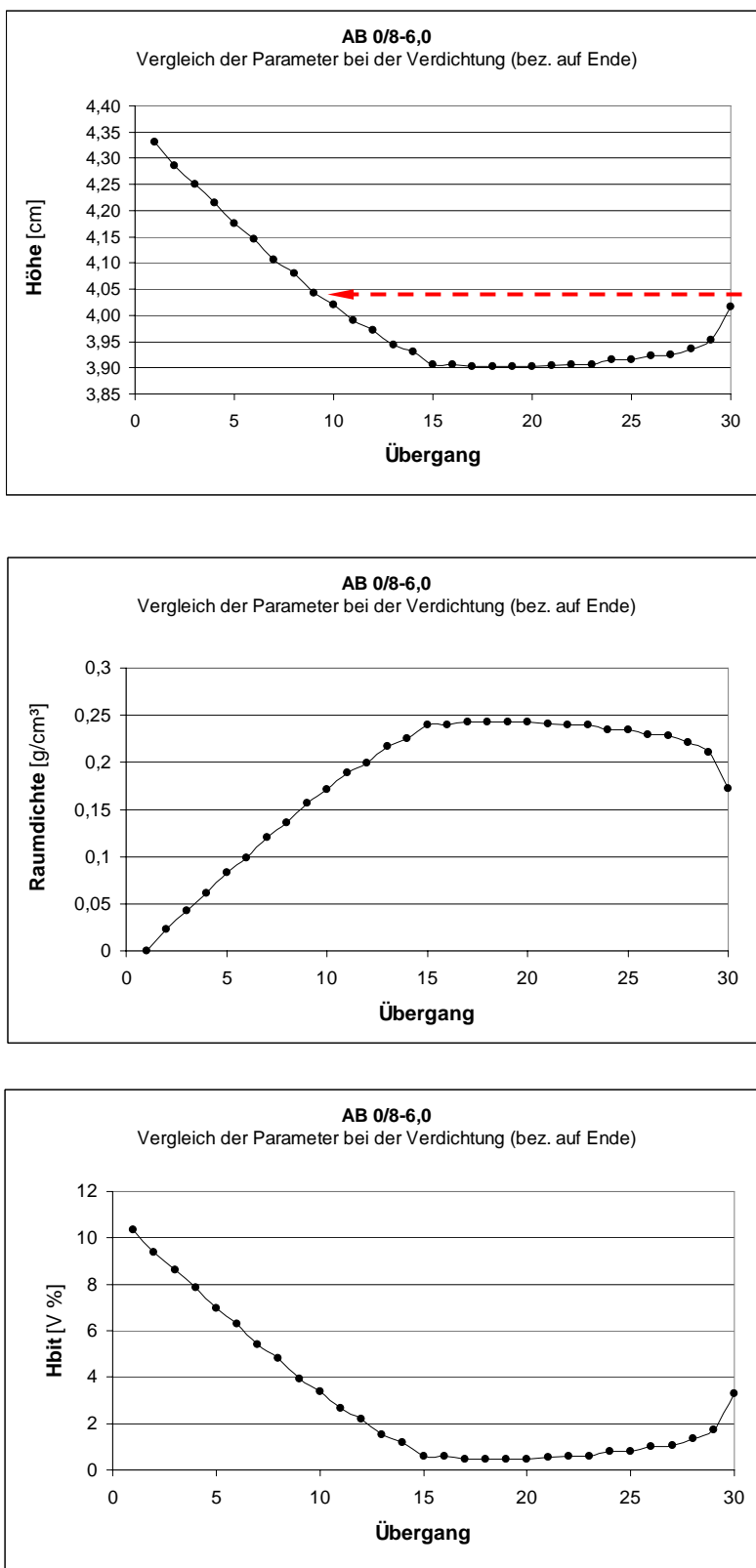
**Abbildung 14:** Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten bezogen auf die Endraumdicke nach Beendigung des Hauptverdichtungs Vorganges



**Abbildung 15:** Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten bezogen auf die Endraumdicke bei Erreichen der maximalen Raumdicke



**Abbildung 16:** Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten bezogen auf die Endraumdicke nach Beendigung des Entlastungsvorganges



**Abbildung 17:** Darstellung der Probekörperhöhe mit entsprechender Raumdichte- und Hohlraumgehaltsentwicklung

Vergleicht man die Entwicklung des Hohlraumgehaltes der unterschiedlichen Mischgutvarianten mit den in den ZTV Asphalt-StB [33] und den ZTVT-StB [34] angegebenen Grenzwerten für das jeweilige Mischgut, so können die vorliegenden Messdaten in die nachfolgend aufgelisteten 5 Verläufe unterschieden werden.

Infolge der einwirkenden Kraft sinkt der Hohlraumgehalt während der Verdichtung auf einen Minimalwert und steigt dann während der schrittweisen Entlastung wieder unterschiedlich stark an. Während dieser Minimalwert bei einigen Mischgutvarianten innerhalb der oben genannten Grenzwerte bleibt (1, 2) sinkt er in anderen Fällen darunter (4) oder sogar ins Negative (3, 5).

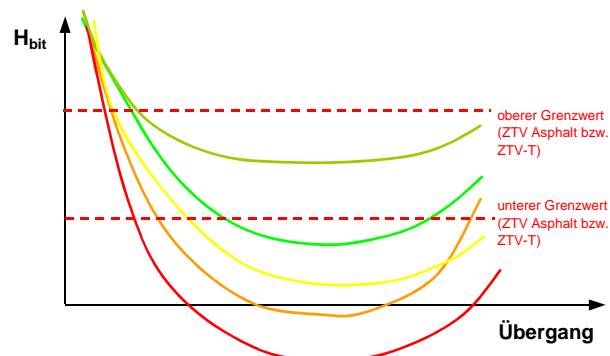
Die Entwicklung des Hohlraumgehaltes im Fall 1 und 2 lässt im Rahmen der in den ZTV-Asphalt-StB [33] bzw. ZTVT-StB [34] geforderten Werte eine optimale Verdichtung erkennen. Im Gegensatz dazu deutet der Verlauf des Hohlraumgehaltes im Fall 4 und 5 auf eine überverdichtete Asphaltprobeplatte hin. Die negativen Hohlraumgehalte im Fall der Verdichtung 3 und 5 lassen sich durch die oben erläuterte Verdrängung des Mischgutes in der Form erklären. Das Mischgut ist zu diesem Zeitpunkt bereits weitestgehend verdichtet, teilweise sogar überverdichtet, ist aber noch nicht ausreichend ausgekühlt und

lässt sich durch das Walzsegment noch bewegen. Im Gegensatz zum Fall 5 besitzt das Mischgut im Fall 3 jedoch ein besonders hohes Rückstellungsvermögen, so dass der Hohlraumgehalt der Mischung am Ende der Entlastung wieder innerhalb der geforderten Grenzwerte der ZTV Asphalt – StB [33] bzw. der ZTVT-StB [34] liegt.

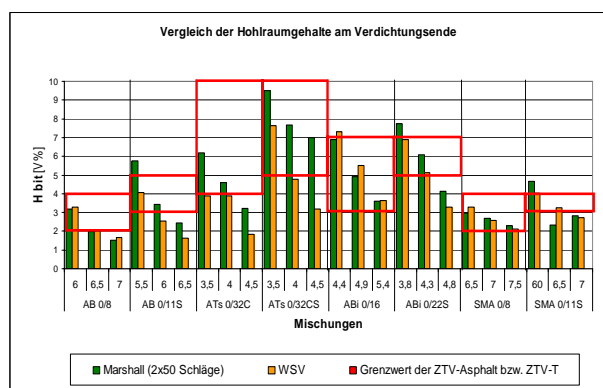
In der nachfolgenden Tabelle ist die Einteilung der untersuchten Mischgutvarianten anhand der Verläufe der Hohlraumgehalte (Anhang 9.2.3) in die erläuterten Kategorien der Verdichtung dargestellt.

Mischungen	Kategorie				
	1	2	3	4	5
ATs 0/32 CS-3,5	AB 0/8-6,0	SMA 0/8-7,5	AB 0/11S-6,0	AB 0/8-6,5	
ABi 0/16-4,4	AB 0/11S-5,5		ATs 0/32C-3,5	AB 0/8-7,0	
ABi 0/16-4,9	ABi 0/16-5,4		ATs 0/32C-4,0	AB 0/11S-6,5	
ABi 0/22S-3,8	SMA 0/8-6,5		ATs 0/32CS-4,0	ATs 0/32C-4,5	
	SMA 0/8-7,0		ATs 0/32CS-4,5		
	SMA 0/11S-6,0		SMA 0/11S-7,0		
	SMA 0/11S-6,5		ABi 0/22S-4,8		
			ABi 0/22S-4,3		

**Tabelle 3:** Einteilung der Mischungsvarianten nach ihrer Verdichtbarkeit



**Abbildung 18:** Qualitative grafische Darstellung der unterschiedlichen Typen der Hohlraumgehaltsentwicklung



**Abbildung 19:** Vergleich der Hohlraumgehalte der WSV und Marshall-Verdichtung (am Ende der Verdichtung) mit den Grenzen der ZTV Asphalt StB bzw. ZTVT-StB

Stellt man die Hohlraumgehalte der WSV- und Marshallverdichtung (2x50 Schläge) den in den ZTV-Asphalt-StB [33] bzw. ZTVT-StB [34] angegebenen Grenzwerten gegenüber, so zeigen sich bei den untersuchten Mischgutvarianten erhebliche Unterschiede.

Bis auf die Mischungen ABi 0/16 und SMA 0/8 ist für alle untersuchten Mischgutvarianten für das WSV-Verfahren eine stärkere Verdichtung erkennbar.

Während die Hohlraumgehalte der Marshallverdichtung nur in einigen Fällen für die Mischgutvarianten mit hohen Bindemittelgehalten unterhalb der Grenzwerte der ZTV liegen, ist dies bei der WSV-Verdichtung mit Ausnahme der oben genannten Mischungen in der Mehrzahl der Untersuchungsvarianten zusätzlich für die mittleren Bindemittelgehalte festzustellen. Um den derzeit gültigen Anforderungen

bei der Herstellung von Asphalt im Labor auch bei der Anfertigung von Probekörpern mit dem WSV gerecht zu werden, müssten hauptsächlich diese Mischgutvarianten neu konzipiert werden.

#### 4.1.3.3 Berechnung eines Verdichtungskennwertes für WSV ( $D_{\text{WSV}}$ ) analog zum D-Wert

Der Verdichtungswiderstand kann auf der Grundlage der experimentell gewonnenen Daten der Höhenabnahme während des Verdichtungs Vorganges analog dem Marshallverfahren mit dem Gausschen Prinzip über die Ermittlung der Summe der Abstandsquadrate entsprechend der in [7] angegebenen Verfahrensweise für die WSV-Verdichtung ermittelt werden. Zur Berechnung des  $D_{\text{WSV}}$ -Wertes wurden hier ausschließlich die Probekörperhöhendaten des Verdichtungs- und Entlastungsvorganges bis zum Erreichen der minimalen Probekörperhöhe berücksichtigt. Für die einzelnen Mischungen ergaben sich im Gegensatz zu den Verfahren der Marshall- und Gyratorverdichtung dabei lediglich zwischen 16 und 26 Einzelwerte, die für die mathematische Anpassung der Auswertefunktion zur Verfügung standen.

Die Ergebnisse aller Mischgutvarianten sind in der Abbildung 20 aufgeführt. Analog dem Marshall-Verfahren lässt sich auch mit Hilfe der Beschreibung der Ver-

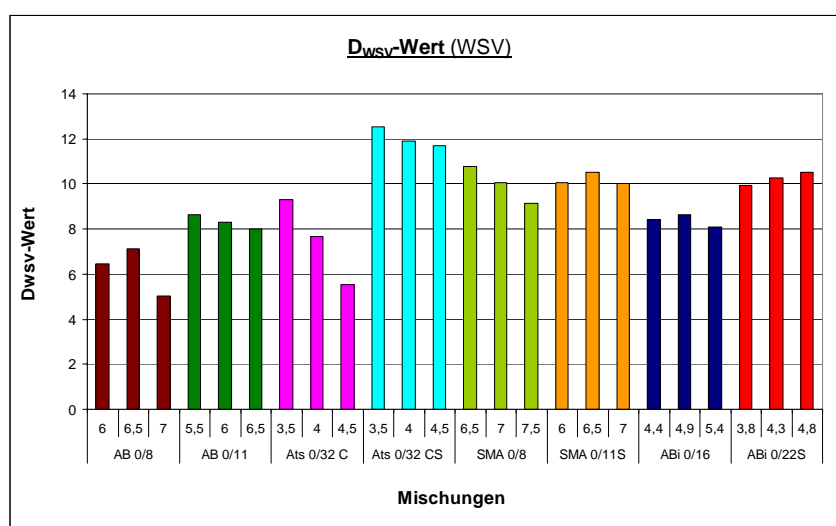
dictbarkeit über den  $D_{WSV}$ -Wert die Einteilung in leicht, mittel und schwer verdichtbare Asphalte vornehmen.

Leicht verdichtbare Asphalte weisen einen geringen, schwer verdichtbare eine hohen  $D_{WSV}$ -Wert auf. Es ist daher zu vermuten, dass der D-Wert mit Zunahme des Bindemittelanteils in der Mischung analog den Ergebnissen des Marshall- und Gyrator-Versuches abnimmt. Diese Tendenz ist bei den Varianten AB 0/11, ATS 0/32C, ATS 0/32CS, SMA 0/8 sehr deutlich und weniger bei den Mischgutvarianten AB 0/8, SMA 0/11S, ABi 0/16 und ABi 0/22S zu erkennen.

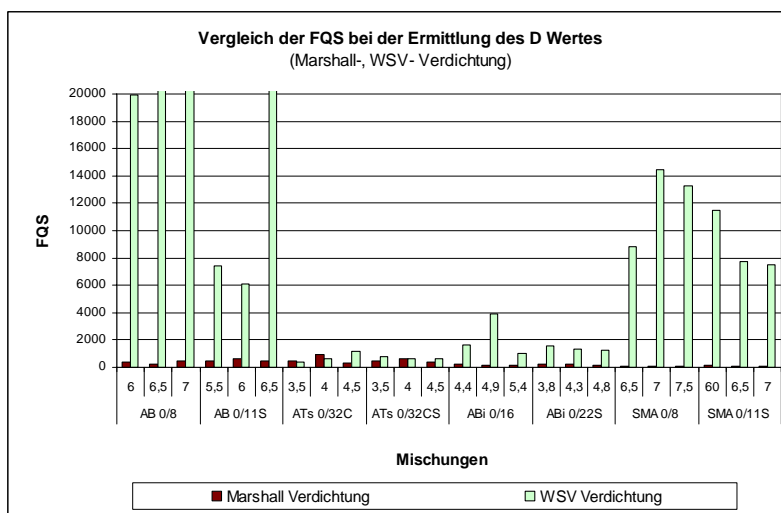
Aufgrund der im Anhang 9.2.1 dargestellten Streubreiten der ermittelten Einzeldaten ist die vorgenannte Bindemittelabhängigkeit jedoch bei den Mischungen SMA 0/11S und ABi 0/16 nur

zu vermuten. Für die Mischung AB 0/8 kann keine Aussage bezüglich eines Zusammenhanges getroffen werden und die Mischung ABi 0/22S zeigt eine gegenläufige Tendenz. Ferner kann bei der WSV-Verdichtung eine andere bindemittelabhängige Reihung der D-Werte auftreten, da sich Änderungen der Mischgutzusammensetzung nicht in derselben Weise auf die Verdichtungseigenschaften der walzenden Verdichtung auswirken müssen.

Aufgrund der oben genannten geringen Datenmenge, die zur Ermittlung des  $D_{WSV}$ -Wertes zur Verfügung steht, kann die Kurvenanpassung nur mit einem sehr großen Fehler erfolgen (vgl. Abbildung 21). Zur Beschreibung der Verdichtbarkeit beim WSV-Verfahren scheint der so ermittelte  $D_{WSV}$ -Wert daher ungeeignet.



