

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt  
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche  
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca  
Institut federal da controlla da material e da retschertgas  
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
Tel. +41-1-823 55 11  
Fax +41-1-821 62 44



# Volumetrische und mechanische Optimierung von Splittmastixasphalt

Forschungsauftrag 18/96 auf Antrag des  
VSS, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Forschungsstelle:  
EMPA, CH 8600 Dübendorf

Autoren:  
O. Neubauer, Chem. Ing.  
M. N. Partl, Dr. Dipl. Ing., ETH

## **Dank**

Ich möchte nicht versäumen den Labormitarbeitern der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA mit ihrem Laborgruppenleiter Herrn Hans Kienast für die rasche Erledigung der notwendigen Untersuchungen sowie dem Abteilungsleiter Herrn Dr. M.N. Partl für die fachliche Beratung während den praktischen Arbeiten und die redaktionelle Hilfe bei der Erstellung des Abschlussberichtes meinen herzlichen Dank auszusprechen.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit FA 18/96, "Volumetrische und mechanische Optimierung von Splittmastixasphalt", basiert auf umfangreichen Vorarbeiten, und intensivem Erfahrungsaustausch mit Mitarbeitern anderer Laboratorien, Unternehmungen sowie eigenen vergleichenden Untersuchungen der EMPA Duebendorf.

Unterschiedliche Verdichtungsarten führen zu ungleichen volumetrischen Kennwerten. Untersucht wurde das Verhalten der Splittmastixasphalte SMA 11 sowie SMA 16 mit unterschiedlichen Filler-Bindemittel-Kombinationen. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch die Ermittlungen bleibender Deformationen bei relativ hohen Temperaturen von 60 °C, durchgeführt mit dem französischen Spurrinentester (LCPC Ornière) und der Spaltzugfestigkeit bei tiefen Temperaturen von 0 °C und -10 °C mit der Spaltzugprüfung.

Aufgrund der Ergebnisse muss die Frage, ob die Bestimmung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel nach der Marshall- wie auch nach der Gyrator-Methode für Splittmastixasphalt SMA zu gleichen Aussagen führt eindeutig mit "nein" beantwortet werden. Es zeigte sich, dass die Bestimmung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel nach der Marshall- und der Gyrator-Methode mit keiner der verwendeten Filler-Bindemittel-Kombinationen weder beim Splittmastixasphalt SMA 11 noch bei Splittmastixasphalt SMA 16 zu gleichen Ergebnissen führt. Aufgrund der Marshallkennwerte sind für den optimalen Gehalt an löslichem Bindemittel deutlich höhere Werte ermittelt worden als aufgrund der Gyratorkennwerte. Mit dem Gyrator werden kleinere optimale lösliche Bindemittelgehalte ermittelt als mit der Marshallverdichtung.

Aus den Kennwerten Hohlraumgehalt, Hohlraumgehalt HMM wie auch Hohlraumfüllungsgrad HFB aller untersuchten Mischungen geht hervor, dass die Verdichtung von Splittmastixasphalt mit dem Gyrator effizienter ist als diejenige mit dem Marshallgerät. Die knetende Verdichtung des bituminösen Mischgutes mit dem Gyrator gestattet den Mineralstoffkörnern, sich umzulagern und dadurch die Hohlräume leichter auszufüllen als bei schlagender Verdichtung mit dem Marshallgerät. Die Marshallverdichtung scheint nicht geeignet für Splittmastixasphalt-Mischgut.

Beim Vergleich der in den Empfehlungen der Schweizer Norm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung" enthaltenen Richtwertebereiche für die Bindemitteldosierung mit den ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteilen sowohl für die untersuchten Mischungen des SMA 11 wie auch für die Mischungen des SMA 16 liegen die ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile immer erheblich unterhalb den unteren Richtwertebereichen der Norm. Es spielt dabei keine Rolle nach welchem Verdichtungsverfahren der optimale lösliche Bindemittelanteil ermittelt wurde. Folglich müssen die Richtwertebereiche für die Bindemitteldosierung der verschiedenen SMA-Sorten neu formuliert werden.

Die an Splittmastixasphalt SMA 11 und SMA 16 bei 60 °C durchgeführten Untersuchungen mit dem französischen Spurrinentester (LCPC Ornière) führen bei keiner der berücksichtigten Filler-Bindemittel-Kombinationen zu beunruhigend grossen bleibenden Deformationen. Jedoch kommt der Einfluss der Füllersorte auf die bleibende Deformationen bei 60 °C deutlich zum Ausdruck. Das bei Gebrauchstemperaturen steifere Bindemittel Olexobit SMA führt in den untersuchten Mischungen zu geringeren Verformungen als bei den Mischungen mit Normalbitumen Bitumen 50/70.

Hinsichtlich der Bestimmungen der Spaltzugfestigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturen wurde festgestellt, dass die Mischungen mit Bitumen 50/70 im Gegensatz zu Olexobit SMA eine geringere Steifigkeit aufwiesen.

## Résumé

Le présent travail de recherche FA 18/96 "Optimisation volumétrique et mécanique des splittmastixasphaltes" repose sur des travaux préliminaires de grande ampleur et un échange d'expériences avec d'autres laboratoires et des entrepreneurs ainsi que sur des études comparatives effectuées par l'EMPA elle-même.

Des modes de compactage différents conduisent à des caractéristiques volumétriques différentes. Cette étude du comportement des splittmastixasphaltes SMA 11 et SMA 16 a été effectuée avec différentes combinaisons filler/bitume. Elle a été complétée par la mesure des déformations permanentes à la température relativement élevée de 60 °C sur l'orniéreur LCPC et la détermination de la résistance à la traction par fendage à basse température entre 0 et -10 °C.

La réponse apportée par les résultats de ce travail à la question de savoir si la détermination de la teneur optimale en liant soluble conduit aux mêmes résultats avec la méthode Marshall ou avec la méthode du compacteur giratoire est clairement négative, cela pour toutes les combinaisons filler/liant utilisées. Avec la méthode Marshall, les valeurs obtenues pour la teneur optimale en liant soluble sont nettement plus élevées qu'avec le compacteur giratoire.

Pour ce qui est des teneurs en vides, les teneurs en vide HMM et le degré de remplissage des vides HFB de tous les mélanges examinés montrent que le compactage avec le compacteur giratoire est plus efficace que celui effectué avec l'appareil Marshall. L'effet de pétrissage de l'enrobé dans le compacteur giratoire permet un déplacement des grains du granulat qui aboutit à un meilleur remplissage des vides que sur l'appareil Marshall. L'appareil Marshall semble ainsi ne pas être approprié au compactage des enrobés de splittmastixasphalte.

La comparaison des domaines de valeurs indicatives de dosage en liant recommandées dans la norme suisse SNB 640 431 b "Revêtements en béton bitumineux, Conception, exigences, exécution" avec les teneurs en liant soluble optimales déterminées montre que tant pour les mélanges SMA 11 que les mélanges SMA 16, les valeurs de liant solubles optimales déterminées se situent toujours notablement au-dessous du domaine le plus inférieur de valeurs indicatives recommandées de la norme. Cela quelle que soit la méthode de compactage utilisée pour la détermination de la teneur en liant soluble optimale. Il est par conséquent nécessaire de redéfinir les domaines des valeurs indicatives du dosage en liant des différents types de SMA.

Les essais à 60 °C sur l'orniéreur LCPC effectués sur les splittmastixasphaltes SMA 11 et SMA 16 ne conduisent à des déformations inquiétantes sur aucune des combinaisons filler/liant examinées. Ces essais mettent toutefois clairement en évidence l'influence du type de filler sur les déformations permanentes. Sur les mélanges examinés, le liant Olexobit SMA, plus rigide aux températures d'utilisation, conduit à des déformations plus faibles que sur ceux réalisés avec le bitume 50/70 standard.

La détermination des résistances à la traction par fendage à différentes températures a montré que les mélanges réalisés avec le bitume 50/70 présentent une rigidité plus faible que ceux confectionnés avec le bitume Olexobit SMA.

## Abstract

The present research project FA 18/96, "Volumetric and mechanical optimisation of stone mastic asphalt", is based on wide-ranging preliminary work, extensive exchange of experience with colleagues from other laboratories and companies and our own comparative testing at EMPA Dübendorf.

Different types of compaction give rise to different volumetric indices. The behaviour of stone mastic asphalts SMA 11 and SMA 16 with different filler/binder combinations was investigated. The investigations were complemented by permanent deformation measurements at relatively high temperatures of 60°C using the French rutting tester (LCPC Orniéreur) and of indirect tensile strength at low temperatures of 0°C and -10°C by the indirect tensile test.

On the basis of the results, the answer to the question as to whether both the Marshall method and the Gyratory compaction method provide the same optimum soluble binder content values in stone mastic asphalt, SMA, must be an unequivocal "no". It was found that none of the optimum soluble binder content values determined by the Marshall method and the Gyratory compactor method were identical for any of the filler/binder combinations used for either stone mastic asphalt SMA 11 or stone mastic asphalt SMA 16. The optimum soluble binder contents determined using the Marshall indices were distinctly higher than those determined using the Gyratory compactor indices. The optimum soluble binder contents determined with the Gyratory compactor are lower than when Marshall compaction is used.

It is clear from the indices air void content, voids of mineral aggregate (VMA) and volume of voids filled with binder (VFA) for all the mixes investigated that stone mastic asphalt is more efficiently compacted with the Gyratory compactor than with the Marshall compactor. The kneading-type compaction of the bituminous composition achieved with the Gyratory compactor allows aggregate grains to move, as a result of which air voids are more readily filled than is the case with the impact compaction used in the Marshall compactor. Marshall compaction does not appear to be suitable for stone mastic asphalt compositions.

A comparison of the recommended ranges for binder addition specified in Swiss Standard SN 640 431 b, "Asphalt concrete surfacing: design, requirements, laying" with the optimum soluble binder contents determined both for the SMA 11 mixes investigated and for SMA 16 mixes reveals that the determined optimum soluble binder contents are always considerably below the lower recommended range stated in the standard, irrespective of the compaction method used to determine optimum soluble binder content. As a consequence, the recommended ranges for binder addition for the various grades of SMA will have to be recalculated.

The investigations carried out on stone mastic asphalts SMA 11 and SMA 16 at 60°C using the French rutting tester (LCPC Orniéreur) revealed no alarmingly large permanent deformation values for any of the filler/binder combinations under consideration. However, filler type does have a distinct influence upon permanent deformation at 60°C. The binder Olexobit SMA, which is more rigid at field temperatures, results in lower deformation values in the mixes investigated than in mixes containing the standard bitumen Bitumen 50/70.

With regard to the determination of indirect tensile strength at various temperatures, it was found that mixes containing Bitumen 50/70 exhibit lower rigidity in comparison with Olexobit SMA.



**INHALTSVERZEICHNIS**

	Seite	
<b>1</b>	<b>AUFTRAG</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNG</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>STAND DES WISSENS</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>FORSCHUNGSPROGRAMM</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>ALLGEMEINE ANGABEN ZU DEN MATERIALIEN</b>	<b>15</b>
5.1	Mineralstoffe	15
5.2	Bindemittel	16
5.3	Mischgut	16
<b>6</b>	<b>PRÜFVORSCHRIFTEN UND ARBEITSANLEITUNGEN</b>	<b>17</b>
6.1	Mineralstoffe	17
6.2	Bindemittel	17
6.3	Mischgut	18
6.4	Qualitätsvorschriften	18
<b>7</b>	<b>EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN MINERALSTOFFE</b>	<b>19</b>
7.1	Filler	19
7.1.1	Petrografische Beschaffenheit	19
7.1.2	Verunreinigungen	21
7.1.3	Korngrössenverteilungen der angelieferten Filler	22
7.1.4	Dichte, Hohlraumgehalt nach Rigden	24
7.1.5	Versteifende Wirkung der Filler	25
7.1.6	Volumenänderung, Mittelwerte aus 6 Prüfkörpern	26
7.2	Korngrössenverteilung von Brechsand und Splitten aus EMPA Prüfbericht Nr. 161'157	28
7.3	Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten aller verwendeten Mineralstoffe	29
7.4	Dichte der verwendeten Mineralstoffe	29
<b>8</b>	<b>EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN BINDEMITELE</b>	<b>30</b>
8.1	Bindemittel	30
<b>9</b>	<b>MISCHREZEPTE</b>	<b>31</b>
9.1	Splittmastixasphalt SMA 11	32
9.2	Splittmastixasphalt SMA 16	33
<b>10</b>	<b>MISCHEN UND VERDICHTEN</b>	<b>35</b>
10.1	Mischer und Verdichtungsformen	35
10.2	Mischgut herstellen	35
10.3	Kurzzeitalterung des Mischgutes für die Verdichtung mit dem Gyrator	36

10.4	<b>Verdichtung mit Marshallgerät</b>	<b>37</b>
10.5	<b>Mischgut verdichten mit Gyrator</b>	<b>38</b>
<b>11</b>	<b>EIGENSCHAFTEN DER HERGESTELLTEN MISCHUNGEN</b>	<b>41</b>
11.1	<b>Übersicht über die untersuchten Mischungen</b>	<b>41</b>
11.2	<b>Beurteilung der Mischgut-Eigenschaften gemäss Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"</b>	<b>42</b>
11.2.1	Mischguttemperaturen	43
11.3	<b>Korngrössenverteilung</b>	<b>44</b>
11.4	<b>Marshallprüfung</b>	<b>47</b>
11.4.1	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	47
11.4.2	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	48
11.4.3	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	48
11.4.4	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	49
11.4.5	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	49
11.4.6	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	50
11.5	<b>Gyratorprüfung</b>	<b>50</b>
11.5.1	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	51
11.5.2	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	52
11.5.3	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	53
11.5.4	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	55
11.5.5	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	56
11.5.6	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	58
<b>12</b>	<b>DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE</b>	<b>59</b>
12.1	<b>Marshall-Ergebnisse</b>	<b>60</b>
12.1.1	Stabilität-Marshall	61
12.1.2	Fliessen-Marshall	64
12.1.3	Hohlraumgehalt-Marshall	65
12.1.4	Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüstes HMM	67
12.1.5	Hohlraumfüllungsgrad HFB	68
12.2	<b>Gyrator-Ergebnisse</b>	<b>73</b>
12.2.1	Höhenänderung	74
12.2.2	Rohdichte	75
12.2.3	Hohlraumgehalt	76
12.2.4	Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüstes HMM	77
12.2.5	Hohlraumfüllungsgrad HFB	78
12.2.6	Verdichtungsverlauf	80
12.2.7	Verdichtungswiderstand gemäss prEN 12697-10: 2001	83
<b>13</b>	<b>OPTIMIEREN DER LÖSLICHEN BINDEMITELEANTEILE</b>	<b>87</b>
13.1	<b>Marshallverdichtung</b>	<b>87</b>
13.1.1	Tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllen	87
13.1.2	Grafische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllen	88
13.1.3	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	91

13.1.4	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	92
13.1.5	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	93
13.1.6	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	94
13.1.7	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	95
13.1.8	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	95
13.1.9	Optimaler löslicher Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	97
<b>13.2</b>	<b>Gyrator-Verdichtung</b>	<b>98</b>
13.2.1	Tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyratorkennwerte erfüllen	98
13.2.2	Grafische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyratorkennwerte erfüllen	99
13.2.3	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	100
13.2.4	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	101
13.2.5	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	101
13.2.6	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	101
13.2.7	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	102
13.2.8	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	102
13.2.9	Optimaler löslicher Bindemittelanteil aufgrund der Gyratorkennwerte	103
<b>14</b>	<b>VERGLEICH DER MARSHALL- UND GYRATOR-ERGEBNISSE</b>	<b>104</b>
14.1.1	Hohlraumgehalt, Hohlraumgehalt HMM und Hohlraumfüllungsgrad HFB von Marshall- und Gyratorprüfkörpern bei $N_{des}$	104
14.1.2	Hohlraumgehalt	107
14.1.3	Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüstes HMM	110
14.1.4	Hohlraumfüllungsgrad HFB	112
14.1.5	Optimaler löslicher Bindemittelanteil	115
<b>15</b>	<b>SPEZIALUNTERSUCHUNGEN</b>	<b>117</b>
<b>15.1</b>	<b>Bleibende Deformation bei 60 °C</b>	<b>117</b>
15.1.1	Spurrinentest mit Ornièreur	117
15.1.2	Ergebnisse der Spurrinentests	119
15.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der bleibenden Deformation bei 60 °C (Spurrinentest) von SMA 11 sowie SMA 16	122
<b>15.2</b>	<b>Bruchverhalten in der Kälte</b>	<b>127</b>
15.2.1	Spaltzugprüfung	127
15.2.2	Ergebnisse der Spaltzugprüfung bei 0 °C	129
15.2.3	Ergebnisse der Spaltzugprüfung bei -10 °C	132
15.2.4	Steigung der Kraft-Verformungs-Kurvenabschnitte der Spaltzugprüfungen bei 0 °C und -10 °C	136
15.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Spaltzugprüfung	138
<b>16</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN</b>	<b>141</b>
<b>16.1</b>	<b>Fragen der Zielsetzung</b>	<b>141</b>
16.1.1	Führt die volumetrische und mechanische Optimierung von Mischgut gemäss SN 640 432 tatsächlich zu mechanisch optimalen Kennwerten?	141
16.1.2	Ist die volumetrische Optimierung von SMA-Mischgut unabhängig von der Verdichtungsart?	141
16.1.3	Kann die Marshall- bzw. die Gyratorverdichtung für SMA-Mischungen überhaupt angewendet werden?	143

<b>17</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>144</b>
<b>18</b>	<b>VERZEICHNIS DER LITERATUR</b>	<b>147</b>
<b>19</b>	<b>VERZEICHNIS DER TABELLEN</b>	<b>149</b>
<b>20</b>	<b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN</b>	<b>154</b>
<b>21</b>	<b>ANHANG</b>	<b>162</b>
21.1	<b>Korngrößenverteilungen von den untersuchten Mischungen</b>	<b>162</b>
21.2	<b>Ausgewählte Berechnungsmethoden von Mischgut- und Prüfkörper-Kennwerten</b>	<b>163</b>
21.2.1	Dichte von Mischgut berechnen	163
21.2.2	Rohdichte der Prüfkörper bestimmen	166
21.2.3	Hohlraumgehalt der Prüfkörper	167
21.2.4	Hohlraumgehalt HMM von Prüfkörpern	168
21.2.5	Hohlraumfüllungsgrad HFB von Prüfkörpern	168
21.2.6	$N_{\text{initial}}$ , $N_{\text{design}}$ und $N_{\text{maximal}}$	169
21.2.7	Berechnen des Prüfkörpervolumens nach jeder Umdrehung des Gyrators	169
21.2.8	Berechnen der geschätzten Rohdichte der Gyratorprüfkörper	170
21.2.9	Bestimmen des Prüfkörpervolumens nach der maximalen Anzahl Umdrehungen ( $N_{\text{max}}$ ) des Gyrators	170
21.2.10	Korrekturfaktor für die Rohdichte der Gyratorprüfkörper	170
21.2.11	Verdichtung und Hohlraumgehalt der Prüfkörper	171

## 1 AUFTRAG

Das Bundesamt für Strassen, ASTRA, erteilte am 22. November 1996 auf Antrag der VSS-Kommission FK 273, "Beläge und Dimensionierung", der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Dübendorf (EMPA) den Forschungsauftrag 18/96 "Volumetrische und mechanische Optimierung von Splittmastixasphalt". Dem Forschungsauftrag liegen folgende Fragestellungen zugrunde:

- a) Führt die volumetrische und mechanische Optimierung von Mischgut gemäss SN 640 432 tatsächlich zu mechanisch optimalen Kennwerten?
- b) Führen beim Splittmastixasphalt SMA unterschiedliche Verdichtungsarten zu gleichen volumetrischen und mechanischen Eigenschaften?

## 2 ZIELSETZUNG

In diesem Forschungsprojekt wird untersucht, ob die volumetrische Optimierung von Splittmastixasphalt (SMA) nach SN 640 432 a tatsächlich auch zu mechanisch optimalen Werten führt. Ausserdem wird diskutiert, ob die volumetrische Optimierung von Mischgut unabhängig von der Verdichtungsart ist und ob die Marshallverdichtung bzw. die Gyratorverdichtung für eine solch spezielle Mischgutsorte überhaupt angewendet werden kann, da sie sich wesentlich von den Mischgutsorten Asphaltbeton (AB) und Heissmischtrag-schicht (HMT) unterscheidet.

Entsprechend dieser Zielsetzung wird in diesem Projekt die volumetrische Optimierung von Mineralstoffen und Bindemittel sowie die mechanische Optimierung von Splittmastixasphalt miteinander verglichen. Dafür werden zwei optimale Zusammensetzungen der Mineralstoffe und jeweils zwei Bindemittelsorten in die Untersuchungen einbezogen und zwar

- a) gemäss der bisherigen Optimierung mit der Marshallprüfung sowie
- b) mit dem Mix-Design Level I gemäss Superpave (gemäss SHRP-Methodologie) wie in [Literatur 18] beschrieben.

Für die Bestimmung des minimalen Hohlraumgehaltes im bindemittelfrei gedachten Mineralstoffgemisch der verdichteten Prüfkörper werden zwei Verdichtungsarten eingesetzt, nämlich die traditionelle Marshallprüfung und die Verdichtung mit dem Gyrator.

Splittmastixasphalt hat sich bewährt für Deckschichten stark beanspruchter Strassenbeläge. Deshalb werden in dieser Forschungsarbeit die Beurteilungen der Baustoffe nur im Hinblick auf die Tauglichkeit für Deckschichten vorgenommen.

### 3 STAND DES WISSENS

Der hohe Anteil grober Splittkörner ergibt ein in sich abgestütztes Korngerüst, welches bleibenden Deformationen entgegenwirkt. Splittmastixasphalt wird daher in der Schweiz für hoch beanspruchte Strassenbeläge verwendet und ist sehr verbreitet. Trotz dieser mechanisch anspruchsvollen Aufgabe sind in den einschlägigen Schweizer Normen bis anhin nur volumetrische und keine mechanischen Anforderungen enthalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das mechanische Verhalten von Splittmastixasphalt im Gegensatz zu Asphaltbeton vor allem auf der Stützwirkung (Druck, Verzahnung im Korngerüst) und weniger auf Kohäsion sowie Adhäsion des Komposits beruht. Die Anwendung üblicher mechanischer Prüfungen, wie z.B. des Marshallversuches für die Bestimmung der Stabilität von Asphaltbeton, ist daher nicht a priori gegeben und muss deshalb noch validiert werden.

Eine Liste mit einer Auswahl einschlägiger Literatur, welche den Stand des Wissens widerspiegelt, findet sich im Kapitel 18 "Verzeichnis der Literatur".

Verglichen mit der Verbreitung von Belägen aus Splittmastixasphalt SMA ist auf dem Gebiet der Erarbeitung von Mischrezepturen und Eignungskriterien für das Mischgut ein erheblicher Forschungsrückstand zu verzeichnen. Beispielsweise wurden im amerikanischen Strategic Highway Research Program SHRP Beläge aus Splittmastixasphalt nicht berücksichtigt und es wurden erst nach Abschluss dieses Programms in den USA entsprechende Forschungsanstrengungen unternommen. Der Kenntnisstand in Europa bezieht sich vor allem auf langjährige praktische Erfahrungen und speziell auf die Arbeiten, die in Deutschland zur Erstellung der ZTV Asphalt-StB 94 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Forschungsgesellschaft für das Strassen- und Verkehrswesen, 1995) durchgeführt wurden. Diese Arbeiten beruhen vor allem auf der in Deutschland etablierten Marshall-Methodologie. Bezüglich Anwendung der SHRP Methode auf SMA bestehen in Deutsch-

land wenig Erfahrungen, da dort die Beschaffung von Gyratoren nur relativ zögernd vorschreitet. Wiederholte Literaturrecherchen über deutsche Forschungsarbeiten mit dem Gyrator an SMA führten zu mässigem Erfolg. Das hier beschriebene Projekt stellt somit keine Parallelforschung zu Projekten in Deutschland dar.

In der Schweiz wurde bisher noch kein Forschungsprojekt über Beläge aus Splittmastixasphalt durchgeführt. Im Rundlaufversuch Nr. 6, "Zementstabilisierte Fundamentalschichten aus Asphaltgranulat und Kiessand unter dünnen bituminösen Deckschichten", Ausgabe 2000, wurden zwar auch SMA Beläge einbezogen, jedoch mit einer komplett anderen Zielrichtung, da im Rundlaufversuch Nr. 6 eine Ergänzung der Norm SN 640 324 a "Dimensionierung, Strassenoberbau" [Literatur 12] im Vordergrund steht. Dieser Rundlaufversuch unterstreicht aber die Aktualität und den Bedarf, Forschungsarbeiten auf dem Gebiet von Splittmastixasphalt durchzuführen.

#### **4 FORSCHUNGSPROGRAMM**

Das Forschungsprogramm konzentrierte sich auf die Optimierung eines Mischgutes für Deckschichten nach schweizerischen Grundsätzen und nach amerikanischen Regeln (Level I), basierend auf der im Rahmen von SHRP erarbeiteten Methodologie, gemäss [Literatur 18].

Auf die ursprünglich vorgesehene Variation der Temperatur während der Verdichtung wurde verzichtet, da der Einfluss der Verdichtungstemperatur bei der Verdichtung mit dem Gyrator sich in weiten Bereichen als unbedeutend erwies (eigene Erfahrungen & Gyrator-Workshop in Nantes [Literatur 13]). Daher wurde die Verdichtung bei der jeweiligen Äquiviskositätstemperatur des Bindemittels durchgeführt.

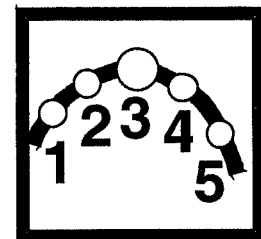
Ein Normalbitumen mit zwei Füllertypen und ein Polymerbitumen mit einem Füllertyp in den Mischungen wurden in die Untersuchungen einbezogen.

Mineralmischungen für Splittmastixasphalt SMA 11 und Splittmastixasphalt SMA 16 wurden untersucht, da aufgrund von Rücksprachen mit verschiedenen Mischanlagen in der Schweiz für Strassen mit hoher Beanspruchung ausschliesslich Splittmastixasphalte mit nominellem Grösstkorn von 11 mm und 16 mm eingebaut werden.

Zur Beantwortung der im Kapitel 1 aufgelisteten Fragen wurden folgende Untersuchungen an SMA 11 und SMA 16 durchgeführt:

- Mechanische Optimierung von Mischgut an SMA 11 und SMA 16
- Mechanische Optimierung von Mischgut gemäss SN 640'432 mit Marshallprüfung
- Volumetrische Optimierung von Mischgut an SMA 11 und SMA 16 mit Marshallverdichtung
- Volumetrische Optimierung von Mischgut an SMA 11 und SMA 16 mit Gyratorverdichtung

<b>Marshallverdichtung</b>		
<b>Gyratorverdichtung</b>		
Bitumen 50/70 (ohne Zusätze) Verdichtungstemperatur 135 °C	SMA 16	SMA 11
→ Filler Netstal	X	X
→ Filler Zeobit	X	X
PmB: Olexobit SMA (ohne Zusätze), Verdichtungstemperatur 135 °C	SMA 16	SMA 11
→ Filler Netstal	X	X
→ Filler Zeobit	0	0



je 4 bis 5 Mischungen

**Abbildung 1** Schematische Darstellung der Kombinationen von Bindemittel und Filler sowie der Optimierung der löslichen Bindemittelanteile mittels Marshall-Stabilität

Einen Überblick über die untersuchten Kombinationen Mischgut, Bindemittelsorten und Filler enthält Abbildung 1. Demzufolge wurden 60 Mischungen untersucht; d.h. pro Verdichtungsart 2 Mischgutsorten (SMA 11 und SMA 16) mit 3 Filler-Bindemittel-Kombinationen mit jeweils 5 Mischungen.

#### **Kommentar zur Verwendung der Filler**

Hinsichtlich der drei Filler-Bindemittel-Kombinationen ist zu vermerken, dass der Vergleich eines "normalen" Kalkfillers (Filler Netstal) mit einem "starken" Filler (Filler Zeobit) im Hinblick auf praktische Probleme beim Einsatz von Normalbitumen erforderlich war. Andererseits sind für viele Polymerbitumen keine "starken" Filler notwendig, deshalb wurde kein starker Filler für Mischungen mit polymermodifiziertem Bitumen Olexobit SMA verwendet (nach Abbildung 1).

Neben den üblichen Untersuchungen am Mischgut und den mit Marshall und Gyrator hergestellten Prüfkörpern wurden beim jeweiligen Optimum der löslichen Bindemittelanteile noch ausgewählte, nicht normierte Spezialuntersuchungen durchgeführt (Tabelle 1):

- Bleibende Deformationen bei sommerlichen Temperaturen mit dem französischen Spurrinntest (LCPC Ornièreur) als Indikator für Standfestigkeit und Kriechen unter dem Einfluss von erhöhten Temperaturen (im Sommer) zu Vergleichszwecken und wegen CEN.
- Bruchverhalten bei tiefen Temperaturen mit der Spaltzugprüfung als Indikator für Sprödigkeit und die Entstehung von Rissen in der Kälte (im Winter).

	<b>Prüfung</b>	<b>Prüftemperatur</b>
<b>a) Marshallverdichtung</b>	Marshallprüfung	60 °C
	Mechanische + Volumetrische Prüfung	Raumtemperatur
<b>b) Gyratorverdichtung</b>	Gyratorprüfung	Raumtemperatur
	Volumetrische Prüfung	Raumtemperatur
<b>c) Spezialuntersuchung</b>	Bleibende Deformation (Ornièreur)	60 °C
	Kältebruch (Spaltzug)	0 °C und -10 °C

**Tabelle 1** Tabellarische Übersicht über das Prüfprogramm für die unterschiedlich verdichteten Prüfkörper sowie Spezialuntersuchungen beim Optimum der löslichen Bindemittelanteile

## 5 ALLGEMEINE ANGABEN ZU DEN MATERIALIEN

### 5.1 Mineralstoffe

Handelsbezeichnung: **Filler Zeobit**, hochstabilisierend (Phonolith)  
Herkunft: Hauri AG, Bötzingen  
Entnahmeort: Brechanlage  
Entnommen durch: Hersteller  
Entnahmedatum: 28.10.97

Handelsbezeichnung: **Filler Netstal** (Kalksteinmehl)  
Herkunft: Netstal  
Entnahmeort: Brechanlage  
Entnommen durch: Hersteller  
Entnahmedatum: 04.04.95

Handelsbezeichnung: **Eigenfiller aus Brechsand 0/4**  
Herkunft: Brechsand 0/4  
Entnahmeort: EMPA  
Entnommen durch: "cm"  
Entnahmedatum: 20.01.98

Handelsbezeichnung: **Brechsand 0/4, Splitt 3/6, Splitt 6/11 und Splitt 11/16**  
Herkunft: Belag AG  
Entnahmeort: 8604 Volketswil  
Entnommen durch: "cm"  
Entnahmedatum: 29.07.95

## 5.2 Bindemittel

Handelsbezeichnung:	<b>Bitumen 50/70</b> (= Bezeichnung gemäss EN 12 591 dies entspricht gemäss SN 671 110 einem Bitumen B 55/70)
Herkunft:	Shell
Entnahmeort:	BHZ, Werk Volketswil
Entnommen durch	Mitarbeiter der EMPA
Eingangsdatum:	21.4.98
Art	<b>Normalbitumen</b>
Sorte	<b>50/70</b>

Bitumen 50/70, Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 9200/215

Handelsbezeichnung:	<b>Olexobit SMA</b>
Herkunft:	BP
Entnahmeort:	Raffinerie Ingolstadt
Entnommen durch	Hersteller
Eingangsdatum:	3.7.97
Art	<b>Polymerbitumen</b>
Sorte	PmB

Olexobit SMA, Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 171074

## 5.3 Mischgut

Hersteller des Mischgutes	EMPA-Dübendorf Abteilung Strassenbau/Abdichtungen
Aufbereitungsanlage	Eirich-Mischer (25 kg Chargenmischer)
Chargenmasse	26 bis 28 kg
Mischtemperatur	vgl. Tabelle 25, Seite 35
Temperatur bei Verdichtungsbeginn	vgl. Tabelle 28 , Seite 43
Mischgut / Sorte	SMA 11
Handelsbezeichnung	Splittmastixasphalt SMA 11
Mischgut / Sorte	SMA 16
Handelsbezeichnung	Splittmastixasphalt SMA 16

## 6 PRÜFVORSCHRIFTEN UND ARBEITSANLEITUNGEN

Das Durchführen der Untersuchungen und das Berechnen der massgebenden Werte erfolgte gemäss den unten aufgeführten Schweizer Normen und unter Einhaltung der in den entsprechenden Normen und Prüfvorschriften angegebenen Genauigkeiten.

### 6.1 Mineralstoffe

Siebanalyse	SN 670 810 c
Sedimentationsanalyse	SN 670 818
Filler wird sedimentiert in Ethylalkohol mit Calciumchlorid als Dispergiermittel.	
Hohlraumgehalt nach Rigden	SN 670 840
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN 671 743 a
Volumenänderung von Prüfkörpern nach Wasserlagerung	SN 670 845
Dichte des Fillers	EMPA SOP 166 <sup>1</sup>
Pyknometer mit Aufsatz und Messmarke, 100 ml Inhalt, bei Raumtemperatur wägen. Filler, Anteile < 0,09 mm, in Pyknometer füllen, Aufsatz einsetzen und wägen. Pyknometer und Aufsatz mit Toluol zu etwa $\frac{3}{4}$ füllen. Pyknometer, Filler und Toluol kräftig schütteln, anschliessend 15 Minuten mit schwachem Vakuum eingeschlossene Luft austreiben. Pyknometer bis zur Messmarke mit Toluol füllen und zwei Stunden im Wasserbad auf Prüftemperatur $25 \pm 0.1$ °C bringen. Nach zwei Stunden Pyknometer und Filler mit Toluol bis zur Messmarke füllen, abtrocknen und wägen.	
Petrographische Beschaffenheit	SN 670 760 a
Anteil an Karbonaten	Methode von Passon [Literatur 1
Rundlaufversuch Nr. 6, "Zementstabilisierte Foundationsschichten aus Asphaltgranulat und Kiessand unter dünnen bituminösen Deckschichten", 2000	

#### Literatur 2

Silikatische Rückstände	Röntgendiffraktionsanalyse (XRD) [Literatur 11]
Verunreinigungen	SN 670 760 a

- Organische  
Augenschein und Behandlung des Fillers mit 3-%iger wässriger Natriumhydroxid-Lösung.
- Anorganische  
Für die Bestimmung der wasserlöslichen Anteile wurden 4 g Filler während vier Stunden in entionisiertem Wasser ausgelaugt, anschliessend filtriert und das Filtrat eingedampft. Der gravimetrisch bestimmte Rückstand bezogen auf 100 g Filler ist der Anteil der wasserlöslichen Salze.
- Gehalt an freiem Kalk (freies CaO)  
wurde mittels Extraktion mit Ethylenglykol bestimmt. Der so alkalisch vorliegende Kalk wurde mit Salzsäure acidimetrisch bestimmt.

### 6.2 Bindemittel

Allgemeine Prüfvorschriften	SN 671 700 a
Makroskopische Beurteilung	SN 671 710 c
Dichte	SN 671 713 b

<sup>1</sup> EMPA SOP = Arbeitsanweisung der Abt. 113

Masse des Prüfkörpers 25 bis 60 g statt mindestens 70 g und Wägegenauigkeit 0.0001 g statt 0.01 g. Ergebnisunsicherheit mindestens gleich wie nach Norm.

Asche	SN 671 719
Penetration	SN 671 740 a
Lösliches in Toluol	SN 671 749 b
Masseänderung bei 163 °C, 75 Minuten	SN 671 752 c
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN 671 743 a
Penetrationsindex	SN 671 744 a
Duktilität	SN 671 746 a
Brechpunkt nach Fraass	SN 671 755 a
Polymermodifizierte Bitumen (PmB) für Beläge	SN 671 400 (Vornorm)
Elastische Rückstellung	SN 671 747
Heisslagerstabilität von polymermodifizierten Bindemitteln	SN 671 750

### 6.3 Mischgut

Bestimmen des löslichen Bindemittelanteils	SN 671 955 a
Dichte	SN 671 965 a
Rohdichte ohne paraffinieren	SN 671 967 a
Alle Rohdichtebestimmungen wurden ohne paraffinieren durchgeführt, da die Wasseraufnahme der Prüfkörper immer unterhalb der Normanforderung waren.	
Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper	SN 671 967 a
Marshallprüfung	SN 671 969 b
Hohlraumfüllungsgrad HFB der Marshallprüfkörper mit Bitumen	SN 640 431 b
Gyrator, Herstellen und Verdichten von Prüfkörpern	EMPA SOP 3097 <sup>2</sup>
Prüfkörper herstellen für Spurrinntest	französische Norm NF P 98-250-2
Spurrinntest	französische Norm NF P 98-253-1
Spaltzugprüfung siehe Kapitel 15.2	

### 6.4 Qualitätsvorschriften

Splittmastixasphalt-Deckschichten	SN 640 432 a
Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung	SN 640 431 b
Filler für bituminöses Mischgut, Qualitätsvorschriften	SN 670 760 a
Sand, Kies, Splitt und Schotter für Beläge, Qualitätsanforderungen	SN 670 130

<sup>2</sup> EMPA SOP = Arbeitsanweisung der Abt. 113

## 7 EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN MINERALSTOFFE

### 7.1 Filler

Filler Netstal	Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 9200/64 und 171'047
Filler Zeobit	Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 171'047
Eigenfiller aus Brechsand 0/4	Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 171'047

Die Beurteilung der Filler Netstal sowie Zeobit erfolgte aufgrund der Anforderungen an Fremdfiller und jene des Fillers aus dem Brechsand 0/4 aufgrund der Anforderungen an Eigenfiller gemäss Schweizer Norm SN 670 760 a "Filler für bituminöses Mischgut, Qualitätsvorschriften".

Alle Untersuchungsergebnisse der drei Filler wurden in Tabellen nebeneinander dargestellt und anschliessend gemäss SN 670 760 nur für bituminöse Mischungen kurz beurteilt, die in Deckschichten verwendet werden.