**Abbildung 20:**  $D_{WSV}$ -Wert (Ermittelt mit den Daten des Hauptverdichtungsvorganges unter Berücksichtigung der Verdichtung und Entlastung)



**Abbildung 21:** Vergleich der Fehlerquadratsumme (FQS) bei der Ermittlung des D-Wertes und des  $D_{WSV}$  Wertes

#### 4.1.3.4 Verdichtungsgrad

In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind die Verdichtungsgrade der untersuchten Mischgutvarianten bezogen auf die Raumdichte der mit 2x50 Verdichtungsschlägen hergestellten Marshallprobekörper und bezogen auf die Rohdichte des Mischgutes zum Zeitpunkt nach Beendigung des Verdichtungs Vorganges, bei Erreichen der minimalen Probekörperhöhe (Maximum der Verdichtung) und am Ende der Entlastung dargestellt.

Der Bezug zur Rohdichte des Mischgutes wurde zusätzlich hergestellt, um den Verdichtungs Vorgang des WSV-Gerätes besser analysieren zu können. Die bei der WSV-Verdichtung am Ende des Verdichtungs Vorganges erreichten Verdichtungsgrade

bezogen auf den Marshall-Probekörper lagen zwischen  $k = 97,2$  und  $101,6$  %. Insbesondere bei der Tragschichtvariante ATS 0/32C konnten für die Bindemittelgehalte 3,5 und 4,0 M.-% durch die walzende Verdichtung des WSV-Gerätes höhere Raumdichten als bei der schlagenden Marshallverdichtung erzeugt werden. Bei Betrachtung der Verdichtungsgrade bezogen auf die Rohdichte des Mischgutes ist für alle Mischungen am Ende der Entlastung ein leichter Anstieg des Verdichtungsgrades mit steigendem Bindemittelgehalt festzustellen. Dieser Zusammenhang kann bei Bezug auf die Raumdichte des Marshall-Probekörpers für die Asphaltbindervarianten und die Mischung ATS 0/32C nicht eindeutig festgestellt werden.

Eine Ursache hierfür ist die Streuung der Raumdichtemesswerte der WSV-



Probekörper. Bei dem Tragschichtmischgut ATS 0/32C spiegeln die ermittelten Verdichtungsgrade die in der Praxis erreichten Werte wieder.

Während des Verdichtungsvorganges sind bei den Mischgutvarianten AB 0/8 (-6,5, -7,0), AB 0/11S-6,5, ATS 0/32C-4,5 und SMA 0/8-7,5 Verdichtungsgrade bezogen auf die Rohdichte des Mischgutes über 100 % ermittelt worden. Diese theoretisch un-

möglichen Werte resultieren, wie bereits in Kapitel 4.1.3.2 erläutert, aus der methodenspezifischen Messdifferenz bei der Messdatenaufzeichnung der Probekörperhöhenänderung, aus welcher durch Rückrechnung der Probekörperendhöhe während des Verdichtungsvorganges unrealistisch hohe Raumdichten und in der Folge zu hohe Verdichtungsgrade resultieren.

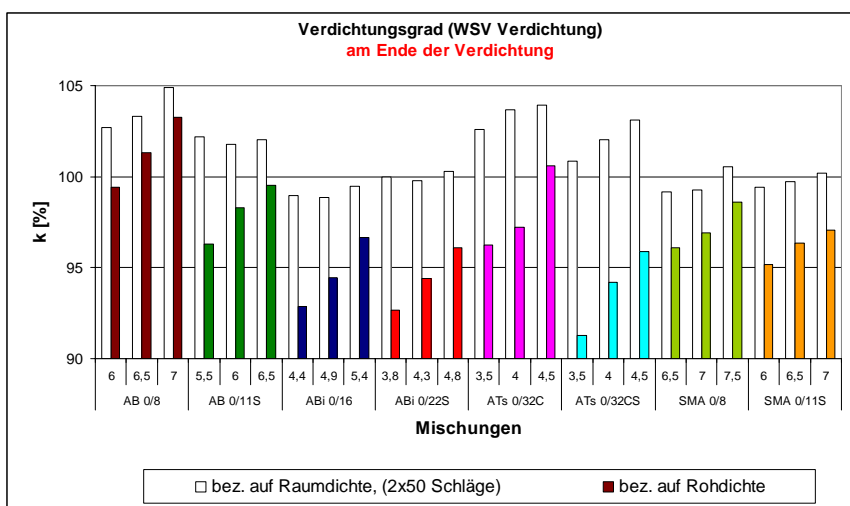


Abbildung 22: Verdichtungsgrad WSV-Verdichtung am Ende des Verdichtungsvorganges

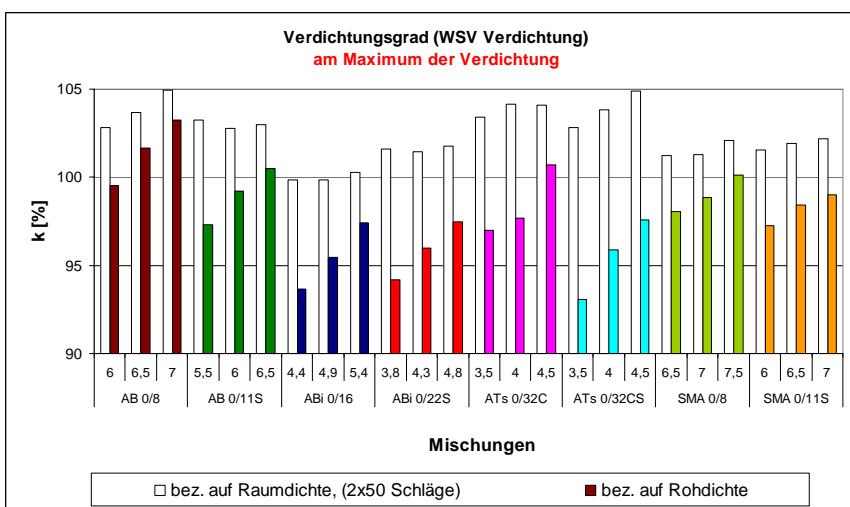
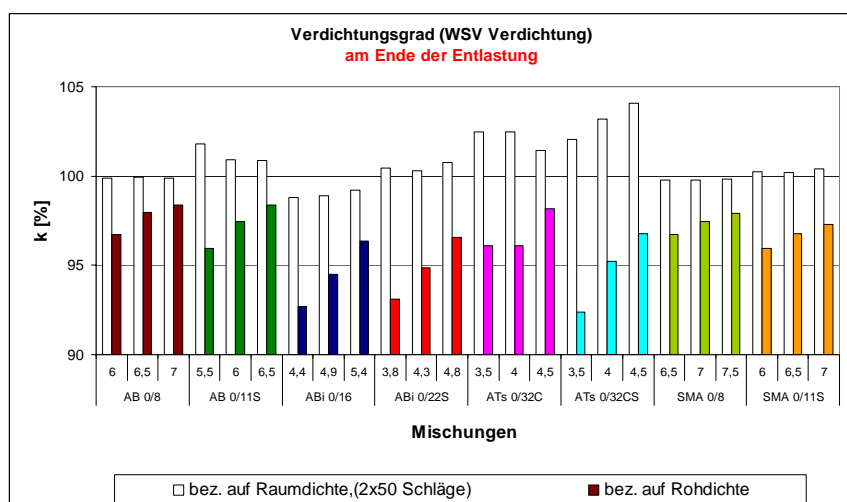


Abbildung 23: Verdichtungsgrad WSV-Verdichtung am Maximum der Verdichtung



**Abbildung 24:** Verdichtungsgrad WSV-Verdichtung am Ende der Entlastung

### 4.1.3.5 Verdichtungsarbeit

#### 4.1.3.5.1 Vorverdichtung

Nachfolgend ist zunächst ausschließlich der Verlauf der Vorverdichtungsarbeit für alle Mischgutvarianten dargestellt. Zur besseren Unterscheidung der untersuchten Mischgutvarianten sind in Abbildung 25 nur die mittleren Bindemittelgehalte dargestellt, eine vollständige Darstellung der Verdichtungsverläufe aller untersuchten Mischgutvarianten findet sich im Anhang 9.2.5.1.

Es wird deutlich, dass schon die geringen Lasten des Vorverdichtungs Vorganges eine Differenzierung der einzelnen Mischgutvarianten erkennen lassen. Anhand der Steigung der Kurven, d.h. dem Anstieg der verrichteten Arbeit, ist zu erkennen, wie leicht bzw. schwer verdichtbar das einzelne Mischgut ist. Während beispielsweise

bei der Mischung SMA 0/11S von Beginn der weggeregelten Verdichtung an stetig Arbeit zur Verdichtung verrichtet wird, setzt insbesondere bei den Asphaltbeton- und Tragschichtvarianten das Mischgut der Verformung lange Zeit kaum Widerstand entgegen. Schon hier zeigt sich die qualitative erwartungsgemäße Reihung der Untersuchungsvarianten SMA – ABi – ATS – AB. Die Verdichtungsarbeit muss jedoch – wie in Abbildung 29 dargestellt – auf die Plattendicke bezogen werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass zu diesem Zeitpunkt der Verdichtung nur eine verhältnismäßig geringe Krafteinleitung erfolgt, so dass eindeutige Unterscheidungen der Verdichtungseigenschaften anhand der Vorverdichtung nicht getroffen werden können. Bei der Betrachtung der Vorverdichtung im gesamten Verdichtungsprozesses wird deutlich, dass diese nur einen sehr geringen

und auch sehr streuungsbehafteten Anteil an der Gesamterdichtungsarbeit hat (siehe Abbildung 27). Für eine sinnvolle Beurteilung der Verdichtungseigenschaften der zu untersuchenden Mischgutvarianten wird

daher im weiteren Vorgehen auf die Analyse der Vorverdichtung verzichtet und ausschließlich der Vorgang der Hauptverdichtung betrachtet.

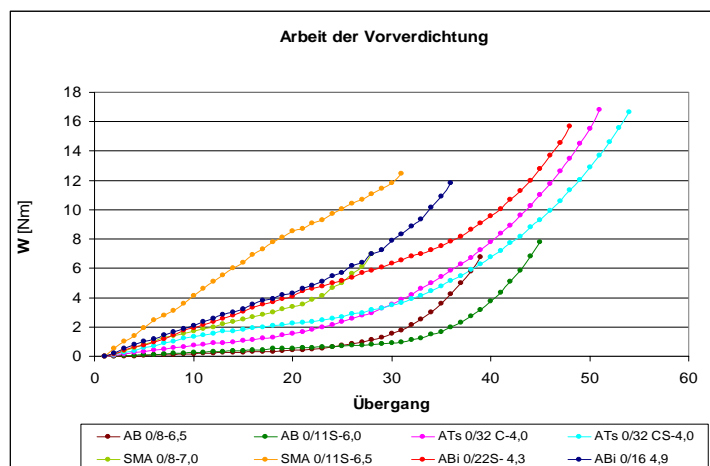


Abbildung 25: Verlauf der Verdichtungsarbeit Vorverdichtung (mittlere Bindemittelgehalte)

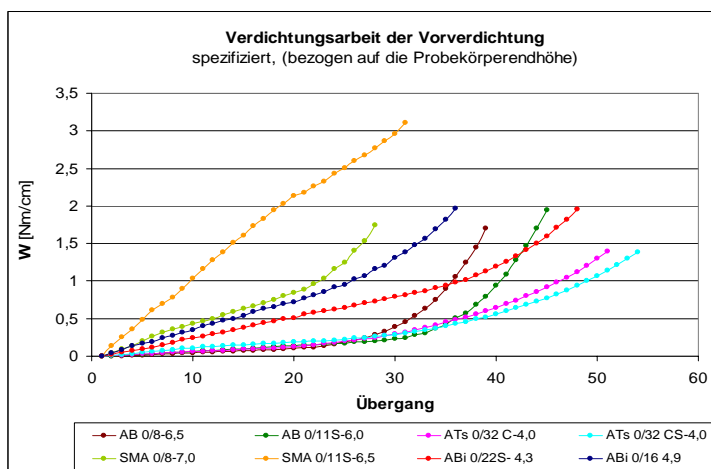


Abbildung 26: Verlauf der Verdichtungsarbeit Vorverdichtung (mittlere Bindemittelgehalte auf Probekörperhöhe normiert)

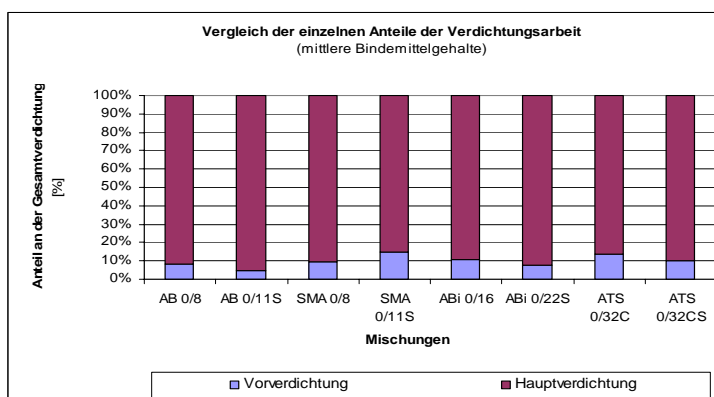


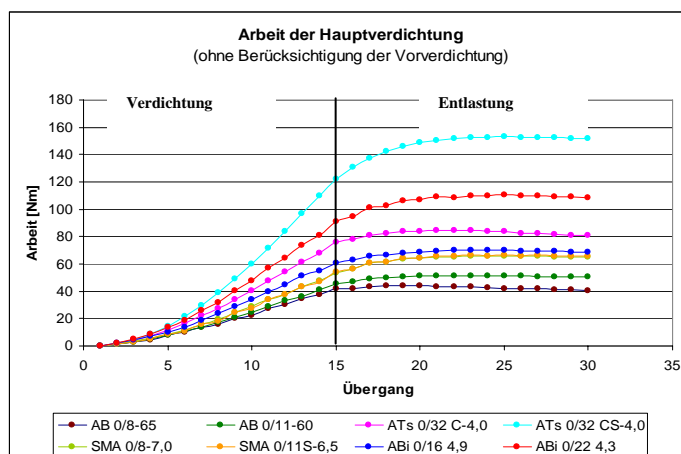
Abbildung 27: Anteil der Vorverdichtung an der Gesamtverdichtung am Beispiel der mittleren Bindemittelgehalte

#### 4.1.3.5.2 Hauptverdichtungsarbeit

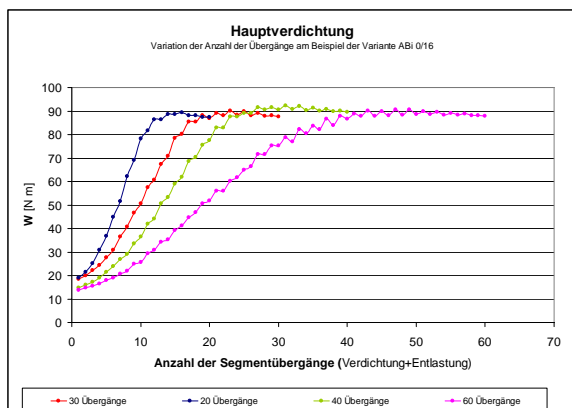
Vernachlässigt man die bereits geleistete Arbeit der Vorverdichtung und stellt die kumulativen Verläufe des Verdichtungsprozesses der Hauptverdichtung gegenüber, so ergibt sich das in Abbildung 28 dargestellte Bild. Auch hier sind aus Übersichtlichkeitsgründen nur die mittleren Bindemittelgehalte dargestellt. Die vorliegenden Verläufe charakterisieren die Entwicklung der Verdichtungsarbeit während der Verdichtungsphase und der stufenweisen Entlastung. Es zeigt sich, dass nach Beendigung des Verdichtungsprozesses nahezu bei allen Mischgutvarianten ein weiterer Anstieg der Arbeit auch während der Entlastung stattfindet, die maximale Raumdichte nach Abschluss des Verdichtungsprozesses also noch nicht erreicht wurde. Da, wie bereits in 3.2.1.3 beschrieben, die Krafteinwirkung nur schrittweise zurückgeht, findet eine vollständige

Rückstellung des Probekörpers nicht sofort statt. Infolge der noch andauernden verminderten Krafteinwirkung steigt - abhängig von der zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen Verdichtungswilligkeit der jeweiligen Mischgutvariante - die Verdichtungsarbeit weiterhin unterschiedlich stark an. Wie stichprobenartige Untersuchungen zeigten hat die Anzahl der gewählten Übergänge hierbei keinen Einfluss auf die verrichtete Gesamtarbeit (siehe Abbildung 29).