#### 7.1.1 Petrografische Beschaffenheit

Nach der Methode von Passon wurde der Anteil an Karbonaten (hydrophile Anteile) bestimmt.

Filler		Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Gehalt an Karbonaten	Masse-%	92 ± 5	7 ± 5	43 ± 5

**Tabelle 2** Filler, Gehalt an Karbonaten

Mittels Röntgendiffraktionsanalyse (XRD) [Literatur 11] wurden die silikatischen Rückstände (hydrophil) bestimmt.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Quarz	gross	mittel	gross
Muskowit	mittel	---	---
Kaolinit	---	---	wenig
Hornblende	wenig	---	wenig
Feldspat	wenig	gross	gross
Biotit	---	---	wenig
Montmorillonit	---	---	wenig

**Tabelle 3** Filler, petrografische Beschaffenheit

### Beurteilung der petrografischen Beschaffenheit

Anforderungen an Filler bezüglich Anteil an Tonmineralien für Deckschichten: Der Anteil muss  $\leq 2$  Masse-% sein.

Anforderungen an Filler bezüglich Anteil an Glimmer für Deckschichten: Der Anteil muss  $\leq 5$  Masse-% sein.

Anforderungen an Filler bezüglich der Summe von Tonmineralien und Glimmer für Deckschichten: Der Anteil muss  $\leq 5$  Masse-% sein.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Petrografische Beschaffenheit			
Tonmineralien, Glimmer	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Verunreinigungen	erfüllt	erfüllt	erfüllt*
Montmorillonit	nicht anwesend	nicht anwesend	anwesend

**Tabelle 4** Filler, Tonmineralien, Glimmer, Verunreinigungen, Montmorillonit

\* Beim Eigenfiller hat die XRD-Analyse die Präsenz des stark quellfähigen Montmorillonit nachgewiesen. Obwohl dieses Tonmineral in einer von der Norm erlaubten Menge vorkommt, könnte es die Eigenschaften des Fillers negativ beeinflussen.

Die in der Schweizer Norm für Deckschichten respektive Trag- und Fundamentalschichten vorgeschriebenen maximalen Werte für Tonmineralien, Glimmer sowie die Summe der beiden Mineralgruppen werden von keinem Filler überschritten. Damit erfüllen die untersuchten Filler diese Anforderungen der Schweizer Norm SN 670 760a.

Alle drei Filler erfüllen die Anforderungen an den höchstzulässigen Gehalt ungeeigneter Anteile.

## 7.1.2 Verunreinigungen

### Anorganische Verunreinigungen

Filler		Netstal	Zeobit	Eigenfiller
wasserlösliche Salze	Masse-%	0,18 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,66 ± 0,01
freier Kalk, freies CaO	Masse-%	< 0,01	0,19 ± 0,01	0,36 ± 0,01

**Tabelle 5** Filler, wasserlösliche Salze und freier Kalk, freies CaO

### Beurteilung der anorganischen Verunreinigungen

Anforderung an den Anteil an ungelöschten Kalk (CaO) für Deckschicht und Abdichtungen: Der Anteil darf maximal 0,6 Masse-% sein.

Anforderung an den Anteil an wasserlöslichen Salzen für Deckschicht und Abdichtungen: Der Anteil darf maximal 2,0 Masse-% sein.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Ungelöschter Kalk (CaO)	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Wasserlösliche Salze	erfüllt	erfüllt	erfüllt*

**Tabelle 6** Filler, anorganische Verunreinigungen

Alle Filler erfüllen die Anforderungen der Schweizer Norm SN 670 760a bezüglich der anorganischen Verunreinigungen.

### Organische Verunreinigungen

Anforderung an den Anteil an Holz, Torf, Kohle oder Russ für Deckschicht und Abdichtungen: Der Anteil darf maximal 0,5 Masse-% sein.

Anforderung an den Anteil an Humusstoffe für Deckschicht und Abdichtungen: Der Anteil darf maximal 0,05 Masse-% sein.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Humusstoffe	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Holz, Torf, Kohle oder Russ	wurden bei keinem Filler gefunden		

**Tabelle 7** Filler, organische Verunreinigungen

### **Beurteilung der organischen Verunreinigungen**

Der Filler **Netstal** (Kalksteinmehl) weist keine erkennbaren, organischen Bestandteile wie Holz, Kohle usw. auf. Nach der Behandlung des Fillers mit 3-%iger wässriger Natriumhydroxidlösung stellte sich keine Gelbfärbung ein. Entsprechend ist der Gehalt an Humusstoffen kleiner als 0,05 %.

Der Filler **Zeobit** weist keine erkennbaren, organischen Bestandteile wie Holz, Kohle usw. auf. Bei der Behandlung des Fillers mit 3-%iger wässriger Natriumhydroxidlösung stellte sich keine Gelbfärbung ein. Deshalb ist der Gehalt an Humusstoffen kleiner als 0,05 % einzustufen.

Der **Eigenfiller** aus Brechsand 0/4 weist keine makroskopisch erkennbaren, organischen Bestandteile wie Holz, Kohle usw. auf. Nach der Behandlung mit 3%-iger Natriumhydroxidlösung stellte sich keine Gelbfärbung ein. Entsprechend liegt der Gehalt an Humusstoffen unter 0,05 Masse-%.

Alle Filler erfüllen diese Anforderungen der Schweizer Norm SN 670 760a bezüglich der organischen Verunreinigungen.

#### **7.1.3 Korngrößenverteilungen der angelieferten Filler**

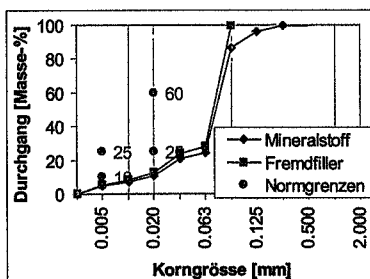
Die Sedimentationsanalyse von Filler nach dem von der EMPA angepassten Sedimentationsverfahren zur Bestimmung der mittleren Korngrößen (ohne Berücksichtigung der Kornform) wird ausschliesslich an der Fraktion < 0,063 mm durchgeführt.

Die berechneten Masse-Anteile werden dann nochmals auf 100 Masse-% der Filleranteile < 0,09 mm umgerechnet.

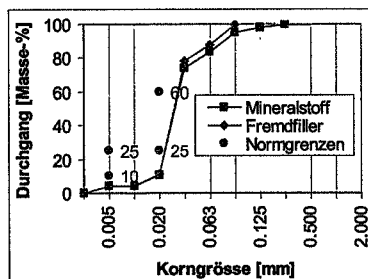
Filler		Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Korndurchmesser in mm				
0,25	Masse-%	100,0		
0,125	Masse-%	96,4	100,0	
0,09	Masse-%	87,0	96,9	100,0
0,063	Masse-%	24,4	85,3	24,4
0,09	Masse-%	100,0	100,0	100,0
0,05	Masse-%	28,0	78,1	20,7
0,02	Masse-%	24,0	11,6	13,2
0,01	Masse-%	12,4	4,4	9,2
0,005	Masse-%	8,2	4,4	5,6

**Tabelle 8** Filler, Sieb- und Sedimentationsanalyse, Anteil < 0,063 mm

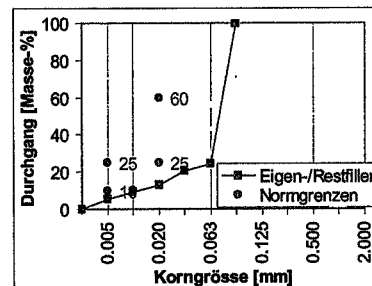
In Abbildung 2 bis Abbildung 4 sind die Korngrößenverteilungen, d.h. die Siebdurchgänge in Masse-%, der verschiedenen Filler im Anlieferungszustand sowie deren Anteile < 0,09 mm in Funktion der Siebgrösse [mm] dargestellt.



**Abbildung 2** Korngrößenverteilung, Filler Netstal



**Abbildung 3** Korngrößenverteilung, Filler Zeobit



**Abbildung 4** Korngrößenverteilung, Filler Eigenfiller

### Beurteilung der Korngrößenverteilungen der Filler

Anforderung an Fremdfiller: Der Anteil an Körnern < 0,09 mm muss  $\geq 80$  Masse-% betragen.

Anforderungen an Filler:

- Der Anteil an Körnern < 0,02 mm muss zwischen 25 und 60 Masse-% betragen.
- Der Anteil an Körnern < 0,005 mm muss zwischen 10 und 25 Masse-% betragen.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Siebdurchgang, Anteil < 0,09 mm	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Siebdurchgang, Anteil < 0,02 mm	erfüllt nicht	erfüllt nicht	erfüllt nicht
Siebdurchgang, Anteil < 0,005 mm	erfüllt nicht	erfüllt nicht	erfüllt nicht

**Tabelle 9** Filler, Tonminerale, Glimmer

Alle Filler erfüllen nur die Anforderung an den Siebdurchgang des Anteiles < 0,09 mm. Der Filler Netstal erfüllt mit nur 24,0 Masse-% gemäss Normgrenze von mindestens 25 Masse-% die Anforderung an den Siebdurchgang des Anteiles < 0,02 mm knapp nicht. Hingegen erfüllen die Filler Zeobit (11,6 Masse-%) sowie der Eigenfiller (13,2 Masse-%) die Anforderung an den Siebdurchgang des Anteiles < 0,02 mm bei weitem nicht.

Alle Filler erfüllen die Anforderung an den Siebdurchgang des Anteiles < 0,005 mm nicht, denn der Siebdurchgang liegt immer unterhalb 10 Masse-%.

Der Filler Zeobit ist wesentlich feinkörniger als der Filler Netstal (Abbildung 2 und Abbildung 3).

#### Zur Beachtung:

Alle folgenden Prüfungen der Filler in den Kapiteln 7.1.4 "Dichte, Hohlraumgehalt nach Rigden", 7.1.5 "Versteifende Wirkung der Filler" sowie 7.1.6 "Volumenänderung, Mittelwerte aus 6 Prüfkörpern" wurden nur mit dem Anteil < 0,09 mm durchgeführt!

### 7.1.4 Dichte, Hohlraumgehalt nach Rigden

Filler		Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Dichte Toluol	t·m <sup>-3</sup>	0,865	0,865	0,865
Dichte des Fillers	t·m <sup>-3</sup>	2,707	2,563	2,744
Hohlraumgehalt nach Rigden	Vol-%	35,3	46,1	32,4

**Tabelle 10** Filler, Dichte bei 25 °C, Hohlraumgehalt nach Rigden

#### Beurteilung des Hohlraumgehaltes nach Rigden

Anforderung: Der Hohlraumgehalt nach Rigden muss zwischen 30 und 45 Volumen-% liegen.

Filler		Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Hohlraumgehalt nach Rigden	Vol-%	erfüllt	erfüllt nicht	erfüllt

**Tabelle 11** Filler, Hohlraumgehalt nach Rigden

Die Filler Netstal wie auch der Eigenfiller erfüllen die Anforderung an den Hohlraumgehalt nach Rigden. Der Filler Zeobit hat einen Hohlraumgehalt nach Rigden von 46,1 Vol-% und erfüllt deshalb die Anforderung nicht.

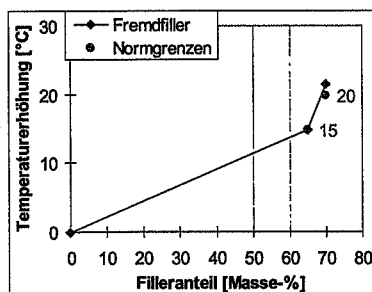
### 7.1.5 Versteifende Wirkung der Filler

Mischungsverhältnisse	Filler Masse-%	Bitumen Masse-%
Ausgangsbitumen	0	100,0
Mischung 1	65,0	35,0
Mischung 2	70,0	30,0

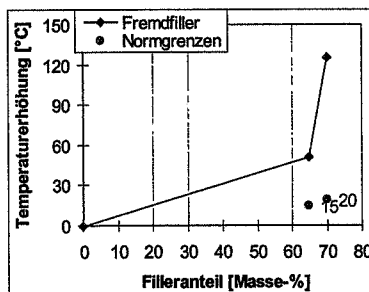
Filler		Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Erweichungspunkt RuK				
Ausgangsbitumen	°C	49,0	45,6	45,6
Mischung 1	°C	64,7	96,9	60,45
Mischung 2	°C	73,0	171,5	67,1
Erhöhung des Erweichungspunktes RuK				
Mischung 1	°C	15,7	51,3	14,85
Mischung 2	°C	24,0	125,9	21,5

**Tabelle 12** Filler, Charakterisierung von Gemischen aus Filler und Bitumen

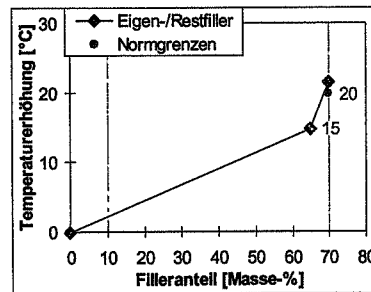
In Abbildung 5 bis Abbildung 7 ist jeweils die versteifende Wirkung der verschiedenen Filler, d.h. die Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel (RuK) [°C] in Funktion des Filleranteils [Masse-%], zusammen mit den Normgrenzen dargestellt.



**Abbildung 5** Versteifende Wirkung, Filler Netstal



**Abbildung 6** Versteifende Wirkung, Filler Zeobit



**Abbildung 7** Versteifende Wirkung, Eigenfiller

### Beurteilung der versteifenden Wirkung

Anforderungen an die Temperaturerhöhung des Erweichungspunktes RuK:

- für Mischung 1 (aus 65,0 Masse-% Filler mit 35,0 Masse-% Bitumen) muss die Temperaturerhöhung des Erweichungspunktes RuK  $\geq 15$  °C ergeben.
- für Mischung 2 (aus 70,0 Masse-% Filler mit 30,0 Masse-% Bitumen) muss die Temperaturerhöhung des Erweichungspunktes RuK  $\geq 20$  °C ergeben.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Mischung 1	erfüllt	erfüllt	erfüllt nicht
Mischung 2	erfüllt	erfüllt	erfüllt

**Tabelle 13** Filler, Beurteilung der versteifenden Wirkung

Die Filler Netstal sowie der Filler Zeobit erfüllen die Anforderung an die versteifende Wirkung. Der Eigenfiller hat bei der Mischung 1 eine versteifende Wirkung von 14,85 °C im Gegensatz zu den geforderten 15 °C und erfüllt deshalb die Anforderung nicht.

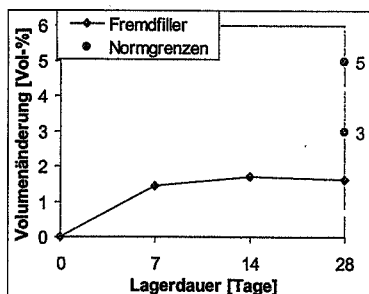
### 7.1.6 Volumenänderung, Mittelwerte aus 6 Prüfkörpern

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
Volumenänderung Vol-%	0,6	3,3	2,3
Risse nach 28 Tagen Wasserlagerung	keine	keine	keine

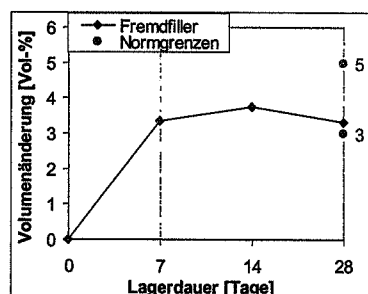
**Tabelle 14** Filler, Volumenänderung von Prüfkörpern nach Wasserlagerung

Alle Prüfkörper der Filler für die Volumenänderung zeigten nach der Prüfung keine Risse.

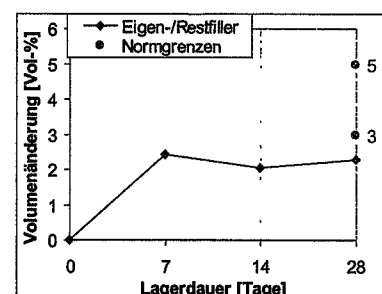
In Abbildung 8 bis Abbildung 10 ist die Volumenveränderung [Volumen-%] und in Abbildung 11 bis Abbildung 13 die Rohdichte [ $\text{t m}^{-3}$ ] der verschiedenen Filler in Funktion der Lagerdauer [Tage] dargestellt.



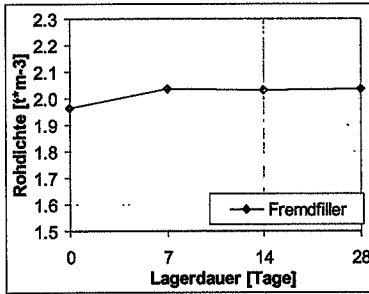
**Abbildung 8** Volumenänderung, Filler Netstal



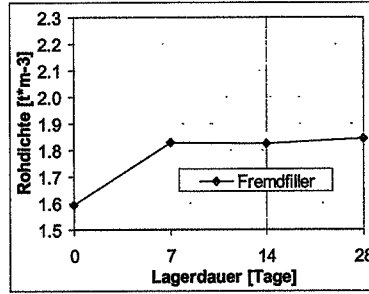
**Abbildung 9** Volumenänderung, Filler Zeobit



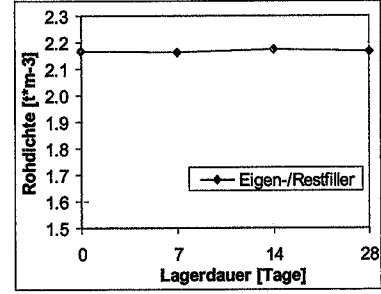
**Abbildung 10** Volumenänderung, Eigenfiller



**Abbildung 11** Rohdichte während Volumenänderung, Filler Netstal



**Abbildung 12** Rohdichte während Volumenänderung, Filler Zeobit



**Abbildung 13** Rohdichte während Volumenänderung, Eigenfiller

**Beurteilung der Volumenänderung nach Wasserlagerung**

Anforderung an die Volumenänderung nach Wasserlagerung der Filler für Deckschicht und Abdichtungen: Die Volumenänderung darf maximal 3 Volumen-% betragen.

Filler	Netstal	Zeobit	Eigenfiller
für Deckschicht und Abdichtungen	erfüllt	erfüllt nicht	erfüllt
Risse nach 28 Tagen Wasserlagerung	erfüllt	erfüllt	erfüllt

**Tabelle 15** Filler, Volumenänderung nach Wasserlagerung

## 7.2 Korngrössenverteilung von Brechsand und Splitten aus EMPA Prüfbericht Nr. 161'157

	Brech-sand 0/3	Fraktion > 0,5 mm aus Brech-sand 0/3	Splitt 3/6	Splitt 6/11	Splitt 6/8	Splitt 8/11	Splitt 11/16
Grösst-korn	4 mm	6 mm	7 mm	13 mm	8 mm	13 mm	24 mm
Sieb [mm]	Siebdurchgänge in [Masse-%]						
22,4							100,0
16,0				100,0		100,0	92,3
11,2				99,4		97,8	6,1
8,0		100,0	100,0	71,3	100,0	0,0	0,3
5,6		76,3	93,4	5,9	8,3		0,1
4,0	100,0	52,6	51,5	1,7	2,4		0,1
2,8	97,5	30,4	18,8	1,0	1,4		0,0
2,0	83,4	19,7	7,1	0,7	1,0		
1,0	50,0	4,3	3,2	0,5	0,7		
0,500	29,5	0,7	2,4	0,4	0,6		
0,250	17,1	0,3	1,8	0,4	0,6		
0,125	8,9	0,2	1,2	0,4	0,5		
0,090	6,8	0,1	1,1	0,3	0,5		

**Tabelle 16** Korngrössenverteilung, Brechsand und Splitte

Da im Splitt 6/11 die Verteilung der Anteile 6/8 mm und 8/11 mm nicht im Verhältnis 1 : 1 vorlag, wurde diese Kornfraktion für die Ausarbeitung der Mischrezepturen der Splittmastixasphalt-Mischgutsorten SMA 11 und SMA 16 mit dem 8 mm Prüfsieb getrennt. Im Folgenden werden die beiden Kornfraktionen 6/8 mm und 8/11 mm als Splitt 6/8 und Splitt 8/11 bezeichnet.

### 7.3 Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten aller verwendeten Mineralstoffe

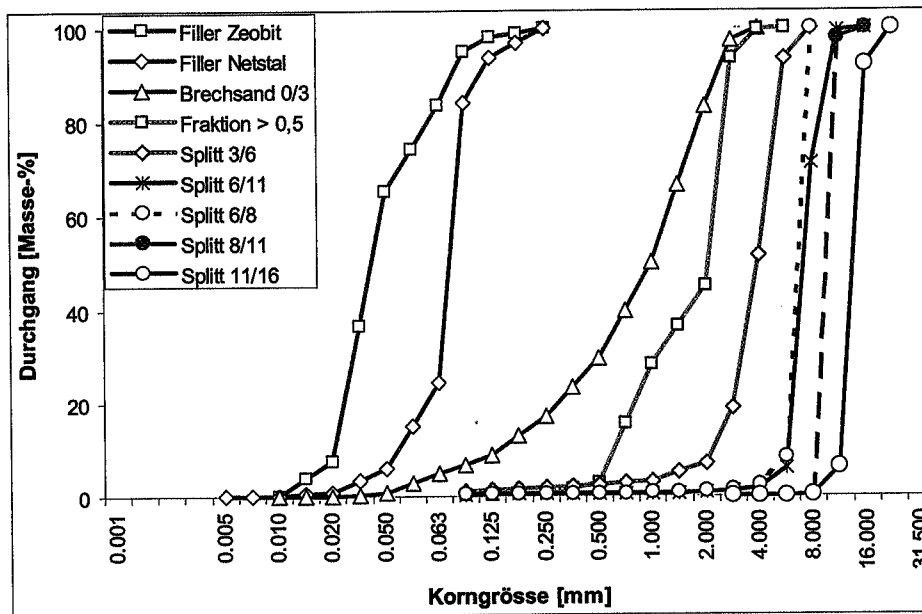


Abbildung 14 Korngrößenverteilungen der verwendeten Mineralstoffe

### 7.4 Dichte der verwendeten Mineralstoffe

	Pyknome- ter-Nummer	Pyknome- ter-Volumen	Masse Py- knometer	Masse Py- knometer mit Mineral	Masse Py- knometer mit Mineral und Toluol	Dichte
		ml	g	g	g	t·m <sup>-3</sup>
Filler Netstal	50,17 und 50,18	142,7	210,281	270,282	374,595	2,707
Filler Zeobit	50,18 und 50,16	143,04	207,84	267,82	371,31	2,563
Brechsand 0/4	76	2135,4	1570,0	2670,4	4164,7	2,698
Fraktion > 0,5	61	2111,8	1550,4	2650,4	4124,7	2,700
Splitt 3/6	59	2362,2	1447,1	2547,3	4238,3	2,701
Splitt 6/11	64	2370,3	1675,4	3775,5	5146,2	2,673
Splitt 11/16	51	2358,5	1418,3	3511,4	4880,9	2,700

Tabelle 17 Dichte der Mineralstoffe, mit Toluol bestimmt

## 8 EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN BINDEMittel

### 8.1 Bindemittel

Bitumen 50/70

Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 9200/215

Olexobit SMA

Daten aus EMPA Prüfbericht Nr. 171074

Makroskopische Beurteilung	Bitumen 50/70	Olexobit SMA
<b>Homogenität bei Raumtemperatur</b>		
Wasser	ohne	ohne
Verunreinigungen	ohne	ohne
Aussehen der Oberfläche	glänzend	glänzend
Farbe	schwarz	schwarz
Geruch	nach Bitumen	nach Bitumen
Aussehen der gestörten Oberfläche	glänzend	glänzend
Konsistenz	mittelhart	mittelhart
<b>Homogenität während dem Aufwärmen</b>		
Verunreinigungen	ohne	ohne
Verhalten beim Aufwärmen	normal	normal
<b>Homogenität bei Verarbeitungstemperatur</b>		
Geruch	nach Bitumen	nach Bitumen
Aussehen der Oberfläche	glänzend	glänzend
Abfliessen vom Glasstab	glatt	glatt

**Tabelle 18** Eigenschaften der Bindemittel, Makroskopische Beurteilung

Massgebende Werte		Bitumen 50/70	Olexobit SMA
Dichte	t·m <sup>-3</sup>	1,028	1,024
Penetration bei 25 °C	10 <sup>-1</sup> mm	74	50
Penetration bei 25 °C, nach Massenänderungsprüfung (RTFOT 163 °C, 75 min) in % des ursprünglichen Wertes	%	53	71
Masseänderung bei 163 °C, 75 Minuten	Masse-%	0,04	-0,03
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	48,8	73,6
Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach Massenänderungsprüfung RTFOT	°C	7,0	2,4
Penetrationsindex		-0,5	3,4
Duktilität bei 25 °C	mm	> 1500	701
Brechpunkt nach Fraass	°C	-23	-21
Lösliches in Toluol	Masse-%	99,54	97,81
Asche	Masse-%	0,02	0,09

**Tabelle 19** Eigenschaften der Bindemittel, Massgebende Werte

<b>Elastische Rückstellung</b>		
Elastische Rückstellung 25 °C/30 Min., im Anlieferungszustand	%	77
Elastische Rückstellung 25 °C/30 Min., nach Masseänderung	%	72
<b>Heisslagerstabilität</b>		
Erweichungspunkt Ring und Kugel, nach Heisslagerstabilität, oberes Drittel	°C	74,4
Erweichungspunkt Ring und Kugel, nach Heisslagerstabilität, unteres Drittel	°C	72,6
Differenz zwischen oberem und unterem Drittel	°C	1,8

**Tabelle 20** Prüfungen, die ausschliesslich an Olexobit SMA durchgeführt wurden

## 9 MISCHREZEPTE

Die für diesen Forschungsauftrag jeweils verwendeten Sande und Splitte wurden speziell für die Herstellung dieser Mischungen angeschafft. Die prozentualen Zusammensetzungen der Mineralstoffe für die Sollwerte der Korngrössenverteilungen der Splittmastixasphalte SMA 11 und SMA 16 wurden aufgrund dieser Mineralstoffe ermittelt und dann für alle Prüfungen beibehalten. Für den SMA 11 wurde eine Korngrössenverteilung gewählt, die sich ziemlich in der Mitte zwischen den beiden Grenzkurven für die Sollwerte der Norm für Splittmastixasphalte befindet (Abbildung 21). Für den SMA 16 wurde eine grobe Variante der Mineralstoffe gewählt (Abbildung 22). Dabei wurde in Kauf genommen, dass die Sollwerte der Korngrössenverteilungen stellenweise geringfügig über die Grenzkurve für den Sollwert der Norm im Grobbereich hinausgehen.

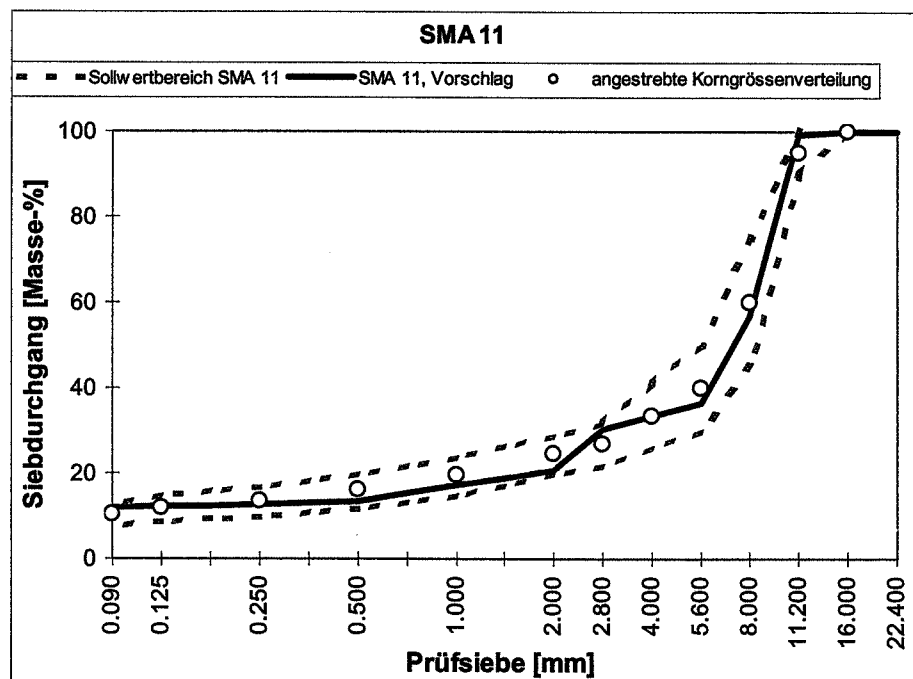
Die Mineralstoffgemische für alle Mischungen von SMA 11 bzw. SMA 16 wurden einmal festgelegt und dann für alle Mischungen beibehalten. Als Bindemittel wurden Bitumen 50/70, Normalbitumen sowie Olexobit SMA, Polymerbitumen, verwendet.

## 9.1 Splittmastixasphalt SMA 11

Die Mischrezepte für Mischgut SMA 11 mit Filler Netstal bzw. Filler Zeobit mit Bitumen 50/70 sowie für Mischgut SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA waren für alle untersuchten Mischungen gleich (vergleiche die Zusammensetzung der Mineralstoffkomponenten in Tabelle 21 sowie die Korngrössenverteilung in Abbildung 15).

Mineralstoffkomponenten		SMA 11	SMA 11
Materialien	Sorte	Masse-%	Masse-%
Filler	Netstal	12,0	---
Filler	Zeobit	---	12,0
Brechsand	0/3	4,0	4,0
Fraktion	> 0,5	14,0	14,0
Splitt	3/6	4,0	4,0
Splitt	6/11	30,0	30,0
Splitt	8/11	36,0	36,0

**Tabelle 21** Prozentuale Zusammensetzung der Mineralstoffe für SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA und für SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70



**Abbildung 15** Korngrössenverteilung, Grenzkurven der SN 640 432 (Sollwertbereich) und angestrebte Korngrössenverteilung aufgrund der berechneten Summe der prozentualen Kornfraktionen für SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA wie auch für SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Mischgut	Dichte	
	t·m <sup>-3</sup>	
SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	t·m <sup>-3</sup>	2,693
SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	t·m <sup>-3</sup>	2,676
SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	t·m <sup>-3</sup>	2,693

**Tabelle 22** Dichte der Mineralstoffgemische von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

## 9.2 Splittmastixasphalt SMA 16

Die Mischrezepte für Mischgut SMA 16 mit Filler Netstal bzw. Filler Zeobit und Bitumen 50/70 sowie Mischgut SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA waren für alle untersuchten Mischungen gleich (vergleiche die Zusammensetzung der Mineralstoffkomponenten in Tabelle 23 sowie die Korngrößenverteilung in Abbildung 16).

Mineralstoffkomponenten		SMA 16	SMA 16
Materialien	Sorte	Masse-%	Masse-%
Filler	Netstal	12,0	---
Filler	Zeobit	---	12,0
Brechsand	0/3	12,0	12,0
Splitt	3/6	3,0	3,0
Splitt	6/11	10,0	10,0
Splitt	8/11	3,0	3,0
Splitt	11/16	60,0	60,0

**Tabelle 23** Prozentuale Zusammensetzung der Mineralstoffe für SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

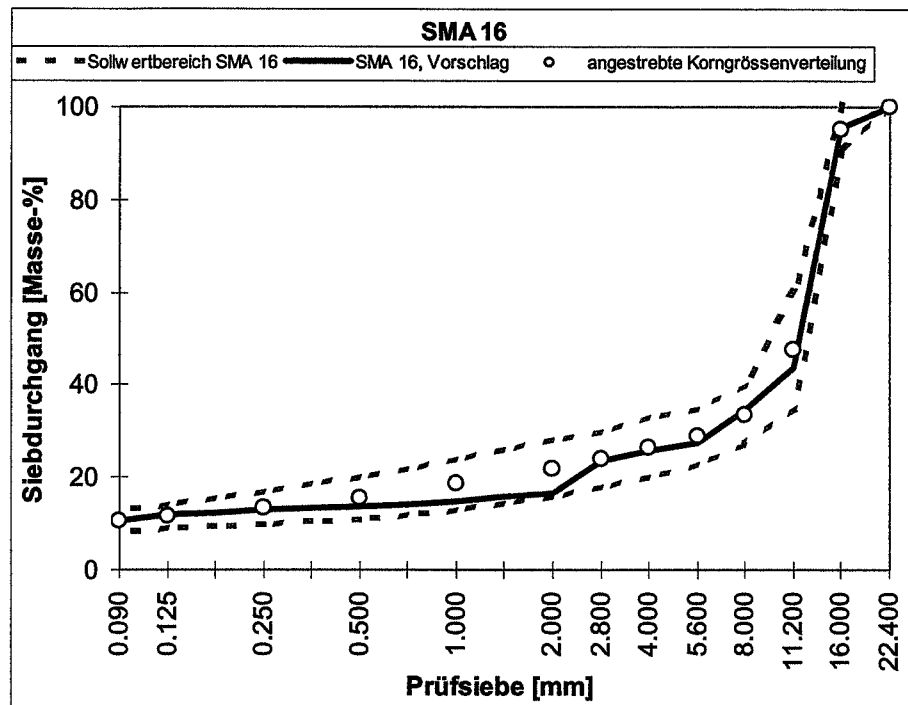


Abbildung 16

Korngrößenverteilung, Grenzkurven der SN 640 432 (Sollwertbereich) und angestrebte Korngrößenverteilung aufgrund der berechneten Summe der prozentualen Kornfraktionen für SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Mischgut	Dichte	
SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	t·m <sup>-3</sup>	2,693
SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	t·m <sup>-3</sup>	2,676
SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	t·m <sup>-3</sup>	2,693

Tabelle 24

Dichte der Mineralstoffgemische von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

## 10 MISCHEN UND VERDICHTEN

### 10.1 Mischer und Verdichtungsformen

Der Behälter des Mixers wurde auf Mischtemperatur geheizt und die Verdichtungsformen bei Verdichtungstemperatur im Trockenschrank gelagert. Die Lagerdauer für die Verdichtungsformen betrug mindestens 1 ½ Stunden.

### 10.2 Mischgut herstellen

Die Mineralstoffe müssen vor dem Herstellen der Mischungen trocken sein. Deshalb wurden sie für jede Mischung entsprechend den Mischgutrezepturen portionenweise in metallische Behälter eingewogen und bevor sie dem Mischprozess zugeführt wurden während mindestens 2 ½ Stunden im Wärmeschrank gelagert.

Die Mineralstoffgemische für alle Mischungen mit Bitumen 50/70 sowohl von SMA 11 als auch von SMA 16 wurden bei 165 °C gelagert und gemischt. Die Mineralstoffgemische für alle Mischungen mit Olexobit SMA wurden bei 175 °C gelagert und gemischt. Das Bitumen 50/70 bzw. das Olexobit SMA wurden ebenfalls im Wärmeschrank während mindestens 2 ½ Stunden bei 165 °C resp. 175 °C gelagert, bevor sie dem Mischprozess zugeführt wurden.

Die Mischdauer nach Beginn der Zugabe des Bindemittels im Mischgefäss betrug bei allen Mischungen 2 Minuten.

Die Temperatur des Ofens wurde gemäss Mischtemperatur der verwendeten Bindemittelsorte eingestellt (Tabelle 25).

Bindemittel	Mischtemperatur
Bitumen 50/70	165 °C
Olexobit SMA	175 °C

**Tabelle 25** Mischtemperaturen für die verwendeten Bindemittel

Die Behälter mit heissen Mineralstoffen wurden aus dem Trockenschrank genommen und vollständig in das Mischgefäss geleert. Danach wurde das Aufschmelzgefäss mit heissem

Bindemittel aus dem Trockenschrank genommen, der Mischer in Gang gesetzt und das heisse Bindemittel in weniger als 60 Sekunden zu den Mineralstoffen gegeben. Nach der Mischdauer von 2 Minuten wurde der Vorgang beendet. Grundsätzlich muss die Mischdauer so gewählt werden, dass ein vollständiges und gleichmässiges Umhüllen der Mineralstoffe mit Bindemittel erfolgt und eine einwandfreie, gleichmässige Mischgutzusammensetzung gewährleistet ist.

Das Mischgut wurde mit einer Maurerkelle auf ein Blech gebracht. Um allfällige Entmischungen zu vermeiden musste das Mischgut noch einmal von Hand umgeschaufelt und gemischt werden.

Das Mischgut wurde für die anschliessenden Prüfkörperherstellungen portioniert und bis zur anschliessenden Verarbeitung gelagert und erkalten lassen.

### **10.3 Kurzzeitalterung des Mischgutes für die Verdichtung mit dem Gyrator**

Mischgut muss vor dem Verdichten mit dem Gyrator gemäss AASHTO "Standard Practice for Short and Long Term Aging of Hot Mix Asphalt (HMA) PP 2-961,2" einer Kurzzeitalterung unterzogen werden:

Zunächst wurde jede abgewogene Portion Mischgut für einen Prüfkörper (etwa 4700 g) auf einem sauberen Aluminiumblech der Grösse  $0,37 \cdot 0,58$  m ausgebreitet. (Diese Menge entspricht  $21,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  auf der Fläche des Aluminiumbleches.) Anschliessend wurde jede Portion Mischgut im Trockenschrank bei  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  gelagert.

Dreimal nach Ablauf einer vollen Stunde  $\pm 5$  Minuten wurde das Mischgut mit einem gewärmten Spachtel gewendet. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Rückstände vom Blechboden so gut als möglich abgekratzt und gleichmässig über das gewendete Mischgut verteilt wurden.