Um den Vorgang der Verdichtung eines Mischgutes im WSV so genau wie möglich zu beschreiben, ist es also notwendig, den Entlastungsvorgang in die Auswertung mit einzubeziehen. Das hierbei erreichte Maximum wird als für die individuell erforderliche Arbeit charakteristisch angesehen und ist somit zur Kennzeichnung der Asphalteeigenschaft Verdichtbarkeit im WSV geeignet.

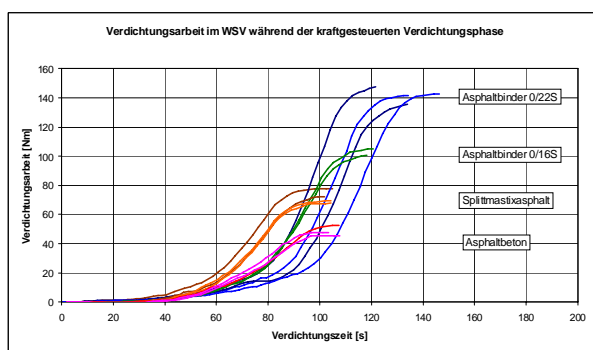


**Abbildung 28:** Verlauf der Verdichtungsarbeit (Hauptverdichtung, mittlere Bindemittelgehalte)



**Abbildung 29:** Vergleich der Verdichtungsarbeit bei unterschiedlicher Anzahl der Segmentübergänge

Ferner zeigen Untersuchungen aus [17] (Abbildung 33) und im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte, stichprobenartige Vorversuche am WSV, dass die Verdichtungsarbeit bei sonst gleichen Materialeigenschaften von der Plattendicke beeinflusst wird. Eine dicke Platte lässt sich stärker verdichten als eine dünne Platte.

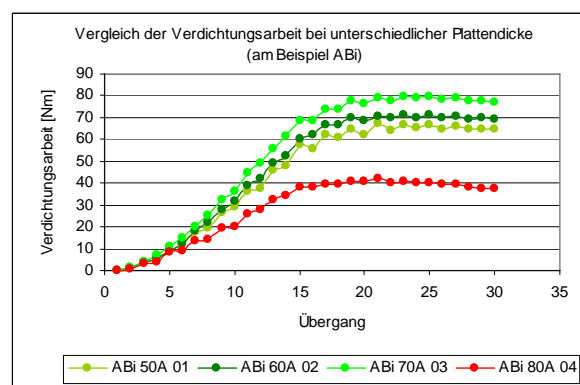


**Abbildung 30:** Beispiele für die Verdichtungsarbeit im Walzsektor-Verdichter [17]

Bei Betrachtung der Kurven für die in [17] ebenfalls nach dem Braunschweiger Mo-

dell verdichteten Asphalte fällt auf, dass die Maxima untereinander etwa im Verhältnis ABi 22 : ABi 16 : SMA von 2,0 : 1,5 : 1,0 stehen. Dieses Verhältnis entspricht dem Verhältnis der Plattendicke von 8 : 6 : 4 (Abbildung 30).

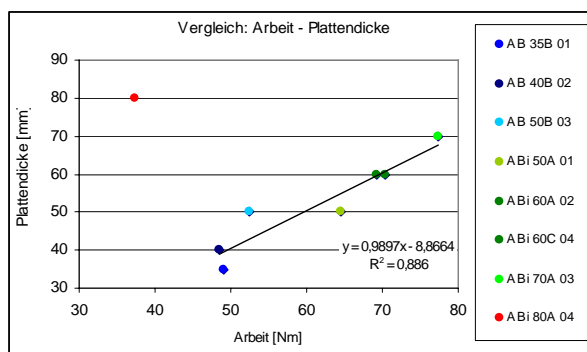
In den Vorversuchen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden des Weiteren die Verdichtungsverläufe einer Asphaltbindervariante und eines Asphaltbetons mit unterschiedlichen Probekörperdicken untersucht. Die Ergebnisse der Asphaltbindeermischung sind exemplarisch in Abbildung 31 dargestellt. Im Anhang 9.2.5.2 befinden sich ergänzend dazu die Ergebnisse der Asphaltbetonmischung.



**Abbildung 31:** Vergleich der Verdichtungsarbeit bei unterschiedlicher Probekörperdicke

Auch für diese Mischungen konnte ein ähnliches Verdichtungsverhalten festgestellt werden. Der mischgutspezifische Zusammenhang zwischen Probekörperdicke und aufzuwendender Verdichtungs-

energie ist mit Ausnahme der Probekörperdicke von 80 mm (es kann sich hierbei um einen Ausreißer handeln) für alle Versuchskörper ermittelbar (Abbildung 32).



**Abbildung 32:** Gegenüberstellung der Verdichtungsarbeit bei unterschiedlicher Plattendicke

Aufgrund der geringen Datenbasis sind aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen jedoch keine weitreichenden, verallgemeinernden Schlüsse abzuleiten. Die Größe des Einflusses der Plattendicke auf die notwendige Verdichtungsarbeit zur Ermittlung eines spezifischen Verdichtungszustandes in Bezug auf verschiedene Mischgutvarianten zu untersuchen, war nicht Bestandteil des Auftrages und konnte aufgrund des hierzu notwendigen umfangreichen Untersuchungsumfanges nur orientierend untersucht werden. Gesicherte quantifizierte Aussagen zur aufzuwendenden Verdichtungsenergie in Abhängigkeit der Probekörperhöhe unterschiedlicher Mischgutvarianten bedürfen eingehender und statistisch abgesicherter Untersuchungen.

Die Messdaten der Vorversuche und die Erkenntnisse aus [17] lassen jedoch den Schluss zu, dass die Verdichtungsarbeit bei vergleichender Betrachtung der Verdichtungsenergie unterschiedlicher Mischgutvarianten auf die Plattendicke bezogen werden muss.

Die Untersuchungsergebnisse der innerhalb dieses Forschungsvorhabens ermittelten Verdichtungsarbeiten sind in Tabelle 4 dargestellt. Bei Betrachtung der Maxima der Verdichtungskurven ist für die unterschiedlichen Mischungsvarianten gleichfalls eine Beziehung zwischen Verdichtungsarbeit und Plattendicke festzustellen.

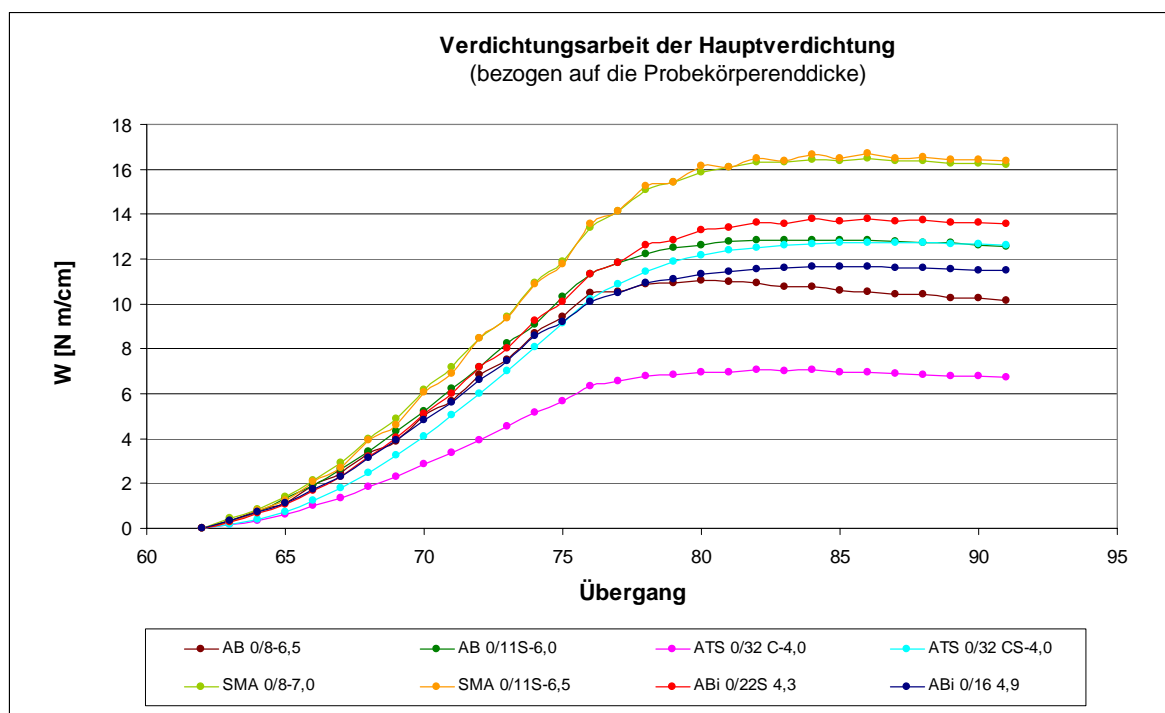
Mit Ausnahme der Mischgutvarianten ATS 0/32 C, die einen Extremwert im untersuchten Kollektiv darstellt, stehen die Mischungen ATS 0/32CS : ABi 22 : ABi 16 : SMA bzw. AB im Verhältnis von 3 : 2 : 1,5 : 1. Dieses Verhältnis entspricht dem Verhältnis der Plattendicken von 12 : 8 : 6 : 4 cm.

Um für die weiterführenden Untersuchungen die Verdichtungsverläufe der einzelnen Mischungen miteinander vergleichen zu können, wurde daher die Arbeit der Hauptverdichtung, wie bereits oben erläutert, auf die Plattendicke bezogen. Es ergibt sich hierfür die Einheit [Nm/cm]. Die so ermittelten Verläufe der Verdichtungsarbeit sind in Abbildung 33 dargestellt.

Hier ist eine deutliche Differenzierung der asphalten in leicht, mittel und schwer verdichtbare Mischungsvarianten erkennbar.

Mischgut	Plattenstärke [cm]	Verhältnis	Mittelwert der Kurvenmaxima (mittlere Bindemittelgehalte) [Nm]
ATS 0/32 C	12	3	84,07
ATS 0/32 CS	12	3	153,914
ABi 0/22 S	8	2	110,85
ABi 0/16	6	1,5	70,126
SMA 0/11S	4	1	64,84
SMA 0/8	4	1	66,28
AB 0/11S	4	1	51,71
AB 0/8	4	1	45,057

**Tabelle 4:** Vergleich der Mittelwerte der Kurvenmaxima untereinander



**Abbildung 33** Verlauf der Verdichtungsarbeit (Hauptverdichtung, mittlere Bindemittelgehalte) bezogen auf die Probekörperdicke

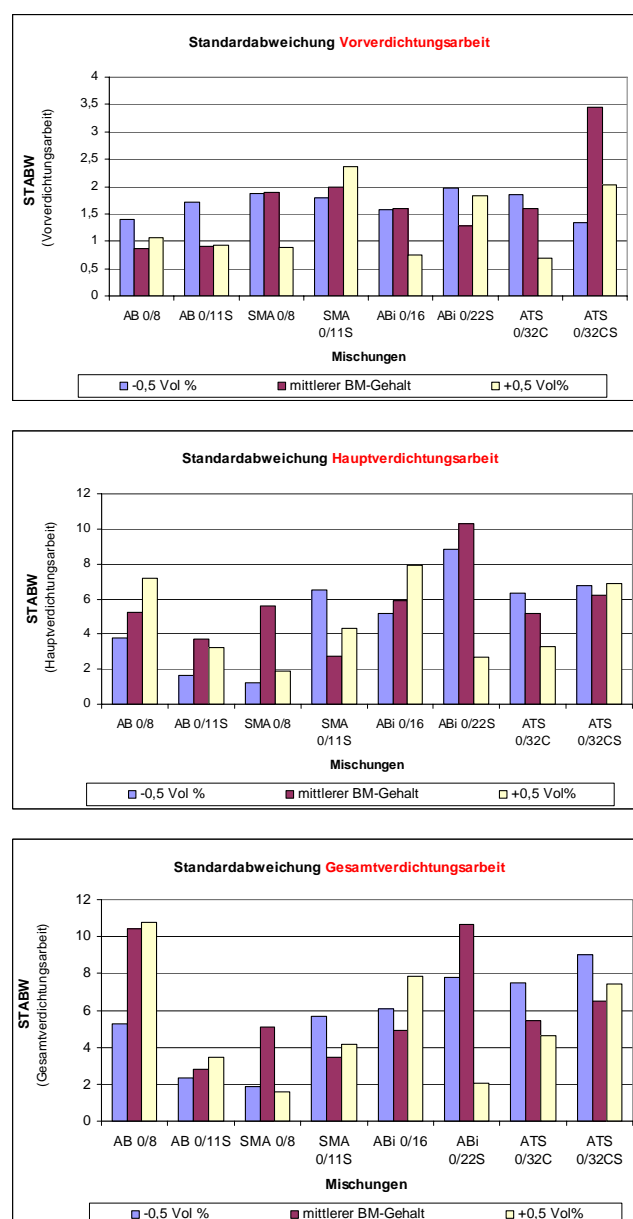
#### 4.1.3.5.3 Präzision der Messdatenerfassung

Nachfolgend ist die Präzision der Messdatenerfassung anhand der Standardabweichungen der innerhalb dieses Forschungsvorhabens ermittelten Daten der einzelnen Mischgutvarianten getrennt nach den Ergebnissen der Verdichtungsarbeit der Vorverdichtung, Hauptverdichtung und für den gesamten Prozess der Verdichtungsarbeit dargestellt. Für die Ermittlung der Standardabweichungen standen je Mischgutvariante  $N=6$  Einzelwerte zur Verfügung.

Verglichen mit den Ergebnissen der an zwei Mischungen durchgeführten Vorversuche (Kapitel 3.4.1) unterliegen die ermittelten Werte der Arbeit der Vorverdichtung in der Mehrzahl der Fälle für die maximalen Bindemittelgehalte derselben Streubreite. Mischgutspezifische Unterschiede zeigen sich bei den Standardabweichungen der mittleren und minimalen Bindemittelgehalte.

Für die Ergebnisse der Hauptverdichtung ( $W_{\text{Haupt}}$ ) und der Gesamtverdichtung ( $W_{\text{Gesamt}}$ ) sind für die Mehrzahl der untersuchten Mischungen ähnliche Streubreiten wie in den Vorversuchen erzielt worden.

Nur besonders leicht bzw. schwer verdichtbare Mischgutvarianten weisen größere Streubreiten auf.



**Abbildung 34:** Präzision der Messdatenerfassung des WSV anhand der innerhalb der Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse



## 4.2 Ergebnisse der Ermittlung der Verformungsbeständigkeit

### 4.2.1 Ergebnisse des Spurbildungsversuches

Bei der Prüfung Stahlrad/Wasser zeigte sich, dass alle Versuche vorzeitig abgebrochen werden mussten. Bereits zu Beginn der Untersuchung war bei den Asphalttragschichten und -betonen ein starkes Einsinken des Prüfrades festzustellen, welches, um die Funktionsfähigkeit des Versuches nicht außer Kraft zu setzen, zu einem Abbruch des Versuches vor Erreichen der in den TPA festgeschriebenen 20.000 Überrollungen führte (Abbildung 35). Bei allen untersuchten Mischungen fand eine Zerstörung des Gefüges mit einhergehender Kornzertrümmerung statt.