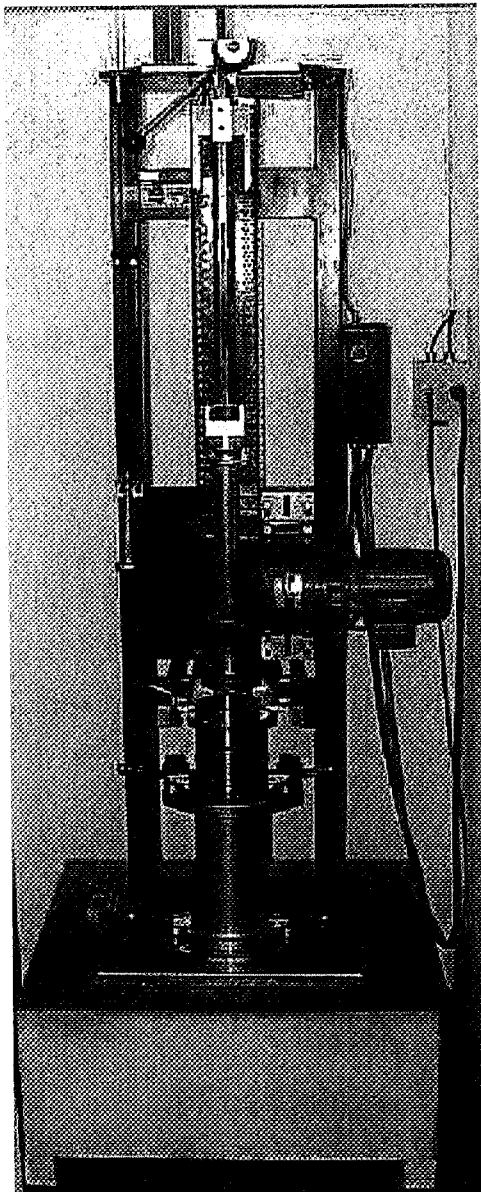
Nachdem das Mischgut eine weitere Stunde im Trockenschrank lagerte, wurde es mit dem Gyrator verdichtet.

## 10.4 Verdichtung mit Marshallgerät

Für die Marshallprüfung wurden für jede Mischung mindestens 3 Prüfkörper hergestellt. Jeder Prüfkörper hatte eine Masse von etwa 1200 g (Mineralstoffgemisch und Bindemittel zusammen).

Um den optimalen Anteil an löslichem Bindemittel (gemäss Schweizer Norm löslicher Bindemittelanteil genannt) besser erkennen und bestimmen zu können, wurde der Bindemittelanteil zunächst in grossen Intervallen geändert. Für grobkörniges Mischgut von

Asphaltbeton (nominelles Grösstkorn > 8 mm) hat sich eine Abstufung von 4 Masse-%, 4,5 Masse-%, 5 Masse-%, 5,5 Masse-% und 6 Masse-% Bindemittel bewährt.

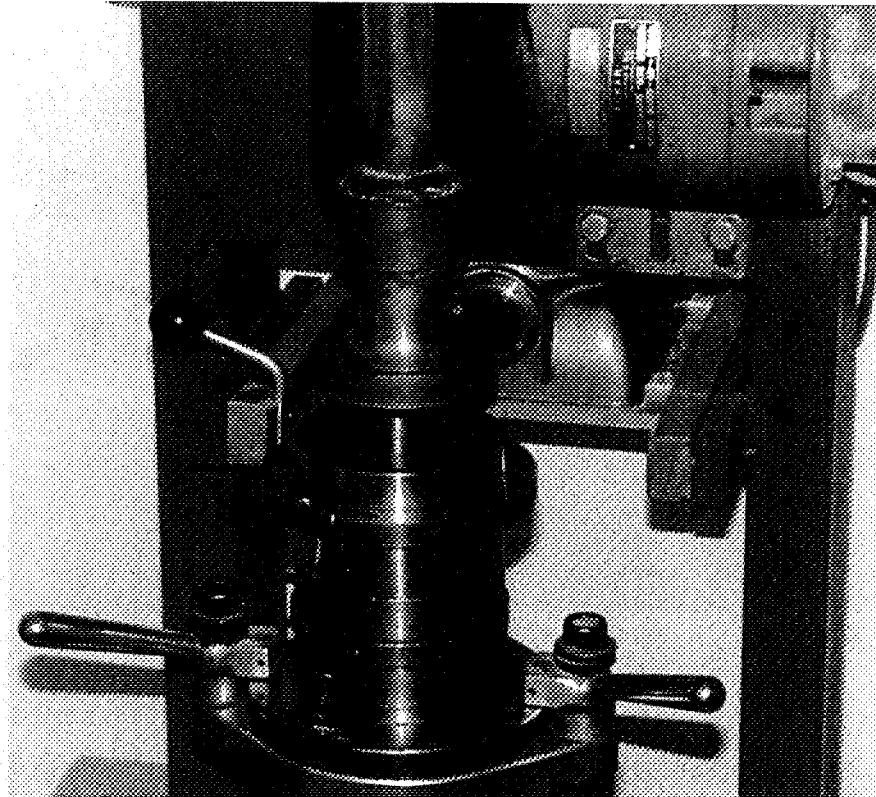


Das Mischgut wurde mit dem Marshallgerät gemäss Schweizer Norm SN 671 969, "Marshall-Versuch", (Abbildung 17) verdichtet. Dazu wurde nach der abteilungsinternen Arbeitsvorschrift EMPA SOP 170, "Marshallprüfung an bituminösem Mischgut", vorgegangen.

Die Führungsstange mit Fallkörper und Bodenstück des Marshallverdichtungsgerätes (Abbildung 18) wurde auf Verdichtungstemperatur gebracht, eine heisse Marshall-Einstampfform aus dem Wärmeschrank genommen und auf deren Boden ein Trennpapier gelegt, bevor das Mischgut mit der richtigen Einstampftemperatur portionenweise eingefüllt wurde. Beim Einfüllen wurde darauf geachtet, dass keine Entmischungen der Grob- und Feianteile stattfand. Deshalb wurde das Mischgut portionenweise eingefüllt und jedesmal der sich bildende Schüttkegel in der Marshall-Einstampfform mit einem Spatel eingebnet.

**Abbildung 17** Marshallverdichtungsgerät

Sobald sich sämtliches Mischgut in der Marshall-Einstampfform befand, wurde der Schüttkegel nochmals eingeebnet und mit einem Trennpapier bedeckt. Die Marshall-Einstampfform wurde so schnell als möglich mit dem Marshallverdichtungsgerät mit 50 Schlägen des Fallhammers auf jeder Seite des Prüfkörpers verdichtet.



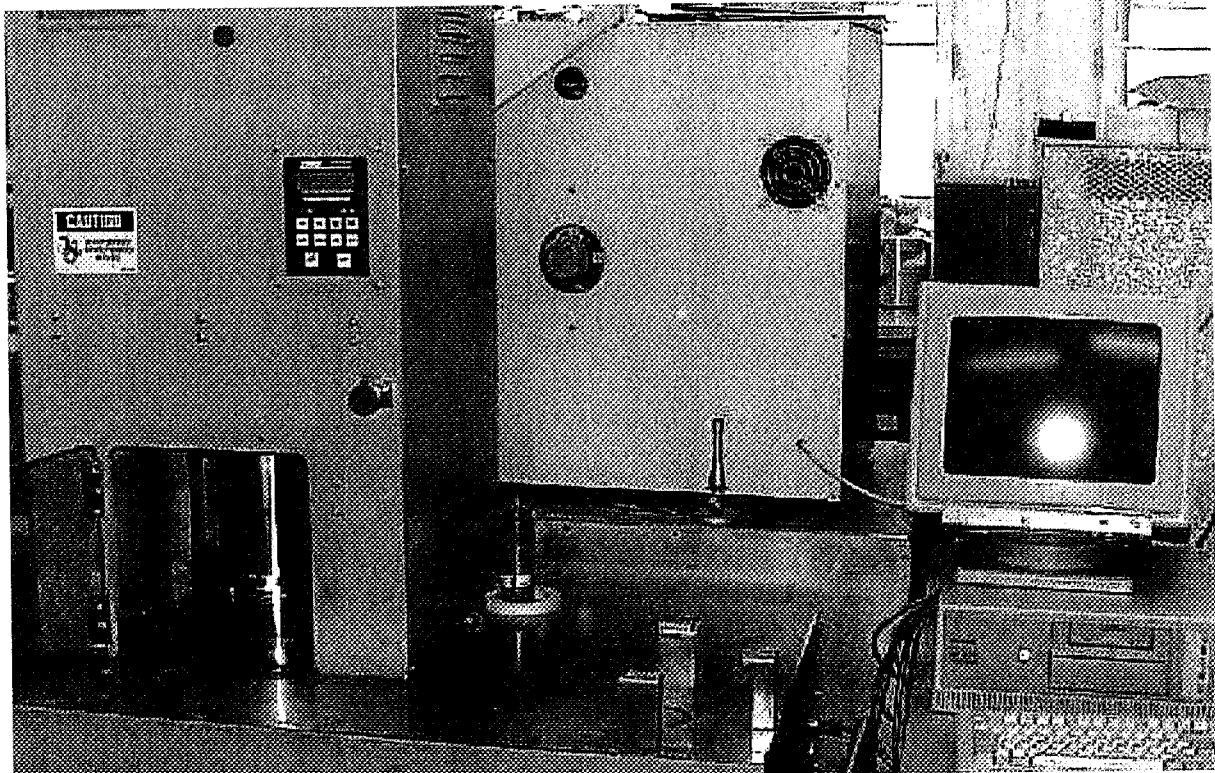
**Abbildung 18** herausgehobene Führungsstange mit Fallkörper, Bodenstück und Marshall-Einstampfform

Danach wurde die Marshall-Einstampfform mit dem fertig verdichteten Mischgut auseinander genommen und die Trennpapiere von Ober- und Unterseite des Marshallprüfkörpers entfernt. Der mittlere Formenteil mit dem Prüfkörper wurde in noch heissem Zustand auf den Formenboden zurückgestellt. Anschliessend wurden alle Prüfkörper auf einer Oberseite mit dem Bindemittelgehalt angeschrieben.

Nachdem alle Prüfkörper hergestellt, angeschrieben und erkaltet waren, wurden sie aus den Marshall-Einstampfformen herausgepresst und mit einer Nummer versehen.

### **10.5 Mischgut verdichten mit Gyrator**

Die Verdichtung des Mischgutes mit dem Gyrator erfolgte nach der abteilungsinternen Arbeitsvorschrift SOP 3097, "Gyrator, Herstellen und Verdichten von Prüfkörpern", vorgegangen.



**Abbildung 19** Herstellen und Verdichten von Prüfkörpern mit dem Gyrator

An der EMPA werden bevorzugt Gyratorprüfkörper mit dem Durchmesser 150 mm hergestellt. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass bei Prüfkörpern mit grossem Durchmesser die Randeinflüsse geringer sind als bei Prüfkörpern mit kleineren Durchmessern [Literatur 14].

Das Verdichten von bituminösem Mischgut mit dem Gyrator (Abbildung 19) dient dazu, Prüfkörper in Anlehnung an die Verdichtungsbedingungen auf einer Strassenbaustelle durch knetende Wirkung einer Pneuradwalze herzustellen. Der Gyrator erzeugt eine vorgegebene Auflast auf das Mischgut und lenkt die Verdichtungsform aus ihrer horizontalen Lage mit einem vorgegebenen nominellen Winkel von  $1,25^\circ$  aus. Danach wird die Verdichtungsform in eine kreisende Taumelbewegung versetzt. Dadurch wird das Mischgut in der Verdichtungsform, ähnlich wie in der Praxis, geknetet. Der Gyrator gestattet es entweder die Anzahl der Umdrehungen der Maschine oder die Prüfkörperhöhe (Prüfkörperhöhe  $\Rightarrow$  Rohdichte und Hohlraumgehalt) bis zum Beenden des Verdichtungsvorganges vorzugeben. Die Prüfkörper zur Optimierung der löslichen Bindemittelanteile mit Mix-Design Level I gemäss Superpave (gemäss SHRP-Methodologie) [Literatur 18] wurden mit dem Gyrator hergestellt. Dabei wurde ausgehend von einer höchsten 7-tages Tempe-

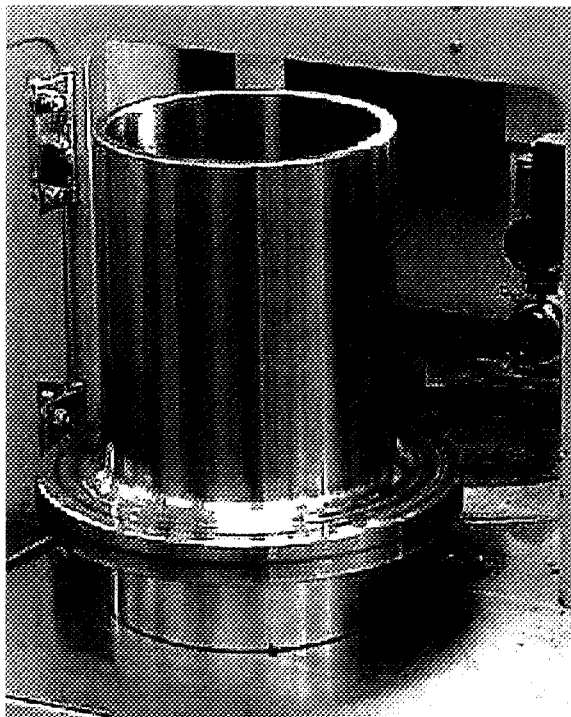
ratur der letzten 3 Jahre von  $<39\text{ }^{\circ}\text{C}$  und der höchsten schweizerischen Verkehrslastklasse T6 die Anzahl der Gyrator-Umdrehungen bei  $N_{\text{des}}$  ( $N_{\text{design}}$ ) auf 126 und  $N_{\text{max}}$  ( $N_{\text{maximal}}$ ) auf 204 eingestellt (Kapitel 21.2.6).

Bei der Verdichtung des Mischgutes mit dem Gyrator wurden 3 Prüfkörper pro Mischung und Verdichtungstemperatur gefertigt.

Um 110 mm bis 120 mm hohe Prüfkörper mit einem Durchmesser von 150 mm zu erhalten, mussten für einen Prüfkörper aus Mischgut SMA 11 respektive SMA 16 jeweils etwa 4700 g eingewogen werden.

Der Gyrator wurde etwa  $\frac{1}{2}$  Stunde vor Arbeitsbeginn eingeschaltet, um die elektronischen Bauteile auf normale Arbeitstemperatur zu bringen. Die gewünschten Verdichtungsparameter wurden kontrolliert und wenn notwendig korrigiert.

Das Mischgut wurde, wie unter Kapitel 10.3 "Kurzeitalterung des Mischgutes für die Verdichtung mit dem Gyrator" beschrieben, gelagert und bearbeitet. Danach wurde das Mischgut vollständig in eine auf Verdichtungstemperatur gebrachte Verdichtungsform



(Abbildung 20) - mit Trennpapier auf dem Boden - eingefüllt. Dabei wurde darauf geachtet, dass während des Einfüllens keine Entmischungen vorkamen. Mit der Ausformeinrichtung am Gyrator wurde das lose Mischgut nach oben gehoben bis es nahezu den Rand der Verdichtungsform erreichte. Dann wurde mit einem erwärmten Spachtel die Oberfläche des Mischgutes so geglättet, dass in der Mitte der Form eine leichte Wölbung entstand. Das Mischgut in der Form wurde mit einem Trennpapier abgedeckt, bevor der heisse Deckel auf das Mischgut gelegt wurde.

**Abbildung 20** Gyrator Verdichtungsform

Dann wurde die Verdichtungsform mit dem Mischgut während 45 Minuten zurück in den Trockenschrank bei Verdichtungstemperatur gestellt. Im Anschluss daran wurde das Mischgut mit dem Gyrator verdichtet, die Verdichtungsform aus dem Gyrator genommen und mit dem Prüfkörper zusammen so lange bei Raumtemperatur gelagert, bis der Prüfkörper ausgeformt werden konnte.

Alle Prüfkörper wurden visuell kontrolliert, da sie an der Oberfläche einheitlich aussehen mussten und keine Entmischungen aufweisen durften.

## 11 EIGENSCHAFTEN DER HERGESTELLTEN MISCHUNGEN

### 11.1 Übersicht über die untersuchten Mischungen

Die Bestimmung der löslichen Bindemittelanteile jeder Mischung wurde separat durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 26 angegeben.

<b>SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70</b>																
Lösliche mittelanteile	Binde-	Masse-%	2,5	3,0	3,5	4,0	4,2	4,7	4,8	5,2	5,4	5,8	---	---	---	---
<b>SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70</b>																
Lösliche mittelanteile	Binde-	Masse-%	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,7	4,9	5,0	5,4	5,6	5,8	---	---	---
<b>SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA</b>																
Lösliche mittelanteile	Binde-	Masse-%	2,5	3,0	3,5	4,0	4,8	5,0	5,8	6,2	6,4	---	---	---	---	---
<b>SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70</b>																
Lösliche mittelanteile	Binde-	Masse-%	2,5	3,0	3,5	4,0	4,3	4,5	4,6	5,0	6,0	---	---	---	---	---
<b>SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70</b>																
Lösliche mittelanteile	Binde-	Masse-%	2,5	3,0	3,5	4,0	4,4	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,3	5,6	5,8	6,4
<b>SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA</b>																
Lösliche mittelanteile	Binde-	Masse-%	2,5	3,0	3,5	4,0	4,4	4,4	4,6	5,4	5,5	---	---	---	---	---

**Tabelle 26** Übersicht über untersuchte Mischungen und deren lösliche Bindemittelanteile. Bis 4,0 Masse-% lösliche Bindemittelanteile wurden die Mischungen ausschliesslich für Marshallprüfungen hergestellt und untersucht.

Nach der Bestimmung der löslichen Bindemittelanteile vom Mischgut wurde jeweils die Korngrößenverteilung ermittelt (Abbildung 190 bis Abbildung 195).

## 11.2 Beurteilung der Mischgut-Eigenschaften gemäss Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"

In der Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung" ist unter Ziffer 15. "Eignungsnachweise für Baustoffe und Mischgut", nachzulesen, dass zum Festlegen der Sollwerte eine Eignungsprüfung für Mischgut gemäss Schweizer Norm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung" durchzuführen ist, sofern ungenügende oder keine Daten vorliegen.

Für Beurteilungen von Mischungen sind folgende Prüfungen verlangt:

- Korngrössenverteilung
- lösliche Bindemittelanteile
- Dichte des Mischgutes
- Rohdichte der Marshallprüfkörper
- Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper
- bindemittelfrei gedachter Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts HMM
- Stabilität SM und
- Fliessen FM der Marshallprüfkörper

Zusätzlich kann der Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB bestimmt werden.

In der Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", ist weiterhin unter Ziffer 15. "Eignungsnachweise für Baustoffe und Mischgut" nachzulesen: *Massgebend sind hier der minimale Hohlraumgehalt  $HMM_{min}$  im bindemittelfrei gedachten Mineralstoffgemisch des Mischgutes sowie der Hohlraumgehalt HM des Mischgutes selber. Der Bindemittelgehalt muss so gewählt werden, dass der minimale Hohlraumgehalt des Mineralgerüsts  $HMM_{min}$  nicht erreicht wird. Die mechanischen Marshallwerte (Stabilität-SM; Fliessen-FM) sind indessen beim SMA wenig aussagekräftig.*

*Für Beläge mit besonderer Beanspruchung empfiehlt sich zudem die Überprüfung der Standfestigkeit im Spurrinntest gemäss der französischen Norm [14].*

Die in der Schweizer Norm SN 640 432 a zitierte Norm [14] bezieht sich auf die französische Norm NF P 98-250-2, "Préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des plaques", Mischgut vorbereiten und Prüfkörper verdichten für Spurrinntest. Die Schweizer Norm SN 640431 b, Absatz "Spurrinntest" bezieht sich auf die entsprechende französische Norm NF P 98-253-1, "Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés, Partie 1: Essai d'orniérage" für die Durchführung des Spurrinntestes zur Messung der bleibenden Deformation.

### 11.2.1 Mischguttemperaturen

Tabelle 27 enthält die zulässigen Höchsttemperaturen des Mischgutes gemäss SN 640 431 b bei der Aufbereitung und die Mindesttemperaturen unmittelbar vor dem Walzen.

Bindemittel	Höchsttemperatur des Mischgutes bei Aufbereitung	Mindesttemperatur des Mischgutes unmittelbar vor dem Walzen
Bitumen 50/70	180 °C	140 °C
PmB	180 °C	140 °C

**Tabelle 27** Einzuhaltende Aufbereitungs- und Einbautemperaturen nach Schweizer Norm SN 640 431 b, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"

In Tabelle 28 sind die verwendeten Verdichtungstemperaturen für Marshall- sowie Gyratorprüfkörper aufgelistet.

Bindemittel	Verdichtungstemperaturen	
	Marshallprüfkörper	Gyratorprüfkörper
Bitumen 50/70	145 °C	135 °C
PmB	155 °C	135 °C

**Tabelle 28** Verwendete Verdichtungstemperaturen für Marshall- sowie Gyratorprüfkörper

### 11.3 Korngrössenverteilung

Die Korngrössenverteilung von jedem Mischgut wurde in der EMPA kontrolliert gemäss EMPA SOP 704, "Korngrössenverteilung von Filler, Sand, Kies, Splitt und Schotter bis Korngrösse 45 mm".

Aus der grafischen Darstellung der Korngrössenverteilungen sowohl vom SMA 11 wie auch vom SMA 16 (Abbildung 190 bis Abbildung 195) ist ersichtlich, dass die Siebdurchgänge der bindemittelfreien Mineralstoffe aus den untersuchten Mischungen sehr nahe beieinander liegen.

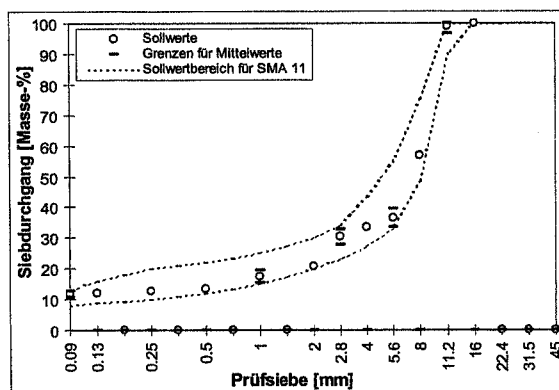
Mischgutsorten	SMA 6	SMA 11	SMA 16
Analysensieb [mm]	Siebdurchgang in Masse-%		
22,4			100
16,0		100	90 bis 100
11,2		90 bis 100	35 bis 60
8,0	100	45 bis 75	27 bis 40
5,6	90 bis 100	30 bis 50	23 bis 35
4,0	50 bis 75	26 bis 41	20 bis 33
2,8	37 bis 55	22 bis 32	18 bis 30
2,0	30 bis 40	20 bis 29	16 bis 28
1,0	20 bis 32	15 bis 24	13 bis 24
0,5	15 bis 28	12 bis 20	11 bis 20
0,25	11 bis 23	10 bis 17	10 bis 17
0,125	9 bis 17	9 bis 15	9 bis 14
0,09	8 bis 13	8 bis 13	8 bis 13

**Tabelle 29**

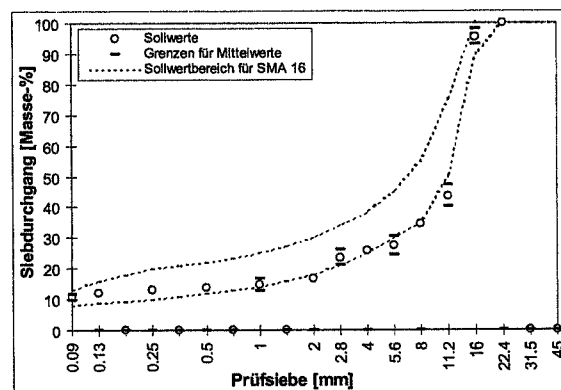
Sollwertbereiche der Korngrössenverteilung gemäss Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"

Mischgutsorten	SMA 11	SMA 16	SMA 11	SMA 16
Analysensieb [mm]	Siebdurchgang [Masse-%]			
22,4	---	100,0	---	---
16,0	100,0	95,4	---	92,9 bis 97,9
11,2	99,1	43,6	96,6 bis 100,0	40,1 bis 47,1
8,0	56,9	34,4	---	---
5,6	36,6	27,5	33,6 bis 39,6	24,5 bis 30,5
4,0	33,4	25,8	---	---
2,8	30,3	23,4	27,8 bis 32,8	20,9 bis 25,9
2,0	20,6	16,7	---	---
1,0	17,3	14,8	15,3 bis 19,3	12,8 bis 16,8
0,5	13,3	13,7	---	---
0,25	12,7	12,9	---	---
0,125	12,2	11,9	---	---
0,09	11,8	10,6	10,8 bis 12,8	9,6 bis 11,6
Tabelle 3 aus SN 640 432 a	Sollwerte der angestrebten Korngrössenverteilungen		Bereiche der zulässigen Abweichungen der Mittelwerte der Siebkurven vom Sollwert	

**Tabelle 30** Korngrössenverteilung, Sollwerte der angestrebten Siebkurven und Bereiche der zulässigen Abweichungen der Mittelwerte der Siebkurven vom Sollwert des SMA 11 sowie des SMA 16 gemäss Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"



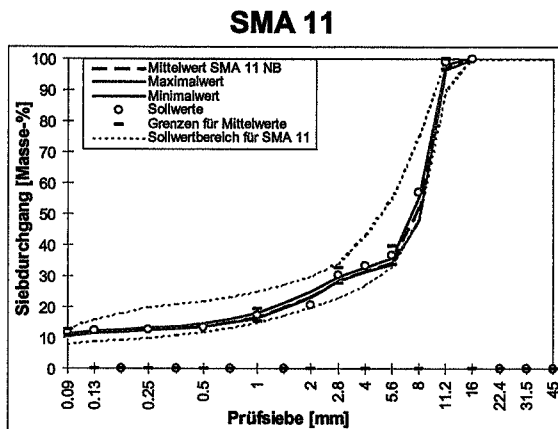
**Abbildung 21** Sollwerte der Korngrössenverteilung mit Sollwertbereich SMA 11 gemäss Schweizer Norm SN 640 432 und oberen und unteren Grenzen für den Mittelwert



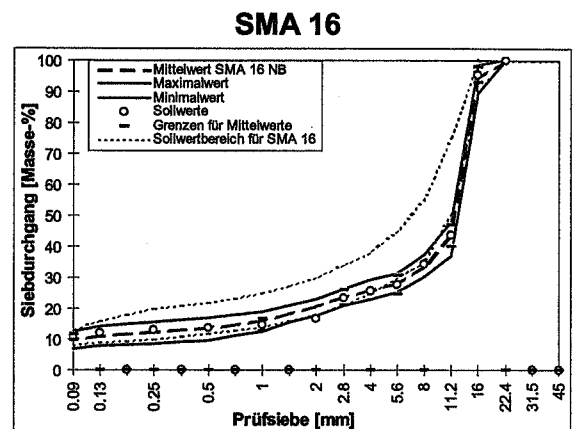
**Abbildung 22** Sollwerte der Korngrössenverteilung mit Sollwertbereich für SMA 16 gemäss Schweizer Norm SN 640 432 und oberen und unteren Grenzen für den Mittelwert

In den Abbildungen 21 und 22 sind die Korngrössenverteilungen im Vergleich zu den Grenzen des Sollwertbereichs nach Norm zu sehen. Zur besseren Übersichtlichkeit sind

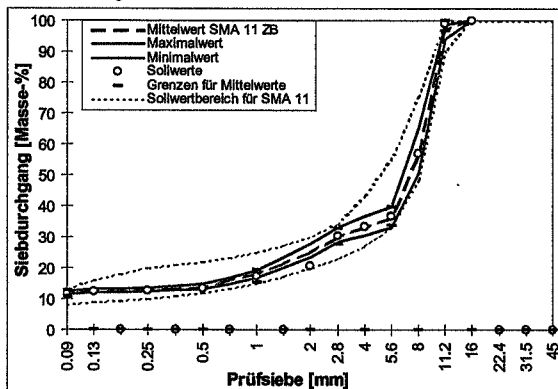
in Abbildung 23 bis Abbildung 28 neben dem Mittelwert nur die minimalen sowie die maximalen Siebdurchgänge der einzelnen Untersuchungsergebnisse dargestellt. Die Einzelwerte befinden sich im Anhang Kapitel 21.1.



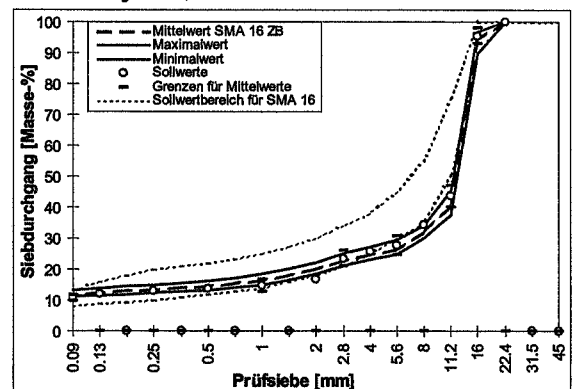
**Abbildung 23** SMA 11 mit Filler Netstal, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte



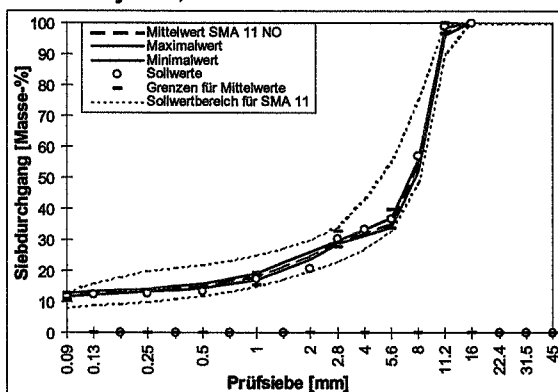
**Abbildung 24** SMA 16 mit Filler Netstal, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte



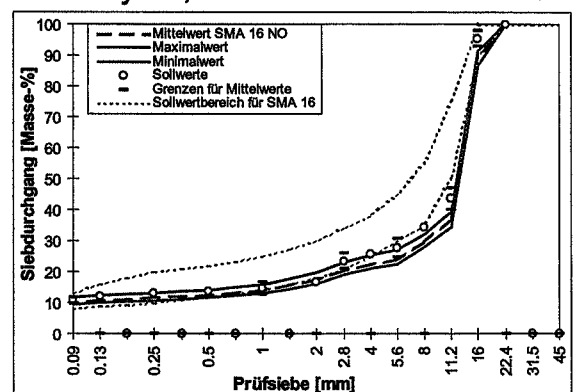
**Abbildung 25** SMA 11 mit Filler Zeobit, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte



**Abbildung 26** SMA 16 mit Filler Zeobit, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte



**Abbildung 27** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte



**Abbildung 28** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte

Aus den grafischen Darstellungen der Abweichungen der Korngrössenverteilungen vom Sollwert in Abbildung 23 bis Abbildung 28 ist ersichtlich, dass fast alle minimalen wie auch maximalen Siebdurchgänge der Einzelwerte den zulässigen Bereich der Sollwerte nur geringfügig über- oder unterschreiten.

## 11.4 Marshallprüfung

In diesem Kapitel sind die Daten der Marshallprüfung zusammengestellt. Die Marshallprüfkörper sind unter Einhaltung der Schweizer Norm SN 671 969, "Marshall-Versuch", hergestellt und untersucht worden.

Beurteilungen und Kommentare zu den Untersuchungsergebnissen folgen in Kapitel 12.1 "Marshall".

### 11.4.1 SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Lösliche Binde-mittel-anteile	Dichte Mischgut, bestimmt	Roh-dichte, Marshall	Hohlraum-gehalt Marshall	Stabilität-Marshall, korrigiert	Fliessen-Marshall	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	Volumen-%	kN	mm	Volumen-%	%
2,5	2,580	2,339	9,3	9,6	1,7	15,0	37,9
3	2,560	2,367	7,5	10,1	1,9	14,4	47,9
3,5	2,541	2,349	7,5	9,6	1,8	15,5	51,5
4	2,521	2,364	6,2	8,9	1,8	15,4	59,6
4,2	2,528	2,402	5,0	8,8	3,0	14,8	66,4
4,7	2,494	2,389	4,2	7,5	3,6	15,2	72,4
4,8	2,510	2,383	5,1	8,3	2,2	16,3	68,9
5,2	2,487	2,361	5,1	8,0	2,3	17,1	70,3
5,4	2,461	2,379	3,3	7,7	2,9	15,9	79,0
5,8	2,455	2,369	3,5	6,9	5,7	16,8	79,2

**Tabelle 31** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

**11.4.2 SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**

Lösliche Binde- mittel- anteile	Dichte Mischgut, bestimmt	Roh- dichte, Marshall	Hohlraum- gehalt Marshall	Stabilität- Marshall, korrigiert	Fliesen- Marshall	Hohlraum- gehalt HMM	Hohlraum- füllungs- grad HFB
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	Volumen- %	kN	mm	Volumen- %	%
4,0	2,506	2,289	8,7	8,8	1,3	17,6	50,7
4,5	2,506	2,375	5,2	12,5	2,6	15,6	66,5
4,7	2,495	2,324	6,9	9,2	2,4	17,5	60,8
4,9	2,484	2,360	5,0	9,4	2,7	16,2	69,2
5,0	2,490	2,373	4,7	10,5	3,0	16,2	70,9
5,4	2,466	2,364	4,1	9,5	3,0	16,7	75,3
5,6	2,475	2,367	4,4	11,1	2,7	17,2	74,8
5,8	2,454	2,376	3,2	8,3	2,8	16,7	81,0

**Tabelle 32** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

**11.4.3 SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Lösliche Binde- mittel- anteile	Dichte Mischgut, bestimmt	Roh- dichte, Marshall	Hohlraum- gehalt Marshall	Stabilität- Marshall, korrigiert	Fliesen- Marshall	Hohlraum- gehalt HMM	Hohlraum- füllungs- grad HFB
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	Volumen- %	kN	mm	Volumen- %	%
2,5	2,579	2,216	14,1	13,9	2,1	19,5	27,7
3,0	2,559	2,287	10,6	12,8	2,0	17,3	38,6
3,5	2,540	2,341	7,8	12,4	2,5	15,8	50,5
4,0	2,520	2,316	8,1	9,1	3,1	17,1	52,6
4,8	2,501	2,398	4,1	11,4	4,2	15,5	73,3
5,0	2,493	2,367	5,1	10,7	4,4	16,5	69,4
5,8	2,477	2,381	3,9	10,1	4,0	17,3	77,4
6,2	2,415	2,367	2,0	10,1	6,2	16,4	87,9
6,4	2,456	2,354	4,2	9,8	5,3	19,0	78,1

**Tabelle 33** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

#### 11.4.4 SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Lösliche Binde-mittel-anteile	Dichte Mischgut, bestimmt	Roh-dichte, Marshall	Hohlraum-gehalt Marshall	Stabilität-Marshall, korrigiert	Fliessen-Marshall	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	Volumen-%	kN	mm	Volumen-%	%
2,5	2,593	2,399	7,5	12,6	1,9	13,3	43,9
3,0	2,573	2,407	6,4	9,4	1,9	13,5	52,2
3,5	2,553	2,382	6,7	7,3	2,2	14,8	54,8
4,0	2,533	2,389	5,7	6,9	3,2	15,0	62,0
4,3	2,521	2,386	5,4	5,6	2,6	15,4	65,1
4,5	2,519	2,389	5,1	5,7	3,1	15,6	67,1
4,6	2,515	2,365	5,9	5,7	2,1	16,5	64,1
5,0	2,496	2,393	4,2	6,3	3,1	15,7	73,6
6,0	2,492	2,393	4,0	5,6	3,8	17,9	70,3

**Tabelle 34** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

#### 11.4.5 SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Binde-mittel-anteile	Dichte Mischgut, bestimmt	Roh-dichte, Marshall	Hohlraum-gehalt Marshall	Stabilität-Marshall, korrigiert	Fliessen-Marshall	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	Volumen-%	kN	mm	Volumen-%	%
4,0	2,518	2,321	7,8	7,8	1,3	16,9	53,5
4,4	2,488	2,354	5,4	7,5	2,6	15,5	65,5
4,7	2,474	2,384	3,7	9,5	3,0	15,2	74,9
4,8	2,505	2,373	5,2	8,6	2,9	15,7	67,8
4,9	2,498	2,366	5,3	8,8	2,9	16,1	68,3
5,0	2,464	2,352	4,6	8,5	2,5	16,0	71,4
5,1	2,477	2,365	4,5	10,7	4,5	16,2	72,3
5,3	2,469	2,384	3,5	9,7	3,6	15,7	78,0
5,6	2,452	2,379	3,0	8,4	2,6	16,2	81,4
5,8	2,448	2,374	3,0	7,9	3,8	16,5	81,6
6,4	2,425	2,368	2,4	6,8	4,1	17,2	84,8

**Tabelle 35** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

#### 11.4.6 SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Binde- mittel- anteile	Dichte Mischgut, bestimmt	Roh- dichte, Marshall	Hohlraum- gehalt Marshall	Stabilität- Marshall, korrigiert	Fliessen- Marshall	Hohlraum- gehalt HMM	Hohlraum- füllungs- grad HFB
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	Volumen- %	kN	mm	Volumen- %	%
2,5	2,592	2,357	9,1	10,8	1,7	14,8	38,8
3,0	2,572	2,328	9,5	12,5	2,0	16,3	41,8
3,5	2,552	2,386	6,5	10,1	2,0	14,7	55,6
4,0	2,532	2,346	7,4	8,6	2,6	16,5	55,4
4,4	2,523	2,380	5,7	9,9	2,6	15,8	64,1
4,4	2,526	2,403	4,9	9,1	2,9	15,3	68,1
4,6	2,515	2,365	5,9	5,7	2,1	16,5	64,1
5,4	2,473	2,348	5,0	7,1	3,4	17,4	71,0
5,5	2,511	2,319	7,6	7,0	2,7	20,0	61,9

**Tabelle 36** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

#### 11.5 Gyratorprüfung

In diesem Kapitel sind die Daten der Gyratorprüfung zusammengestellt. Die Gyratorprüfkörper sind unter Einhaltung der EMPA SOP 3097, "Gyrator, Herstellen und Verdichten von Prüfkörpern", hergestellt und untersucht worden.