**Abbildung 35:** Spurrinne, ATS 0/32 C mit 3,5; 4,0; 4,5 M % Bindemittel im Mischgut

Um dennoch vergleichende Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit mit Hilfe des Spurbildungsversuches an allen

unter 3.1.1 aufgeführten Mischgutvarianten vornehmen zu können, wurden die Versuchsbedingungen dergestalt modifiziert, dass anstelle eines Stahlrades mit einem Gummirad (Vollgummireifen auf Stahl) und anstelle einer Temperierung der Proben im Wasserbad von 50 °C mit einer Wassertemperatur von 60°C geprüft wurde.

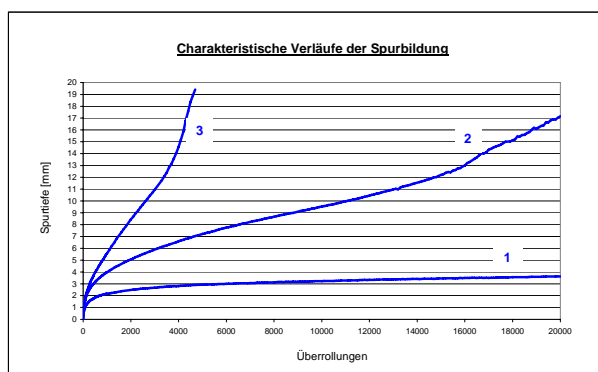
Beim Spurbildungsversuch können, wie bei allen Versuchen zum Verformungsverhalten zunächst ungeachtet der Spurrinnentiefe bei Versuchsende, die drei in Abbildung 36 dargestellten charakteristischen Verläufe unterschieden werden.

1) Nach Überwindung der Anfangskrümmung wird die Verlaufskurve immer flacher, d.h. die Zunahme der Spurrinnentiefe pro Anzahl der Überrollungen wird immer geringer; der Asphalt stabilisiert sich. Die Kurven nähern sich nach einer Konsolidierungsphase, die nach ca. 1000 bis 2000 Überrollungen abgeschlossen ist, asymptotisch einem Endwert an.

2) Nach Überwindung der Anfangskrümmung steigt die Spurrinnentiefe zunächst langsamer, später schneller an. Ursache für diesen Anstieg ist eine Zerstörung des Gefüges des Asphalt (Ablösung des Bindemittels von der Gesteinsoberfläche: Stripping-Effekt), einem Vorgang, der

aufgrund der damit verbundenen Kohäsionsverluste zu einem Versagen der Asphaltprobe und damit zu einem frühzeitigen Ende des Spurbildungsversuches führt.

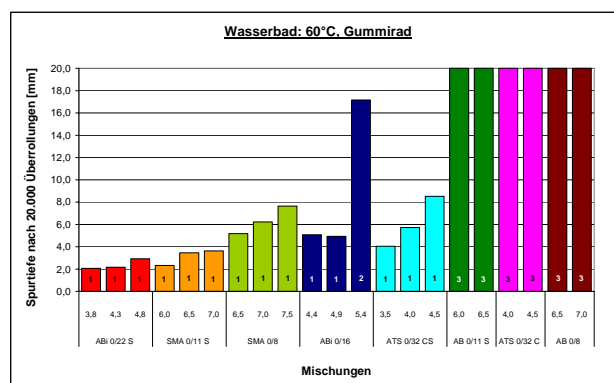
3) Nach Überwindung der Anfangskrümmung verläuft die Spurbildung nahezu linear bis zum Versuchsende. Hier findet von Anfang an eine Zerstörung des Gefüges statt. Die Spurrinnentiefe nimmt stetig stark zu.



**Abbildung 36:** Charakteristische Verläufe der Spurbildung

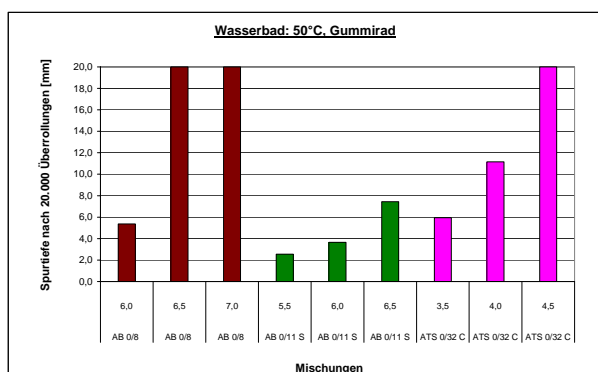
In Abbildung 37 und Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Spurbildungsversuche aufgeführt. Die Asphalte sind in Abbildung 37 entsprechend ihrer mittleren absoluten Spurrinnentiefe gereiht. Innerhalb eines Asphaltes war die Mischung mit reduziertem Bindemittelgehalt jeweils die standfesteste, bei der Mischung mit erhöhtem Bindemittelgehalt war die Spurbildung am ausgeprägtesten. Neben der Auswertung der absoluten Spurrinnentiefe nach jeweils 20.000 Überrollungen soll zur besseren

Charakterisierung der Verformungseigenschaften der Mischungen und zur Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Verdichtbarkeit der gesamte Verlauf der Spurbildung betrachtet werden. Im Anhang 9.3.1 sind die Abbildungen zu den einzelnen Mischgutvarianten aufgeführt. Zur Kategorisierung der Varianten bezüglich der charakteristischen Verläufe (1, 2 oder 3) sind die Balken in Abbildung 37 entsprechend gekennzeichnet.



**Abbildung 37:** Spurrinnentiefe bei Versuchsdurchführung Gummirad, Wasserbad 60°C

Es zeigt sich, dass die Asphaltbetonproben und die Proben der Asphalttragschicht ATS 0/32C den Spurbildungstest auch unter den modifizierten Bedingungen nicht bestanden. Diese Proben wurden daher darüber hinaus bei einer Temperatur von 50 °C getestet. Das Ergebnis ist in Abbildung 38 dargestellt.



**Abbildung 38:** Spurrinnentiefe bei Versuchsdurchführung, Gummirad, Wasserbad 50°C

Auch bei Betrachtung dieser Darstellung wird deutlich, dass die AB 0/8 –Mischung der Verformung kaum Widerstand entgegensetzt.

#### 4.2.2 Ergebnisse der dynamischen Stempleindringtiefe

Auch die Versuche zur Ermittlung der dynamischen Stempleindringtiefe konnten nicht bei allen Mischungsvarianten bis zum Ende des Versuches (10.000 Lastwechsel) durchgeführt werden. Im Fall der Mischungen ABi 0/16 und AB 0/8 kündigte sich im Laufe der durch den Versuch indizierten Verformung eine Gefügestörung an, die zum vorzeitigen Abbruch des Versuches führte. Als am wenigsten belastbar stellten sich die Mischgutvarianten ATS 0/32C-4,0 und 4,5 heraus. Die Probekörper dieser Mischgutvarianten haben bereits nach 1000 Lastwechseln die maximale Eindringtiefe erreicht.

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse der dynamischen Stempleindringtiefe am Versuchsende nach 10.000 Lastwechseln bzw. bei Abbruch des Versuches dargestellt. Die Ergebnisse stellen den Mittelwert aus jeweils zwei untersuchten Probekörpern je Mischgutvariante dar.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb einer Mischung sind bei den vorzeitig beendeten Asphalten die Eindringtiefen aller Mischgutvarianten zum Zeitpunkt des Abbruches der verformungsempfindlichsten Mischgutvariante dargestellt.

Der gesamte Verlauf der Eindringtiefe jeder Mischgutvariante ist in den Abbildungen im Anhang 9.3.2 aufgeführt. Im Folgenden soll nur kurz auf die unterschiedlichen Verformungseigenschaften der untersuchten Mischgutvarianten eingegangen werden.

Wie bereits bei der Auswertung der Spurbildungsversuche dargestellt, kann das Verformungsverhalten der Mischgutvarianten auch beim Versuch der dynamischen Stempleindringtiefe in die drei unterschiedliche Verläufe unterteilt werden. Zur Kategorisierung der Varianten bezüglich der charakteristischen Verläufe sind die Balken in Abbildung 39 wiederum gekennzeichnet. Es sei hierbei außerdem auf die Abbildung 36 verwiesen.

Die Entwicklung der Eindringtiefe der Mischungen SMA 0/8, SMA 0/11S, ABi 0/22S, ATS 0/32 CS, AB 0/11S verhalten sich analog der Verlaufskurve 1. Hierbei wird die Zunahme der Stempeleindringtiefe mit zunehmender Lastwechselzahl immer geringer, der Asphalt stabilisiert sich. Die Kurven nähern sich jeweils einem Endwert an. Im Vergleich der am Versuchsende ermittelten Messergebnisse der Eindringtiefe kann festgestellt werden, dass mit steigendem Bindemittelgehalt innerhalb einer Mischung die Eindringtiefe zunimmt.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Asphalten mussten im Fall der Mischung ABi 0/16 für alle Bindemittelgehalte, ATS 0/32C-4,0, 4,5 und AB 0/8-6,0 und -7,0 die Versuche vor Erreichen des Versuchsendes abgebrochen werden. In allen untersuchten Fällen fand eine Gefügezerstörung und vorzeitiges Versagen der Probekörper statt. Im Verlauf des Versuches steigt die Eindringtiefe zunächst langsam dann schneller an. Der Wendepunkt dieser Kurve ist im Fall der Mischung ABi 0/16 bereits nach 2000 Lastwechseln erreicht.

Für die Mischung ATS 0/32C ist ein besonders steiler stetiger Anstieg der Eindringtiefe für den gesamten Versuchsverlauf festzustellen. Während sich die Entwicklung der Eindringtiefe der Mischgutvariante mit dem Bindemittelgehalt 3,5 M.-

% analog der Verlaufskurve 1 bewegt, tritt das Erreichen der maximalen Eindringtiefe und damit vorzeitige Versagen im Fall der Mischgutvarianten mit einem Bindemittelgehalt von 4,0 und 4,5 M.-% bereits nach 2000 Lastwechseln ein. Der besonders steile Anstieg der Kurve der Eindringtiefe deutet in diesen Fällen auf eine Zerstörung des Gefüges unmittelbar nach Beginn des Versuches hin. Zur Charakterisierung wird daher hierfür die Verlaufskurve 3 gewählt. Eine Gefügezerstörung findet auch im Fall der Mischgutvariante AB 0/8-6,0 statt. Der Wendepunkt der Verlaufskurve der Eindringtiefe befindet sich hierbei jedoch erst bei ca. 5000 Lastwechseln.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Innerhalb einer Mischung stellt sich, wie bereits beim Versuch der Spurbildung festgestellt wurde, die Mischungsvariante mit dem geringsten Bindemittelanteil als die verformungsbeständigste dar. Bei den Mischgutvarianten mit erhöhtem Bindemittelgehalt war die Eindringtiefe am ausgeprägtesten. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Asphalttragschicht ATS 0/32 CS-4,5 und ATS 0/32 C für die Bindemittelgehalte 4,0 und 4,5 M.-% sowie für den Asphaltbeton AB 0/8-7,0. Mit steigendem Bindemittelgehalt nimmt die Eindringtiefe zu, die Mischung ist weicher und weniger verformungsresistent. Leicht ver-

dichtbare Mischungsvarianten neigen zur Gefügezerstörung.

In Anlehnung an [23] lassen sich die Asphalte auch bezüglich ihres Verformungsverhaltens unterteilen. Demnach werden die Mischgutvarianten ABi 0/16, AB 0/8 und ATS 0/32C die bereits bei 10.000 Lastwechseln überwiegend eine Verformung >75 ‰ aufweisen zu den „weichen“ Asphalten und die Mischgutvarianten ABi

0/22S und ATS 0/32CS deren Verformung bei 10.000 Lastwechseln etwa bei 10‰ liegt zu den „steifen“ Asphalten gezählt (siehe Abbildung 40). Asphalte deren Verformung bei 10.000 Lastwechseln etwa 35‰ beträgt werden dem mittelplastischen Bereich zugeordnet. Hierzu zählen die Asphaltvarianten SMA 0/8, SMA 0/11S und AB 0/11S.

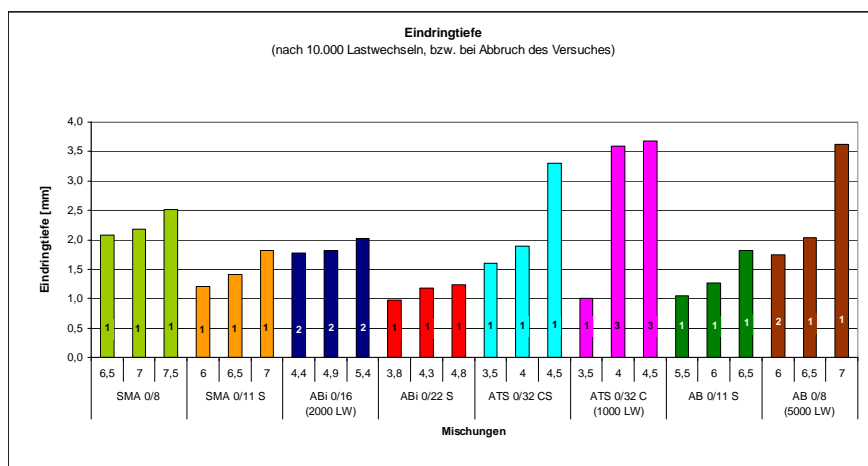


Abbildung 39: Dynamische Stempelleindringtiefe - Eindringtiefe [mm] am Versuchsende

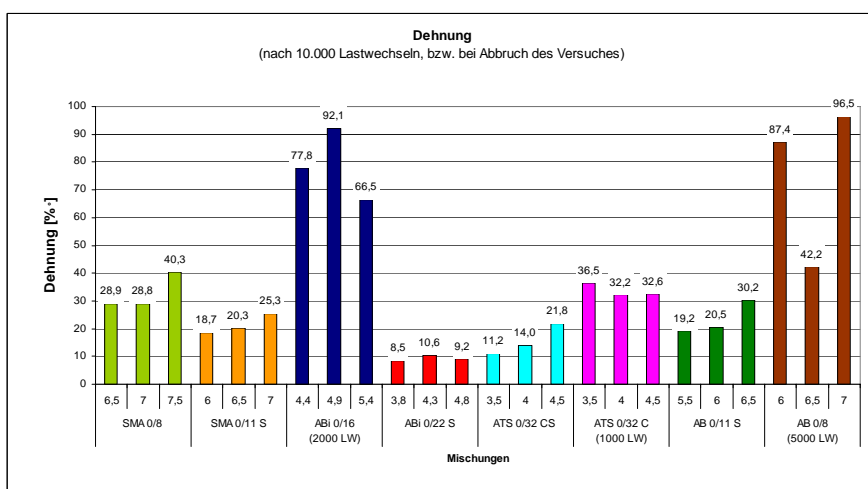


Abbildung 40: Dynamische Stempelleindringtiefe - Dehnung [%] am Versuchsende

## 5 Auswertung

### 5.1 Vergleichende Untersuchungen - Ermittlung eines Kennwertes der Verdichtbarkeit

Um die in der dargestellten Verläufe der Verdichtungsarbeit innerhalb der Hauptverdichtung bezüglich der Charakterisierung unterschiedlicher Mischgutvarianten zu untersuchen, wurde die Annäherung an verschiedene mathematische Funktionen untersucht. Im Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Funktionen lassen sich die Verdichtungsverläufe aller Mischungen mit der Boltzmann-Konstanten am besten beschreiben. Hierbei wurde ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,99594$  erreicht (vgl. Abbildung 43).

Die Boltzmann-Funktion, mit welcher man die nachstehend aufgezeigte sigmoidale (sigmaförmig, S-förmige) Kurve erhält, bestimmt sich durch die folgende Gleichung.

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2$$

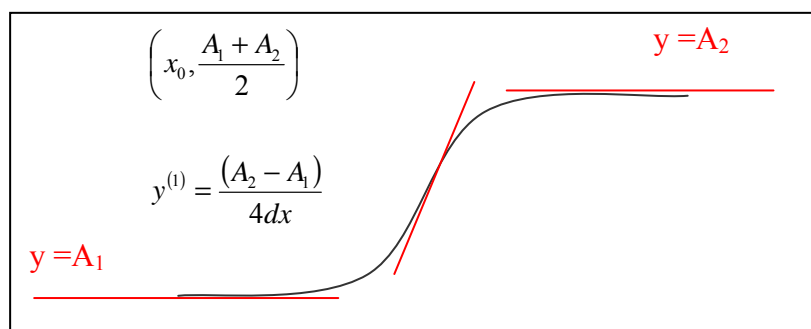
$A_1$  stellt hierbei den Anfangswert und  $A_2$  den Endwert dar, dem sich die Kurve im Unendlichen annähert. Die Funktion ist symmetrisch um den Schnittpunkt mit der Tangente, welcher die Koordinaten

$\left(x_0, \frac{A_1 + A_2}{2}\right)$  besitzt. Die folgende Funktionsgleichung  $y^{(1)} = \frac{(A_2 - A_1)}{4dx}$  beschreibt

den Verlauf der Tangente.

Um den Verdichtungsverlauf mit Hilfe dieser Kurveninterpolation für den Verlauf der summarisch eingebrachten Verdichtungsarbeit zu deuten, wird der Variablen  $A_1$  der Beginn der Verdichtungsarbeit ( $W_A$ ) und der Variablen  $A_2$  das Ende ( $W_E$ ) zugeordnet. Dabei wird in Kauf genommen, dass dem gewählten Modell ein symmetrischer Verlauf der Verdichtung zu Grunde liegt, was in der Praxis nicht der Fall sein wird.

Zunächst soll der gesamte Verlauf der in den Probekörper eingebrachten Verdichtungsarbeit, d.h. der Verdichtungs- und



Entlastungsvorgang untersucht werden. Bei Betrachtung der Kurvenverläufe lässt sich aufgrund der Normierung des Verdichtungs Vorganges die o.g. Formel wie folgt vereinfachen:

$$W(x) = W_E - \frac{W_E}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}}$$

In Tabelle 5 sind die Parameter der Kurveninterpolation dargestellt. Für die Übersichtlichkeit wurden hier im Gegensatz zur Abbildung 41 nur die mittleren Bindemittelgehalte aufgeführt.

Eingangswerte der Kurveninterpolation sind die Größen  $W_A$  und  $W_E$ . Der  $x_0$ -Wert kennzeichnet die Mittelpunktskoordinate der jeweiligen Kurve und bestimmt sich aufgrund der symmetrischen Verteilung durch diesen Anfangs- und Endwert nach der oben stehenden Formel. In der rechten Spalte sind die jeweils erhaltenen Bestimmtheitsmaße für die Kurvenanpassung aufgeführt.

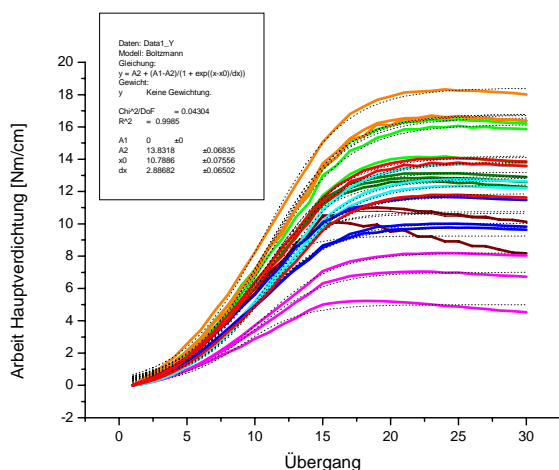
Es zeigt sich, dass sich die Verdichtungskurven mit einer guten Präzision an die Boltzmann-Funktion anpassen lassen. Die einzelnen Kurvenverläufe unterscheiden sich insbesondere durch den Endwert, den  $W_E$ -Wert, voneinander. Der  $W_E$ -Wert kann als ein Maß für die zur Erzielung eines bestimmten Verdichtungserfolges bei einem spezifischen Mischgut zu investierende Verdichtungsarbeit gedeutet werden. Große  $W_E$ -Werte kennzeichnen demzufolge schwer verdichtbare Mischgutvarianten, kleine  $W_E$ -Werte leicht verdichtbare.

Vorraussetzung für die Anwendung dieses Ansatzes sind die nachfolgend aufgeführten idealisierten Vorstellungen

- die Dichteverteilung im WSV-Probekörper ist homogen
- es finden praktisch keine Kornzertrümmerungen statt
- die Temperaturveränderungen während des Verdichtungsprozesses sind vernachlässigbar

	$W_E$	$x_0$	$R^2$
SMA 0/8	16,6	10,815	0,99803
SMA 0/11S	16,2	10,920	0,99768
ABi 0/22	13,8	10,872	0,99762
AB 0/11	12,9	10,177	0,99726
ATs 0/32 CS	12,8	11,293	0,99898
ABi 0/16	11,7	10,127	0,99705
AB 0/8	11,3	9,818	0,99531
ATs 0/32 C	7,0	9,977	0,99662

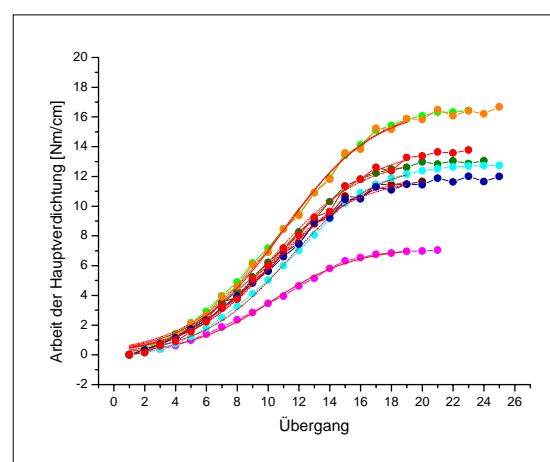
**Tabelle 5:** Zusammenstellung der Parameter bei Kurvenanpassung mittels Boltzmann-Konstanter (mittlere Bindemittelgehalte)



**Abbildung 41:** Kurvenanpassung mit der Boltzmann-Konstanten (alle 30 Werte) Zuordnung gemäß Abb. 45

Betrachtet man die Kurven in Abbildung 41, so ist festzustellen, dass insbesondere bei der Mischgutvariante AB 0/8 (braune Linie) und bei der Tragschicht ATS 0/32 C (rosa Linie) nach Beendigung des Verdichtungsvorganges ein Abfall der ermittelten Werte der Arbeit stattfindet. Dieser Abfall resultiert aus der Entspannung des Probekörpers während der Entlastungsphase, wenn die auf die Probekörperoberfläche wirkende Kraft nicht ausreicht, um der Entspannung entgegenzuwirken. Hieraus ergeben sich dann infolge der Aufzeichnung negativer Wege auch für die Arbeit negative Beträge, die im kumulativen Verlauf der Arbeit einen Abfall der Werte zur Folge haben. Um diese, im Vorfeld der Untersuchungen einer beliebigen Mischung nicht vorhersehbare, Reaktion zu

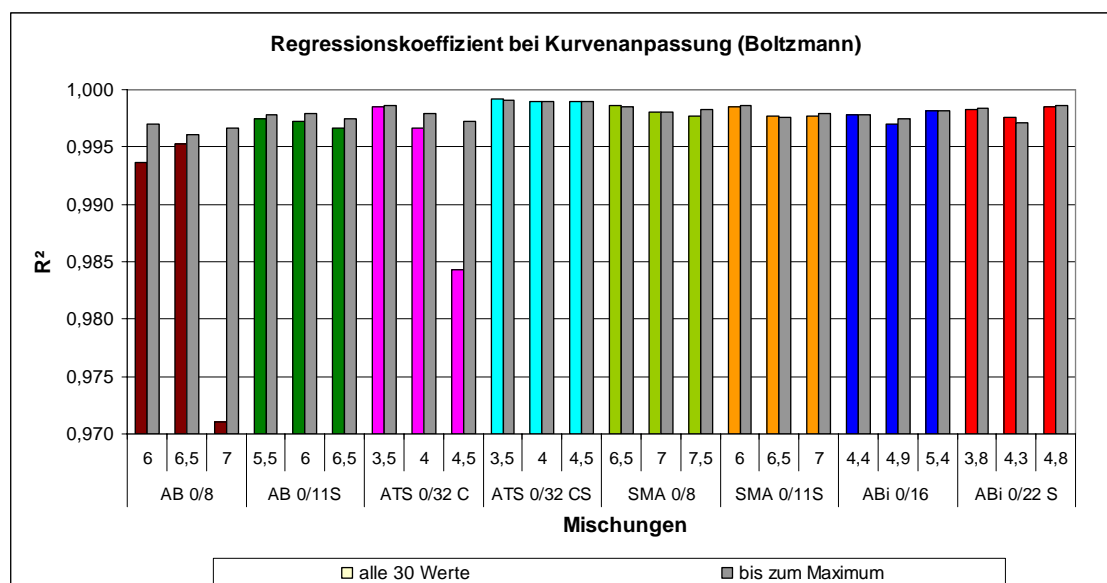
berücksichtigen und um eine genauere mathematische Beschreibung der Verdichtungseigenschaften zu erhalten, wurde die Kurvenanpassung an allen Mischgutvarianten bis zum Erreichen des Maximums der Raumdichte untersucht. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 42 und im Anhang 9.2.6 dargestellt.



**Abbildung 42:** Kurvenanpassung mit der Boltzmann-Konstanten (bis zum Erreichen des Maximums der Raumdichte) Zuordnung gemäß Abb. 45

Beim Vergleich der Bestimmtheitsmaße beider Interpolationen zeigt sich in allen untersuchten Fällen jeweils ein Anstieg der Werte der Untersuchung bis zum Erreichen der maximalen Raumdichte gegenüber der Betrachtung des Vorganges bis zum Ende der Entlastung. Insgesamt erhöht sich der mittlere erreichte Regressionskoeffizient somit von  $R^2 = 0,99598$  auf  $R^2 = 0,99792$  (siehe Abbildung 43).



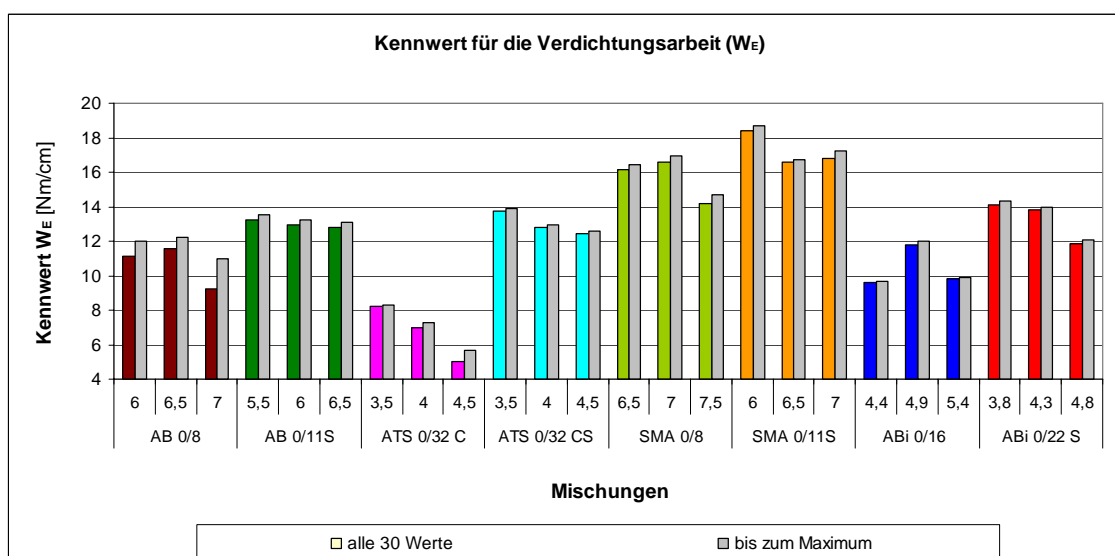


**Abbildung 43:** Vergleich der Regressionskoeffizienten bei Anpassung mittels Boltzmann Konstante

Eine Differenzierung der Verdichtungsarbeit in Abhängigkeit des Bindemittelgehaltes konnte für alle Mischgutvarianten außer der des ABi 0/16

Oermittelt werden. Hierbei fällt erwartungsgemäß der  $W_E$ -Wert mit steigendem Bindemittelgehalt in dem Mischgut. In der

Abbildung 44 sind die  $W_E$ -Werte aller Mischgutvarianten bei Betrachtung des Verlaufes der Verdichtung einschließlich des Entlastungsvorganges (bunte Balken) den  $W_E$ -Werten bei Erreichen der maximalen Raumdichte (graue Balken) gegenübergestellt.



**Abbildung 44:** Kennwert für die Verdichtungsarbeit  $W_E$

## 5.2 Gesamtauswertung/ Folgerungen

### 5.2.1 Auswertung zur Beschreibung der Verdichtbarkeit mit dem Walzsektorverdichtungsgerät

Die Verdichtbarkeit eines Mischgutes ist ein Maß für die bei einer bestimmten Art der Verdichtung aufzuwendende Energie, die zum Erreichen der optimalen Raumdichte und des optimalen Hohlraumgehaltes erforderlich ist. Die Verdichtbarkeit ist materialabhängig und kann mit Hilfe der schlagenden Verdichtung des Marshall-Verfahrens über den D-Wert ausgedrückt werden.

Der für die walzende Verdichtung des WSV-Gerätes im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelte adäquate Kennwert ist der  $W_E$ -Wert, welcher die in den Probekörper eingebrachte Energie in Form von verrichteter Arbeit widerspiegelt. Eine leichte Verdichtbarkeit eines Mischgutes wird demzufolge durch einen geringen D-Wert und einen geringen  $W_E$ -Wert gekennzeichnet. Für schwer verdichtbare Asphalte verhält es sich entgegengesetzt.

Wie die Auswertung des Hohlraumgehaltes und des Verdichtungsgrades zeigt, kann die vorliegende Arbeitsanleitung für die WSV-Verdichtung nicht auf alle Mischgutvarianten uneingeschränkt angewendet werden. Die Entwicklung der Hohlraumgehalte kann hierbei in zwei Fälle unter-

schieden werden. Während sich im Fall a) der Hohlraumgehalt während der Verdichtung innerhalb der in den ZTV Asphalt-StB [33] bzw. ZTVT-StB [34] geforderten Werten bewegt, sinkt er im Fall b) am Ende des Verdichtungs Vorganges unter die festgelegten Grenzwerte ab. Vereinzelt ergeben sich rechnerisch während der Verdichtung sogar negative Hohlraumgehalte. Das letztgenannte Verhalten deutet auf eine Überverdichtung hin. In diesem Fall ist die Auswertung der ermittelten WSV-Verdichtungsdaten nicht sinnvoll, da die zur Verfügung stehenden Messwerte, wie in Kapitel 4.1.3.2 erläutert, aus maschinenbau- und messtechnischen Gründen zu unsicher sind, um fundierte Aussagen zur spezifischen Verdichtung eines speziellen Mischgutes zu treffen.