Zur Konzeption eines Mischgutes für einen Strassenbauabschnitt wird  $N_{des}$  ( $N_{design}$ ) – als notwendige Anzahl Umdrehungen des Gyrators zum Herstellen und Verdichten von Prüfkörpern aus Mischgut - aus einer Tabelle gelesen.  $N_{des}$  ist eine Funktion des Klimas und der Beanspruchung des Belages durch die Höhe des Verkehrsaufkommens und wurde im SHRP-Projekt ermittelt.  $N_{des}$  ist der Bezugswert zur Berechnung der maximalen Anzahl Umdrehungen  $N_{max}$  sowie auch einer minimalen Anzahl Umdrehungen  $N_{ini}$  ( $N_{initial}$ ) ist. Die Kennwerte der Prüfkörper bei  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$  und  $N_{max}$  werden gemäss SHRP-Richtlinien beurteilt (vgl. Abbildung 30).

Formeln zur Berechnung von Kennwerten der Gyratorprüfkörper sind im Kapitel 21.2 "Ausgewählte Berechnungsmethoden von Mischgut- und Prüfkörper-Kennwerten" ausführlich beschrieben.

Beurteilungen und Kommentare zu den Untersuchungsergebnissen folgen in Kapitel 12.2 "Gyrator-Ergebnisse".

### 11.5.1 SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,2	4,8	5,2	5,3	5,4	5,8
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,121	2,114	2,118	2,115	2,112	2,095
Hohlraumgehalt	Vol-%	16,1	15,8	14,8	14,7	14,2	13,7
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	24,8	25,7	25,6	25,5	25,3	25,5
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	35,1	38,7	42,0	42,5	44,0	46,2
Verdichtung	%	83,9	84,2	85,2	85,3	85,8	86,3

**Tabelle 37** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{ini}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

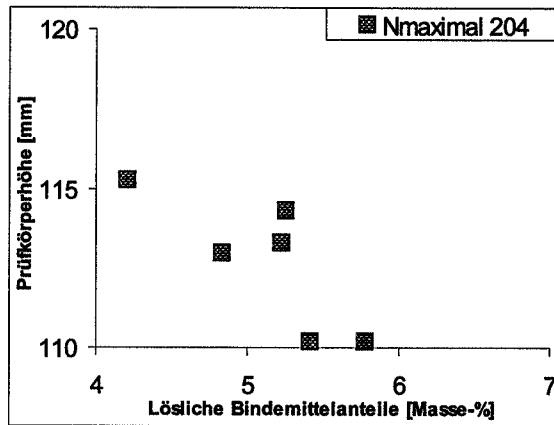
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,2	4,8	5,2	5,3	5,4	5,8
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,428	2,418	2,399	2,390	2,407	2,388
Hohlraumgehalt	Vol-%	3,9	3,7	3,5	3,6	2,2	1,7
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	13,9	15,1	15,7	15,8	14,9	15,1
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	71,6	75,5	77,6	77,3	85,3	89,0
Verdichtung	%	96,1	96,3	96,5	96,4	97,8	98,3

**Tabelle 38** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{des}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

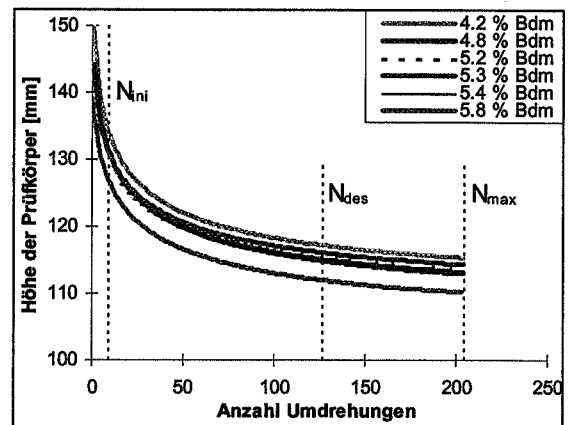
Die Berechnung des Hohlraumgehaltes eines Gyratorprüfkörpers erfolgt wie unter Kapitel 21.2.3 "Hohlraumgehalt der Prüfkörper" beschrieben, indem von 100 der hundertfache Quotient aus der Rohdichte des Gyratorprüfkörpers und der Dichte des Mischgutes subtrahiert werden. Die Rohdichte des Gyratorprüfkörpers wird berechnet aus dem Quotienten aus der Masse des Gyratorprüfkörpers und seinem Volumen.

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,2	4,8	5,2	5,3	5,4	5,8
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,469	2,458	2,439	2,426	2,445	2,426
Hohlraumgehalt	Vol-%	2,3	2,1	1,9	2,1	0,6	0,1
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	12,4	13,6	14,3	14,5	13,5	13,7
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	81,2	84,8	86,5	85,4	95,4	99,3
Verdichtung	%	97,7	97,9	98,1	97,9	99,4	99,9

**Tabelle 39** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{max}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70



**Abbildung 29** Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70



**Abbildung 30** Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile (Bdm); SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

### 11.5.2 SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,5	4,9	5,2	5,8
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,091	2,082	2,075	2,106
Hohlraumgehalt	Vol-%	16,5	16,3	16,3	14,2
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	25,6	26,3	26,8	26,1
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	35,5	38,0	39,3	45,7
Verdichtung	%	83,5	83,7	83,7	85,8

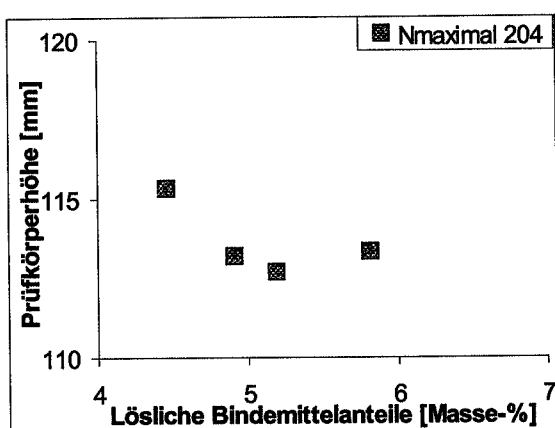
**Tabelle 40** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{ini}$ , SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,5	4,9	5,2	5,8
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,393	2,394	2,394	2,406
Hohlraumgehalt	Vol-%	4,5	3,8	3,4	2,0
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	14,9	15,2	15,5	15,6
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	69,9	75,3	78,0	87,6
Verdichtung	%	95,5	96,2	96,6	98,0

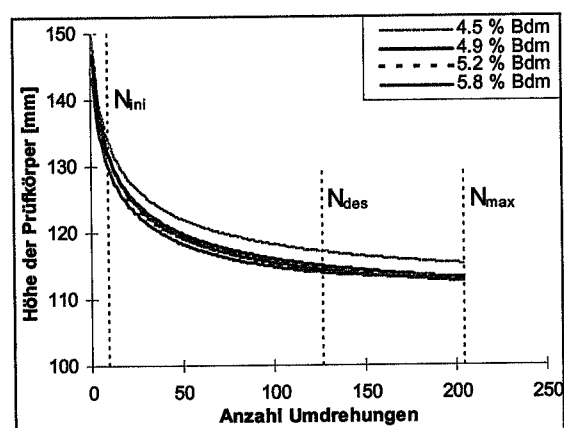
**Tabelle 41** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{des}$ , SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,5	4,9	5,2	5,8
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,434	2,432	2,430	2,421
Hohlraumgehalt	Vol-%	2,9	2,2	1,9	1,4
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	13,5	13,9	14,2	15,1
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	78,6	84,1	86,5	91,2
Verdichtung	%	97,1	97,8	98,1	98,6

**Tabelle 42** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{max}$ , SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70



**Abbildung 31** Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70



**Abbildung 32** Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

### 11.5.3 SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,8	5,0	5,8	6,4
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,147	2,143	2,159	2,141
Hohlraumgehalt	Vol-%	14,2	14,0	12,8	12,8
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	24,3	24,4	25,0	26,3
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	41,7	42,6	48,6	51,3
Verdichtung	%	85,8	86,0	87,2	87,2

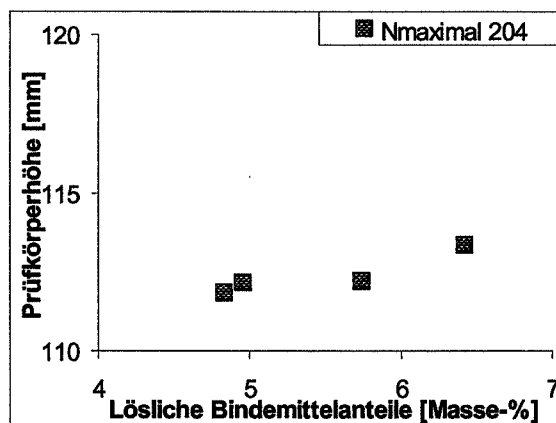
**Tabelle 43** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{ini}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,8	5,0	5,8	6,4
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,429	2,424	2,423	2,393
Hohlraumgehalt	Vol-%	2,9	2,8	2,2	2,6
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	14,4	14,5	15,8	17,6
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	79,8	81,0	86,1	85,5
Verdichtung	%	97,1	97,2	97,8	97,4

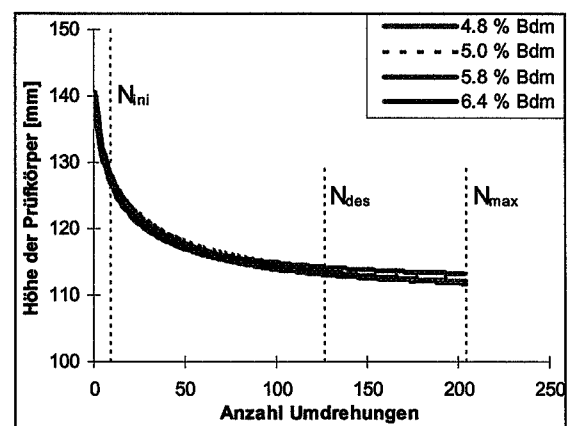
**Tabelle 44** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{des}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,8	4,9	5,8	6,4
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,464	2,458	2,443	2,414
Hohlraumgehalt	Vol-%	1,5	1,4	1,4	1,7
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	13,1	13,3	15,1	16,9
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	88,6	89,5	91,0	89,9
Verdichtung	%	98,5	98,6	98,6	98,3

**Tabelle 45** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{max}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA



**Abbildung 33** Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA



**Abbildung 34** Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

#### 11.5.4 SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,3	4,9	5,1
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,114	2,115	2,111
Hohlraumgehalt	Vol-%	16,1	15,1	13,6
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	25,0	25,3	24,1
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	35,5	40,1	43,8
Verdichtung	%	83,9	84,9	86,4

**Tabelle 46** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{ini}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,3	4,9	5,1
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,411	2,402	2,417
Hohlraumgehalt	Vol-%	4,4	3,6	1,1
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	14,5	15,1	13,1
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	69,9	76,0	92,0
Verdichtung	%	95,6	96,4	98,9

**Tabelle 47** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{des}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

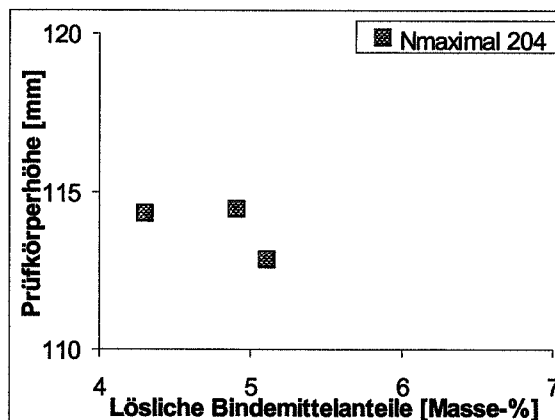
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,3	4,9	5,1
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,455	2,439	2,451
Hohlraumgehalt	Vol-%	2,6	2,1	-0,3
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	12,9	13,8	11,9
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	79,6	84,7	102,4
Verdichtung	%	97,4	97,9	100,3

**Tabelle 48** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{max}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

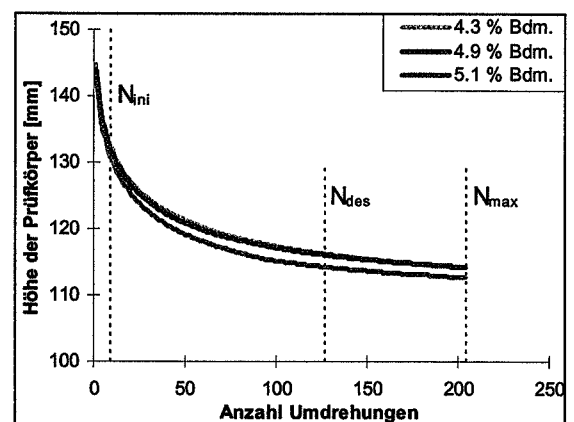
Ein hoher Bindemittelgehalt eines Mischgutes führt im Allgemeinen zu geringem Verdichtungswiderstand. Während der Verdichtung der Gyratorprüfkörper kommt es jedoch bei hohem Bindemittelgehalt des Mischgutes manchmal zu einem Auspressen von Bindemittel und feinen Mineralstoffen. Diese ausgepressten Anteile von Mörtel können nach der Verdichtung der Gyratorprüfkörper nicht mehr quantitativ zurückgewonnen werden und führen einerseits zu einem Verlust von eingewogenem Mischgut (Masse) und andererseits auch zu Verlust von Volumen der Gyratorprüfkörper. Aufgrund der Tatsache, dass die Dichte des ausgepressten Mörtels geringer ist als diejenige des verbleibenden

Mineralstoffgemisches mit dem Rest des Bindemittels, erhöht sich auch die Dichte des verbleibenden Mischgutes. Das führt dazu, dass im Falle von hohem Bindemittelgehalt in Verbindung mit intensiver Verdichtung so viel Bindemittel mit feinen Mineralstoffanteilen aus dem Mischgut verloren geht, dass die Rohdichte des Gyratorprüfkörpers grösser wird als die an unverdichtetem Mischgut ermittelte Dichte.

Daraus ergibt sich beim Dividieren der Rohdichte des Gyratorprüfkörpers durch die Dichte des Mischgutes ein Ergebnis, welches grösser ist als 1. Dies führt zu einem negativen Resultat des Hohlraumgehaltes, wie beim untersuchten Mischgut SMA 11 mit 5,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen bei den Verdichtungen von  $N_{max}$  (Tabelle 48). Diese Tatsache ergibt dann auch einen Hohlraumfüllungsgrad HFB und eine Verdichtung von über 100 %.



**Abbildung 35** Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70



**Abbildung 36** Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

### 11.5.5 SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,7	5,3	5,8	6,4
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,053	2,061	2,086	2,128
Hohlraumgehalt	Vol-%	17,1	16,5	14,8	12,3
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	26,4	27,1	26,5	25,4
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	35,4	39,0	44,4	51,8
Verdichtung	%	82,9	83,5	85,2	87,7

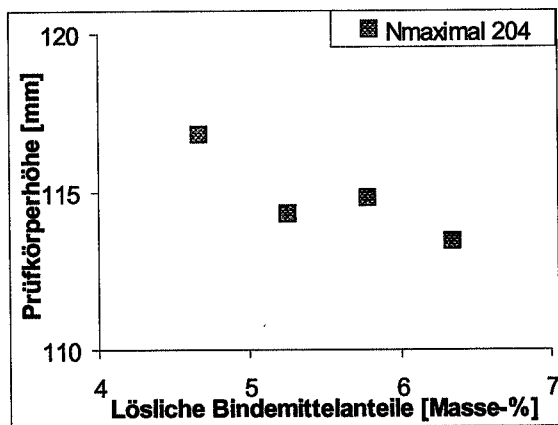
**Tabelle 49** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei  $N_{ini}$ , SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,7	5,3	5,8	6,4
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,383	2,393	2,391	2,412
Hohlraumgehalt	Vol-%	3,7	3,1	2,3	0,6
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	14,5	15,3	15,8	15,5
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	74,7	80,0	85,3	96,4
Verdichtung	%	96,3	96,9	97,7	99,4

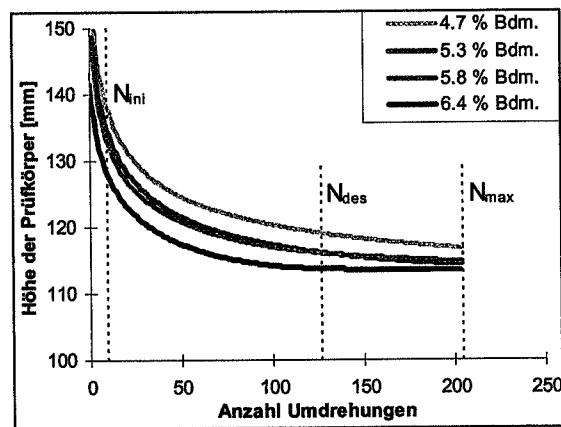
**Tabelle 50** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{des}$ , SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,7	5,3	5,8	6,4
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,430	2,432	2,418	2,418
Hohlraumgehalt	Vol-%	1,8	1,5	1,2	0,3
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	12,9	14,0	14,9	15,2
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	86,2	89,2	91,6	98,1
Verdichtung	%	98,2	98,5	98,8	99,7

**Tabelle 51** Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei  $N_{max}$ , SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70



**Abbildung 37** Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70



**Abbildung 38** Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

**11.5.6 SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	3,8	4,3	5,2	6,2
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,122	2,118	2,167	2,176
Hohlraumgehalt	Vol-%	16,9	16,2	13,2	11,3
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	24,8	25,1	24,3	24,4
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	31,9	35,6	45,9	54,2
Verdichtung	%	83,1	83,8	86,8	88,7

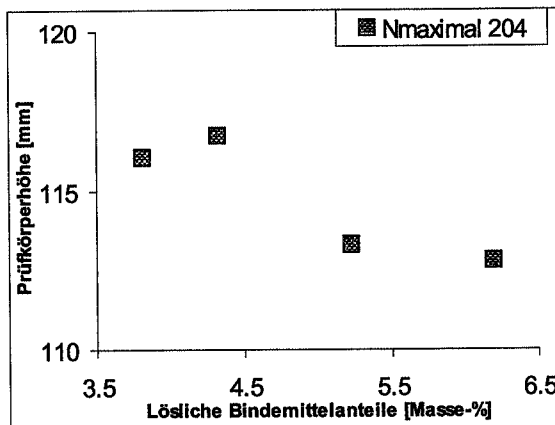
**Tabelle 52** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei N<sub>ini</sub>, SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	3,8	4,3	5,2	6,2
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,416	2,396	2,412	2,408
Hohlraumgehalt	Vol-%	5,3	5,2	3,4	1,8
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	14,3	15,3	15,7	16,4
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	62,9	66,1	78,7	89,1
Verdichtung	%	94,7	94,8	96,6	98,2

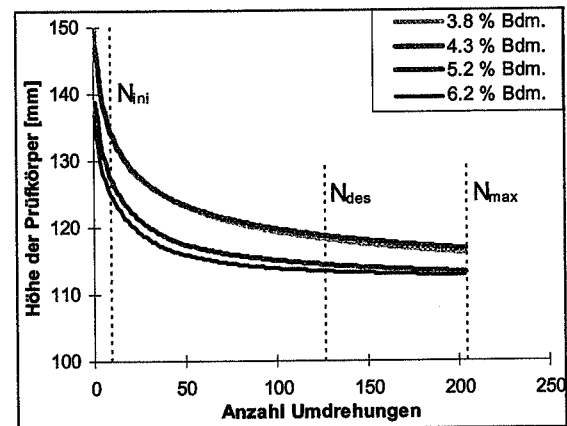
**Tabelle 53** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei N<sub>des</sub>, SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	3,8	4,3	5,2	6,2
Rohdichte, korrigiert	t·m <sup>-3</sup>	2,461	2,435	2,436	2,408
Hohlraumgehalt	Vol-%	3,6	3,6	2,4	1,8
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	12,7	13,9	14,9	16,4
Hohlraumfüllungsgrad HFB	%	72,1	74,0	83,7	89,1
Verdichtung	%	96,4	96,4	97,6	98,8

**Tabelle 54** Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei N<sub>max</sub>, SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA



**Abbildung 39** Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA



**Abbildung 40** Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

## 12 DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Einerseits wurde die Marshallprüfung gemäss Schweizer Norm SN 671 969 b zum Ermitteln der optimalen löslichen Bindemittelanteile für die Mischgutsorten SMA 11 und SMA 16 sowie zur Kontrolle der entsprechenden physikalischen Kennwerte angewendet. Dafür wurden Prüfkörper hergestellt und geprüft gemäss EMPA SOP 170, "Marshallprüfung an bituminösem Mischgut".

Andererseits wurden von denselben Mischungen gemäss SHRP-Methodologie Gyrotorprüfkörper hergestellt und die optimalen löslichen Bindemittelanteile entsprechend ermittelt.

Bei der Bestimmung des Optimums wurden sowohl Stabilität-Marshall, Fliesen-Marshall als auch der Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper in Betracht gezogen. Der Bindemittelgehalt des Mischgutes für SMA 11 sowie SMA 16 wurde dabei in weiten Bereichen variiert, um die Auswirkungen dieses Parameters möglichst deutlich erfassen zu können.

In den folgenden Kapiteln werden die Untersuchungsergebnisse der Marshallprüfungen für die Mischgutsorten SMA 11 sowie SMA 16 mit den verschiedenen Filler-Bitumen-Kombinationen für die Beurteilung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel gemeinsam kommentiert.

Im Anhang, Kapitel 13, wird der optimale Bindemittelanteil von jeder einzelnen Mischgutsorte aufgrund der Marshallkennwerte erläutert.

## 12.1 Marshall-Ergebnisse

Gemäss den schweizerischen Normen SN 640 432a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten", und SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", gelten für das Optimieren eines bituminösen Mischgutes hauptsächlich folgende Kriterien:

- Die Stabilität-Marshall muss gleich oder grösser sein als 10 kN (Richtwert SN 640 431b).
- Das Fliessen-Marshall soll gleich oder kleiner sein als 3,5 mm (Richtwert SN 640 431b).
- Der Hohlraumgehalt-Marshall der Prüfkörper muss zwischen 3 Volumen-% und 4 Volumen-% liegen (Richtwerte SN 640 432a).
- Der Hohlraumfüllungsgrad HFB soll für HMT 11 zwischen 64 % und 78 % und für HMT 16 S zwischen 63 % und 77 % sein (Richtwerte SN 640 431b).

Der Bindemittelgehalt muss so gewählt werden, dass der minimale Hohlraumgehalt des Mineralgerüsts  $HMM_{\min}$  nicht erreicht wird. Der Sollwert des Hohlraumgehalt-Marshall soll im Bereich von 3 bis 4 Volumen-% liegen.

Für die Beschreibung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse ist – wegen den Streuungen der einzelnen Untersuchungsergebnisse – ausschliesslich die Trendlinie in den Diagrammen herangezogen worden.

Während der Durchführung der Marshallprüfungen zeigte sich sehr schnell, dass sich mit den bisher erfolgreich benutzten Bindemittelgehalten für Asphaltbeton bei der Prüfung von Splittmastixasphalt nicht für alle geprüften Kombinationen von Mineralstoffgemischen und Bindemittel deutlich erkennbare maximale Stabilitätswerte ergeben (Kapitel 11.4).

Um nach der traditionellen Methode den optimalen Gehalt an löslichem Bindemittel für ein Mischgut festzulegen, wurde die Stabilität-Marshall in Funktion des Gehaltes an löslichem

Bindemittel grafisch dargestellt und beim Maximum der Stabilität-Marshall der zugehörige lösliche Bindemittelanteil als der optimale Gehalt ermittelt (Abbildung 41 bis Abbildung 46).

### 12.1.1 Stabilität-Marshall

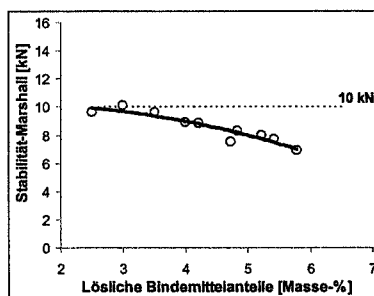
Da die Korngrößenverteilungen der Mineralstoffe für die beiden SMA-Mischungen nicht verändert wurden, wurde erwartet, dass die Stabilität bei der Durchführung der Marshallprüfung mit zunehmenden löslichen Bindemittelanteilen zu- und dann wieder abnimmt. Solche Kurvenformen ergeben sich bei der Prüfung von Mischgut für Asphaltbeton wie auch Heissmischtragschicht. Diese erwartete Kurvenform konnte jedoch nur an den Mischungen beobachtet werden, bei deren Herstellung der sehr stark versteifende Filler Zeobit mit Bitumen 50/70 verwendet wurde. Bei den Mischungen SMA 11 wie auch SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. dem polymermodifizierten Bitumen Olexobit SMA wurden diese Erwartungen nicht erfüllt.

Die Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung" verweist für das Durchführen der Eignungsprüfung für Mischgut von Splittmastixasphalt auf die Qualitätsnorm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung". Dort wird die Anforderung an die entsprechende Belagsorte AB angegeben. Die geforderte Mindeststabilität der Mischgut-Typen S und H, unabhängig vom nominellen Grösstkorn, wird mit  $\geq 10$  kN festgeschrieben. In der Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", ist jedoch ausführlich darauf hingewiesen, dass die mechanischen Marshallwerte Stabilität und Fliessen beim Splittmastixasphalt wenig aussagekräftig sind. Vielmehr müssen für die Beurteilung dieser Mischgutsorten der Hohlraumgehalt  $HMM_{\min}$  im bindemittelfrei gedachten Mineralstoffgemisch des Mischgutes sowie der Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper für die Beurteilung herangezogen werden.

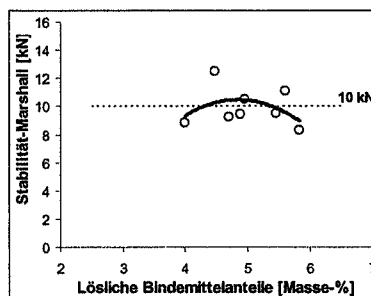
Bei den meisten Mischungen fiel die Stabilität-Marshall mit zunehmendem Gehalt an löslichem Bindemittel ständig ab, vermutlich, weil in der Marshall-Prüfung die Stützwirkung des Korngerüstes in SMA nur ungenügend mobilisiert wird. Einzige Ausnahmen waren beim SMA 11 wie beim SMA 16 die Mischungen mit dem hochstabilisierenden Filler Zeobit. In der Absicht eindeutige Kurvenformen mit einem Maximum in den grafischen Darstellungen von Stabilitätswerten in Funktion des löslichen Bindemittelanteils zu erhalten,

wurden zusätzliche Mischungen mit geringeren Bindemittelgehalten ausschliesslich für die Marshallprüfung hergestellt und geprüft (Kapitel 11.1). Für diese zusätzlichen Mischungen wurden die Dichten der Mischungen nicht nach Norm bestimmt, sondern wie bereits beschrieben aus den separat bestimmten Dichten der Mineralstoffkomponenten und des verwendeten Bindemittels entsprechend ihren Mischungsverhältnissen berechnet.

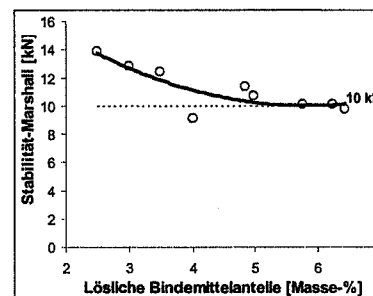
### Stabilität-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile



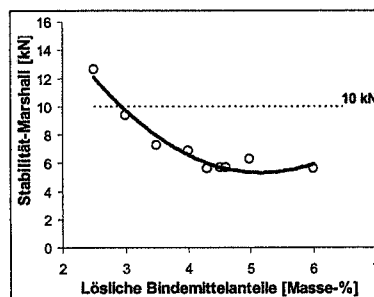
**Abbildung 41** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



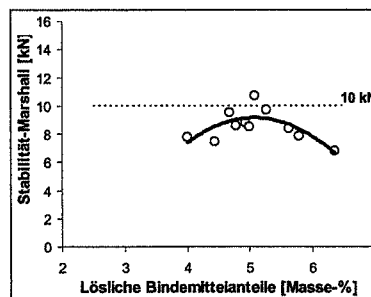
**Abbildung 42** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



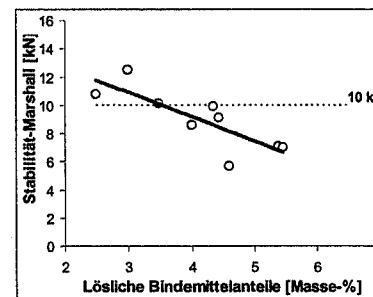
**Abbildung 43** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



**Abbildung 44** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



**Abbildung 45** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



**Abbildung 46** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431

Die Stabilität-Marshall für die Mischung mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 zeigt beim SMA 11 (Abbildung 42) wie auch beim SMA 16 (Abbildung 45) ein Maximum, wenn die Stabilität-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile dargestellt wird. Die beiden anderen Kombinationen von Filler und Bindemittel lassen kein Maximum erkennen.

Dies deutet mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen grösseren Einfluss des Fillers als des Bindemittels auf die mechanischen Kennwerte dieser Mischungen hin (vgl. Kapitel 14 Vergleich der Marshall- und Gyrator-Ergebnisse). Trotzdem hat auch das Bindemittel einen ersichtlichen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte dieser Mischungen; denn die Kurven der Stabilität-Marshall für die Kombinationen von Filler Netstal mit Bitumen 50/70 sowie Olexobit SMA zeigen ebenfalls einen unterschiedlichen Verlauf (Abbildung 41, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 46). Immerhin steigen die Kurven in die gleiche Richtung, jedoch mit unterschiedlicher Steilheit.

Aus den Kurven für die beiden Filler-Bindemittel-Kombinationen (Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal und Olexobit SMA) kann auf traditionelle Art kein optimaler Gehalt des löslichen Bindemittels bei der höchsten Stabilität-Marshall ermittelt werden. Aus den Kurven für die Filler-Bindemittel-Kombination mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 kann das Maximum der Stabilität für SMA 11 bei etwa 4,8 Masse-% sowie für SMA 16 etwa bei 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen ermittelt werden.

In bezug auf die in der Norm geforderte Mindeststabilität von 10kN für Asphaltbeton des Typs S und H ist festzustellen, dass dieser Wert bei SMA 11 wie auch beim SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 nur für die untersuchten Mischungen mit löslichen Bindemittelanteilen kleiner als 3 Masse-% erreicht wird (Abbildung 41 und Abbildung 44).

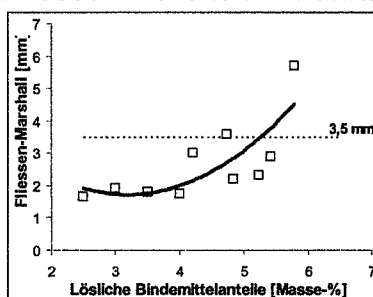
Für einige der untersuchten Mischungen des SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, besonders in der Nähe des feststellbaren optimalen Gehaltes an löslichen Bindemittelanteilen von 4,8 Masse-%, liegt ein Bereich wenig oberhalb des geforderten Mindestwertes von 10 kN (Abbildung 42). Von den Mischungen des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 erreicht keine eine Stabilität-Marshall, die grösser als 10 kN ist.

Bei den Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA liegen alle Stabilitätswert über dem geforderten Mindestwert von 10 kN (Abbildung 43). Die Mischungen mit Filler Netstal und Olexobit SMA ergeben nur für lösliche Bindemittelanteile kleiner als 3,6 Masse-% Stabilitäten-Marshall über dem geforderten Mindestwert von 10 kN (Abbildung 46).

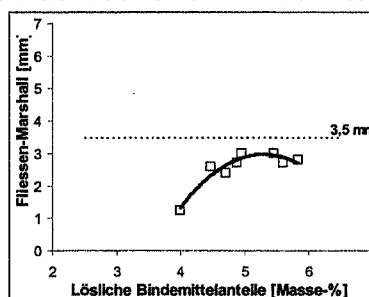
### 12.1.2 Fliesen-Marshall

Da die Korngrössenverteilung der Mineralstoffe für die beiden SMA-Mischungen unverändert blieb, nahm das Fliesen-Marshall bei der Durchführung der Marshallprüfung mit zunehmendem Bindemittelgehalt in der Mehrzahl der Fälle progressiv zu, ähnlich wie dies bei der Marshallprüfung von Asphaltbeton und Heissmischtragschichten vorkommt (Abbildung 48 und Abbildung 51). Ausnahmen bildeten die Mischungen mit dem Filler Zeobit.

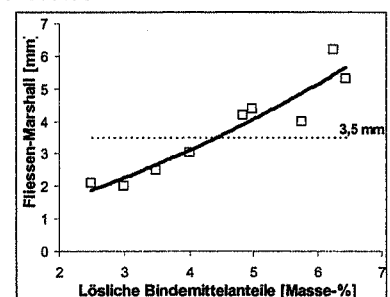
#### Fliesen-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile



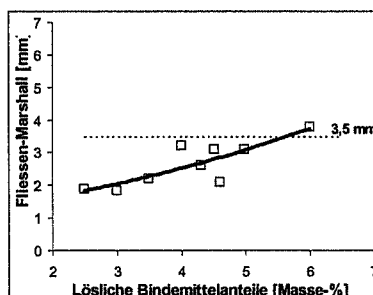
**Abbildung 47** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



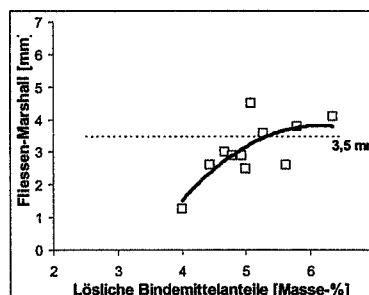
**Abbildung 48** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



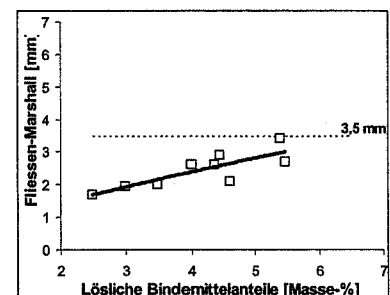
**Abbildung 49** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



**Abbildung 50** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



**Abbildung 51** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431



**Abbildung 52** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431

Die untersuchten Mischungen mit löslichen Bindemittelanteilen zwischen 2,5 Masse-% und 6 Masse-% des SMA 11 (Abbildung 47) und des SMA 16 (Abbildung 50) mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 ergeben bei der grafischen Darstellung des Fliesen-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile zunehmende Werte. Deshalb wird der maxi-

male Grenzwert für das Fliesen-Marshall von 3,5 mm, wie er in der Norm für Asphaltbetonbeläge als Richtwert für Mischgut des Typs S und H angegeben ist, von diesen untersuchten Mischungen mit mehr als etwa 5,2 Masse-% beim SMA 11 und 5,6 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen beim SMA 16 überschritten.

Das Fliesen-Marshall der Mischung mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 zeigt weder beim SMA 11 (Abbildung 48) noch beim SMA 16 (Abbildung 51) eine stetig steigende oder zunehmend steiler werdende Kurve sondern eine degressiv steigende, die ein Maximum erreicht, um dann wieder abzufallen, wenn die Stabilität-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile dargestellt wird. Das Fliesen-Marshall des SMA 11 überschreitet bei etwa 5,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen jedoch das Fliesen-Marshall des SMA 16 bei etwa 5,6 Masse-% den maximalen Grenzwert.

Die Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA ergeben beim Fliesen-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 49) ebenfalls zunehmende Werte und überschreiten mit mehr als 4,5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen die zulässige Grenze. Die Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA liegen alle unterhalb der zulässigen Grenze für Fliesen-Marshall.

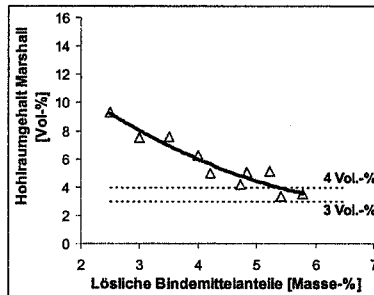
Auch die Kurven für das Fliesen-Marshall mit den verschiedenen Filler-Bitumen-Kombinationen deuten mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen grösseren Einfluss des Fillers als des Bindemittels auf die mechanischen Kennwerte dieser Mischungen hin. Trotzdem hat auch das Bindemittel einen ersichtlichen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte dieser Mischungen; denn die Kurven für das Fliesen-Marshall der Mischungen mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie Olexobit SMA zeigen ebenfalls einen unterschiedlichen Verlauf, der zwar in die gleiche Richtung weist, jedoch eine unterschiedliche Steilheit besitzt.

### 12.1.3 Hohlraumgehalt-Marshall

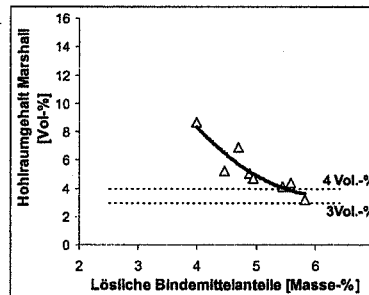
Bei der Verdichtung des Mischgutes mit dem Marshall-Einstampfergerät kommt der Hohlraumgehalt bei den Mischungen sowohl des SMA 11 wie auch des SMA 16 mit einem Bindemittelgehalt, der deutlich über 5 Masse-% ist (Abbildung 53 bis Abbildung 58) zwischen den nach Schweizer Norm SN 640 432 a, " Splittmastixasphalt-Deckschichten,

Konzeption, Anforderungen, Ausführung", geforderten Werten von 3 Volumen-% und 4 Volumen-% zu liegen.

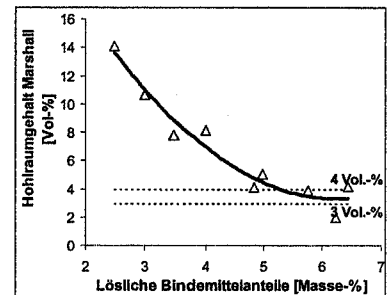
### Hohlraumgehalt Marshall in Funktion der löslichen Bindemittelanteile



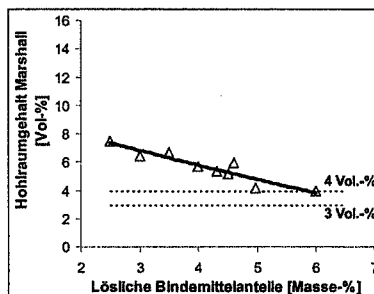
**Abbildung 53** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431



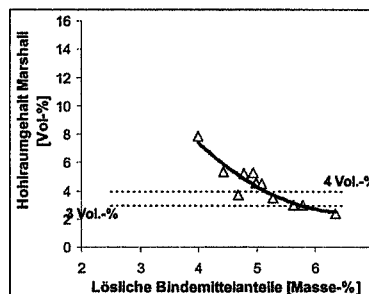
**Abbildung 54** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431



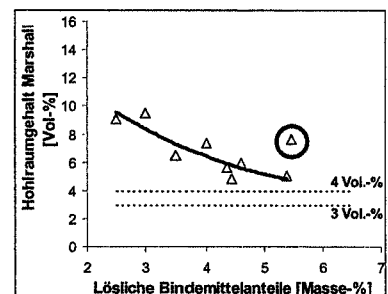
**Abbildung 55** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431



**Abbildung 56** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431



**Abbildung 57** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431



**Abbildung 58** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431

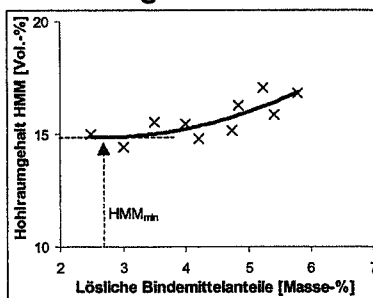
Der eingekreiste Datenpunkt in Abbildung 58 wird als Ausreisser gewertet und ist deshalb nicht in die Berechnung für die Trendlinie mit einbezogen worden.

Der Hohlraumgehalt-Marshall nimmt bei allen untersuchten Mischungen mit zunehmendem Bindemittelgehalt ab. Der Bereich des gemäss SN 640 431b als Richtwert vorgegebene Hohlraumgehalt-Marshall zwischen 3 Volumen-% und 4 Volumen-% wird von sämtlichen Mischungen erst mit löslichen Bindemittelanteilen über 5 Masse-% erreicht.

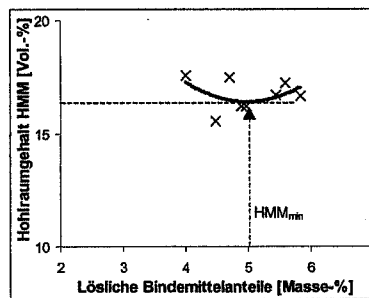
### 12.1.4 Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts HMM

Bezüglich minimalem Hohlraumgehalt  $HMM_{min}$  ist in der Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", lediglich angegeben, dass der minimale Hohlraumgehalt des Mineralgerüsts  $HMM_{min}$  nicht erreicht werden darf, was durch die Wahl des Bindemittelgehaltes erreicht werden muss. Es existieren jedoch keine Angaben über die Grösse dieses Wertes.

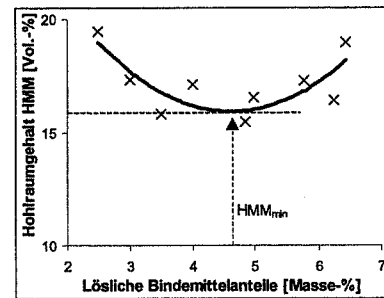
#### Hohlraumgehalt HMM in Funktion der löslichen Bindemittelanteile



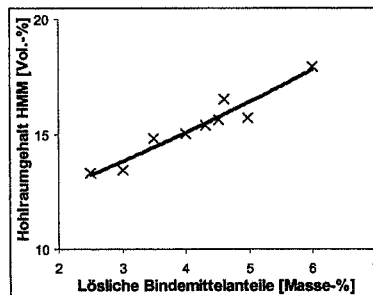
**Abbildung 59** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie



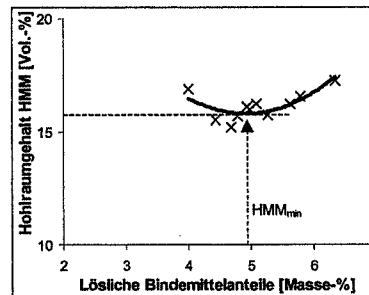
**Abbildung 60** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie



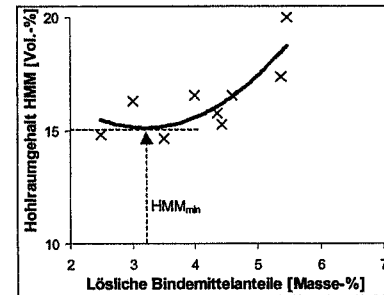
**Abbildung 61** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie



**Abbildung 62** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie



**Abbildung 63** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie



**Abbildung 64** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie

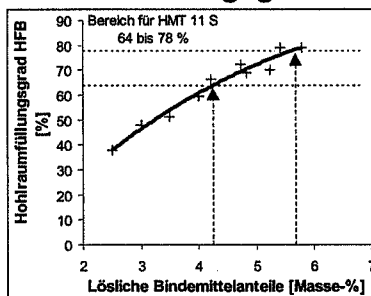
Ausser den Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 62) haben alle anderen Mischungen eine Trendlinie des Hohlraumgehaltes HMM mit einem Minimum. Die Minima der Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 59) sowie des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 64) werden bei etwa 3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht. Ein solch geringer Anteil an löslichen Bindemittelanteilen für einen Splittmastixasphalt ist für die Verwendung

im Strassenbau unrealistisch. Bei den Mischungen SMA 11 (Abbildung 60) sowie SMA 16 (Abbildung 63) mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 liegt das Minimum fast genau bei 5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Beim SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 61) wird das Minimum bei etwa 4,7 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht.

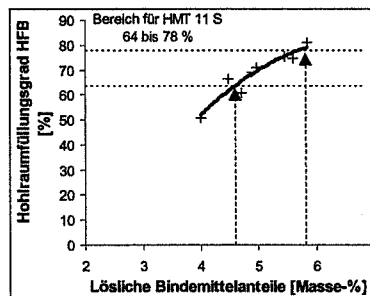
### 12.1.5 Hohlraumfüllungsgrad HFB

Eine Grössenangabe für den Kennwert HFB ist im Anhang der Schweizer Norm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", Kapitel N. "Anhang" unter Ziffer 76, "Hohlraumgehalt des bindemittelfrei gedachten Mineralstoffgerüstes HMM, Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB", in der Tabelle 24, "Richtwerte für die Hohlraumfüllungsgrade mit Bitumen von Marshallprüfkörpern", aufgeführt. Für Marshallprüfkörper aus Mischgut AB 11 soll der Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB zwischen 64 % und 80 % und für Mischgut HMT 11 zwischen 64 % und 78 % liegen. Für Marshallprüfkörper aus Mischgut AB 16 wird der Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB zwischen 68 % und 78 % und für Mischgut HMT 16 zwischen 63 % und 77 % liegen.

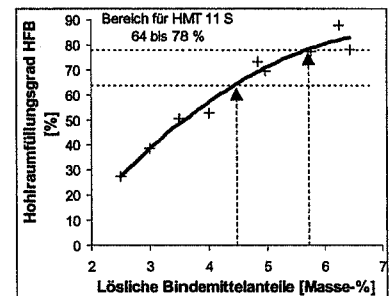
#### Hohlraumfüllungsgrad HFB in Funktion der löslichen Bindemittelanteile



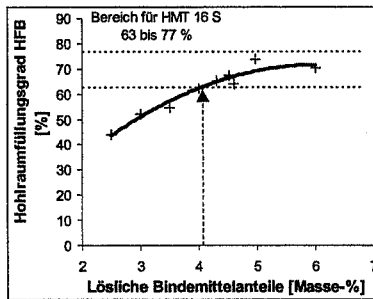
**Abbildung 65** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



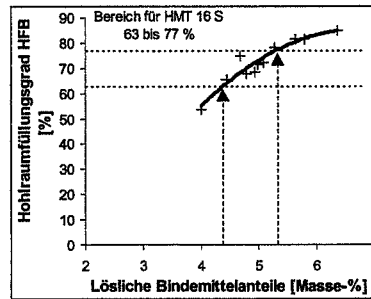
**Abbildung 66** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



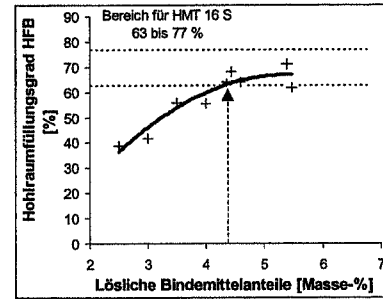
**Abbildung 67** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



**Abbildung 68** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlräumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



**Abbildung 69** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlräumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



**Abbildung 70** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlräumfüllungsgrad HFB und Trendlinie

Da weder in SN 640 431 b – mit den Anforderungswerten für Asphaltbeton und Heissmischtragschichten – noch in SN 640 432 a – mit den Anforderungswerten für SMA – beschrieben ist, welche Grenzwerte für die Beurteilung von Splittmastixasphalt zu verwenden sind, wurden im folgenden diejenigen für Heissmischtragschichten benutzt. Der Vergleich mit den Anforderungswerten für Asphaltbeton wäre grundsätzlich sehr ähnlich ausgefallen, sodass sich die folgenden Aussagen nicht wesentlich ändern würden.

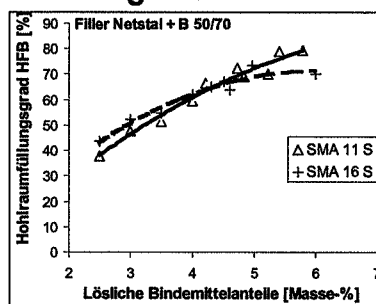
Wird aufgrund der Normrichtwerte für Heissmischtragschichten des Types S davon ausgegangen, dass für SMA 11 der minimale Hohlräumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB bei 64 % liegen sollte, dann ist aus den Diagrammen (Abbildung 65 bis Abbildung 67) ersichtlich, dass diese Grenze für die Marshallprüfkörper aller Mischungen in einem engen Bereich mit einem löslichen Anteil an Bindemittel zwischen 4,2 Masse-% und 4,6 Masse-% erreicht wird.

Wird aufgrund der Normrichtwerte für Heissmischtragschichten des Types S davon ausgegangen, dass der minimale Hohlräumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB für SMA 16 bei 63 % liegen sollte, dann ist aus den Diagrammen (Abbildung 68 bis Abbildung 70) ersichtlich, dass diese Grenze für die Marshallprüfkörper aller Mischungen ebenfalls in einem engen Bereich mit löslichen Bindemittelanteilen zwischen 4,0 Masse-% und 4,4 Masse-% erreicht wird.

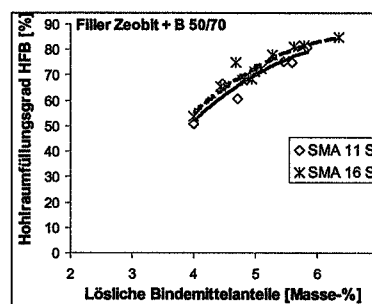
Wird ferner angenommen, dass der maximale Hohlräumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB bei 78 % für SMA 11 und bei 77 % für SMA 16 liegen sollte, dann ist aus den Diagrammen (Abbildung 65 bis Abbildung 70) ersichtlich, dass diese Grenze für die Marshallprüf-

körper der Mischungen SMA 11 zwischen 5,7 Masse-% und 5,8 % Masse-% wie auch der Mischungen SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 bei 5,3 Masse-% löslichen Anteilen an Bindemittel erreicht wird. Die beiden Mischungen SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA bleiben bis zu 6 Masse-% lösliche Bindemittelanteile immer unterhalb der oberen Grenze von 77 % für den Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB.

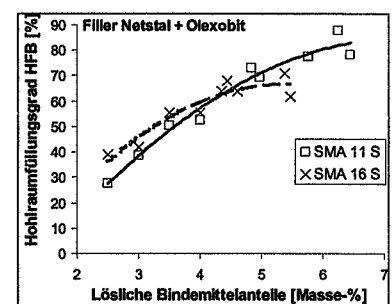
### Hohlraumfüllungsgrad HFB in Funktion der löslichen Bindemittelanteile, Einfluss der Korngrösse



**Abbildung 71** SMA 11 und SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



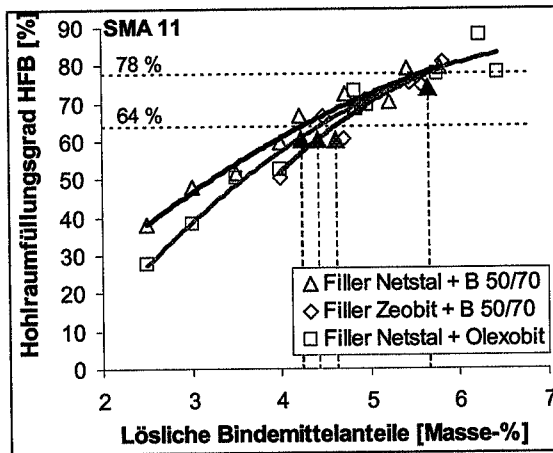
**Abbildung 72** SMA 11 und SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



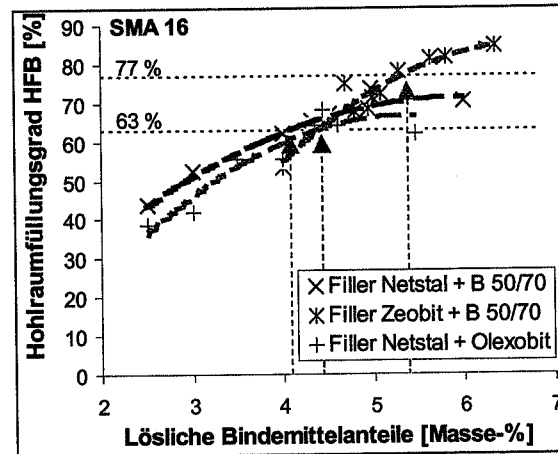
**Abbildung 73** SMA 11 und SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie

Werden die Kurven des Hohlraumfüllungsgrades HFB für die verschiedenen Filler-Bindemittel-Kombinationen in Diagrammen dargestellt, wird sichtbar, dass die Kurven je nach Kombination verschieden steil verlaufen. Die Mischungen von SMA 11 wie diejenigen von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 inklusive Olexobit SMA ergeben Kurven, die sich bei etwa 4,5 Masse-% löslichen Anteilen an Bindemittel kreuzen, wobei die Kurve vom SMA 16 dann jeweils deutlich flacher verläuft (Abbildung 71 und Abbildung 73). Die Kurven des Hohlraumfüllungsgrades mit Bindemittel HFB vom SMA 11 sowie SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 verlaufen fast parallel im gesamten untersuchten Bindemittelbereich (Abbildung 72).

### Hohlraumfüllungsgrad HFB in Funktion der löslichen Bindemittelanteile, Einfluss des Filler- und Bindemitteltyps



**Abbildung 74** SMA 11, Filler Netstal mit Bitumen 50/70, Filler Zeobit mit Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal mit Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie



**Abbildung 75** SMA 16, Filler Netstal mit Bitumen 50/70, Filler Zeobit mit Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal mit Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie

In den obigen grafischen Darstellungen entsprechen die waagrechten, gestrichelten Linien den Normrichtwerten für Heissmischtragschichten des Types S. Die senkrechten gestrichelten Linien zeigen – sofern sie nicht übereinander liegen und sich deshalb verdecken – die Kreuzungspunkte der Trendlinien für die verschiedenen Mischungen mit den Normrichtwerten an.

Beim SMA 11 ist die Steilheit aller Kurven verschieden. Die Mischungen mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 führen zu der am wenigsten steil verlaufenden Kurve des Hohlraumfüllungsgrades HFB. Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 ergeben den steilsten Kurvenverlauf und die Mischungen mit Filler Netstal und Olexobit SMA liegen dazwischen.

Die Kurven der beiden Mischungen SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie mit Olexobit SMA verlaufen praktisch parallel; wohingegen die Mischung mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 am steilsten verläuft und als einzige den oberen Grenzwert von 77 % überschreitet.

In der Praxis ist es üblich, Mischgut für Splittmastixasphalt mit einem Bindemittelgehalt von 5,7 Masse-% bis 6,5 Masse-% herzustellen und einzubauen. Dies scheint aber für

Mischungen von Splittmastixasphalt mit nominellem Grösstkorn  $< 16$  mm nicht ganz unbedenklich zu sein. Aus den Untersuchungsergebnissen geht nämlich hervor, dass beim maximalen Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB der obere Grenzwert von 78 % schon mit 5,7 Masse-% bis 5,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht wird. Bei Mischungen von Splittmastixasphalt mit nominellem Grösstkorn  $\geq 16$  mm mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie mit Filler Netstal und Olexobit SMA bleiben die Kurven des Hohlraumfüllungsgrades HFB bis zu 6 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen immer unterhalb des oberen Grenzwertes von 77 %. Die Mischung von Splittmastixasphalt mit nominellem Grösstkorn  $\geq 16$  mm mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 erreicht bei einem löslichen Bindemittelanteil von 5,3 Masse-% schon den oberen Grenzwert von 77 % des maximalen Hohlraumfüllungsgrades mit Bindemittel HFB.

## 12.2 Gyrator-Ergebnisse

Gemäss der amerikanischen SHRP-Methodologie gelten für das Optimieren eines bituminösen Mischgutes hauptsächlich folgende Kriterien – mit der Einschränkung, dass die in der SHRP-Methodologie festgelegten Anforderungen ursprünglich nur für Walzasphalthe der Typen Asphaltbeton sowie Heissmischtragschicht erarbeitet wurden:

- Die Prüfkörper müssen nach der maximalen Anzahl Umdrehungen noch eine Höhe von  $115 \pm 5$  mm haben.
- Der geringste Hohlraumgehalt  $HMM_{\min}$  der Prüfkörper muss grösser als 13,0 Volumen-% sein.
- Der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Prüfkörper muss innerhalb des Bereiches von 65 % bis 75 % liegen.
- Die Verdichtung nach der Gyrator-Umdrehungen bei  $N_{\text{ini}}$  muss gleich oder kleiner sein als 89 %, nach der Anzahl Umdrehungen bei  $N_{\text{des}}$  gleich oder weniger sein als 96 % und nach der Anzahl Umdrehungen bei  $N_{\text{max}}$  gleich oder weniger sein als 98 %.
- Der Hohlraumgehalt nach der Anzahl Umdrehungen bei  $N_{\text{des}}$  muss gleich oder grösser sein als 4 Volumen-%.

Die Verdichtung der Gyratorprüfkörper gemäss SHRP-Methodologie wird berechnet gemäss Beschreibung im Kapitel 21.2.11 "Verdichtung und Hohlraumgehalt der Prüfkörper".

Das Kriterium bezüglich des Hohlraumgehaltes bei der maximalen Verdichtung wird eigentlich durch die Verdichtung nach der Gyrator-Umdrehungen bei  $N_{\text{des}}$  mit der Anforderung von weniger als 96 % abgedeckt, denn wenn der Prüfkörper nur eine Verdichtung von gleich oder weniger als 96 % der Dichte des Mischgutes aufweist, enthält er noch 4 oder mehr Volumen-% Hohlräume.

In den folgenden Kapiteln werden die Untersuchungsergebnisse der Gyratorprüfungen für die Mischgutsorten SMA 11 sowie SMA 16 mit den verschiedenen Filler-Bitumen-Kombinationen für die Beurteilung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel gemeinsam diskutiert.

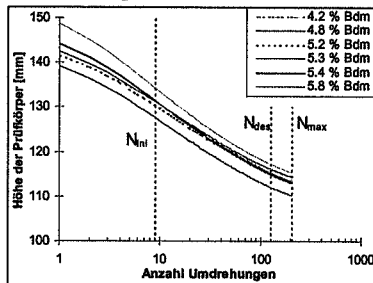
Im Anhang, Kapitel 13.1, sind die Kennwerte der Gyratorprüfkörper von jeder einzelnen Mischgutsorte bezüglich des optimalen Bindemittelanteiles kommentiert.

## 12.2.1 Höhenänderung

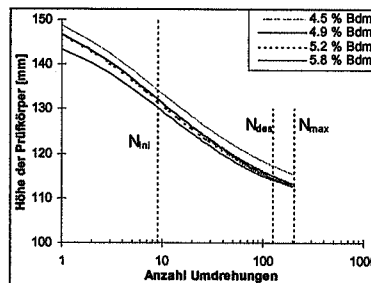
Anforderung gemäss SHRP: Die Prüfkörper müssen nach der maximalen Anzahl Umdrehungen zwischen 110 mm und 120 mm hoch sein.

Die Höhen der Prüfkörper nach  $N_{max}$  Gyrator-Umdrehungen werden einerseits durch die maximal gewählte Anzahl Umdrehungen und andererseits durch die Menge des eingefüllten Mischgutes beeinflusst.

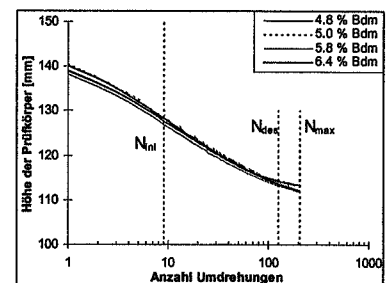
### Prüfkörperhöhe in Funktion der Anzahl Gyrator-Umdrehungen, Einfluss des Bindemittelgehalts



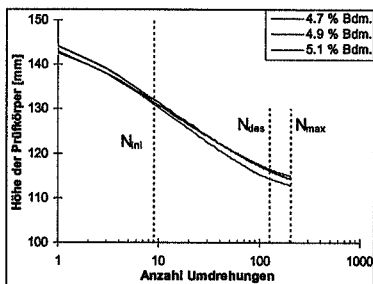
**Abbildung 76** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper



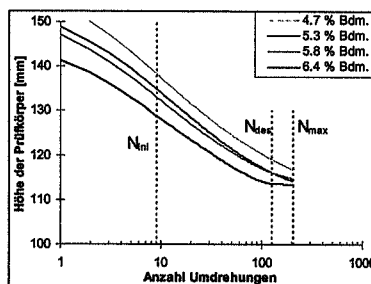
**Abbildung 77** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper



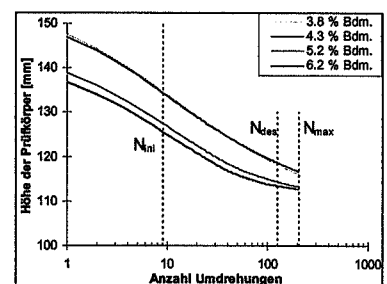
**Abbildung 78** SMA 11 mit Filler Netstal mit Olexobit SMA, Höhe der Prüfkörper



**Abbildung 79** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper



**Abbildung 80** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper



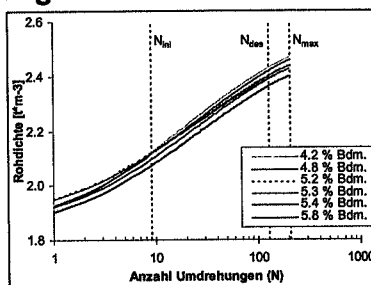
**Abbildung 81** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Höhe der Prüfkörper

Gemäss Abbildung 76 bis Abbildung 82 liegen die Höhen der verdichteten Prüfkörper nach 204 Gyrator-Umdrehungen bei  $N_{max}$  aller untersuchten Mischungen (SMA 11 wie auch SMA 16) im Bereich von 110 mm bis 120 mm und erfüllen somit die Anforderung.

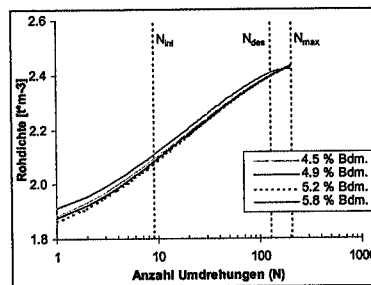
## 12.2.2 Rohdichte

An die Rohdichte der Gyratorprüfkörper werden keine direkten Anforderungen gestellt. Indirekt bestehen aber Anforderungen an die Rohdichte, da der Hohlraumgehalt der Prüfkörper auf mindestens 4 Volumen-% bei  $N_{des}$  festgelegt wird. Deshalb muss die Rohdichte der Gyratorprüfkörper weniger als 96 % der Dichte der Mischung sein (vgl. dazu Kapitel 12.2.6).

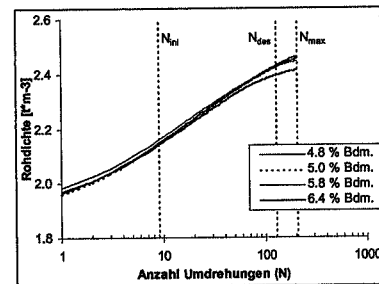
### Rohdichte in Funktion der Anzahl Gyrator-Umdrehungen, Einfluss des Bindemittelgehalts



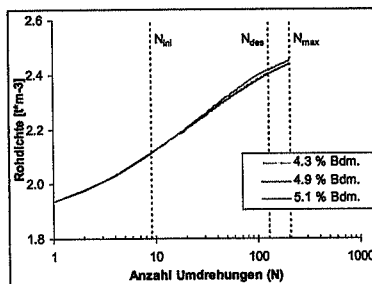
**Abbildung 82** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Rohdichte



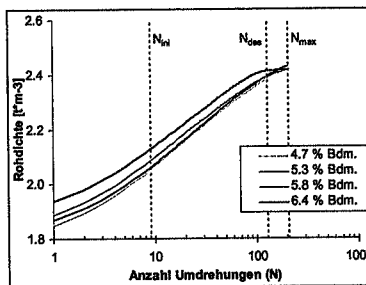
**Abbildung 83** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Rohdichte



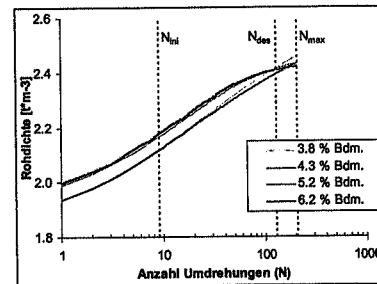
**Abbildung 84** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Rohdichte



**Abbildung 85** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Rohdichte



**Abbildung 86** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Rohdichte



**Abbildung 87** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Rohdichte

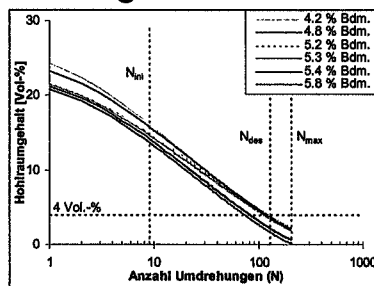
Bei den meisten Kurven in Abbildung 82 bis Abbildung 87 mit den Darstellungen der Rohdichte der Gyratorprüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen im halblogarithmischen Koordinatensystem ändert sich die Steigung – unabhängig vom nominellen Grösstkorn – von Anfang bis Ende nur wenig. Auffallend anders verlaufen aber diejenigen Kurven mit mehr löslichen Bindemittelanteilen als etwa 6 Masse-%, denn bei diesen nimmt die Steigung mit zunehmender Anzahl Umdrehungen ab und manchmal liegen sie sogar parallel zur Grundlinie des Diagrammes. Dies heisst, dass die anfänglich gute Verdichtungswilligkeit mit zunehmender Anzahl Umdrehungen deutlich abnimmt. Vermutlich

ist dann die Lagerung der Mineralstoffe schon derart kompakt, dass sich die grossen Körner untereinander bereits abstützen und dadurch eine zusätzliche Verdichtung behindern.

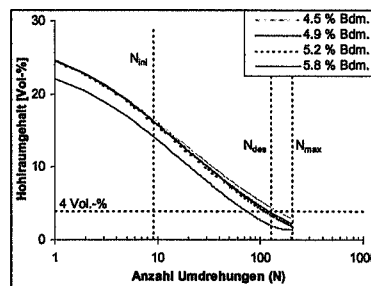
### 12.2.3 Hohlraumgehalt

Anforderung gemäss SHRP: Der Hohlraumgehalt nach der Gyrator-Umdrehungen bei  $N_{des}$  muss gleich oder grösser sein als 4 Volumen-% (vgl. dazu Kapitel 12.2.6).

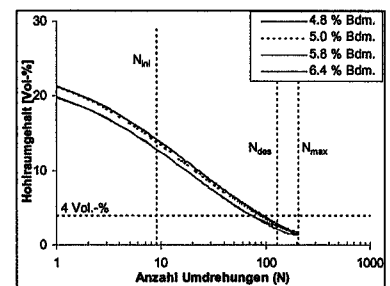
#### Hohlraumgehalt in Funktion der Anzahl Gyrator-Umdrehungen, Einfluss des Bindemittelgehalts



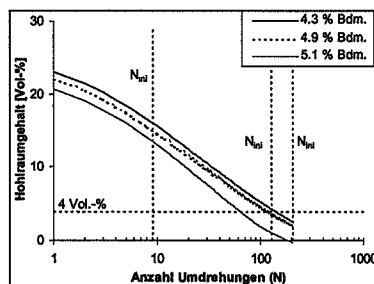
**Abbildung 88** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt



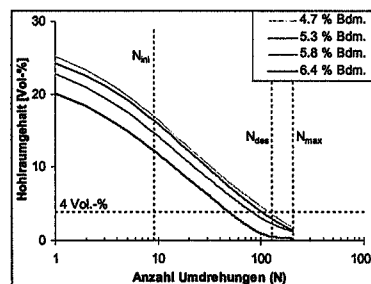
**Abbildung 89** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt



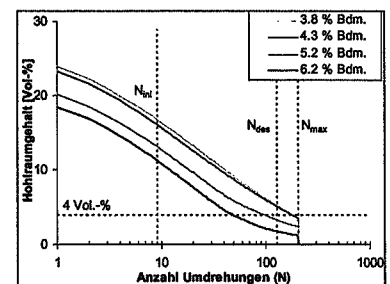
**Abbildung 90** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt



**Abbildung 91** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt



**Abbildung 92** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt



**Abbildung 93** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt

Wie aus Abbildung 88 bis Abbildung 93 hervorgeht, ergeben die Mischungen des SMA 11 S mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 mit 4,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen bei  $N_{des}$  (Tabelle 38) einen Hohlraumgehalt von 3,9 Volumen-%. Die ermittelten Untersuchungsergebnisse liegen also schon unterhalb der zulässigen 4 Volumen-% und erfüllen deshalb diese Anforderung nicht. Das Mischgut des SMA 16 mit 4,3 Masse-% (Tabelle 47) löslichem Bindemittelanteil erfüllt diese Anforderung. Alle anderen Mischun-

gen des SMA 11 sowie des SMA 16 mit mehr löslichen Bindemittelanteilen erfüllen diese Anforderung nicht.

Die Mischung mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 des SMA 11 mit 4,5 Masse-% (Tabelle 41) erfüllt nicht die Anforderung an den Hohlraumgehalt von  $\geq 4$  Volumen-%. Die Mischungen des SMA 11 mit mehr löslichen Bindemittelanteilen erfüllen diese Anforderung ebenfalls nicht. Auch alle Mischungen des SMA 16 (Tabelle 50) erfüllen diese Anforderung nicht.

Von den untersuchten Mischungen mit Filler Netstal und Olexobit SMA des SMA 11 (Tabelle 44) erfüllt kein Prüfkörper diese Anforderung an den Hohlraumgehalt. Die Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA mit 3,8 und 4,3 Masse-% (Tabelle 53) löslichen Bindemittelanteilen erfüllen diese Anforderung. Die Mischungen mit mehr löslichen Bindemittelanteilen führen zu geringerem Hohlraumgehalt.

#### 12.2.4 Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts HMM

Anforderung gemäss SHRP: Der geringste Hohlraumgehalt  $HMM_{\min}$  der Prüfkörper darf 13,0 Volumen-% nicht unterschreiten.

##### Hohlraumgehalt HMM in Funktion der Anzahl Gyrator-Umdrehungen, Einfluss des Bindemittelgehalts

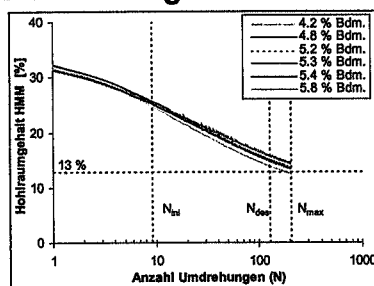


Abbildung 94 SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM

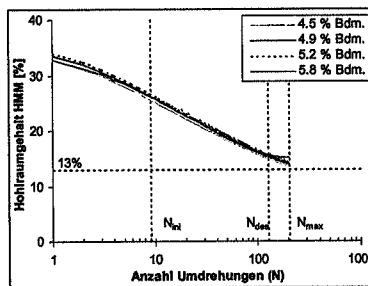


Abbildung 95 SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM

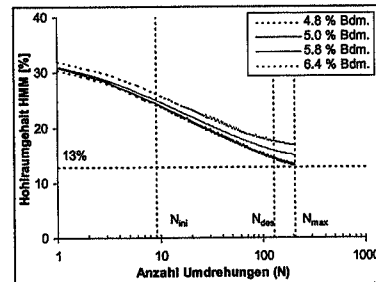
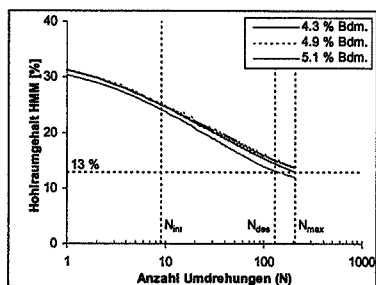
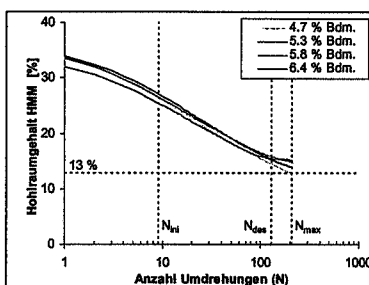


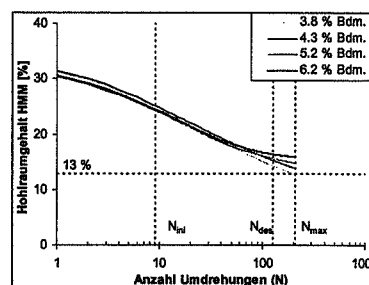
Abbildung 96 SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM



**Abbildung 97** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM



**Abbildung 98** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM



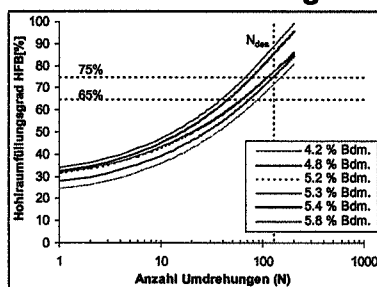
**Abbildung 99** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM

Wie aus Abbildung 94 bis Abbildung 99 ersichtlich, werden die Anforderung an den Hohlraumgehalt  $HMM_{min}$  von mehr als 13 Volumen-% bei  $N_{des}$  von allen Gyratorprüfkörpern der untersuchten Mischungen des SMA 11 und des SMA 16 mit allen Filler-Bindemittel-Kombinationen erfüllt.

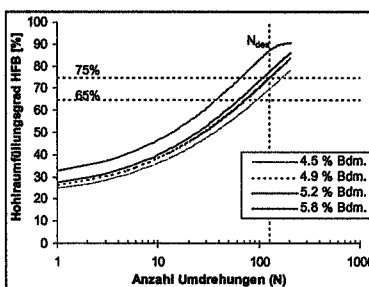
### 12.2.5 Hohlraumfüllungsgrad HFB

Anforderung gemäss SHRP: Der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Prüfkörper muss innerhalb des Bereiches von 65 % bis 75 % liegen.

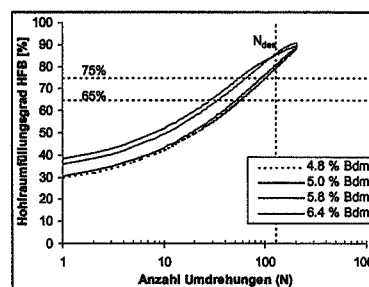
#### Hohlraumfüllungsgrad HFB in Funktion der Anzahl Gyrator-Umdrehungen, Einfluss des Bindemittelgehalts



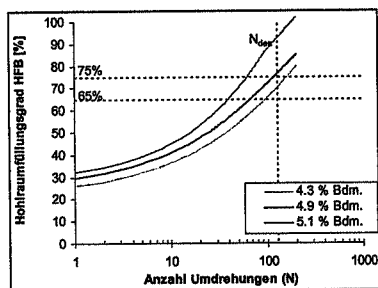
**Abbildung 100** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB



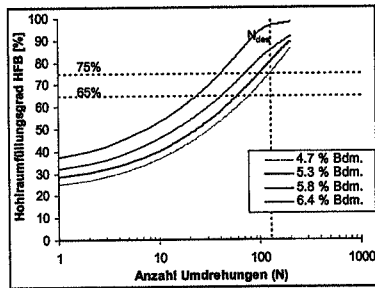
**Abbildung 101** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB



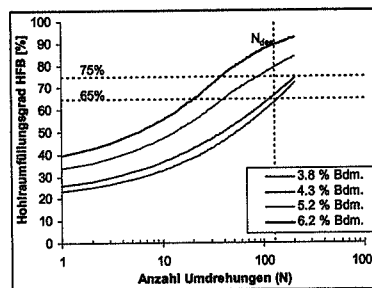
**Abbildung 102** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB



**Abbildung 103** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB



**Abbildung 104** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB



**Abbildung 105** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB

Wie aus Abbildung 100 bis Abbildung 105 hervorgeht, liegt der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Prüfkörper nach  $N_{des}$  Gyrator-Umdrehungen beim Mischgut SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Tabelle 38), mit 4,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteile mit 71,6 Volumen-% gerade innerhalb, beim Mischgut mit 4,8 Masse-% mit 75,5 Volumen-% und mehr löslichen Bindemittelanteilen oberhalb des zulässigen Bereiches von 65 % bis 75 %.

Der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Prüfkörper nach  $N_{des}$  Gyrator-Umdrehungen liegt beim Mischgut SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Tabelle 41), mit 4,5 Masse-% löslichem Bindemittelanteil mit 69,9 Volumen-% innerhalb, bei den Mischungen mit 4,9; 5,2 und 5,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen oberhalb des zulässigen Bereiches von 65 % bis 75 %.