Dieses Phänomen zeigt sich insbesondere bei den leicht verdichtbaren Mischgutvarianten AB 0/8-6,5; AB 0/8-7,0; AB 0/11S-6,5 und ATS 0/32C-4,5 (siehe Anhang 9.2.3 Hohlraumgehalte). Um dennoch Aussagen zur Verdichtbarkeit dieser Mischgutvarianten mit Hilfe des WSV-Verfahrens treffen zu können, muss die vorgegebene Arbeitsanleitung modifiziert werden. Diese Möglichkeit ist in der Arbeitsanleitung ALP A- Stb, Teil 11, [9] bereits eröffnet.

Einen Sonderfall stellt die Mischgutvariante SMA 0/8-7,5 dar. Hier sinkt der Hohlraumgehalt während der Verdichtung ebenfalls, jedoch nur kurzfristig auf negative Werte. In diesem Bereich der Verdichtung wird, wie gelegentlich auch bei der Verdichtung durch die Walze in situ beobachtet werden kann, auf der Probekörperoberfläche ein Wulst hin und her bewegt. Im Gegensatz zu den vorgenannten Mischgutvarianten besitzt dieses Mischgut jedoch ein starkes Rückstellungsvermögen, so dass sich der Hohlraumgehalt zum Ende der Verdichtung wieder auf ein Niveau innerhalb der von der ZTV Asphalt-StB [33] geforderten Werte erhöht. Zur Auswertung der Verdichtung dieser Mischgutvariante können daher alle Daten verwendet werden.

Es ist bekannt, dass mit Hilfe der Bestimmung des D-Wertes bei der Marshall-Verdichtung die Verdichtungseigenschaften von Mischgutvarianten bis zu einem Größtkorn von 22,0 mm sehr genau beschrieben werden können.

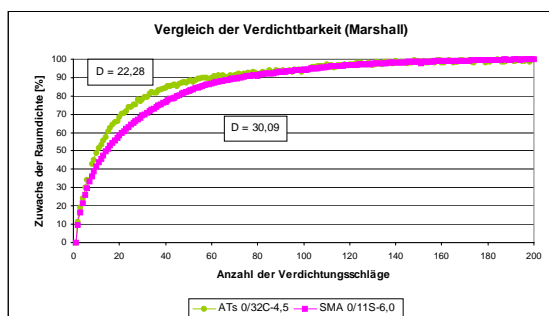
Da der  $D_{WSV}$ -Wert, wie bereits im Kapitel 4.1.3.3. erläutert wurde, die WSV-Verdichtung nur ungenügend beschreibt und daher als Vergleichskriterium zur Marshallverdichtung nicht herangezogen werden kann, besteht die Notwendigkeit der Schaffung eines neuen Kennwertes in

Anlehnung an die Entwicklung der Raumdicke des Marshall-Verfahrens.

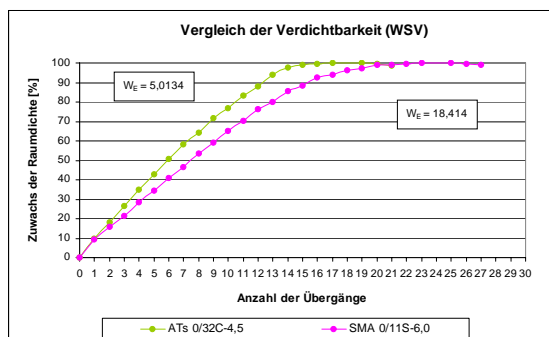
Die Auswertungen in Kapitel 5.1.1 haben ergeben, dass sich zur mathematischen Beschreibung des Verdichtungsverlaufes die in den Probekörper eingebrachte, summarisch dargestellte Verdichtungsarbeit eignet. Mit Hilfe der mathematischen Kurvenanpassung durch die Boltzmann-Funktion gelingt es, für alle untersuchten Mischgutvarianten eine mathematische Annäherung an die empirischen Daten mit einem hohen Bestimmtheitsmaß zu erhalten. Der zur Marshallverdichtung adäquate Kennwert zur Charakterisierung der Verdichtungswilligkeit der Walzsektorverdichtung wird als  $W_E$ -Wert bezeichnet. Er ist der Endwert der angenäherten Funktion und ein Maß für die in den Probekörper eingebrachte Gesamtverdichtungsarbeit.

Vergleicht man die Entwicklung des Verdichtungskennwertes  $D$  in Abhängigkeit von der eingebrachten Verdichtungsenergie (Anzahl der Schläge) unterschiedlicher Mischgutvarianten miteinander, so kann an der Krümmung der Kurve (Geschwindigkeit der Dichtezunahme) eine Unterscheidung in leicht bzw. schwer verdichtbare Mischgutvarianten getroffen werden. Je kleiner der Parameter  $D$  ist, desto stärker ist die Krümmung. Die Dichtezunahme ist anfangs groß und am Ende des Verdich-

tungsprozesses nur noch gering. Kleine  $D$ -Werte charakterisieren leicht verdichtbares Mischgut, steigende  $D$ -Werte kennzeichnen zunehmend schwerer verdichtbare Mischgutvarianten. Diese Charakteristik kann auch für die  $W_E$ -Werte festgestellt werden. In den Abbildung 45 und Abbildung 46 ist die Entwicklung der Raumdichte in der Form des prozentualen Zuwachses der Raumdichte exemplarisch für zwei Mischungsvarianten für die Marshall- und Walzsektorverdichtung dargestellt.



**Abbildung 45:** Vergleich der Verdichtbarkeit anhand der  $D$  Werte der Marshallverdichtung



**Abbildung 46:** Vergleich der Verdichtbarkeit anhand der  $W_E$  Werte der Walzsektorverdichtung

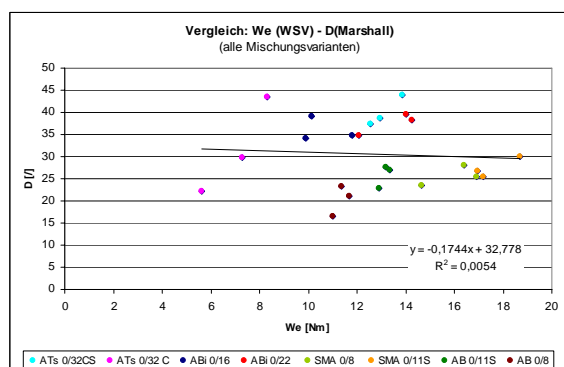
Die Abbildung 46 zeigt, dass sich die leichter verdichtbare Mischgutvariante ATs 0/32C-4,5 nicht nur durch den größeren Anstieg der Kurve sondern auch durch das vorzeitige Erreichen des Verdichtungsmaximums (Raumdichtemaximum nach bereits 15 Segmentübergängen) von dem schwerer verdichtbaren SMA deutlich unterscheidet. Bei der Walzsektorverdichtung charakterisieren kleine  $W_E$ -Werte leicht verdichtbare und große  $W_E$ -Werte schwer verdichtbare Mischgutvarianten.

Wie bereits die Untersuchung der Hohlraumgehalte der verdichteten Proben zeigte, können insbesondere schwer verdichtbare Asphalte mit den im Rahmen dieser Untersuchung festgelegten Bedingungen der Walzsektorverdichtung gem. den in den ZTV Asphalt -StB bzw. ZTVT -StB [33,34] angegebenen Eigenschaften hergestellt werden. Der Verlauf der Verdichtungsarbeit kann mit einer hohen Genauigkeit mathematisch dargestellt werden, so dass im Gegensatz zur Marshallverdichtung die Möglichkeit besteht, das Verdichtungsverhalten insbesondere auch grobkörniger Mischgutvarianten, wie Binder- und Tragschichten, ausreichend genau mit Hilfe des Kennwertes  $W_E$  der Walzsektorverdichtung zu beschreiben.

Die Auswertung der  $W_E$ -Werte leicht verdichtbarer Mischungen ist jedoch aufgrund der teilweise stattfindenden Überverdicht-

tung und infolge der unsicheren Höhenda-  
atenaufzeichnung ungenau. Sie kann daher  
in der Folge zur Charakterisierung der  
Verdichtbarkeit dieser Mischgutvarianten  
und bezüglich des Vergleiches zu anderen  
Mischgutvarianten zu nicht plausiblen Er-  
gebnissen führen. Die Auswertung der  $W_E$ -  
Werte dieser Mischungen sollte daher erst  
nach Anpassung des Verdichtungsregimes  
des Walzsektorverdichtungsverfahrens an  
die hierzu spezifische benötigte Verdich-  
tungsenergie erfolgen.

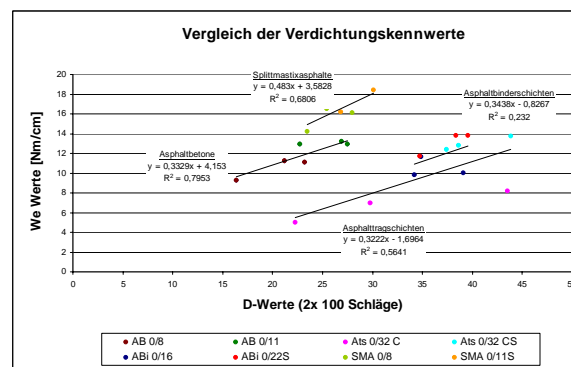
In Abbildung 47 sind die Verdichtungs-  
kennwerte aller untersuchten Mischgutva-  
rianten beider Verdichtungsverfahren ge-  
genübergestellt. Der Vergleich der Kenn-  
größen zeigt aus den oben genannten  
Gründen keinen sinnvollen Zusammen-  
hang auf.



**Abbildung 47:** Vergleich der Verdichtungs-  
kennwerte der Marshall- und  
Walzsektorverdichtung

Der nach Mischgutvarianten getrennte  
Vergleich der Verdichtungskennwerte bei-  
der Verfahren ist in Abbildung 48 darge-  
stellt. Die sich hierbei für Asphaltbetone,

Spplittmastixasphalte und Asphalttrag-  
schichten darstellenden, verbesserten Zu-  
sammenhänge können als Indiz für den  
zwischen beiden Verdichtungskennwerten  
vorhandenen Zusammenhang gedeutet  
werden.



**Abbildung 48:** Vergleich der Verdichtungs-  
kennwerte (Marshall- und Walz-  
sektorverdichtung) bezogen auf  
einen Asphalttyp

Als eine zusätzliche Ursache der in  
Abbildung 47 dargestellten unzureichen-  
den Korrelation der Verdichtungskennwer-  
te ist die Art der Verdichtungswirkung  
anzusehen. Durch den sich vom Marshall-  
versuch unterscheidenden Energieeintrag  
kann sich die bei der Walzsektorverdich-  
tung ermittelte Reihung der Messwerte der  
mit verschiedenen Bindemittelmengen  
untersuchten Mischgutvarianten von den  
bei der Marshallverdichtung festgestellten  
Werten unterscheiden. Mit steigenden Bin-  
demittelgehalten wäre dann nicht zwangs-  
läufig ein Abfall der Verdichtungskenn-  
werte zu erwarten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich das Walzsektorverfahren zur Beschreibung der Verdichtbarkeit eignet, wenn die Boltzmann-Funktion zugrunde gelegt wird. Die mischgutspezifische Beschreibung der Verdichtungswirkung kann über den Kennwert  $W_E$  in [Nm/cm] in Form der zur Verdichtung erforderlichen charakteristischen Verdichtungsarbeit erfolgen.

Die zur Auswertung dieser Arbeit benötigte Verdichtungsverlauf ist aber abhängig vom angewandten Verdichtungsregime. Voraussetzung für die einwandfreie mischgutspezifische Beschreibung der Verdichtbarkeit ist daher die Ermittlung eines für das jeweilige Mischgut charakteristischen Verdichtungsverlaufes.

Insbesondere für den Vergleich des für den Marshallprobekörper bestehenden Bewertungshintergrundes ist es daher in erster Linie von Bedeutung, mit dem WSV Probekörper herzustellen, die Dichtemerkmale ( $H_{bit}$ ,  $k$ ) aufweisen, welche innerhalb der von den ZTV Asphalt-StB und ZTVT – StB festgelegten Grenzwerte liegen.

Mit dem im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ausschließlich angewandten Verdichtungsprogramms (Braunschweiger Modell) ist es hauptsächlich für grobkörniges und schwer verdichtbares Asphaltmischgut gelungen, Probekörper mit Dichtemerkmale herzustellen, welche den in

den ZTV Asphalt-StB und ZTVT-StB angegebenen Grenzwerten entsprechen. Die aus der Verdichtung dieser Mischungen abgeleiteten Verdichtungsverläufe sind charakteristisch für die spezifische Verdichtung dieser Mischungen und geeignet für die Beschreibung der Verdichtbarkeit über die Ermittlung eines Kennwertes ( $W_E$ ).

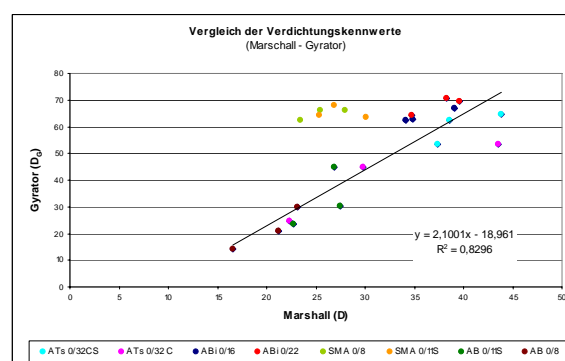
Bei leicht verdichtbaren Mischgutvarianten ist die Ermittlung eines Kennwertes zur Beschreibung der Verdichtbarkeit mit den in dieser Untersuchung festgelegten Randbedingungen der Verdichtungswirkung (Braunschweiger Modell) nur bedingt geeignet. Die Gründe dafür liegen einerseits in der möglicherweise stattfindenden Überverdichtung und andererseits in der aus maschinenbau- und messtechnischen Gründen ungenauen Probekörperhöhenaufzeichnung.

Für eine adäquate Beschreibung der Verdichtungseigenschaften dieser Mischungen ist es daher notwendig, das Verdichtungsregime (Verdichtungsprogramm) hinsichtlich der einzubringenden Verdichtungsenergie, wie bereits in [9] angedeutet, zu modifizieren. Gegebenenfalls würden auch funktions- oder messtechnische Veränderungen des Walzsektorverdichtungsgerätes zur Ermittlung mischgutspezifisch korrekter Verdichtungsverläufe beitragen.

Übergangsweise lässt sich das momentane Defizit der Beschreibung der Verdichtbarkeit leicht verdichtbarer Mischgutvarianten auch durch die Ergebnisse des Marshallverfahrens (D-Wert) oder Gyratorverfahrens ( $D_G$ -Wert) ergänzen, deren Genauigkeit insbesondere im Bereich leicht verdichtbarer und feinkörniger Mischgutvarianten liegt. Der Vergleich der Verdichtungskennwerte  $D$  beider Verfahren ist in Abbildung 49 dargestellt. Das angegebene Bestimmtheitsmaß der dargestellten Regression bezieht sich hierbei auf alle an der Untersuchung beteiligten Mischgutvarianten, mit Ausnahme der Splittmastixasphalte. Die verhältnismäßig gute Korrelation der Verdichtungskennwerte beider Verfahren lässt auf eine vergleichbare Wirkungsweise der Verfahren schließen.

Im Gegensatz zum Vergleich des Marshallverfahrens mit dem Walzsektorverfahren überlagern sich beim Vergleich des Marshallverfahrens mit dem Gyratorverfahren die Bereiche verlässlicher Messergebnisse. Leicht verdichtbare Mischungen lassen sich beim Marshall- und Gyratorverfahren mit ähnlichen Probekörpereigenschaften verdichten. Schwer verdichtbare und grobkörnige Mischungen lassen sich einerseits aufgrund der unzureichenden Verdichtungsenergie und andererseits aufgrund der begrenzten Probekörperabmessungen durch die Verdichtungskennwerte

von Marshall- und Gyratorverfahren nur unzureichend beschreiben.