Bei allen untersuchten Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Tabelle 44) mit löslichen Bindemittelanteilen von 4,8 Masse-% und mehr befindet sich der Hohlraumfüllungsgrad HFB aller Prüfkörper nach  $N_{des}$  Gyrator-Umdrehungen mit mehr als 79,8 Volumen-% ebenfalls oberhalb des zulässigen Bereiches von 65 % bis 75 %.

Der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Prüfkörper des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 liegt nach  $N_{des}$  Gyrator-Umdrehungen beim Mischgut SMA 16 (Tabelle 47), mit 4,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen entsprechend einem HFB von 69,9 Volumen-% innerhalb und bei der Mischung mit 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen schon oberhalb des zulässigen Bereiches von 65 % bis 75 %.

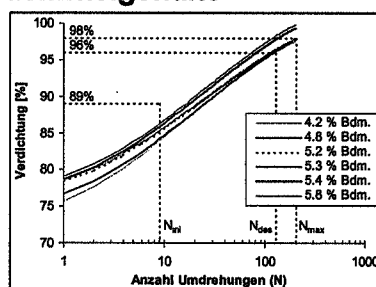
Der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Prüfkörper des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Tabelle 50) mit 4,7 Masse-% löslichem Bindemittelanteil und 74,7 Volumen-% liegt bei  $N_{des}$  Gyrator-Umdrehungen gerade noch innerhalb und bei den Mischungen mit mehr löslichen Bindemittelanteilen bereits oberhalb des zulässigen Bereiches von 65 % bis 75 %.

Bei den untersuchten Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Tabelle 53) mit 3,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen und 62,9 Volumen-% ergibt sich nach  $N_{des}$  Gyrator-Umdrehungen ein Hohlraumfüllungsgrad HFB aller Prüfkörper unterhalb, mit 4,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen und 66,1 Volumen-% innerhalb und mit mehr löslichen Bindemittelanteilen liegen die Ergebnisse bereits oberhalb des zulässigen Bereiches von 65 % bis 75 %.

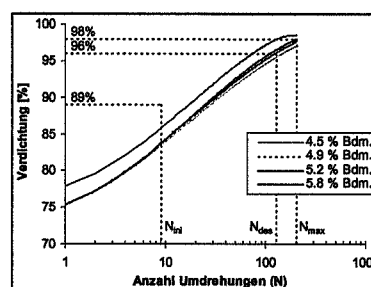
### 12.2.6 Verdichtungsverlauf

Einen Vergleich der verschiedenen Mischungen bezüglich Anforderungen an die Verdichtung ermöglichen Abbildung 106 bis Abbildung 111.

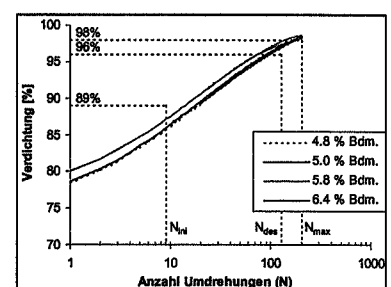
#### Verdichtung [%] in Funktion der Anzahl Gyrator-Umdrehungen, Einfluss des Bindemittelgehalts



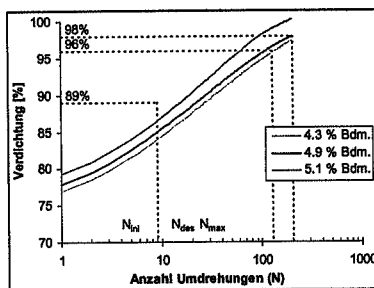
**Abbildung 106** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtung



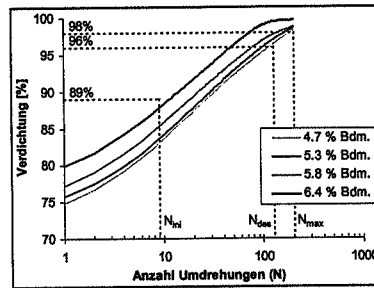
**Abbildung 107** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtung



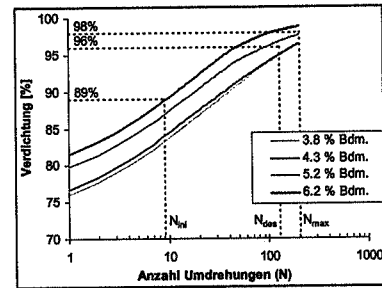
**Abbildung 108** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtung



**Abbildung 109 SMA**  
16 mit Filler Netstal und  
Bitumen 50/70, Verdichtung



**Abbildung 110 SMA**  
16 mit Filler Zeobit und Bitu-  
men 50/70, Verdichtung



**Abbildung 111 SMA**  
16 mit Filler Netstal und  
Olexobit SMA, Verdichtung

**Anforderung bezüglich  $N_{ini}$ :** Die Verdichtung nach  $N_{ini} = 9$  Gyrator-Umdrehungen muss weniger als 89 % sein.

Diese Anforderung erfüllen alle Gyratorprüfkörper der untersuchten Mischungen des SMA 11 und des SMA 16 mit sämtlichen Filler-Bindemittel-Kombinationen.

**Anforderung bezüglich  $N_{des}$ :** Die Verdichtung nach  $N_{des} = 126$  Gyrator-Umdrehungen muss weniger als 96 % sein.

Diese Anforderung erfüllen die Mischung des Mischgutes SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 nicht; denn schon mit 4,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen und 96,1 % ist der Grenzwert gerade überschritten. Die Mischungen mit mehr löslichen Bindemittelanteilen erfüllen diese Anforderung nicht.

Nur die Mischung des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 mit 4,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erfüllt diese Anforderung. Die Mischungen mit mehr löslichem Bindemittelanteil erfüllen diese Anforderung nicht.

Diese Anforderung erfüllt die Mischung des SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 mit 4,5 Masse-% löslichem Bindemittelanteil und 95,5 %. Die Mischungen mit höheren löslichen Bindemittelanteilen, wie 4,9; 5,2 sowie 5,8 Masse-%, erfüllen diese Anforderung nicht.

Dieser Anforderung genügt keine Mischung des Mischgutes SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70. Schon mit 4,7 Masse-% löslichem Bindemittelanteil ist die Verdichtung mit 96,3 % oberhalb des geforderten Grenzwertes von weniger als 96 %.

Die untersuchten Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA erfüllen diese Anforderung nicht.

Von den untersuchten Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA mit 3,8 Masse-% sowie 4,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen liegen die Werte der Verdichtung nach 126 Gyrator-Umdrehungen mit 94,7 % bzw. 94,8 % unter dem geforderten Grenzwert von 96 % und erfüllen diese Anforderung. Die Mischungen mit mehr löslichen Bindemittelanteilen haben eine Verdichtung von mehr als 96 %.

**Anforderung bezüglich  $N_{\max}$ : Die Verdichtung nach  $N_{\max} = 204$  Gyrator-Umdrehungen muss weniger als 98 % sein.**

Diese Anforderung erfüllen die Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 mit 4,2 Masse-% bis 5,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Die Mischung mit 5,2 Masse-% löslichem Bindemittelanteil ergibt eine Verdichtung von 98,1 %. Da der lösliche Bindemittelanteil von 5,2 Masse-% jedoch zwischen 4,8 Masse-% und 5,3 Masse-% liegt, müsste sich die Verdichtung ähnlich verhalten. Im Fall der Mischung SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 mit 5,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen ist mit grosser Wahrscheinlichkeit eine experimentelle Abweichung aufgetreten weshalb der Wert für die maximale Verdichtung dieser Prüfkörper ebenfalls zur Kategorie der Mischungen, welche die Anforderung erfüllen, zu zählen ist. Die Mischungen mit 5,4 und 5,8 Masse-% löslichem Bindemittelanteil erfüllen die Anforderung nicht.

Die untersuchten Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 mit 4,3 Masse-% und 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erfüllen diese Anforderung. Hin-gegen ergibt die Verdichtung der Mischung mit 4,7 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen einen Wert von 98,2 % obwohl der lösliche Bindemittelanteil dieser Mischung zwischen denen von 4,3 Masse-% und 4,9 Masse-% liegt und diese beiden Mischungen die Anforderung erfüllen. Die untersuchte Mischung mit 5,1 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen ergibt eine Verdichtung von 100,3 % (Tabelle 48) und erfüllt somit die Anforderung eindeutig nicht. Wie das Untersuchungsergebnis einer Verdichtung der Gyratorprüfkörper von mehr als 100 % zustande kommt, ist bereits in Abschnitt 11.5.4 "SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70" beschrieben.

Ebenfalls erfüllt wird diese Anforderung von den Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 des SMA 11 mit 4,5 Masse-% und 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Die Mischungen des SMA 11 mit 5,2 Masse-% sowie mit 5,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen ergeben 98,1 % und 98,6 % Verdichtung und genügen dieser Anforderung nicht.

Alle untersuchten Mischungen des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 genügen dieser Anforderung nicht. Schon bei 4,7 Masse-% löslichem Bindemittelanteil ist die Verdichtung mit 98,2 % grösser als der geforderte Wert von weniger als 98 %. Mit zunehmenden löslichen Bindemittelanteilen nehmen die Werte der Verdichtung zu.

Alle untersuchten Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA erfüllen die Anforderung an die Verdichtung nach 204 Gyrator-Umdrehungen nicht. Schon bei 4,8 Masse-% löslichem Bindemittelanteil ist die Verdichtung mit 98,5 % grösser als der geforderte Wert von weniger als 98 % und mit zunehmenden löslichen Bindemittelanteilen nehmen die Werte der Verdichtung weiterhin zu.

Die untersuchten Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA mit 3,8 Masse-%, 4,3 Masse-% und 5,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erfüllen die Anforderung. Die Mischung mit 6,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erfüllt mit 98,8 % die Anforderung nicht.

### 12.2.7 Verdichtungswiderstand gemäss prEN 12697-10: 2001

Als Mass für den Verdichtungswiderstand, ausgedrückt als K-Wert, wird gemäss prEN 12697-10: 2001 die Steigung der Kurve des abnehmenden Hohlraumgehaltes in Abhängigkeit der Anzahl Umdrehungen bei der Verdichtung der Gyratorprüfkörper berechnet. Basis für die Berechnung ist folgende Formel:

$$v(\text{ng}) = v(1) - (K \cdot \ln(\text{ng}))$$

Wobei als Masszahl für den Verdichtungswiderstand der Faktor K massgebend ist. Er wird als K-Wert bezeichnet.

- $v(\text{ng})$  = Hohlraumgehalt nach einer bestimmten Anzahl Gyrator-Umdrehungen
- $v(1)$  = Hohlraumgehalt nach einer einzigen Umdrehung des Gyrators
- K = Masszahl für die Verdichtungswiderstand der Mischung
- ng = Gyrator-Umdrehungen bei welcher  $v(\text{ng})$  bestimmt wird
- ln = natürlicher Logarithmus

Bindemittel, Masse-%	K-Wert u(1) bis u(204)	K-Wert u(1) bis u(100)	K-Wert u(1) bis u(20)
4.2	4.1	4.1	4.2
4.8	3.9	3.9	4.0
5.2	3.6	3.6	3.6
5.3	3.6	3.6	3.6
5.4	3.5	3.5	3.6
5.8	3.5	3.5	3.5

Tabelle 55 K-Wert von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, gemäss prEN 12697-10, jeweils berechnet zwischen 1 und 204 Umdrehungen sowie 1 und 100 und 1 und 20 Umdrehungen

Als Beispiel für die geringen Unterschiede der K-Werte bei den stark unterschiedlichen Verdichtungen nach 20, 100 sowie 204 Umdrehungen des Gyrators wurden für die folgenden Auswertungen nur noch die K-Werte nach 204 Umdrehungen des Gyrators benutzt.

Bindemittel, Masse-%	SMA 11 NB	Bindemittel, Masse-%	SMA 11 ZB	Bindemittel, Masse-%	SMA 11 NO
4,2	4,1	4,5	4,2	4,8	3,6
4,8	3,9	4,9	4,2	5,0	3,5
5,2	3,6	5,2	4,2	5,8	3,3
5,3	3,6	5,8	3,7	6,4	3,3
5,4	3,5			6,2	3,2
5,8	3,5				

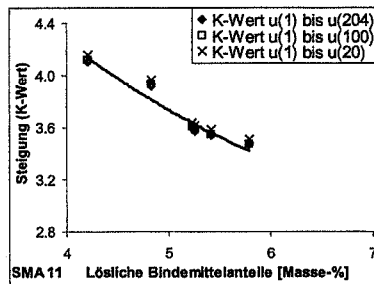
Tabelle 56 K-Wert, gemäss prEN 12697-10, von SMA 11-Mischungen jeweils berechnet zwischen 1 und 204 Umdrehungen

Bindemittel, Masse-%	SMA 16 NB	Bindemittel, Masse-%	SMA 16 ZB	Bindemittel, Masse-%	SMA 16 NO
4,7	3,4	4,7	4,3	3,8	4,1
4,3	3,9	5,3	4,1	4,3	3,9
4,9	3,7	5,8	3,8	5,3	3,0
5,1	3,4	6,4	3,3	5,2	3,3
				6,2	3,0

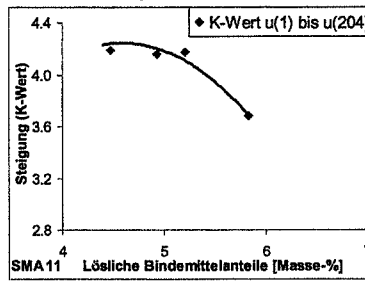
Tabelle 57 K-Wert, gemäss prEN 12697-10, von SMA 16-Mischungen jeweils berechnet zwischen 1 und 204 Umdrehungen

Einen Vergleich bezüglich des Verdichtungswiderstandes der Mischungen mit verschiedenen löslichen Bindemittelanteilen sowie Filler-Bitumen-Kombinationen während der Gyratorprüfung ermöglicht Abbildung 112 bis Abbildung 117.

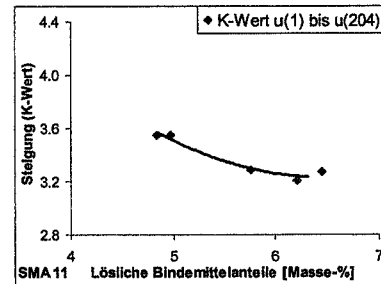
### Verdichtungswiderstand gemäss prEN 12697-10:2001 in Funktion der löslichen Bindemittelanteile bei der Verdichtung mit dem Gyrator



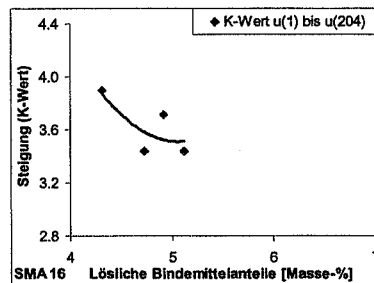
**Abbildung 112** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand



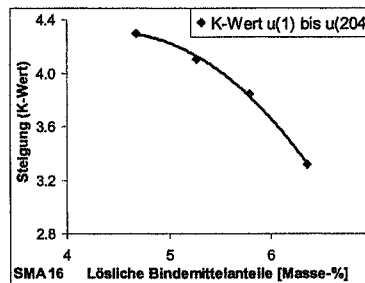
**Abbildung 113** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand



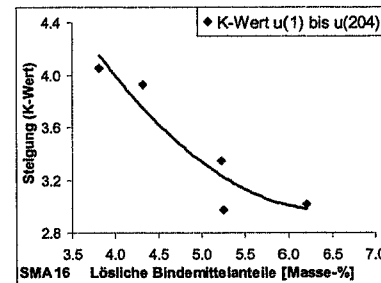
**Abbildung 114** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtungswiderstand



**Abbildung 115** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand



**Abbildung 116** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand



**Abbildung 117** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtungswiderstand

Die prEN 12697-10: 2001, "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 10: Compactability", empfiehlt in Abschnitt 7.2 für die Auswertung des Verdichtungswiderstandes den Verlauf des berechneten Hohlraumgehaltes der Mischung resp. des Prüfkörpers zu benutzen. Aus der Grundfläche und der momentanen Höhe des Gyratorprüfkörpers wird der Hohlraumgehalt nach jeder Umdrehung des Gyrators berechnet. Aus dem Hohlraumgehalt der Mischung nach einer Umdrehung des Gyrators wird nach der oben skizzierten Berechnungsmethode der K-Wert unter Verwendung der linearen Regression berechnet zu einem Hohlraumgehalt des Prüfkörpers nach mindestens 20 Umdrehungen des Gyrators.

---

Zur Überprüfung der Abweichung des K-Wertes bei unterschiedlich vielen Umdrehungen wurde er für jede untersuchte Mischung bei der empfohlenen minimalen Anzahl von 20 Umdrehungen des Gyrators bei der in dieser Forschungsarbeit maximalen Anzahl Umdrehungen von 204 berechnet und zusätzlich wurde noch eine Auswertung bei 100 Umdrehungen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die K-Werte von allen Mischungen mit zunehmender Anzahl Umdrehungen kleiner werden. Aus diesem Grund sind diese drei K-Werte nur für die Mischung des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 112) in der grafischen Darstellung enthalten.

Aus der Lage der Ergebnisse geht eindeutig hervor, dass keine wesentlichen Unterschiede vorkommen, sondern sich ausschliesslich geringfügige systematische Verschiebungen in der Grössenordnung von wenigen Hundertstel ergeben. Aus diesem Grund wurden in allen anderen Abbildungen des Verdichtungswiderstandes nur noch die berechneten K-Werte zwischen einer und 204 Umdrehungen dargestellt. Auch bei diesen Darstellungen wurde wegen der Streuungen der Resultate eine Trendlinie eingezeichnet.

Auffallend bei der Auswertung dieser Kennwerte ist, wie schon in den grafischen Darstellungen anderer Kennwerte, dass die Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 wiederum zu einer anders verlaufende Kurvenform als die Mischungen mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie Olexobit SMA führen.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind die Euronormen für "bitumenhaltige Mischungen" noch nicht verbindlich. Sie sollen frühestens im Jahre 2003 eingeführt werden. Der K-Wert ist eine neue unverbindliche Kenngrösse für bitumenhaltige Mischungen, welche in dieser Forschungsarbeit nur zwecks Orientierung aufgenommen wurde.

## 13 OPTIMIEREN DER LÖSLICHEN BINDEMITELEANTEILE

In diesem Kapitel werden die optimalen löslichen Bindemittelanteile einerseits aufgrund der Kennwerte von der Marshallverdichtung, andererseits aufgrund der Verdichtung mit dem Gyrator ermittelt.

### 13.1 Marshallverdichtung

Es sei hier nochmals mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass gemäss Norm SN 640 432 a grundsätzlich weder die Stabilität- noch das Fliessen-Marshall zur Beurteilung von Splittmastixasphalt herangezogen werden darf. Trotzdem sind im Rahmen dieser Forschungsarbeit in den folgenden Zusammenfassungen der Marshallergebnisse zur Information diese beiden Kennwerte sowie die Anforderungen der Norm SN 640 432 a in den folgenden tabellarischen Zusammenfassungen (Tabelle 58 und Tabelle 59) aufgeführt worden. Zur Abgrenzung sind die Ergebnisse jedoch auf farbigem Hintergrund dargestellt.

#### 13.1.1 Tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllen

Die beiden Marshallkennwerte Stabilität-Marshall sowie Fliessen-Marshall wurden zwar in der tabellarischen Darstellung integriert, jedoch zur Bestimmung des optimalen löslichen Bindemittelanteiles nicht berücksichtigt und sind deshalb farblich gekennzeichnet worden.

Marshallkennwerte	Anforderung an SMA 11	Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
		lösliche Bindemittelanteile [Masse-%]		
Stabilität-Marshall	> 10 kN	< 3	4,3 bis 5,8	< 5,4
Fliessen-Marshall	< 2,5 mm	< 5,3	4,0 bis 5,6	> 4,4
Hohlraumgehalt-Marshall	3,5 bis 4,5 Vol-%	> 5,4	> 5,6	> 5,3
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	~ 3	~ 5,0	~ 4,7
Hohlraumfüllungsgrad HFB	64 bis 78 %	4,7 bis 5,8	4,6 bis 5,8	4,5 bis 5,7
<b>Optimale lösliche Bindemittelanteile aufgrund der Marshallkennwerte</b>				
möglicher Bereich	Masse-%	5,5 bis 5,8	5,4 bis 5,7	5,6 bis 5,8
empfohlen	Masse-%	5,6	5,6	5,7

**Tabelle 58** SMA 11, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllt werden.

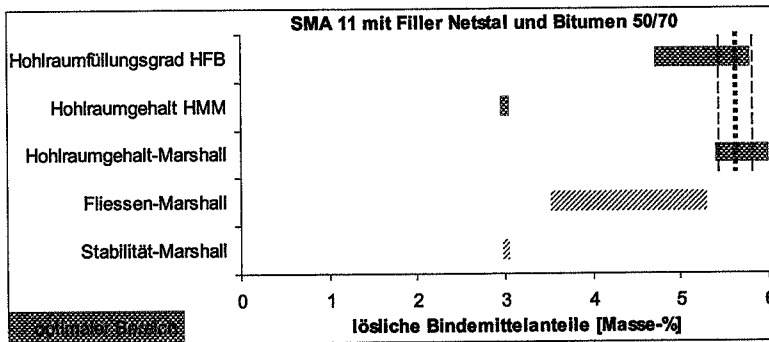
Marshallkennwerte	Anforderung an SMA 16	Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
		lösliche Bindemittelanteile [Masse-%]		
Stabilität-Marshall	> 10 kN	< 3,0	~ 5,1	< 3,5
Fließen-Marshall	< 3,5 mm	< 5,7	< 5,4	< 5,5
Hohlraumgehalt-Marshall	3,5 bis 4,5 Vol-%	> 5,9	5,1 bis 5,8	> 5,5
Hohlraumgehalt HMM	Vol-%	Gerade	~ 5,0	~ 3,2
Hohlraumfüllungsgrad HFB	63 bis 77 %	4,1 bis >6	4,4 bis 5,4	4,4 bis >6
<b>Optimale lösliche Bindemittelanteile aufgrund der Marshallkennwerte</b>				
möglicher Bereich	Masse-%	4,1 bis 5,9	5,0 bis 5,3	4,4 bis 5,5
empfohlen	Masse-%	5,0	5,1	5,0

**Tabelle 59** SMA 16, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllt werden.

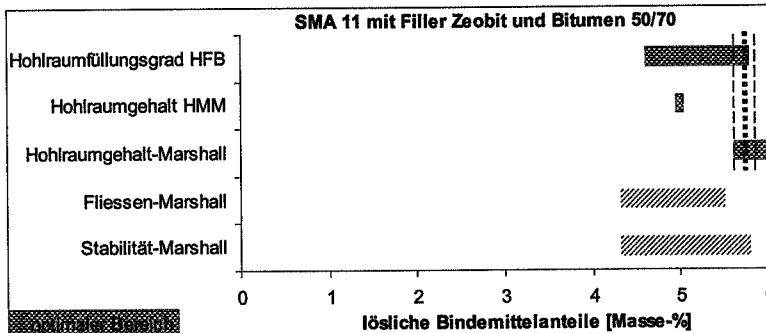
### 13.1.2 Grafische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllen

In Abbildung 118 bis Abbildung 123 sind die ermittelten Bereiche der löslichen Bindemittelanteile dargestellt innerhalb derer die Anforderungen der relevanten Marshallkennwerte von SMA 11 sowie SMA 16 erfüllt werden für die verschiedenen Filler-Bitumen-Kombinationen. Die beiden Kennwerte Stabilität-Marshall sowie Fließen-Marshall wurden in der grafischen Darstellung integriert, jedoch gegenüber den ausgefüllten Balken der anderen Werte schraffiert dargestellt.

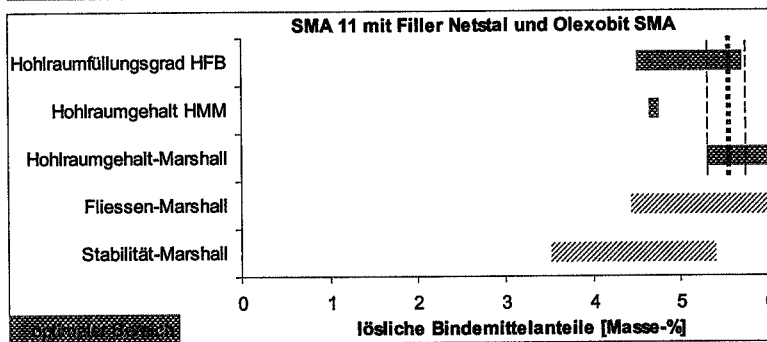
Der mögliche Bereich des optimalen löslichen Bindemittelanteiles ist durch die beiden gestrichelten und der empfohlene optimale lösliche Bindemittelanteil durch die punktierte Senkrechte markiert.



**Abbildung 118** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte

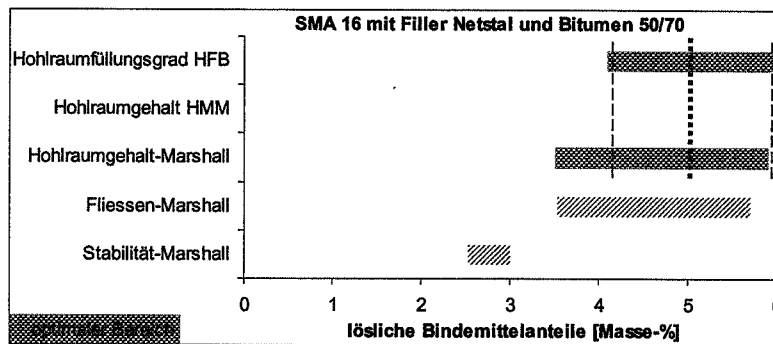


**Abbildung 119** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte

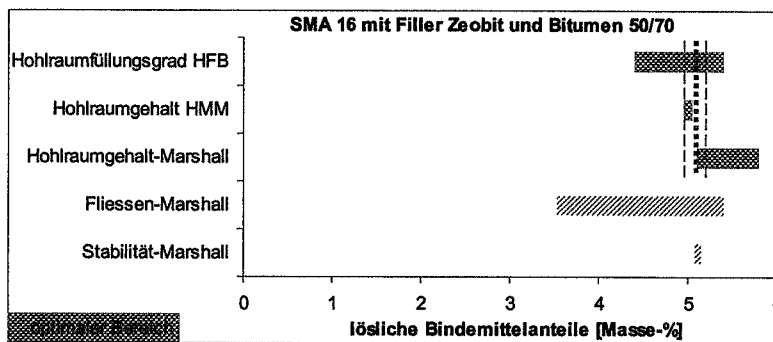


**Abbildung 120** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte

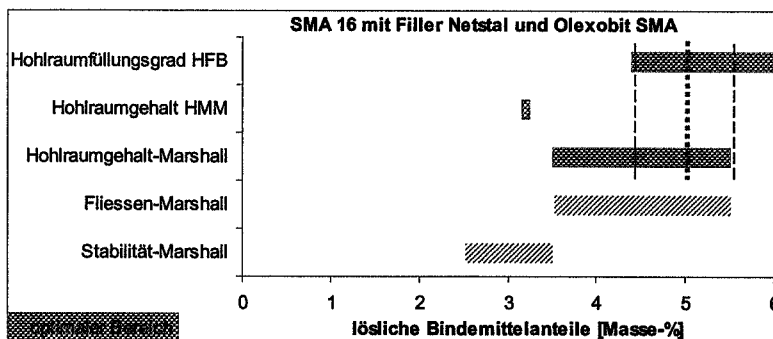
Die aufgrund der mechanischen Eigenschaften ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile weichen von denjenigen ab, welche sich aus den volumetrischen Eigenschaften ergeben. Und zwar trifft diese Aussage sowohl für den SMA 11 wie auch für den SMA 16 zu. Dies zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften vom Mischgut für SMA keine schlüssigen Aussagen bezüglich der Optimierung der löslichen Bindemittelanteile liefern. Diese Erkenntnis bestätigt nachträglich die Aussage der Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten", welche Stabilität- und Fliesen-Marshall als nicht verwendbare Kennwerte für die Beurteilung von SMA bezeichnet.



**Abbildung 121** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte



**Abbildung 122** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte



**Abbildung 123** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte

Bei den volumetrischen Eigenschaften der Prüfkörper fällt der Hohlraumgehalt-Marshall des Mineralstoffgerüsts HMM auf, der meistens wesentlich unterhalb jenes Bindemittelbereiches auftritt, in welchem sich der optimale lösliche Bindemittelanteil der Mischung befindet. Bei den Gyratorprüfkörpern liegt er meistens darüber (vgl. Abbildung 124 bis Abbildung 129). Deshalb ist dieser Kennwert nicht besonders relevant für die Beurteilung eines SMA.

Zudem sind HMM und HFB miteinander verbunden. Ist HMM eines Mischgutes klein, kann nur wenig Bindemittel zugegeben werden bis die oberen Grenzwerte für den Hohlraumfüllungsgrad von 78 % Vol.-% für HMT 11 und 77 % für HMT 16 S erreicht werden.

### 13.1.3 SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 aus der grafischen Darstellung der **Stabilität-Marshall** in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 41) kann eigentlich gar nicht bestimmt werden; denn die Trendlinie beginnt bei den niedrigsten löslichen Bindemittelanteilen von 2,5 Masse-% mit einer Stabilität, die geringfügig über 10 kN beginnt und von da an mit zunehmenden löslichen Bindemittelanteilen nur noch abnimmt. Deshalb wird vermutet, dass die Stabilität-Marshall  $\geq 10$  kN für dieses Mischgut unterhalb etwa 3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen liegt. Ein solch niedriger Bindemittelgehalt ist grundsätzlich zur Verwendung eines Mischgutes SMA 11 für den Bau eines Strassenbelages zu niedrig.

Das **Fliessen-Marshall** überschreitet bei mehr als etwa 5,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen den zulässigen Grenzwert von 3,5 mm für das Fliessen (Abbildung 47). Dies heisst, dass der optimale lösliche Bindemittelanteil für diese Mischung unterhalb 5,3 Masse-% liegen muss.

Der **Hohlraumgehalt-Marshall** (Abbildung 53) kommt nur oberhalb von 5,4 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen in den zulässigen Bereich von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-%. Aufgrund dieses Kennwertes muss der optimale lösliche Bindemittelanteil für diese Mischung oberhalb von 5,4 Masse-% liegen.

Die Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 59) erreichen das Minimum des **Hohlraumgehaltes HMM** mit fast genau 15 Volumen-% bei etwa 3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen.

Der **Hohlraumfüllungsgrad HFB** (Abbildung 65) liegt zwischen 4,7 Masse-% und 5,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen im zulässigen Bereich von 64 % bis 78 %. Bei diesem Kennwert ist der grösste Spielraum für die Ermittlung der optimalen löslichen Bindemittelanteile gegeben.

Werden Stabilität-Marshall und Fliessen-Marshall für die Optimierung der löslichen Bindemittelanteile ausser acht gelassen, muss aufgrund des Hohlraumgehaltes-Marshall sowie des Hohlraumfüllungsgrades HFB ein löslicher Bindemittelanteil im Bereich zwischen 5,4 Masse-% und 5,8 Masse-% für diese Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 als optimal angesehen werden; jedoch liegt das Minimum des Hohlraumgehaltes HMM dieser Mischungen mit rund 15 Volumen-% bei etwa 3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen.

Auch muss besonderes Augenmerk auf das Fliessen-Marshall gelegt werden, da dieser Kennwert mit mehr als etwa 5,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen den zulässigen Grenzwert von 3,5 mm Fliessen überschreitet, was vermuten lässt, dass diese Mischung mit mehr als 5,4 Masse-% Bindemittel zu schnell eintretender Spurrinnenbildung neigt. Eine "Überfettung" des Gemisches mit mehr als 5,4 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen ist durch den relativ grossen minimalen Hohlraumgehalt HMM allerdings trotzdem nicht zu erwarten.

Aufgrund des Ergebnisses vom Hohlraumgehalt-Marshall und der Tatsache, dass dieser empfohlene Wert innerhalb des zulässigen Bereiches vom Hohlraumfüllungsgrad HFB liegt, wird für den SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 aus dem möglichen Bereich von 5,4 Masse-% bis 5,8 Masse-% als optimaler löslicher Bindemittelanteil der Wert von 5,6 Masse-% empfohlen.

#### 13.1.4 SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 liegt aufgrund der grafischen Darstellung der **Stabilität-Marshall** in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 42) im Bereich von etwa 4,3 Masse-% bis 5,8 Masse-%. Für lösliche Bindemittelanteile im Bereich von etwa 4,3 Masse-% bis 5,5 Masse-% liegt das **Fliessen-Marshall** oberhalb dem zulässigen Grenzwert von 3,5 mm.

Der **Hohlraumgehalt-Marshall** (Abbildung 54) kommt bei löslichen Bindemittelanteilen über 5,6 Masse-% in den zulässigen Bereich von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-%.

Bei den Mischungen SMA 11 (Abbildung 60) mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 wird das Minimum des **Hohlraumgehaltes HMM** mit etwa 16 Volumen-% fast genau bei 5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht.

Der **Hohlraumfüllungsgrad HFB** (Abbildung 66) liegt im Bereich von etwa 4,6 Masse-% bis 5,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen im zulässigen Bereich von 64 % bis 78 %.

Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass in demselben Bereich der löslichen Bindemittelanteile, in dem die Marshallprüfkörper eine Stabilität-Marshall über 10 kN erreichen, auch die Grenze von 3,5 mm für das Fliessen-Marshall überschritten wird. Somit ist das Fliessen-Marshall beim optimalen Gehalt des löslichen Bindemittels aufgrund der Stabilität-Marshall mit 4,8 Masse-% schon zu gross.

Obwohl Stabilität-Marshall und Fliesen-Marshall für die Optimierung der löslichen Bindemittelanteile ausser acht gelassen werden müssen, wurden in diesem Falle die Daten trotzdem einmal beurteilt, da sie die einzigen Stabilitätsergebnisse beim SMA 11 sind, welche ein Maximum erreichen. Zusätzlich zu der Auswertung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel von 4,8 Masse-% aufgrund der Stabilität-Marshall (Abbildung 42) und des Fließens-Marshall (Abbildung 48) wurde aus der grafischen Darstellung des Hohlraumgehaltes (Abbildung 54) der zugehörige Hohlraumgehalt für diesen Bindemittelgehalt herausgelesen. Bei einem Gehalt an löslichem Bindemittel von 4,8 Masse-% ergibt sich ein Hohlraumgehalt von etwa 5 Volumen-%. Dieser Hohlraumgehalt liegt oberhalb des in der Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten", unter Ziffer 19. "Hohlraumgehalt von Marshallprüfkörpern" festgelegten Bereiches von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-% (Abbildung 54). Schneidet die Kurve des Hohlraumgehaltes die obere Grenze von 4 Volumen-%, dann beträgt der Gehalt an löslichem Bindemittel etwa 5,6 Masse-%. Bei den Mischungen SMA 11 (Abbildung 60) mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 wird das Minimum des Hohlraumgehaltes HMM fast genau bei 5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht. Daraus ergibt sich ungefähr ein ebenso grosser Wert für den optimalen löslichen Bindemittelanteil wie er aufgrund der Stabilität-Marshall und des Fliesen-Marshall gewählt werden müsste.

Der optimale lösliche Bindemittelanteil ergibt sich für die Mischungen SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 mit etwa 5,6 Masse-%, basierend auf den Kennwerten Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper, Stabilität-Marshall und Fliesen-Marshall.

### 13.1.5 SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Gemäss grafischer Darstellung der **Stabilität-Marshall** in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 43) bei weniger als etwa 5,4 Masse-%, liegt der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA bei weniger als etwa 5,4 Masse-%. Das **Fliesen-Marshall** (Abbildung 49) überschreitet etwa bei mehr als 4,4 Masse-% den zulässigen Grenzwert von 3,5 mm. Der **Hohlraumgehalt-Marshall** (Abbildung 55) kommt bei löslichen Bindemittelanteilen über 5,3 Masse-% in den zulässigen Bereich von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-% zu liegen.

Beim SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 61) wird das Minimum des **Hohlraumgehaltes HMM** (Abbildung 61) mit rund 16 Volumen-% bei etwa 4,7 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht.

Der **Hohlraumfüllungsgrad HFB** (Abbildung 67) liegt für lösliche Bindemittelanteile zwischen etwa 4,5 Masse-% und 5,7 Masse-% im zulässigen Bereich von 64 % bis 78 %.

Gemäss des Hohlraumgehaltes-Marshall liegt der optimale Anteil an löslichem Bindemittel etwa bei 5,3 Masse-%. Der Hohlraumgehalt HMM erreicht das Minimum bei löslichen Bindemittelanteilen von etwa 4,7 Masse-% und der Hohlraumfüllungsgrad HFB liegt im Bereich von etwa 4,8 Masse-% bis 5,7 Masse-%. Infolge des Spielraumes den der Hohlraumgehalt HMM mit rund 16 Volumen-% bei einem löslichem Bindemittelanteil von etwa 4,7 Masse-% zulässt, müsste der optimale Gehalt an löslichem Bindemittel für die Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA zwischen 5,3 Masse-% und 5,7 Masse-% festgelegt werden.

Aufgrund des Kennwertes Stabilität-Marshall und Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper ergibt sich für die Mischungen SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA ein optimaler löslicher Bindemittelanteil von etwa 5,3 Masse-%, ausserdem liegt dieser Wert innerhalb des zulässigen Bereiches vom Hohlraumfüllungsgrad HFB.

### 13.1.6 SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Aufgrund der grafischen Darstellung der **Stabilität-Marshall** in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 44), lässt sich folgern, dass der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bei weniger als etwa 3 Masse-% liegen muss. Zu beachten ist allerdings, dass der niedrige Bindemittelgehalt zum Erreichen der gemäss Norm geforderten Stabilität-Marshall grundsätzlich für den Einbau eines Splittmastixasphalt in der Praxis zu niedrig ist. Das **Fliessen-Marshall** (Abbildung 50) übersteigt bei mehr als etwa 5,7 Masse-% den zulässigen Grenzwert von 3,5 mm.

Der **Hohlraumgehalt-Marshall** (Abbildung 56) erreicht erst bei löslichen Bindemittelanteilen über 5,9 Masse-% den zulässigen Bereich von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-%.

Die Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 62) haben eine stetig steigende Trendlinie des **Hohlraumgehaltes HMM** ohne Minimum.

Der **Hohlraumfüllungsgrad HFB** (Abbildung 68) liegt im Bereich von etwa 4,1 Masse-% bis > 6 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen im zulässigen Bereich von 63 % bis 77 %.

Die Kennwerte Fliesen-Marshall sowie Hohlraumgehalt-Marshall deuten auf eine obere Begrenzung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel von etwa 5,7 Masse-% hin. Aufgrund des Hohlraumfüllungsgrades HFB gibt es auch kein Argument gegen diesen Grenzwert. Somit resultiert aus den Marshall-Kennwerten Hohlraumgehalt, Hohlraumfüllungsgrad HFB und Fliesen-Marshall für die Mischung des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 ein optimaler löslicher Bindemittelanteil von 5,7 Masse-%.

### 13.1.7 SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

In Bezug auf das Mischgut SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 lässt sich aus der grafischen Darstellung der **Stabilität-Marshall** in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 45) folgern, dass der optimale lösliche Bindemittelanteil etwa bei 5,2 Masse-% liegt. Die Trendlinie verläuft praktisch immer unterhalb 10 kN; jedoch ein Wert (bei 5,1 Masse-%) liegt darüber. Das **Fliesen-Marshall** (Abbildung 51) überschreitet bei etwa 5,4 Masse-% den zulässigen Grenzwert von 3,5 mm.

Der **Hohlraumgehalt-Marshall** (Abbildung 57) liegt im zulässigen Bereich von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-% für lösliche Bindemittelanteile zwischen 5,1 Masse-% und 5,8 Masse-%.

Bei den Mischungen des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 wird das Minimum des **Hohlraumgehaltes HMM** (Abbildung 63) mit rund 16 Volumen-% fast genau bei 5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen erreicht.

Für lösliche Bindemittelanteile von etwa 4,4 Masse-% bis 5,3 Masse-% bewegt sich der Hohlraumfüllungsgrad HFB im zulässigen Bereich von 63 % bis 77 %.

Somit ergibt sich ein optimaler löslicher Bindemittelanteil im Bereich von 5 Masse-% bis 5,4 Masse-% für die Messungen des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70. Aufgrund des Ergebnisses für den Hohlraumfüllungsgrad HFB wird aus diesem möglichen Bereich als optimaler löslicher Bindemittelanteil ein Wert von 5,3 Masse-% empfohlen.

### 13.1.8 SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA aus der grafischen Darstellung der **Stabilität-Marshall** in Funktion der löslichen Bindemittelanteile (Abbildung 46) bei

weniger als etwa 3,5 Masse-% liegt. Das **Fliessen-Marshall** (Abbildung 52) bleibt bis zu 5,5 Masse-% immer unterhalb des zulässigen Grenzwertes von 3,5 mm.

Der **Hohlraumgehalt-Marshall** (Abbildung 58) kommt bei allen Mischungen mit löslichen Bindemittelanteilen von 2,5 Masse-% bis 5,5 Masse-% ausschliesslich oberhalb des zulässigen Bereiches von 3 bis 4 Volumen-% zu liegen.

Die Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 64) erreichen ein Minimum des **Hohlraumgehaltes HMM** mit fast genau 15 Volumen-% bei löslichen Bindemittelanteilen von etwa 3,2 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Ein solch geringer Anteil an löslichen Bindemittelanteilen für einen Splittmastixasphalt ist für die Verwendung im Strassenbau unrealistisch.

Der **Hohlraumfüllungsgrad HFB** (Abbildung 70) überschreitet mit 4,4 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen den unteren Grenzwert, liegt jedoch bei allen untersuchten Mischungen mit maximal 68 % immer unterhalb des oberen Grenzwertes im zulässigen Bereich von 63 % bis 77 %.

Da der lösliche Bindemittelanteil für die geforderte Stabilität-Marshall von mindestens 10 kN bei weniger als etwa 3,5 Masse-% liegt, wird dieser Kennwert nicht zur Ermittlung des optimalen löslichen Bindemittelanteiles herangezogen. Das Fliessen-Marshall überschreitet erst bei löslichen Bindemittelanteilen über 5,5 Masse-% den zulässigen Grenzwert von 3,5 mm. Vom Fliessen-Marshall aus beurteilt, kann das Optimum bis zu 5,5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen liegen. Basierend auf dem Hohlraumgehalt-Marshall müssten die löslichen Bindemittelanteile allerdings über 5,5 Masse-% vermutet werden, da bis zu diesem Anteil der Hohlraumgehalt-Marshall immer oberhalb des zulässigen Bereiches von 3 Volumen-% bis 4 Volumen-% zu liegen kommt. Wie bei der Stabilität-Marshall wird auch das Minimum des Hohlraumgehaltes HMM bei einem gleich niedrigen löslichen Bindemittelanteil erreicht. Der Hohlraumfüllungsgrad HFB kommt bei 4,4 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen in den zulässigen Bereich von 63 % bis 77 %, erreicht aber bis zum höchsten untersuchten löslichen Bindemittelanteil die obere Grenze nicht. Dies bedeutet, dass für diese Mischungen des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA der optimale lösliche Bindemittelanteil ausschliesslich aufgrund der Ergebnisse aus Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper, Hohlraumfüllungsgrad HFB sowie Fliessen-Marshall mit etwa 5,5 Masse-% oder grösser ermittelt werden kann.

### **13.1.9 Optimaler löslicher Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte**

Aufgrund der Marshallkennwerte kann für alle Mischungen des SMA 11 ein Gehalt an löslichem Bindemittel von ungefähr 5,6 Masse-% und für alle Mischungen des SMA 16 ein solcher von ungefähr 5,0 Masse-% als optimal angesehen werden. Wobei der optimale lösliche Bindemittelanteil für die Mischungen des SMA 11 tendenziell etwa 0,6 Masse-% höher anzusetzen ist als für die Mischungen des SMA 16.

## 13.2 Gyrator-Verdichtung

In diesem Kapitel werden die ermittelten Kennwerte von der Verdichtung mit dem Gyrator zur Ermittlung der optimalen löslichen Bindemittelanteile dargestellt.

### 13.2.1 Tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyrator Kennwerte erfüllen

Gyrator Kennwerte	Anforderung an SMA 11	Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
Hohlraumgehalt $HMM_{min}$	> 13 Vol-%			
Hohlraumfüllungsgrad HFB	65 bis 75%	4,2 bis 4,8	4,5	< 4,8
Verdichtung bei $N_{ini}$	< 89 %	4,2 bis 5,8	4,5 bis 5,8	4,8 bis 6,4
Verdichtung bei $N_{des}$	< 96 %	< 4,2	4,5	< 4,8
Verdichtung bei $N_{max}$	< 98 %	4,2 bis 4,8	4,5 bis 5,2	< 4,8
Hohlraumgehalt bei $N_{des}$	> 4 Vol-%	< 4,2	4,5	4,8
Optimaler Gehalt an löslichem Bindemittel aufgrund der Gyrator Kennwerte				
lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,2	4,5	etwa 4,8

**Tabelle 60** SMA 11, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyrator Kennwerte erfüllt werden.

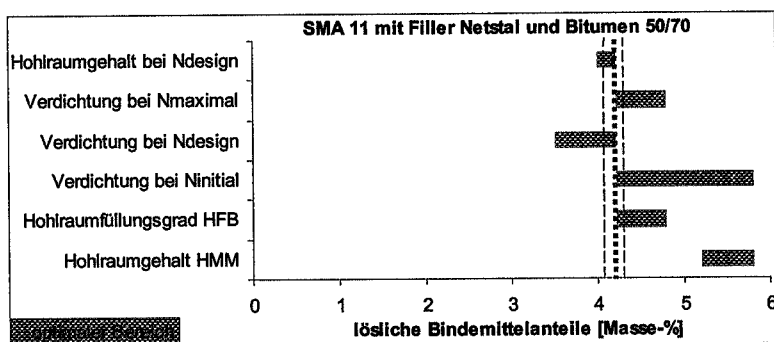
Gyrator Kennwerte	Anforderung an SMA 16	Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
Hohlraumgehalt $HMM_{min}$	> 13 Vol.-%			
Hohlraumfüllungsgrad HFB	65 bis 75%	4,3	4,7	5,3
Verdichtung bei $N_{ini}$	< 89 %	4,3 bis 5,1	4,7 bis 6,4	4,7 bis 6,4
Verdichtung bei $N_{des}$	< 96 %	4,3	< 4,7	4,7 bis 5,3
Verdichtung bei $N_{max}$	< 98 %	4,3	< 4,7	< 4,7 bis 5,8
Hohlraumgehalt bei $N_{des}$	> 4 Vol-%	4,3	< 4,7	4,7 bis 5,3
Optimaler Gehalt an löslichem Bindemittel aufgrund der Gyrator Kennwerte				
lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,3	4,7	5,3

**Tabelle 61** SMA 16, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyrator Kennwerte erfüllt werden.

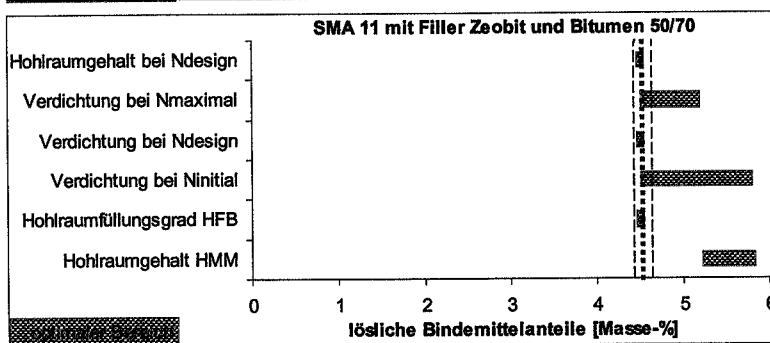
### 13.2.2 Grafische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die untersuchten Mischungen die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyratorkennwerte erfüllen

In Abbildung 124 bis Abbildung 129 sind die ermittelten Bereiche der löslichen Bindemittelanteile dargestellt, innerhalb derer die Anforderungen der relevanten Gyratorkennwerte von SMA 11 sowie SMA 16 für die verschiedenen Filler-Bitumen-Kombinationen erfüllt werden.

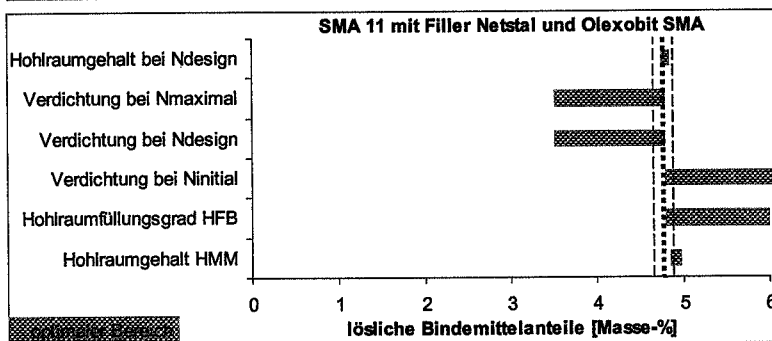
Der mögliche Bereich des optimalen löslichen Bindemittelanteiles für jede Mischung ist durch die beiden gestrichelten und der empfohlene optimale lösliche Bindemittelanteil durch die punktierte Senkrechte markiert.



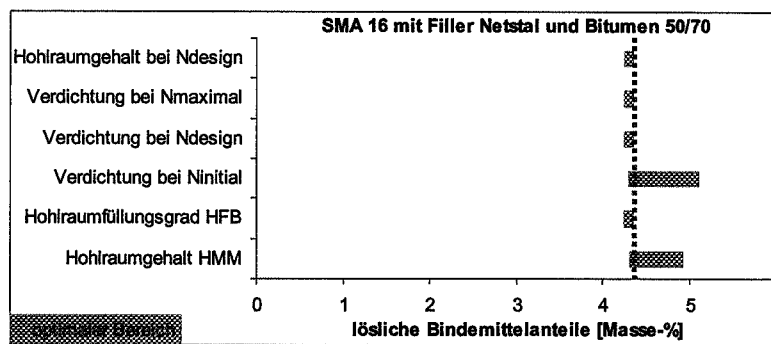
**Abbildung 124** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plziert werden kann



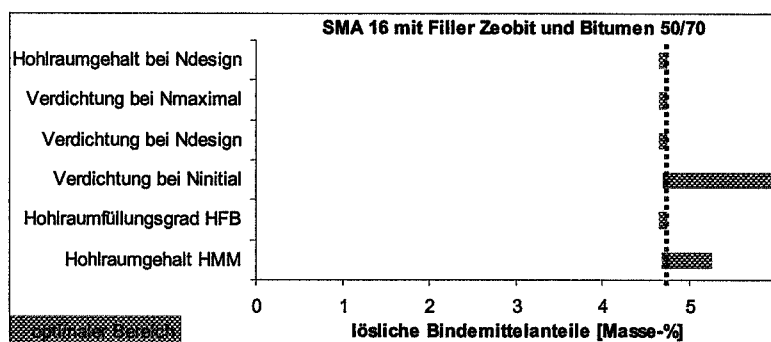
**Abbildung 125** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plziert werden kann



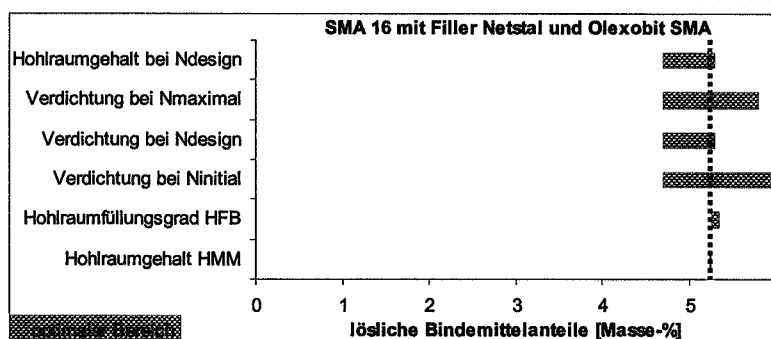
**Abbildung 126** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plziert werden kann



**Abbildung 127** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyrator Kennwerte plaziert werden kann



**Abbildung 128** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyrator Kennwerte plaziert werden kann



**Abbildung 129** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyrator Kennwerte plaziert werden kann

Bei den volumetrischen Eigenschaften der Gyratorprüfkörper soll der minimale Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts  $HMM_{min}$  gemäss SHRP-Richtlinien für Asphaltbeton oder Heissmischtragschicht grösser sein als 13 Vol.-%. Der Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts HMM der Marshallprüfkörper liegt meistens wesentlich unterhalb des Bindemittelbereiches, in welchem sich der optimale lösliche Bindemittelanteil der Mischung befindet (vgl. Kapitel 13.1.2). HMM und HFB sind miteinander verbunden.

### 13.2.3 SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 106) muss sich in der Nähe von etwa 4,8 Masse-% bewegen, obwohl die Verdichtung der Mischung mit 4,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen nach

126 Gyrator-Umdrehungen entsprechend  $N_{des}$  sich bei 96,2 % anstatt bei weniger als 96 % befinden. Der Hohlraumfüllungsgrad HFB liegt mit 4,8 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen bei 74,8 %, d.h. im zulässigen Bereich.

#### **13.2.4 SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Abbildung 107) muss zwischen 4,5 Masse-% und 4,9 Masse-% bewegen obwohl die Verdichtung der Mischung mit 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen nach 126 Gyrator-Umdrehungen entsprechend  $N_{des}$  bei 96,2 % anstatt bei weniger als 96 % liegt. Bei einem löslichen Bindemittelanteil von 4,9 Masse-% ergibt sich ein Hohlraumfüllungsgrad HFB von 75,3 % bei 4,9 Masse-%, ein Wert, welcher nur um 0,3 % die höchste noch zugelassenen Grenze überschreitet. Somit muss der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 in der Nähe von etwa 4,8 Masse-% liegen.

#### **13.2.5 SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 108), gemäss der SHRP-Methodologie nach den gewählten kein optimaler Bindemittelanteil ermitteln lässt. Denn die Anforderung an die Verdichtung nach 126 Gyrator-Umdrehungen entsprechend  $N_{des}$  muss weniger als 96 % betragen. Die Untersuchungsergebnisse der Verdichtung aller Prüfkörper der untersuchten Mischungen sind grösser als 97 %. Der Hohlraumfüllungsgrad HFB liegt bei allen Mischungen bei etwa 80 % und darüber. Also muss der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA geringer sein als 4,8 Masse-%.

#### **13.2.6 SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70**

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 109) muss zwischen 4,3 Masse-% und 4,9 Masse-% betragen obwohl die Verdichtung der Mischung mit 4,7 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen nach 126 Gyrator-Umdrehungen, entsprechend  $N_{des}$ , bei 96,9 % liegt, d.h. grösser ist als von der Mischung mit 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Bei einem löslichen Binde-

mittelanteil von 4,9 Masse-% resultiert ein Hohlraumfüllungsgrad HFB von 72,6 %. Der Hohlraumgehalt HMM liegt bei 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen bei 15,1 Volumen-% %.

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 muss in der Nähe von etwa 4,4 Masse-% betragen obwohl der optimale lösliche Bindemittelanteil dieses Mischgutes mit den vorhandenen Daten nicht ganz genau zu ermitteln ist.

### **13.2.7 SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Abbildung 110) muss in der Nähe von etwa 5 Masse-% liegen obwohl die Verdichtung der Mischung mit 4,7 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen nach 126 Gyrator-Umdrehungen entsprechend  $N_{des}$  94,3 % beträgt und die Verdichtung der Mischung mit 5,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen nach 126 Gyrator-Umdrehungen entsprechend  $N_{des}$  bei 96,5 % erreicht. Der Hohlraumfüllungsgrad HFB ergibt bei 4,9 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen den Wert 72,6 %. Bei 4,9 Masse-% löslichem Bindemittelanteil resultiert ein Hohlraumfüllungsgrad HFB von 65,0 % und bei 5,3 Masse-% löslichem Bindemittelanteil ein solcher von 77,8 %.

### **13.2.8 SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Der optimale lösliche Bindemittelanteil des Mischgutes SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 111) kann mit den untersuchten drei Mischungen nicht vorausgesagt werden kann. Bei einem löslichen Bindemittelanteil von 5,2 Masse-% beläuft sich der Hohlraumfüllungsgrad HFB bereits auf über 80 %. Dies bedeutet, dass der optimale lösliche Bindemittelanteil dieses Mischgutes bei weniger als 5,2 Masse-% gesucht werden muss.

Der optimale lösliche Bindemittelanteil aufgrund der Gyratorkennwerte für die einzelnen Mischungen ist in Kapitel 13.2.2 übersichtlich dargestellt.

### 13.2.9 Optimaler löslicher Bindemittelanteil aufgrund der Gyratorkennwerte

Alle Mischungen der SMA 11 wie auch SMA 16 mit allen Filler-Bitumen-Kombinationen lassen sich etwa gleich gut verdichten; deshalb erreichen viele Gyratorprüfkörper mit einem löslichen Bindemittelanteil von 4,8 Masse-% sowohl bei  $N_{des}$  als auch bei  $N_{max}$  schon eine Verdichtung oberhalb der Grenzwerte gemäss SHRP-Methodologie von 96 % bzw. 98 %. Unabhängig von dieser allgemeinen Feststellung ergeben sich individuelle Unterschiede beim optimalen löslichen Bindemittelanteil der Mischungen zwischen den Filler-Bitumen-Kombinationen wie auch zwischen SMA 11 und SMA 16. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Die massgebenden Gyratorkennwerte der Mischungen des SMA 11 mit allen Filler-Bitumen-Kombinationen sind nicht extrem weit voneinander entfernt (vgl. Abbildung 124 bis Abbildung 126), deshalb wurden für diese Mischungen im Mittel ungefähr 4,6 Masse-% lösliche Bindemittelanteile als optimal angenommen. Bei der Verdichtung der Mischungen mit dem Gyrator wird eine zunehmende Tendenz der optimalen löslichen Bindemittelanteile offensichtlich.

Die optimalen Gyratorkennwerte ergeben sich sowohl beim SMA 11 wie auch beim SMA 16 bei den Mischungen mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 mit den geringsten, mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 ein wenig höheren und mit Filler Netstal und Olexobit SMA deutlich mit den am höchsten löslichen Bindemittelanteilen.

Ausserdem benötigt der SMA 16 immer ein bisschen höhere lösliche Bindemittelanteile als der SMA 11 um die optimale Verdichtung der Mischungen zu erreichen.

## 14 VERGLEICH DER MARSHALL- UND GYRATOR-ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden die ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile der Mischungen, deren Prüfkörper einerseits mit dem Marshallgerät und andererseits mit dem Gyrator verdichtet worden sind, erläutert.

### 14.1.1 Hohlraumgehalt, Hohlraumgehalt HMM und Hohlraumfüllungsgrad HFB von Marshall- und Gyratorprüfkörpern bei $N_{des}$

In diesem Abschnitt werden die Kennwerte von Hohlraumgehalt, Hohlraumgehalt HMM und Hohlraumfüllungsgrad HFB von Marshall- wie auch Gyratorprüfkörpern bei  $N_{des}$  miteinander verglichen.

#### SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Marshallkennwerte				Gyratorkennwerte bei $N_{des}$			
Lösliche Bindemittelanteile	Hohlraumgehalt	Hohlraumgehalt HMM	Hohlraumfüllungsgrad HFB	Lösliche Bindemittelanteile	Hohlraumgehalt	Hohlraumgehalt HMM	Hohlraumfüllungsgrad HFB
Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%	Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%
2,5	9,3	15,0	37,9				
3	7,5	14,4	47,9				
3,5	7,5	15,5	51,5				
4	6,2	15,4	59,6				
4,2	5,0	14,8	66,4	4,2	5,6	17,4	63,7
4,7	4,2	15,2	72,4	4,7	3,8	17	74,8
4,8	5,1	16,3	68,9	4,8	3,4	17,3	78,4
5,2	5,1	17,1	70,3	5,2	3,2	15,5	79,1
5,4	3,3	15,9	79,0	5,8	-0,3	13,4	102,5
5,8	3,5	16,8	79,2				

**Tabelle 62** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

**Tabelle 63** Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

**SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**

Marshallkennwerte				Gyratorkennwerte bei $N_{des}$			
Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB	Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%	Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%
4,0	8,7	17,6	50,7				
4,5	5,2	15,6	66,5	4,5	4,2	14,7	71,1
4,7	6,9	17,5	60,8				
4,9	5,0	16,2	69,2	4,9	3,8	15,2	75,3
5,0	4,7	16,2	70,9				
5,4	4,1	16,7	75,3				
5,6	4,4	17,2	74,8	5,2	3,3	15,5	78,5
5,8	3,2	16,7	81,0	5,8	1,2	15	92,1

**Tabelle 64** Mittelwerte der Marshallprüf-körper von SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**Tabelle 65** Mittelwerte der Gyratorprüf-körper von SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Marshallkennwerte				Gyratorkennwerte bei $N_{des}$			
Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt Marshall	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB	Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt Gyrator	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%	Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%
2,5	14,1	19,5	27,7				
3,0	10,6	17,3	38,6				
3,5	7,8	15,8	50,5				
4,0	8,1	17,1	52,6				
4,8	4,1	15,5	73,3	4,8	2,9	14,4	80,0
5,0	5,1	16,5	69,4	5,0	2,8	14,6	80,7
5,8	3,9	17,3	77,4	5,8	1,7	15,4	88,9
6,2	2,0	16,4	87,9	6,4	1,5	16,7	90,8
6,4	4,2	19,0	78,1				

**Tabelle 66** Mittelwerte der Marshallprüf-körper von SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**Tabelle 67** Mittelwerte der Gyratorprüf-körper von SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

**SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70**

Marshallkennwerte				Gyratorkennwerte bei $N_{des}$			
Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt Marshall	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB	Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt Gyrator	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%	Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%
2,5	7,5	13,3	43,9				
3,0	6,4	13,5	52,2				
3,5	6,7	14,8	54,8				
4,0	5,7	15,0	62,0				
4,3	4,5	24,3	69,0	4,3	5,0	15	66,6
4,5	5,1	15,6	67,1				
4,6	5,9	16,5	64,1				
5,0	2,1	13,7	79,0	4,9	4,4	15,8	72,6
6,0	4,0	17,9	70,3	5,1	3,3	15,1	78,1

**Tabelle 68** Mittelwerte der Marshallprüf-körper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70**Tabelle 69** Mittelwerte der Gyratorprüf-körper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70**SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**

Marshallkennwerte				Gyratorkennwerte bei $N_{des}$			
Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt Marshall	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB	Lösliche Binde-mittel-anteile	Hohlraum-gehalt Gyrator	Hohlraum-gehalt HMM	Hohlraum-füllungs-grad HFB
Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%	Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%
4,0	7,8	16,9	53,5				
4,4	5,4	15,5	65,5				
4,7	3,7	15,2	74,9	4,7	5,7	16,4	65
4,8	5,2	15,7	67,8				
4,9	5,3	16,1	68,3				
5,0	4,6	16,0	71,4				
5,1	4,5	16,2	72,3				
5,3	3,5	15,7	78,0	5,3	3,5	15,7	77,8
5,6	3,0	16,2	81,4				
5,8	3,0	16,5	81,6	5,8	2,5	16	84,4
6,4	2,4	17,2	84,8	6,4	1,5	16,3	90,7

**Tabelle 70** Mittelwerte der Marshallprüf-körper von SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**Tabelle 71** Mittelwerte der Gyratorprüf-körper von SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

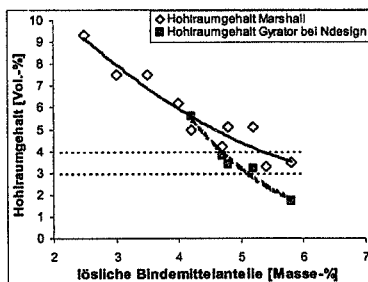
**SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Marshallkennwerte				Gyrator Kennwerte bei N <sub>des</sub>			
Lösliche Bindemittelanteile	Hohlraumgehalt Marshall	Hohlraumgehalt HMM	Hohlraumfüllungsgrad HFB	Lösliche Bindemittelanteile	Hohlraumgehalt Gyrator	Hohlraumgehalt HMM	Hohlraumfüllungsgrad HFB
Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%	Masse-%	Volumen-%	Volumen-%	%
2,5	9,1	14,8	38,8				
3,0	9,5	16,3	41,8				
3,5	6,5	14,7	55,6				
4,0	7,4	16,5	55,4				
4,4	5,7	15,8	64,1				
4,4	4,9	15,3	68,1				
4,6	5,9	16,5	64,1	5,2	2,2	14,7	85
5,4	5,0	17,4	71,0	5,3	1,8	14,2	87,3
5,5	7,6	20,0	61,9	6,2	2,1	16,7	87,3

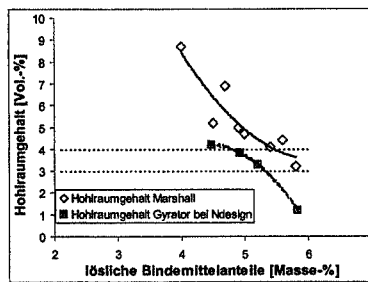
**Tabelle 72** Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

**Tabelle 73** Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

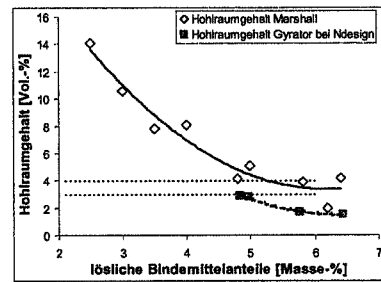
**14.1.2 Hohlraumgehalt**



**Abbildung 130** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator



**Abbildung 131** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator

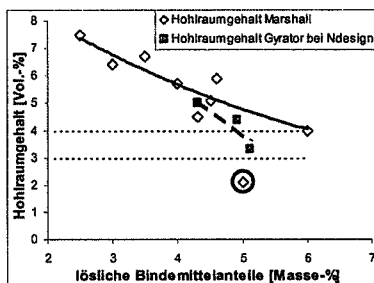


**Abbildung 132** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator

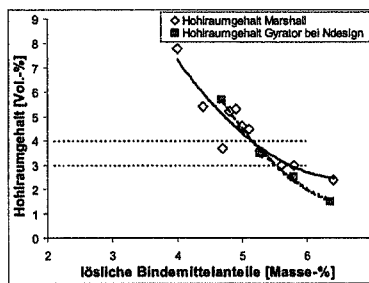
Der Hohlraumgehalt der Marshall- wie auch der Gyratorprüfkörper aus SMA 11 nimmt mit steigendem Bindemittelgehalt ab. In diesem Punkt verhalten sich die Untersuchungsergebnisse gleich wie von Untersuchungen mit Asphaltbeton oder Heissmischtragschicht bekannt.

Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 70 (Abbildung 130) liegen nahezu auf einer Geraden. Der Hohlraumgehalt-Marshall der untersuchten Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 70 (Abbildung 131) sowie Filler Netstal und Olexobit SMA 70 (Abbildung 132) ergibt schwach gekrümmte Kurven, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.

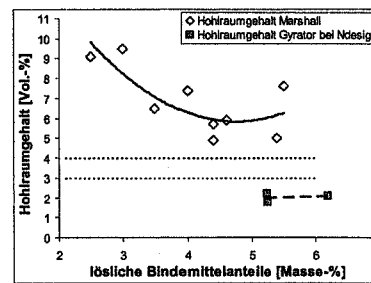
Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 70 (Abbildung 130) sowie mit Filler Netstal und Olexobit SMA 70 (Abbildung 132) liegen auf schwach gekrümmten Kurven, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt. Beim SMA 11 ) mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 70 (Abbildung 131) liegen die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile ebenfalls auf einer gekrümmten Kurve, jedoch mit der Einschränkung, dass die Kurve im Gegensatz zu den anderen beiden Mischungen umgekehrt gekrümmt verläuft. Die Steilheit dieser Kurve nimmt mit steigendem Bindemittelgehalt zu.



**Abbildung 133** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator



**Abbildung 134** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator



**Abbildung 135** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator

Für den SMA 16 gilt, dass der Hohlraumgehalt der Marshall- wie auch der Gyratorprüfkörper mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.

Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 133) liegen auf einer sehr schwach gekrümmten Kurve. Der durch die kreisförmige Umrandung gekennzeichnete Datenpunkt in Abbildung 133 wird als Ausreisser betrachtet und ist deshalb nicht in die Berechnung der Trendlinie mit einbezogen worden. Der Hohlraumge-

halt-Marshall der untersuchten Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Abbildung 134) ergibt eine gekrümmte Kurve, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt. Der Hohlraumgehalt-Marshall der untersuchten Mischungen mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 135) ergibt eine abnehmende Kurve mit einem Minimum bei einem Bindemittelgehalt von etwa 4,7 Masse-%.

Beim den ermittelten Werten des Hohlraumgehaltes der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 135) liegen keine Resultate mit weniger als 5,2 Masse-% Bindemittel vor (vgl. Tabelle 61. Bei der Bestimmung dieser Ergebnisse traten Probleme mit dem Gyrator auf, die zum Verwerfen der Daten führten. Deshalb kann nicht mit absoluter Sicherheit festgestellt werden, wie die tendenzielle Entwicklung des Kurvenverlaufes des Hohlraumgehaltes der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile gewesen wäre, weshalb eine gerade Trendlinie im Diagramm eingezeichnet ist. Beim SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 liegen die Werte des Hohlraumgehaltes der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile auf einer gekrümmten Kurve (Abbildung 134), deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.

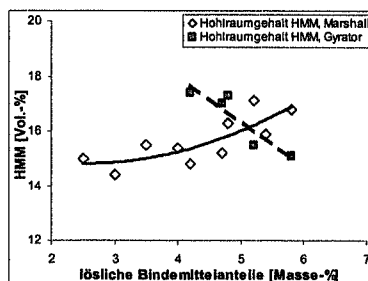
Die Kurve des Hohlraumgehaltes der Gyratorprüfkörper vom SMA 16 S mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 kreuzt die Kurve des Hohlraumgehaltes der Marshallprüfkörper etwa bei 4,4 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen (Abbildung 133). Mit zunehmendem Anteil an löslichem Bindemittel ist der Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper kleiner als derjenige der Marshallprüfkörper. Die beiden Kurven des Hohlraumgehaltes der Marshallprüfkörper sowie der Gyratorprüfkörper des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 in Funktion der löslichen Bindemittelanteile kreuzen sich bei etwa 4 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Bei höheren Anteilen an löslichem Bindemittel ist der Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper kleiner als derjenige der Marshallprüfkörper.

Generell ist zu beobachten, dass bei allen drei Mischungen des SMA 16 der Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper praktisch bei jedem Anteil an löslichem Bindemittel geringer ist als bei den Marshallprüfkörpern. Es zeigt sich also auch bei diesem Kennwert des SMA 16 S, dass die Verdichtung von bituminösem Mischgut mit dem Gyrator effizienter ist als diejenige mit dem Marshallgerät.

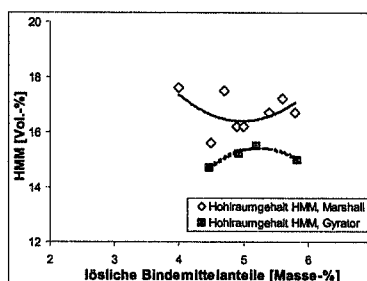
Beim SMA 16 ist der Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper nur bei den Mischungen mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 ab einem für die Mischung entsprechenden löslichen Bindemittelanteil kleiner als derjenige der Marshallprüfkörper. Beim SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA liegen die Hohlraumgehalte der Gyratorprüfkörper mit löslichen Bindemittelanteilen grösser als 5,2 Masse-% weit unterhalb denjenigen der Marshallprüfkörper.

### 14.1.3 Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts HMM

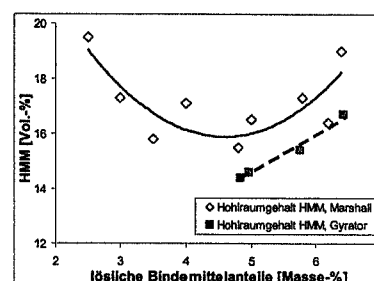
Ein Richt- oder Grenzwert für den Kennwert  $HMM_{min}$  ist in der Tabelle 24, "Richtwerte für die Hohlraumfüllungsgrade mit Bitumen von Marshallprüfkörpern", im Anhang der Schweizer Norm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", Kapitel N. "Anhang" unter Ziffer 76, "Hohlraumgehalt des bindemittelfrei gedachten Mineralstoffgerüsts HMM, Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB", anzugeben.



**Abbildung 136** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator



**Abbildung 137** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator



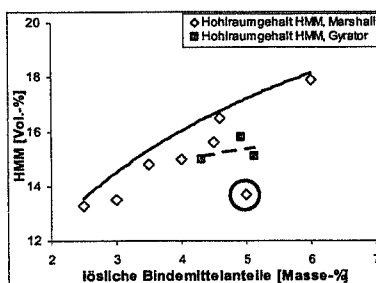
**Abbildung 138** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator

Der Hohlraumgehalt HMM verhält sich bei Marshall- wie auch bei Gyratorprüfkörpern in Funktion der löslichen Bindemittelanteile bei SMA 11 uneinheitlich.

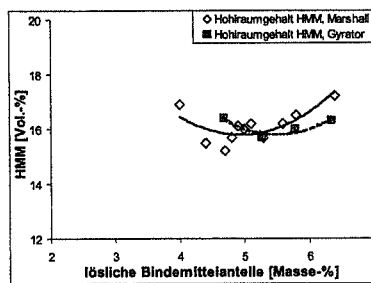
Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes HMM der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 136) zeigen eine leicht gekrümmte Gerade in Funktion des löslichen Bindemittelgehaltes, mit zunehmender Tendenz. Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes HMM der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 11 S mit Filler Zeobit

und Bitumen 50/70 (Abbildung 137) sowie mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 138) ergeben in den untersuchten Bereichen der löslichen Bindemittelanteile Kurven, die zu einem Minimum abfallen und anschliessend wieder ansteigen (vgl. Kapitel 12.1.4). Eine solche Kurvenform entspricht dem theoretischen Modell, dass die Mineralstoffe im bituminösen Prüfkörper durch den Verdichtungsprozess mit zunehmendem Bindemittelgehalt, der zur Herabsetzung der inneren Reibung des Mischgutes führt, näher aneinander gerückt werden, bis so viel Bindemittel in der Mischung enthalten ist, dass die Mineralstoffe durch den Platzbedarf des hohen Bindemittelvolumens nicht mehr so dicht gelagert werden können.

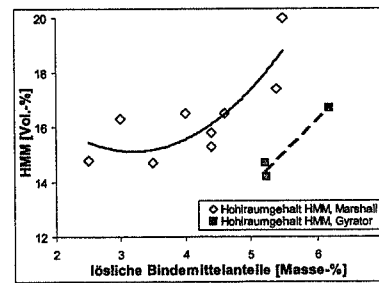
Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes HMM der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile aller Mischungen des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 136) folgen in den untersuchten Bereichen der löslichen Bindemittelanteile einer linear fallenden Tendenz welche die Kurve des Hohlraumgehaltes HMM der Marshallprüfkörper etwa bei 5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen schneidet. Die Kurve des SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Abbildung 137) steigt zu einem Maximum an und fällt anschliessend wieder ab. Sie verhält sich qualitativ somit gegensätzlich zur Kurve der Marshalldaten. Im Gegensatz dazu ergibt sich für SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA mit steigendem Bindemittelgehalt eine ansteigende Gerade, die annähernd dem ansteigenden Kurvenast der Marshalldaten entspricht (Abbildung 138). Für beide Mischungen SMA 11 sowohl mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 wie auch mit Filler Netstal und Olexobit SMA liegen die Kurven des Hohlraumgehaltes HMM der Gyratorprüfkörper deutlich unterhalb derjenigen der Marshallprüfkörper.