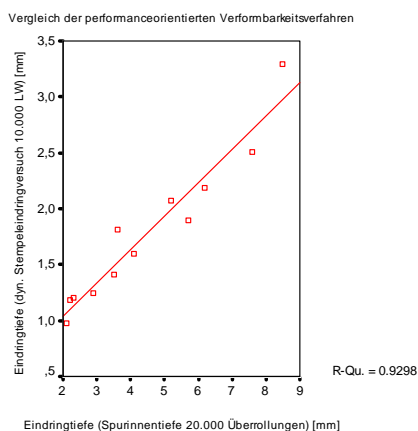
**Abbildung 49:** Vergleich der Verdichtungskennwerte Marshall-/Gyratorverdichtung

### 5.2.2 Ergebnisse der Untersuchung des vermutete Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit

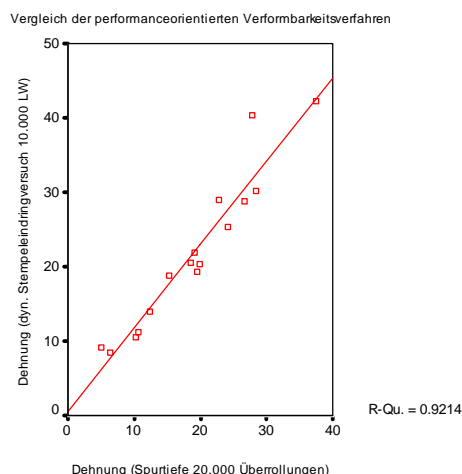
Wie die Ergebnisse der Untersuchungen der Verformungsbeständigkeit (Kapitel 4.2) zeigen, konnten unter den festgelegten Randbedingungen aufgrund der geringen Standfestigkeit einiger Mischungen nicht für alle am Untersuchungsprogramm beteiligten Mischgutvarianten Ergebnisse ermittelt werden. Insbesondere beim Spurbildungsversuch mussten die Versuche bei den leicht verdichtbaren und wenig verformungsresistenten Mischungen vorzeitig abgebrochen werden. Aus diesem Grund wurde der direkte Vergleich der Kenngrößen der Verdichtbarkeit mit den Kenngrößen der Verformungsbeständigkeit zusätzlich zum Endergebnis des Versuches bei unterschiedlicher Belastungsintensität

durchgeführt. Die Gegenüberstellung der Kennwerte konnte daher teilweise nur mit einer reduzierten Anzahl der Mischgutvarianten erfolgen. Die nachfolgenden Gegenüberstellungen beruhen daher ausschließlich auf den jeweils vorhandenen vergleichbaren Daten.

Um eine tendenzielle Aussage zur Wirkungsweise der Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Verformungsbeständigkeit auf die Untersuchungsvarianten treffen zu können, wurden zunächst die Ergebnisse der beiden performanceorientierten Verfahren Spurbildung und dynamische Stempel Eindringtiefe miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Eindringtiefen beider Verfahren und der hieraus ermittelten Dehnungen (Eindringtiefe bezogen auf die Probekörperhöhe) am Versuchsende sind nachfolgend in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt.



**Abbildung 50:** Vergleich der Ergebnisse Spurbildung - dynamische Stempel-eindringtiefe (Eindringtiefe [mm])



**Abbildung 51:** Vergleich der Ergebnisse Spurbildung – dynamische Stempel-eindringtiefe (Dehnungen [%])

Das hohe Bestimmtheitsmaß und die positive Richtung der Regressionsgeraden weisen darauf hin, dass bei beiden Verfahren die Verformungsbeständigkeit der Untersuchungsvarianten in derselben Weise erfasst wird.

Bezogen auf die Auswertung der Eindringtiefe (Abbildung 50) trifft diese Aussage für die Mischgutvarianten ATS 0/32CS, SMA 0/8, SMA 0/11S, ABi 0/22S und für die Auswertung der Dehnung (Abbildung 51) zusätzlich für die Mischung AB 0/11S zu. Für die restlichen Mischgutvarianten kann aufgrund mangelnder Daten keine Aussage getroffen werden.

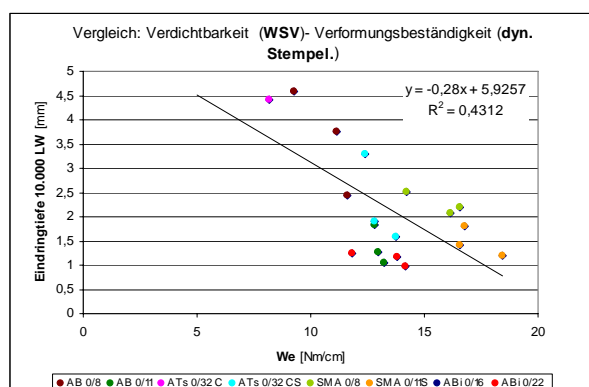
Um den Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit messtechnisch zu untersuchen, wurden die Kennwerte der Verdichtbarkeit ( $D$  bzw.  $D_G$ -Wert und  $W_E$ -Wert) den Kenngrößen



der Verformungsbeständigkeit (Eindringtiefe des Stempels bzw. des Rades und Dehnung) bei unterschiedlicher Belastungsintensität gegenübergestellt. Mit Hilfe des Signifikanztests mit dem Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ( $p$ ) [22] wurden die ermittelten Bestimmtheitsmaße anschließend auf Signifikanz untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt. Die zugehörigen Diagramme befinden sich im Anhang 9.4.1.1.

### Dynamische Stempeleindringtiefe

In Abbildung 52 ist exemplarisch der Vergleich der Verdichtbarkeit der Walzsektorverdichtung mit der Bewertung der Verformungsbeständigkeit durch die dynamische Stempeleindringtiefe bei einer Belastung von 10.000 Lastwechseln dargestellt.



**Abbildung 52:** Vergleich Verdichtbarkeit – Verformungsbeständigkeit (dynamische Stempeleindringtiefe –  $W_E$ -Wert)

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte ein Zusammenhang zwischen dem Ver-

dichtungskennwert ( $W_E$ ) und der Verformungsbeständigkeit, ausgedrückt durch die Eindringtiefe des Stempels mit einer 99%igen Wahrscheinlichkeit ( $p < 0,01$ ) für alle untersuchten Belastungsstufen bei einer Stichprobengröße von  $N = 19-24$  festgestellt werden.

Der Anteil der gemeinsamen Varianz der Variablen liegt hierbei jedoch nur zwischen 34,4 und 43,1 %.

Der untersuchte Parameter Verdichtbarkeit kann also nicht als überwiegender Einflussfaktor auf die Verformungsbeständigkeit angesehen werden.

Für den Vergleich der dynamischen Stempeleindringtiefe mit dem Verdichtungskennwert des Marshall- (D) und Gyratorversuches ( $D_G$ ) ergab sich bei der Lastwechselzahl 10.000 LW, am Versuchsende ebenfalls eine Bestätigung des Zusammenhanges. Die Signifikanz liegt hierbei auf dem Niveau 0,05, jedoch liegt auch hier der Anteil der Varianz der Verdichtbarkeit, der durch die Verformungsbeständigkeit erklärt wird, nur bei 22,4 bis 25,42%.

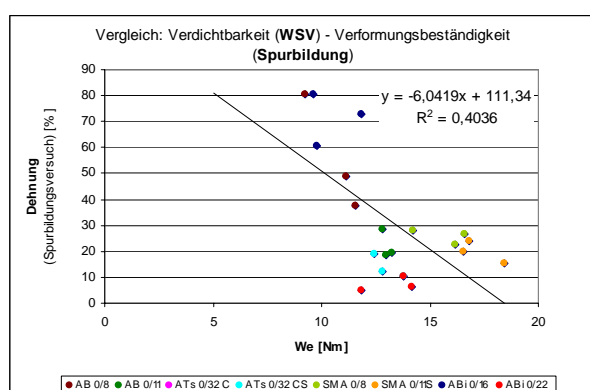
Der Vergleich der Verdichtungskennwerten mit den Dehnungsmesswerten zeigte nur für den Kennwert der Marshallverdichtung zu Beginn des Versuches bei 1000 Lastwechseln und am Ende des Versuches

bei 10.000 Lastwechseln einen sehr signifikanten Zusammenhang auf.

Für die Gegenüberstellung der Kennwerte der WSV- und Gyratorverdichtung mit den Messwerten der Dehnung ergaben sich für einige Belastungszustände signifikante Zusammenhänge (auf dem Niveau 0,05), am Ende des Versuches ist jedoch in beiden Fällen keine Beziehung zwischen Verdichtung und Verformung zu erkennen.

### Spurbildungsversuch

Die Ergebnisse des Vergleiches der Kennwerte der Spurbildungsversuche mit den Kennwerten der Verdichtbarkeit sind exemplarisch für den Kennwert der Walzsektorverdichtung ( $W_E$ ) und die Dehnung bei einer Belastung von 20.000 Überrollungen in der nachfolgenden Abbildung 53 dargestellt.



**Abbildung 53:** Vergleich Verdichtbarkeit – Verformungsbeständigkeit (Spurbildungsversuch –  $W_E$ -Werte)

Im Gegensatz zur Auswertung der Messergebnisse der dynamischen Stempel-

dringtiefe wurden bei der Spurbildung nur die Messwerte nach Beendigung des Versuches, bei 20.000 Überrollungen bzw. die Messwerte bei vorzeitigem Abbruch des Versuches den Kennwerten der Verdichtbarkeit gegenübergestellt (Tabelle 6). Alle in die Vergleiche einfließenden Untersuchungsergebnisse resultieren aus den Messungen im 60°C temperierten Wasserbad.

Im Ergebnis der vergleichenden Untersuchungen konnte der vermutete Zusammenhang zwischen dem Verdichtbarkeitskennwert ( $W_E$ ) und der Verformungsbeständigkeit, ausgedrückt durch die Probekörperdehnung sowie die Verformung ebenfalls mit einer 99%igen Wahrscheinlichkeit ( $p < 0,01$ ) festgestellt werden (Tabelle 6).

Der Anteil der gemeinsamen Varianz der Variablen liegt jedoch auch hierbei nur zwischen 37,53 und 40,36%. Wie bereits bei der Darstellung der Messergebnisse der dynamischen Stempelindringtiefe erläutert wurde, kann also der untersuchte Parameter Verdichtbarkeit des WSV Verfahrens trotz des hohen Signifikanzniveaus nicht als überwiegender Einflussfaktor auf die Verformungsbeständigkeit angesehen werden.

Für den Vergleich der Verdichtbarkeitskennwerte des Marshall- und Gyratorverfahrens mit den Verformungskenngrößen konnten ausschließlich mit den Messwer-

ten der Probekörperdehnung signifikante Zusammenhänge ermittelt werden. Der Anteil der gemeinsamen Varianz der hier verglichenen Kenngrößen liegt in einem ähnlichen Bereich (46,7 und 49,61%). Der vermutete Zusammenhang zwischen Verdichtung und Verformbarkeit kann daher auch für diese Fälle nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Beim Vergleich der Verdichtungskennwerte mit den Messwerten der Eindringtiefe des Spurrades konnte in allen drei Fällen kein Zusammenhang gefunden werden.

### Zusammenfassung

Insgesamt zeigt sich der vermutete Zusammenhang zwischen den Kennwerten

der Verdichtbarkeit und der Verformbarkeit am deutlichsten bei der dynamischen Stempeleindringtiefe und der Walzsektorverdichtung.

Aufgrund der geringen Standfestigkeit einiger Mischgutvarianten - in Kombination mit den geforderten Randbedingungen - ist die zum Vergleich zur Verfügung stehende Datenbasis leider erheblich eingeschränkt.

Die Untersuchungsergebnisse sollten daher mit einer größeren Datenbasis statistisch besser abgesichert werden.

Bestimmtheitsmass (R <sup>2</sup> ) dynamische Stempeleindringtiefe			
Lastwechsel	We (WSV)	D (Marshall)	DG (Gyrator)
<b>Dehnung</b>			
10.000	0,0291	0,5201	0,226
7.000	0,2384	0,1888	0,2494
5.000	0,2344	0,1229	0,1827
1.000	0,096	0,2949	0,2542
<b>Eindringtiefe</b>			
10.000	0,431	0,2542	0,2241
7.000	0,404	0,0666	0,075
5.000	0,3846	0,0273	0,041
1.000	0,344	0,2314	0,1425

Zusammenhang ist sehr signifikant (Niveau 0,01)
Zusammenhang ist signifikant (Niveau 0,05)
Zusammenhang ist nicht signifikant

Bestimmtheitsmass (R <sup>2</sup> ) Spurbildungsversuch			
Überrollungen	We (WSV)	D (Marshall)	DG (Gyrator)
<b>Dehnung</b>			
20.000	0,4036	0,05	0,1027
	0,1886	0,467	0,4961
<b>Eindringtiefe</b>			
20.000	0,2423	0,045	0,2404
<b>Verformung</b>			
20.000	0,3753	0,0043	0,0116
	0,1758	0,124	0,2696

**Tabelle 6:** Bestimmtheitsmaße und Darstellung der Signifikanz der untersuchten Zusammenhänge

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

### Allgemeines und Auftrag

Das Walzsektorverdichtungsgerät dient bisher ausschließlich der Herstellung von Probekörpern, an denen mechanische Eigenschaften von Asphalten untersucht werden sollen. Im Gegensatz zum Marshall- und Gyratorverfahren, deren Grenzen der Herstellung von Probekörpern bei einem Größtkorn von 22 mm liegen, können mit dem WSV auch Probekörper von Binder- und Tragschichten mit praxisadäquaten Abmessungen und Eigenschaften hergestellt werden.

In der vorliegenden Forschungsarbeit sollte untersucht werden, ob sich aus dem beim Walzsektorverdichtungsgerät aufgezeichneten Verdichtungsverlauf Kennwerte zur Beschreibung der Verdichtbarkeit ableiten lassen.

### Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm umfasste die Untersuchung der Verdichtung eines breiten Spektrums unterschiedlicher Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten, die mit jeweils drei verschiedenen Bindemittelgehalten ausschließlich nach dem in [9] angegebenen Verdichtungsprogramm (Braunschweiger Modell) hergestellt wurden.

### Ergebnisse

Während die Auswertung der Verdichtbarkeit mittel und schwer verdichtbarer Mischgutvarianten plausible Ergebnisse lieferte, ergaben sich für die leicht verdichtbaren Mischgutvarianten z.T. unplausible Werte, die sich auf die in der Arbeitsanleitung angegebenen Verdichtungsrandbedingungen zurückführen lassen.

Die Entwicklung der Probekörperhöhen während der Verdichtung und die daraus abgeleiteten Verdichtungsgrade und Hohlraumgehalte lassen vermuten, dass das Mischgut während der Verdichtung horizontal in der Form verschoben wird, d.h. das Mischgut weicht dem Walzsegment aus. Dies hat eine fehlerhafte Messung der Plattendicke zur Folge [29].

In einigen Fällen ergibt sich sogar ein (rechnerisch) negativer Hohlraumgehalt. Für diese leicht verdichtbaren Asphalte muss daher unter Ausnutzung der in [9] gegebenen Möglichkeiten ein entsprechendes Verdichtungsprogramm konzipiert werden.

Zur Beschreibung der Verdichtbarkeit existiert bislang der durch den Marshallversuch ermittelte Kennwert  $D$  nach Arand/Renken. Der Bewertungshintergrund dieses Verfahrens kann jedoch auf die Walzsektorverdichtung nicht uneinge-

schränkt übertragen werden. Aufgrund der vom Marshallversuch abweichenden Arbeitsweise der Verdichtung ergibt sich für die Walzsektorverdichtung ein Verdichtungsverlauf, welcher – aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten beim Einzelversuch – nicht über einen exponentiellen Ansatz angenähert werden kann.

Dennoch besteht analog dem Marshallverfahren die Möglichkeit, eine Unterscheidung der Mischgutvarianten in leicht, mittel und schwer verdichtbare Asphalte vorzunehmen.

Die Arbeitsweise im Verdichtungsregime des WSV erfordert eine getrennte Auswertung von Vor- und Hauptverdichtung. Da die erforderliche Arbeit der Vorverdichtung nur ca. 11-22 % der Gesamtverdichtung ausmacht, wurde der zur Beschreibung der WSV-Verdichtung ermittelte Kennwert ausschließlich an der Entwicklung der Verdichtungsarbeit der Hauptverdichtung bestimmt.

#### Auswertung

Für die Auswertung wurde die kumulative Darstellung der Verdichtungsarbeit über die Zahl der Verdichtungsübergänge gewählt. Die dabei entstehenden Kurven lassen sich mit der Boltzmann-Funktion annähern.

Mathematisch lässt sich die Verdichtbarkeit eines Asphaltes gemäß der nachste-

henden Formel anhand des  $W_E$ -Wertes charakterisieren.

$$W(x) = W_E - \frac{W_E}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}}$$

Der  $W_E$ -Wert bezeichnet das Maximum der aufsummierten Verdichtungsarbeit während der Hauptverdichtung im WSV und charakterisiert nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen die für das jeweilige Mischgut erforderliche Verdichtungsarbeit in Nm/cm.

Vorraussetzung für die Anwendung dieses Ansatzes sind die nachfolgend aufgeführten idealisierten Vorstellungen:

- die Dichteverteilung im WSV Probekörper ist homogen
- es finden praktisch keine Kornzertrümmerungen statt
- die Temperaturveränderungen während des Verdichtungsprozesses sind vernachlässigbar

Untersuchungen im Vorfeld des Forschungsvorhabens und die Ergebnisse der Auswertung der Hauptverdichtungsarbeit der unterschiedlichen Mischgutvarianten deuten darauf hin, dass die Probekörperdicke einen Einfluss auf die aufzuwendende Verdichtungsarbeit ausübt. Während die Anzahl der Lastübergänge bis zur maxima-

len Raumdichte auf die Verdichtungsarbeit keinen Einfluss ausübt, benötigen hohe Probekörper bei sonst gleicher Mischgutzusammensetzung eine größere Verdichtungsarbeit. Die mischgutspezifische Größe des Einflusses der unterschiedlichen Probekörperdicken war nicht Teil des Vorhabens und konnte nur orientierend untersucht werden.

Die vergleichende Betrachtung des vorliegenden Datenmaterials der untersuchten Mischgutvarianten erfordert jedoch den Bezug der Verdichtungsarbeit auf die Plattendicke. Zur Auswertung der Verdichtungskennwerte wurde daher in erster Näherung die ermittelte Verdichtungsarbeit ohne einen mischgutspezifischen Korrekturfaktor auf die Probekörperdicke bezogen.

Die Analyse der Dichtemerkmale ( $H_{bit}$ ,  $k$ ) der Probekörper aller untersuchten Mischgutvarianten während und nach der Verdichtung zeigte, dass die Beschreibung der Verdichtbarkeit mit den derzeitigen Erkenntnissen und den Randbedingungen der Verdichtung nur für mittel und schwer verdichtbare Asphalte plausible Ergebnisse liefert. Ursache für die unzureichende Beschreibung der Verdichtbarkeit leicht verdichtbarer Mischgutvarianten ist einerseits im Verdichtungsregime und andererseits in der aus maschinenbau- und messtechnischen Gründen ungenauen Probekörperhö-

henaufzeichnung während der Verdichtung zu sehen. Um auch für diese Asphalte einen Kennwert zur Beschreibung der Verdichtbarkeit mit dem WSV ermitteln zu können, muss das Programm der Verdichtung (Braunschweiger Modell) modifiziert werden, was jedoch nicht Gegenstand des Auftrages war.

Bis zur Umsetzung dieser Änderung lässt sich die Verdichtbarkeit dieser Asphaltmischungen weiterhin mit Hilfe des D- bzw.  $D_G$ -Wertes charakterisieren.

#### Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit

Der Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit wurde bei den beiden performanceorientierten Verfahren der dynamischen Stempeleindringtiefe und der Spurbildung untersucht. Ein signifikanter Zusammenhang stellt sich hierbei am deutlichsten für den Vergleich des Verdichtungskennwertes  $W_E$  mit der dynamischen Stempeleindringtiefe dar. Jedoch kann die Verdichtbarkeit hierbei nicht als alleiniger und überwiegender Einflussfaktor auf die Verformungsbeständigkeit angesehen werden. Eine quantitative Bewertung dieses Zusammenhanges kann aufgrund des relativ geringen Datenumfanges, der dieser Untersuchung zugrunde liegt, nicht vorgenommen werden. Die Untersuchungen mit dem Spurbil-

dungsversuch, insbesondere bei wenig standfesten Mischgutvarianten, macht eine Modifizierung der Untersuchungsrandbedingungen erforderlich.

### Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Nachweis erbracht, dass sich das Walzsektorverdichtungsverfahren grundsätzlich für die Ansprache der Verdichtbarkeit von Asphalt eignet. In einem ersten Auswertungsschritt wurde die Summe der aufgebrauchten Verdichtungsarbeit je Übergang bei der Hauptverdichtung mathematisch ausgewertet. Mit dem daraus abgeleiteten Kennwert  $W_E$  kann die Verdichtbarkeit verschiedener Mischgutarten und -sorten charakterisiert werden.

Bei der Bearbeitung ergaben sich einige Fragestellungen, die einen weiteren Forschungsbedarf rechtfertigen:

- Der Einfluss der Dicke der Asphalt-schicht auf die Verdichtungsarbeit sollte quantifiziert werden.

- Die Aussagekraft der Vorverdichtung sollte überprüft werden
- Ein Verdichtungsregime für leicht verdichtbare Mischgutsorten und hohlraumreiche Gemische sollte entwickelt werden
- Die Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Verdichtungsarbeit in die Praxis sollte unter Berücksichtigung des Einflusses der Verdichtungs-temperatur überprüft werden
- Mechanische und messtechnische Verbesserungen des Walzsektorverdichtungsgerätes sollten realisiert werden

Für die Beschreibung der Verdichtbarkeit von Asphalt sollte auf Basis der aufgeführten offenen Fragen ein Konzept entwickelt werden, das dann auf rein physikalischen Größen beruhen kann.

---

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Arand, W.: Verdichtung – mathematisch-analytisch betrachtet. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche und verwandte Stoffe 25 (1974) 11, 427-429
- [2] Arand, W., Renken, P.: Labor-Walzverdichtungs-Gerät zur Herstellung verdichteter Asphaltproben mit praxisadäquaten mechanischen Eigenschaften, Schriftreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Heft 771, Bonn-Bad Godesberg 1999
- [3] Arand, W., Renken, P.: Einfluß der Mischdauer und der Verdichtungstemperatur auf die Verdichtbarkeit von Walzasphaltgemischen, Schriftreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Heft 523, Bonn-Bad Godesberg 1988
- [4] Arand, W., Renken, P.: Entwicklung und Optimierung eines Labor- Walzsektorverdichtungsgerätes zur Herstellung verdichteter Asphaltproben mit praxisadäquaten mechanischen Eigenschaften. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 7.162 G 92 E des Bundesministeriums für Verkehr, Braunschweig 1996
- [5] DIN 1996-7: Prüfung von Asphalt, Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad, Dezember 1992, Beuth Verlag Berlin
- [6] DIN EN 12697-10: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 10: Verdichtbarkeit; März 2002, Beuth Verlag Berlin
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“: Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mit Hilfe des Marshall –Verfahrens. Köln 1987
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“, Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil xx, Verfahren zum Herstellen von Asphaltprobepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Entwurf Sept. 2002
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“, Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 11, Herstellung von Asphaltprobepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Ausgabe 2003
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“, Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Spurbildungsversuch – Bestimmung der Spurtiefe im Wasserbad, Ausgabe 1997
- [11] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen : Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Behandlung von abweichenden Messwerten (Ausreißern), Köln 1978



- 
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“, Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 1: Praxis der Verdichtung, Köln 1991
- [13] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstrassen“: Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2 Theorie der Verdichtung Köln 1993
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“, Merkblatt [GM1] für das Verdichten von Asphalt, Köln 2004 (Entwurf 05.07.2004)
- [15] Gauer, P.K.: Eine Analyse der Verdichtungswilligkeit und des Verformungswiderstandes von bituminösem Mischgut bei Verdichtung im Gyrator; Dissertation TU Darmstadt 1970
- [16] Gauer, P.K.: Ermittlung von Verformungswilligkeit und Verformungswiderstand bituminöser Gemische im Laboratorium, Bitumen (3/1975), 88-96
- [17] Gauer, P.K., Schmalz, M.: Untersuchungen zum Einfluss der Sieblinie im Splittbereich und der Mineralstoffrohichte auf die Lagerungsdichte von Splittmastixasphalt 0/11S, (09/2002)
- [18] Gragger, F.: Die Haufwerksporosität als Prüfgröße von Mineralstoffen, Straßen- und Tiefbau 27, (1973) 7, 467-479
- [19] Heinemann, R.: Mathematische Ansätze zur Berechnung verdichtungsabhängiger Größen. Bitumen Teere, Asphalte, Peche und verwandte Stoffe 23 [1972] 6, 238-243
- [20] Heitkamp, E.: Einfluss der Bitumenhärte und Sandqualität auf das Verschleißverhalten von bituminösem Mischgut. Das stationäre Mischwerk 12 (1978) 2, 15-28
- [21] Kezdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik, Band I Verlag für das Bauwesen, Berlin (1969)
- [22] K. Überla, Faktorenanalyse, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1971, S. 366-367
- [23] Leutner, R., Renken, P., Büchler, S., Lobach, T.: Überprüfung der Eignung des dynamischen Stempeldringversuches zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines Bewertungshintergrundes. Schlussbericht zum Forschungsauftrag 12522N der AiF, Braunschweig 2003
- [24] Paulmann, G.: Verdichtungsvorgänge und Verdichtungswiderstand bei bituminösem Mischgut, Bitumen, 32 (2/1970), 33-39
- [25] Paulmann, G.: Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten bei schlag- und gyratorisch verdichtetem Mischgut; Dissertation TU Darmstadt 1969

- 
- [26] Renken, P.: Verdichtungswilligkeit von Asphaltgemischen. Schriftreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Heft 296, Bonn-Bad Godesberg 1980
- [27] Renken, P.: Verdichtbarkeit von Asphaltbetongemischen und ihr Einfluss auf die Standfestigkeit, Schriftreihe Lehrstuhl für Straßenwesen und Erdbau TU Braunschweig o. Professor Dr.-Ing. Wolfgang Arand, Heft 3, Braunschweig, 1980
- [28] Renken, P.: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von mittels Walz-Sektor-Verdichtungsgerät und Lamellen-Verdichtungsgerät hergestellten Asphaltprobeplatten, Schriftreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Heft 821, Bonn-Bad Godesberg 2001
- [29] Täube, A.: Herstellung von Walzasphaltprobeplatten mit dem Labor-Walzverdichtungsgerät, asphalt, Heft 3/2001, S.10-13
- [30] Terzaghi, K.: Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Deuticke, Leipzig-Wien 1925
- [31] Wallner, B.: Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator, Dissertation am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München, München 2004
- [32] Wörner, T., Wallner B., Schwingenschlögl, F.: Beurteilung der asphalttechnologischer Kenngrößen von Gyratorprobekörpern im Hinblick auf die Anforderungen der ZTV Asphalt-StB und der ZTVT-StB. Schriftreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Heft 871, Bonn-Bad Godesberg 2003
- [33] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, ZTV Asphalt- StB 01, Ausgabe 2001, FGSV Verlag, Köln
- [34] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau ZTV T-StB 95, Ausgabe 1995/ Fassung 2002, FGSV Verlag, Köln

## Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen

## Unterreihe „Straßenbau“

**1993**

- S 1: Verwitterungsbeständigkeit von Recycling-Baustoffen  
Guth kostenlos
- S 2: Eignung von Grubenbergen als Baustoff für Tragschichten  
ohne Bindemittel  
Guth kostenlos
- S 3: Altlastenerfassung durch geophysikalische Methoden  
Faust kostenlos
- S 4: EPS-Hartschaum als Baustoff für Straßen  
Bull-Wasser kostenlos
- S 5: Baubegleitende Messungen B 73n  
Heinisch, Blume kostenlos
- S 6: Eignung überdeckter Fugen mit Querkraftübertragung  
Fleisch, Bartz kostenlos

**1994**

- S 7: 33. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 14,00

**1995**

- S 8: Anleitung Qualitätsmanagementplan Asphalttragschichten  
Freund, Stöckner € 12,50
- S 9: Meßwert- und rechnergestütztes Management der Stra-  
ßenerhaltung – Niederschrift und Referate des Erfahrungsaustau-  
sches am 16. und 17. Mai 1995 in Berlin € 13,00
- S 10: 34. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 14,00

**1996**

- S 11: Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und  
Rollwiderstand  
Ullrich, Glaeser, Sander € 15,00
- S 12: Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen –  
Projektgruppe „Lärmmindernde Straßendecken“ € 10,00
- S 13: Qualität von mineralischen Straßenbaustoffen  
Tabbert € 16,50

**1997**

- S 14: 35. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 16,50
- S 15: Anforderungen an Fugenfüllsysteme aus Temperaturdeh-  
nungen  
Eisenmann, Lechner € 12,50
- S 16: Sicherheitswirksamkeit ausgewählter Straßenbaumaßnah-  
men im Lande Brandenburg  
Schnüll, Handke, Seitz € 22,00

**1998**

- S 17: Restnutzungsdauer von Asphalttschichten  
Wolf € 13,00

- S 18: 2. Erfahrungsaustausch über rechnergestütztes Stra-  
ßen-  
erhaltungsmanagement € 14,50

- S 19: Einfluß der Bruchflächigkeit von Edelsplitten auf die Stand-  
festigkeit von Asphalten  
Teil 1: Literaturlauswertung  
Beckedahl, Nösler, Straube  
Teil 2: Einfluß des Rundkornanteils auf die Scherfestigkeit von  
Gesteinskörnungen  
H.G. Diel € 16,50

**1999**

- S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 14,00
- S 21: Walzbeton: Ergebnisse aus neuester Forschung und lang-  
jähriger Praxis – Kompendium  
Birmann, Burger, Weingart, Westermann  
Teil 1: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von  
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (1)  
Schmidt, Bohlmann, Vogel, Westermann  
Teil 2: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von  
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (2)  
Weingart, Dreßler  
Teil 3: Messungen an einer Versuchsstrecke mit Walzbeton-Trag-  
schicht an der B54 bei Stein-Neukirch  
Eisenmann, Birmann  
Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichte-  
verlauf und Ebenheit von Walzbeton  
Burger € 17,00

**2000**

- S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen  
Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung  
€ 19,50
- S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen  
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,  
v. d. Elshout, Sym € 10,50

**2001**

- S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-  
grund - Konsolidationsverfahren -  
Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim  
Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund  
Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf  
wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolida-  
tionsverfahren  
Koch € 17,50
- S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 16,50

**2002**

- S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-  
grund - Aufgeständerte Gründungspolster  
Rogner, Stelter € 14,00
- S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von  
Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung  
der ZTV-M 02  
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50
- S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundes-  
fernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität  
des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am  
25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00
- S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines For-  
schungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeits-  
ausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saar-  
brücken € 13,50

## 2003

- S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –  
€ 19,50
- S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues „Straßenrecht“ am 23./24. September 2002 in Saarbrücken  
Golkowski € 13,50
- S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsvorhabens der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2003 in Saarbrücken € 13,50
- S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50
- S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen  
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

## 2004

- S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren  
Grundhoff, Kahl € 17,50
- S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50
- S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

## 2005

- S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50
- S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt  
Renken, Büchler € 16,00
- S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50
- S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben  
Schröder € 13,50
- S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt  
Wörner, Metz € 17,50
- S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Krajewski, Kuhl € 14,00
- S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund  
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

## 2006

- S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen  
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel € 21,00
- S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen  
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen  
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes  
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.