**Abbildung 139** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator



**Abbildung 140** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator



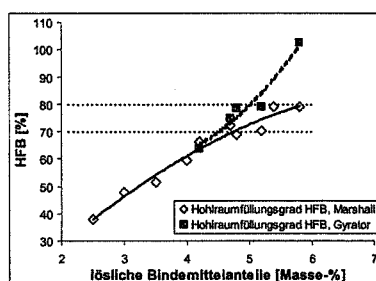
**Abbildung 141** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator

Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes HMM der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 139) ergeben in den untersuchten Bereichen der löslichen Bindemittelanteile eine ansteigende Kurve. Der eingekreiste Datenpunkt der Marshallwerte wird als Ausreisser angesehen und ist nicht für die Berechnung der Trendlinie benutzt worden. Im Gegensatz dazu ergeben die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes HMM der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 S mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Abbildung 140) sowie SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 141) in den untersuchten Bereichen der löslichen Bindemittelanteile Kurven, die jeweils zu einem Minimum abfallen und anschliessend wieder ansteigen.

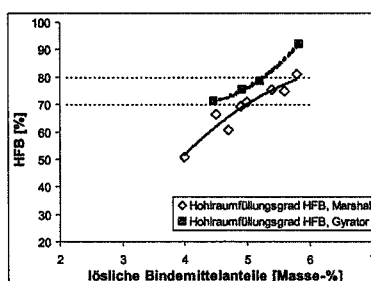
Beim Hohlraumgehalt HMM der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie beim SMA 16 S mit Filler Netstal und Olexobit SMA sind keine Resultate mit weniger als 4,3 bzw. 5,2 Masse-% Bindemittel verfügbar (Abbildung 139). Deshalb kann die tendenzielle Entwicklung des Kurvenverlaufes nicht mit ausreichender Sicherheit festgestellt werden.

Die ermittelten Werte des Hohlraumgehaltes HMM der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile aller Mischungen des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 ergeben in den untersuchten Bereichen der löslichen Bindemittelanteile eine Kurve, die zu einem Minimum abfällt und dann wieder ansteigt (Abbildung 140). Für die Mischungen des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 scheinen die Kurven des Hohlraumgehaltes HMM der Marshallprüfkörper wie auch der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile mit ihrem Minimum auf dem gleichen Niveau zu liegen und nur seitlich verschoben zu sein.

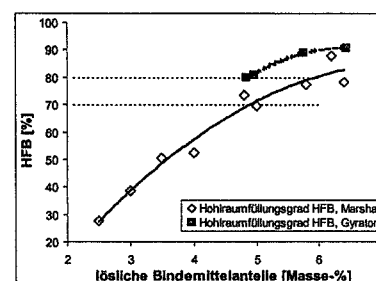
#### 14.1.4 Hohlraumfüllungsgrad HFB



**Abbildung 142** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraum-



**Abbildung 143** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüll-



**Abbildung 144** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraum-

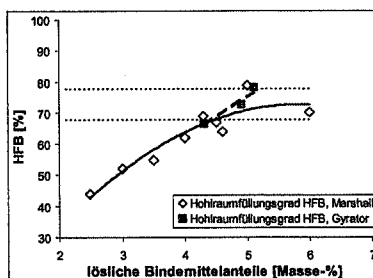
füllungsgrad HFB Marshall  
und Hohlraumfüllungsgrad  
HFB Gyrator

füllungsgrad HFB Marshall  
und Hohlraumfüllungsgrad  
HFB Gyrator

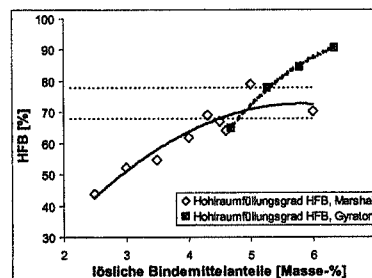
füllungsgrad HFB Marshall  
und Hohlraumfüllungsgrad  
HFB Gyrator

Die ermittelten Werte des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile der SMA 11 Mischungen ergeben schwach gekrümmte Kurven, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt (Abbildung 142, Abbildung 143 sowie Abbildung 144).

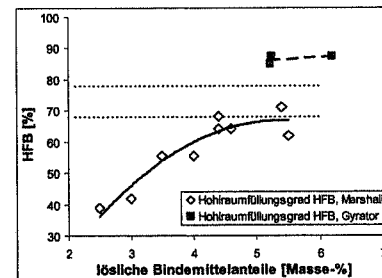
Demgegenüber liegen die ermittelten Werte des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 auf schwach gekrümmten Kurven, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt zunimmt. Lediglich beim SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA folgen die ermittelten Werte des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile ebenfalls einer gekrümmten Kurve, deren Steilheit wie bei den Marshallprüfkörpern mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.



**Abbildung 145** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator



**Abbildung 146** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator



**Abbildung 147** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator

Die ermittelten Werte des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 (Abbildung 145), mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 (Abbildung 146) sowie mit Filler Netstal und Olexobit SMA (Abbildung 147) ergeben wie bei SMA 11 gekrümmte Kurven, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.

Beim den ermittelten Werten des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile des SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 reicht die Datenmenge nicht aus, um mit ausreichender Sicherheit die tendenzielle Entwicklung des Kurvenverlaufes festzustellen. Beim SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 liegen die Werte des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Gyratorprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile auf einer gekrümmten Kurve, deren Steilheit mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.

Die Kurve des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Gyratorprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 kreuzt die Kurve des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Marshallprüfkörper etwa bei 4,3 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Mit zunehmendem Anteil an löslichem Bindemittel ist der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Gyratorprüfkörper grösser als derjenige der Marshallprüfkörper. Die beiden Kurven des Hohlraumfüllungsgrades HFB der Marshallprüfkörper sowie der Gyratorprüfkörper des SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 in Funktion der löslichen Bindemittelanteile kreuzen sich bei etwa 5 Masse-% löslichen Bindemittelanteilen. Bei höheren Anteilen an löslichem Bindemittel ist der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Gyratorprüfkörper somit grösser als jene der Marshallprüfkörper. Beim SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA liegen die Hohlraumfüllungsgrade HFB der Gyratorprüfkörper mit löslichen Bindemittelanteilen grösser als 5,2 Masse-% weit oberhalb derjenigen der Marshallprüfkörper. Ein Kreuzungspunkt der beiden Kurven ist demzufolge nicht feststellbar.

Es zeigt sich also auch beim Kennwert Hohlraumfüllungsgrad HFB aller Mischungen des SMA 16, dass die Verdichtung von bituminösem Mischgut mit dem Gyrator effizienter ist als diejenige mit dem Marshallgerät.

Beim SMA 16 ist der Hohlraumfüllungsgrad HFB der Gyratorprüfkörper nur bei den Mischungen mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 ab einem für die Mischung entsprechenden löslichen Bindemittelanteil grösser als derjenige der Marshallprüfkörper.

### 14.1.5 Optimaler löslicher Bindemittelanteil

Die Anforderungen gemäss Schweizer Norm an die Kennwerte von Marshallprüfkörpern sowie die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Kennwerte von Gyratorprüfkörpern werden innerhalb unterschiedlicher Bereiche der löslichen Bindemittelanteile erfüllt.

Beim SMA 11 ergeben sich die optimalen löslichen Bindemittelanteile für alle untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen aufgrund der Marshallkennwerte in einem engen Bereich von 5,6 Masse-% bis 5,7 Masse-% (vgl. Tabelle 74 sowie Tabelle 58). Ebenso liegen die ermittelten, optimalen Gyratorkennwerte für diese Mischungen innerhalb von 4,2 Masse-% bis etwa 4,8 Masse-% (vgl. Tabelle 59). Dabei wird für die Mischung mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 der niedrigste, für Filler Zeobit und Bitumen 50/70 ein leicht höherer und für Filler Netstal und Olexobit SMA der deutlich höchste lösliche Bindemittelanteil ermittelt.

Mischungen			Optimale lösliche Bindemittelanteile von allen untersuchten Mischungen		
			Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
11	Marshall	Masse-%	5,6	5,6	5,7
	Gyrator	Masse-%	4,2	4,5	4,8
	Differenzen	Masse-%	1,4	1,1	0,9
16	Marshall	Masse-%	5,0	5,1	5,0
	Gyrator	Masse-%	4,3	4,7	5,3
	Differenzen	Masse-%	0,7	0,4	-0,3

**Tabelle 74** Untersuchte SMA-Mischungen, optimale lösliche Bindemittelanteile sowie Differenzen zwischen dem ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteil durch Marshall- und Gyratorprüfungen

Aufgrund der volumetrischen Marshallkennwerte kann für alle Mischungen des SMA 11 ein Gehalt an löslichem Bindemittel von ungefähr 5,6 Masse-% als optimal angesehen werden. Die Gyratorkennwerte hingegen zeigen grössere Unterschiede und die optimalen Gehalte an löslichem Bindemittel mit 4,2 Masse-%, 4,5 Masse-% sowie etwa 4,8 Masse-

%, liegen 0,9 Masse-% bis 1,4 Masse-% niedriger (Tabelle 74) als diejenigen, welche aus den Marshallkennwerten resultieren.

Aufgrund der volumetrischen Marshallkennwerte kann für alle Mischungen des SMA 16 ein Gehalt an löslichem Bindemittel von ungefähr 5,0 Masse-% als optimal angesehen werden. Auch beim SMA 16 liefern die Gyratorkennwerte grössere Unterschiede und die optimalen Gehalte an löslichem Bindemittel mit 4,3 Masse-%, 4,7 Masse-% sowie etwa 5,3 Masse-%, liegen 0,7 Masse-% bis 0,4 Masse-% niedriger (Tabelle 74) als diejenigen, welche aus den Marshallkennwerten resultieren. Einzige Ausnahme dabei ist die Mischung mit Filler Netstal und Olexobit SMA bei welcher der optimale Gehalt an löslichem Bindemittel aufgrund der Gyratorkennwerte 0,3 Masse-% höher liegt als aufgrund der Marshallkennwerte festgestellt worden ist.

Die Klassierung der Werte für die optimalen Gehalte an löslichem Bindemittel der verschiedenen Filler-Bitumen-Kombinationen in den Mischungen des SMA 11 sowie des SMA 16 S ist sehr ähnlich, unabhängig ob die Prüfkörper mit dem Marshallgerät oder Gyrator verdichtet worden sind. Prüfkörper mit dem Gyrator verdichtet, liefern dabei Untersuchungsergebnisse, die deutlicher auf Unterschiede der volumetrischen Materialkennwerte hinweisen.

## 15 SPEZIALUNTERSUCHUNGEN

Alle Mischungen, SMA 11 wie auch SMA 16, mit Filler Netstal und Olexobit SMA lassen sich sehr gut mit dem Gyrator verdichten (vgl. Tabelle 74). Aus diesem Grund sind die Verdichtungen sowohl bei  $N_{des}$  als auch bei  $N_{max}$  bei einem Bindemittelgehalt von 4,8 Masse-% nicht extrem weit von den Grenzwerten gemäss SHRP-Methodologie (< 96 % und < 98 %) entfernt. Deshalb wurden für jene Mischungen, die Spezialuntersuchungen unterworfen worden sind, ungefähr 4,8 Masse-% lösliche Bindemittelanteile angestrebt.

### 15.1 Bleibende Deformation bei 60 °C

#### 15.1.1 Spurrinntest mit Ornièreur

Grundsätzlich existieren zwei mögliche Verdichtungsformen für Prüfungen mit dem französischen Spurrinntester. Für diesen Forschungsauftrag wurden Prüfkörper mit den Abmessungen Länge 500 mm, Breite 180 mm und Dicke 100 mm verwendet.

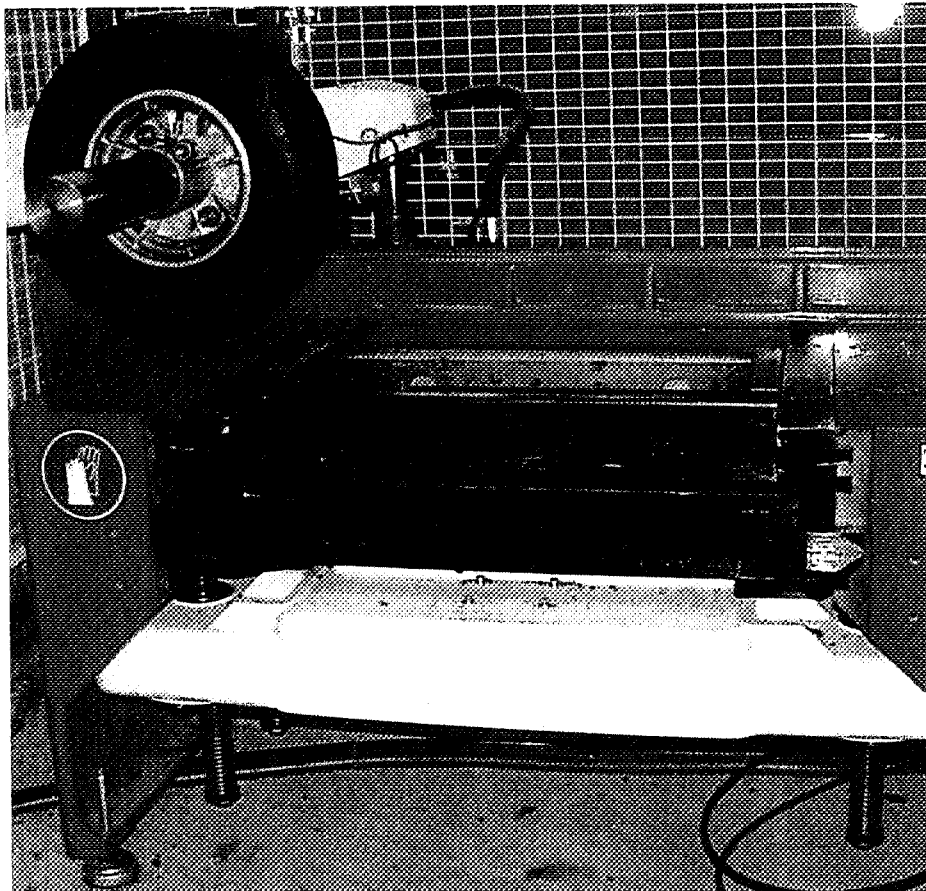
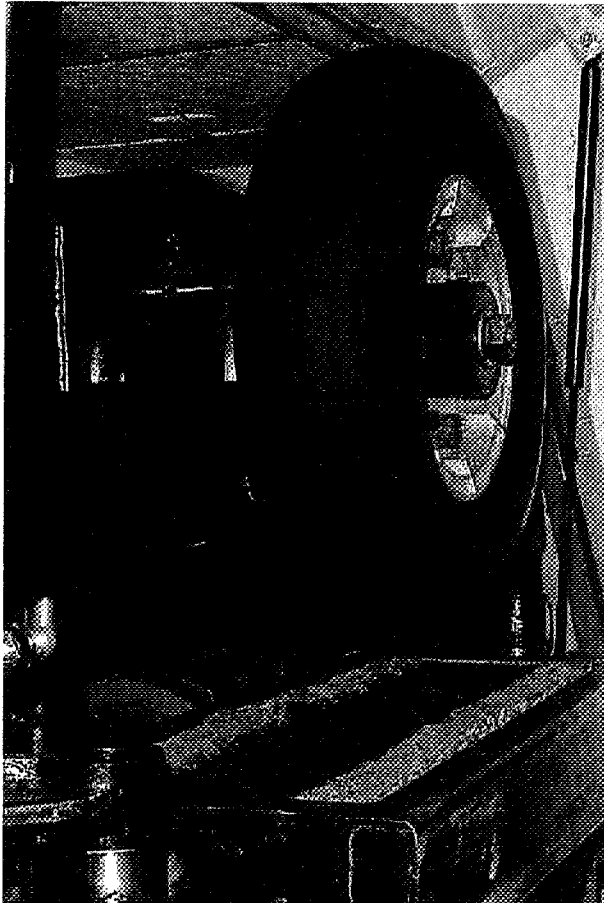


Abbildung 148 Verdichtungsgerät zur Herstellung von Prüfkörpern für die Durchführung des Spurrinntests mit Ornièreur

Die Verdichtungsformen werden im Wärmeschrank bei Verdichtungstemperatur während mindestens 2½ Stunden gelagert und anschliessend im Verdichtungsgerät für den Spurrinntest eingebaut. Die Verdichtung von allen geprüften Mischungen erfolgt bei  $155 \pm 5^\circ\text{C}$  gemäss französischer Norm NF P 98-250-2, Kapitel 7.2.1.2 Compactage fort, Typ 2. Es wurden immer 2 Prüfkörper für eine Prüfung hergestellt, die Rohdichte bestimmt und



**Abbildung 149** Ansicht des Spurrinntestes mit Ornièreur zur Durchführung und Bestimmung der Spurrinntiefe von Prüfkörpern

während mindestens 48 Stunden bei Raumtemperatur gelagert bevor sie im Spurrinntester eingebaut und bei Raumtemperatur mit 1000 Zyklen überrollt wurden. Jeder Zyklus umfasste dabei zwei Überrollungen pro Sekunde. Anschliessend wurden die Prüfkörper während mindestens 12 Stunden bei  $60^\circ\text{C}$  temperiert. Die Prüfkörper wurden ausgemessen, um die Ausgangsdicke als Bezugsgrösse für das Bestimmen der Spurrinntiefe zu ermitteln. Die Prüfkörper wurden gemäss der in Tabelle 75 bis Tabelle 80 aufgeführten Anzahl Zyklen bei  $60^\circ\text{C}$  überrollt. Dabei wurden in definierten Intervallen je Prüfkörper 3 Messungen in 5 Querprofilen durchgeführt. Durch Mitteln der 15 Messwerte wurden jeweils die Spurrinntiefen als Prozentanteil der Ausgangsdicke berechnet. Die Einzelwerte samt Mittelwerten sind in Abbildung 150 bis Abbildung 155 dargestellt.

Massgebender Wert für die Spurrinntiefe ist der Mittelwert der bleibenden Deformation von zwei Prüfkörpern nach 30'000 Zyklen bei  $60^\circ\text{C}$ . Dabei ist die Ausgangsdicke der Prüfkörper die Bezugsgrösse für die Berechnung der relativen Spurrinntiefe.

## 15.1.2 Ergebnisse der Spurrinntests

### SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile			4,8 Masse-%		
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwerte
Rohdichte		[t·m <sup>-3</sup> ]	2,368	2,377	2,372
Hohlraumgehalt		[Vol-%]	5,7	5,4	5,6
Spurrinntiefe in % der Ausgangsdicke bei	30	Zyklen	2,26	1,95	2,11
	100	Zyklen	2,75	2,64	2,70
	300	Zyklen	3,17	2,88	3,03
	1000	Zyklen	3,54	3,26	3,40
	3000	Zyklen	4,27	3,93	4,10
	10000	Zyklen	4,97	4,67	4,82
	30000	Zyklen	5,77	5,25	5,51

**Tabelle 75** Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

### SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

Lösliche Bindemittelanteile			4,7 Masse-%		
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwerte
Rohdichte		[t·m <sup>-3</sup> ]	2,335	2,327	2,331
Hohlraumgehalt		[Vol-%]	6,4	6,7	6,6
Spurrinntiefe in % der Ausgangsdicke bei	30	Zyklen	1,25	1,38	1,32
	100	Zyklen	1,68	1,85	1,77
	300	Zyklen	2,08	2,25	2,16
	1000	Zyklen	2,64	2,75	2,69
	3000	Zyklen	3,17	3,35	3,26
	10000	Zyklen	4,10	4,29	4,19
	30000	Zyklen	5,14	5,23	5,18

**Tabelle 76** Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

### SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Lösliche Bindemittelanteile			4,6 Masse-%		
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwerte
Rohdichte		[t·m <sup>-3</sup> ]	2,374	2,374	2,374
Hohlraumgehalt		[Vol-%]	5,7	5,7	5,7
Spurrinntiefe in % der Ausgangsdicke bei	30	Zyklen	2,01	1,58	1,80
	100	Zyklen	2,71	2,20	2,45
	300	Zyklen	3,13	2,71	2,92
	1000	Zyklen	3,55	2,90	3,23
	3000	Zyklen	3,91	3,27	3,59
	10000	Zyklen	4,37	3,65	4,01
	30000	Zyklen	4,87	4,00	4,43

**Tabelle 77** Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

**SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70**

Lösliche Bindemittelanteile			4,6 Masse-%		
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwerte
Rohdichte		[t·m <sup>-3</sup> ]	2,402	2,379	2,391
Hohlraumgehalt		[Vol-%]	4,5	5,4	4,9
Spurrinntiefe in % der Ausgangsdicke bei	30	Zyklen	2,07	1,83	1,95
	100	Zyklen	2,56	2,28	2,42
	300	Zyklen	2,88	2,68	2,78
	1000	Zyklen	3,16	2,99	3,07
	3000	Zyklen	3,48	3,40	3,44
	10000	Zyklen	4,67	4,67	4,67
	30000	Zyklen	5,58	5,46	5,52

**Tabelle 78** Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

**SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70**

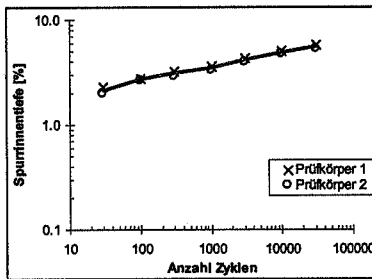
Lösliche Bindemittelanteile			5,0 Masse-%		
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwerte
Rohdichte		[t·m <sup>-3</sup> ]	2,360	2,357	2,359
Hohlraumgehalt		[Vol-%]	4,2	4,3	4,3
Spurrinntiefe in % der Ausgangsdicke bei	30	Zyklen	1,06	0,89	0,97
	100	Zyklen	1,63	1,36	1,49
	300	Zyklen	2,28	1,69	1,99
	1000	Zyklen	2,80	2,43	2,62
	3000	Zyklen	3,31	2,90	3,11
	10000	Zyklen	3,92	3,77	3,85
	30000	Zyklen	4,67	4,28	4,47

**Tabelle 79** Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

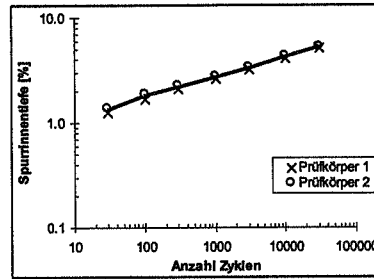
**SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA**

Lösliche Bindemittelanteile			4,4 Masse-%		
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwerte
Rohdichte		[t·m <sup>-3</sup> ]	2,409	2,404	2,407
Hohlraumgehalt		[Vol-%]	4,5	4,7	4,6
Spurrinntiefe in % der Ausgangsdicke bei	30	Zyklen	1,50	1,47	1,49
	100	Zyklen	2,18	2,11	2,14
	300	Zyklen	2,52	2,57	2,55
	1000	Zyklen	2,94	2,76	2,85
	3000	Zyklen	3,40	3,15	3,27
	10000	Zyklen	3,90	3,48	3,69
	30000	Zyklen	3,99	3,79	3,89

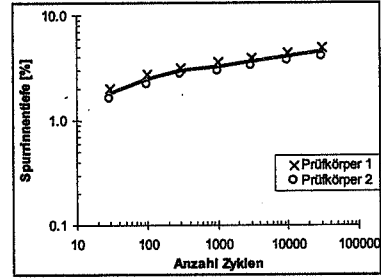
**Tabelle 80** Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

**Doppelt logarithmische Darstellungen der Spurrinnentiefe des SMA 11**

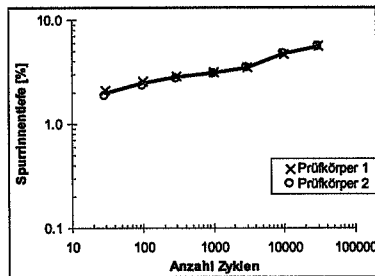
**Abbildung 150** SMA 11 mit Filler Netstal und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinnentiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert



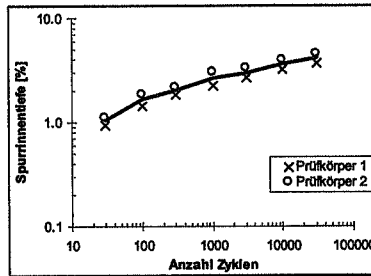
**Abbildung 151** SMA 11 mit Filler Zeobit und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinnentiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert



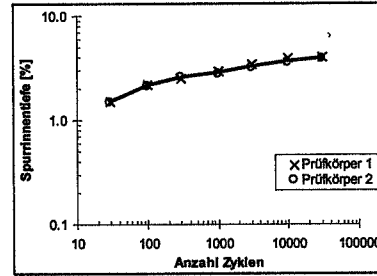
**Abbildung 152** SMA 11 mit Filler Netstal und 4,6 Masse-% Olexobit SMA, Spurrinnentiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert

**Doppelt logarithmische Darstellungen der Spurrinnentiefe des SMA 16**

**Abbildung 153** SMA 16 mit Filler Netstal und 4,6 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinnentiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert



**Abbildung 154** SMA 16 mit Filler Zeobit und 5,0 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinnentiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert



**Abbildung 155** SMA 16 mit Filler Netstal und 4,4 Masse-% Olexobit SMA, Spurrinnentiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert

### 15.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der bleibenden Deformation bei 60 °C (Spurrinntest) von SMA 11 sowie SMA 16

<b>Mischgut SMA 11</b>		Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
<b>Marshallkennwerte</b>				
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,8	4,7	4,6
Dichte Mischgut	t·m <sup>-3</sup>	2,512	2,495	2,517
Rohdichte (Marshall)	t·m <sup>-3</sup>	2,371	2,324	2,370
Hohlraumgehalt (Marshall)	Vol-%	5,6	6,9	5,8
Stabilität-Marshall, korrigiert	kN	6,7	9,2	11,5
Fliessen-Marshall	mm	2,3	2,4	3,8
<b>Spurrinntest</b>				
bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe)				
Rohdichte (Spur-)	t·m <sup>-3</sup>	2,372	2,331	2,374
Hohlraumgehalt (Spur-)	Vol-%	5,6	6,6	5,7
massgebende Spurrinntiefe	%	5,5	5,2	4,4

**Tabelle 81** SMA 11, Marshall- und Spurrinntest-Kennwerte

<b>Mischgut SMA 16</b>		Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA
<b>Marshallkennwerte</b>				
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	4,6	5,0	4,4
Dichte Mischgut	t·m <sup>-3</sup>	2,515	2,464	2,523
Rohdichte (Marshall)	t·m <sup>-3</sup>	2,365	2,352	2,380
Hohlraumgehalt (Marshall)	Vol-%	5,9	4,6	5,7
Stabilität-Marshall, korrigiert	kN	5,7	8,5	9,9
Fliessen-Marshall	mm	2,1	2,5	2,6
<b>Spurrinntest</b>				
bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe)				
Rohdichte (Spur-)	t·m <sup>-3</sup>	2,391	2,359	2,407
Hohlraumgehalt (Spur-)	Vol-%	4,9	4,3	4,6
massgebende Spurrinntiefe	%	5,5	4,5	3,9

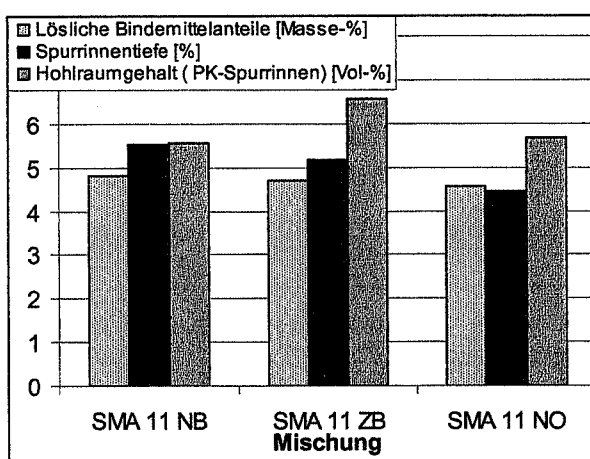
**Tabelle 82** SMA 16, Marshall- und Spurrinntest-Kennwerte

Bei den folgenden grafischen Darstellungen sind die Filler-Bindemittel-Kombinationen mit Abkürzungen versehen worden, da sonst die langen Bezeichnungen die Übersichtlichkeit beeinträchtigen würden:

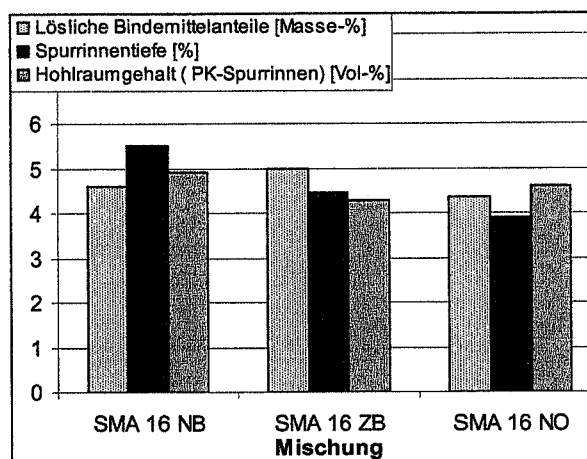
NB = Filler Netstal und Bitumen 50/70

ZB = Filler Zeobit und Bitumen 50/70

NO = Filler Netstal und Olexobit SMA



**Abbildung 156** SMA 11, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinnentest nach 30'000 Zyklen) lösliche Bindemittelanteile, Spurrinnentiefe und Hohlraumgehalt der Prüfkörper



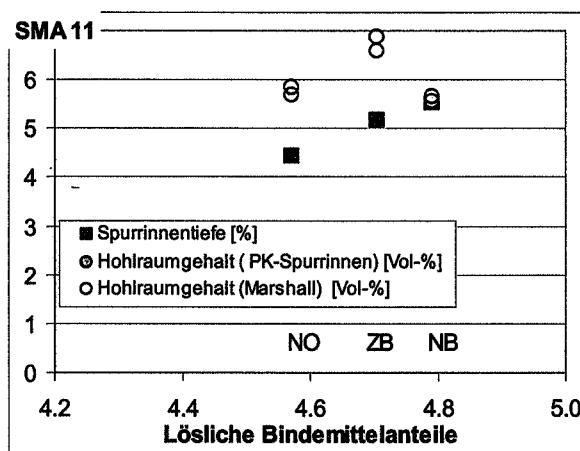
**Abbildung 157** SMA 16, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinnentest nach 30'000 Zyklen) lösliche Bindemittelanteile, Spurrinnentiefe und Hohlraumgehalt der Prüfkörper

Wie aus Abbildung 156 und Abbildung 157 ersichtlich, war bei den Prüfkörpern aus SMA 11 mit 4,8 Masse-% Bindemittel sowie aus SMA 16 mit 4,6 Masse-% Bindemittel mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 nach 30'000 Zyklen bei 60 °C je eine mittlere bleibende Deformation von 5,5 % der Ausgangsdicke zu verzeichnen. Die Prüfkörper aus SMA 11 enthielten vor der Prüfung im Mittel 5,6 Volumen-% und die Prüfkörper aus SMA 16 S nur 4,9 Volumen-% Hohlräume.

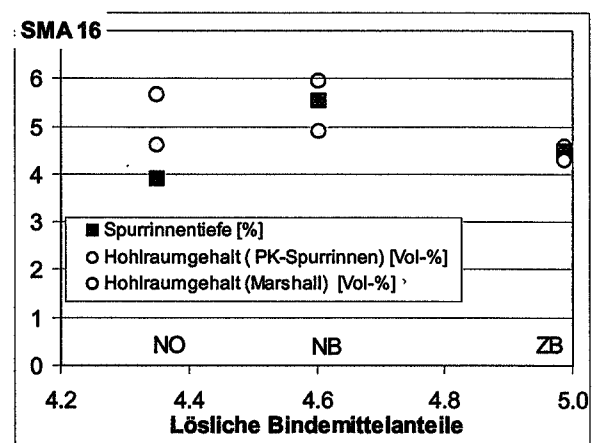
Die Prüfkörper aus SMA 11 mit 4,7 Masse-% Bindemittel erfuhren eine bleibende Deformation nach 30'000 Zyklen bei 60 °C von 5,2 % der Ausgangsdicke von etwa 100 mm; diejenigen aus SMA 16 mit 5,0 Masse-% Bindemittel mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 lieferten eine bleibende Deformation bei 60 °C von 4,5 % der Ausgangsdicke. Die Prüf-

körper aus SMA 11 hatten vor der Prüfung im Mittel 6,6 Volumen-% und die Prüfkörper aus SMA 16 nur 4,3 Volumen-% Hohlräume.

Die Prüfkörper aus SMA 11 mit 4,6 Masse-% Bindemittel erlitten eine bleibende Deformation nach 30'000 Zyklen bei 60 °C von 4,4 % der Ausgangsdicke von etwa 100 mm; diejenigen aus SMA 16 mit 4,4 Masse-% Bindemittel mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 eine bleibende Deformation bei 60 °C von 3,9 % der Ausgangsdicke. Die Prüfkörper aus SMA 11 enthielten vor der Prüfung im Mittel 5,7 Volumen-% und die Prüfkörper aus SMA 16 nur 4,6 Volumen-% Hohlräume.



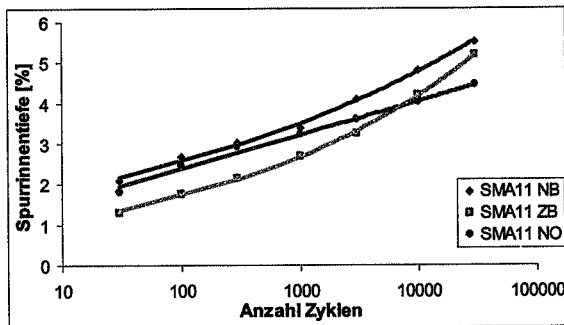
**Abbildung 158** SMA 11, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntest nach 30'000 Zyklen); Spurrinnentiefe, Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper und Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile



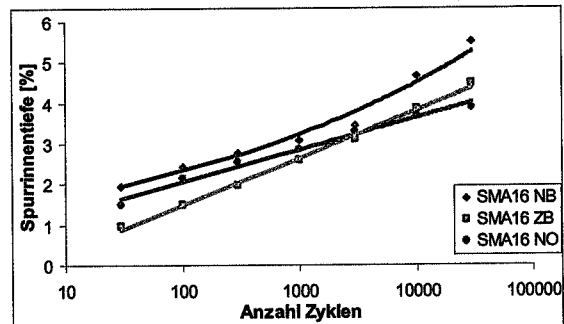
**Abbildung 159** SMA 16, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntest nach 30'000 Zyklen); Spurrinnentiefe, Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper und Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper in Funktion der löslichen Bindemittelanteile

Gemäss Abbildung 158 und Abbildung 159 ist der Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper bei allen geprüften Mischungen insbesondere aber bei SMA 16 immer grösser als derjenige der Spurrinnen-Prüfkörper. Dies dürfte durch die unterschiedlichen Bedingungen bei der Herstellung der Prüfkörper verursacht worden sein; namentlich durch den Knet- und Walzeffekt bei der Verdichtung der Spurrinnen-Prüfkörper, aber auch durch die unterschiedliche Vorbehandlung des Mischgutes. Während das Mischgut für alle Prüfkörper der Marshallprüfung wie auch der Spurrinnen-Prüfung nicht gealtert wurden und mit einer Verdichtungstemperatur entsprechend der Schweizer Norm SN 671 969 b bei 155 °C verdichtet worden sind, wurde nach gängiger Vorgehensweise für die Gyratorprüfkörper Mischgut verwendet, welches vor der Verdichtung der in Kapitel 10.3 beschriebenen Kurzzeitalterung unterworfen worden ist.

Da sich die Reihenfolge der Mischungen zwischen den SMA 11 (Abbildung 158) sowie SMA 16 (Abbildung 159) ändert, ist anzunehmen, dass die geringen Unterschiede bei den löslichen Bindemittelanteilen der Filler-Bindemittel-Kombinationen einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse der bleibenden Deformation bei 60 °C der Prüfkörper nehmen.



**Abbildung 160** SMA 11, Spurrinntiefe bei 60 °C in Funktion der Anzahl Zyklen



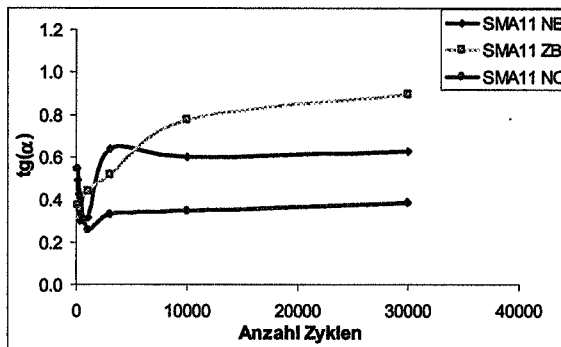
**Abbildung 161** SMA 16, Spurrinntiefe bei 60 °C in Funktion der Anzahl Zyklen

Aus Abbildung 160 sowie Abbildung 161 ist ersichtlich, dass die Untersuchungsergebnisse gut beschrieben werden durch potentielle (gekrümmte Kurven) oder logarithmische (Geraden) Anpassung der Trendlinie.

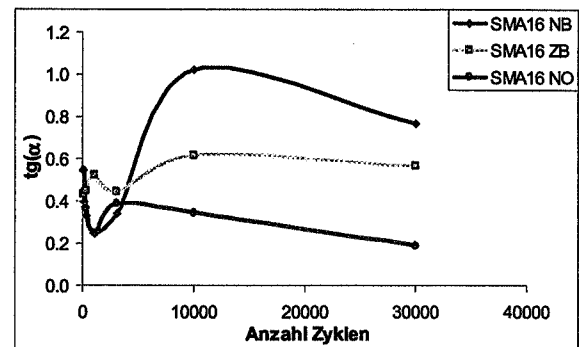
Die Verläufe der bleibenden Deformation bei 60 °C (Spurrinntest) sämtlicher SMA 11 S wie auch SMA 16 Mischungen mit nahezu optimalem Gehalt der löslichen Bindemittelanteile können im halblogarithmischen Raum gut durch eine potentielle Anpassung der Trendlinie angenähert werden. Dabei folgen die Mischungen mit Bitumen einem nahezu parallelen Verlauf. Die Zunahme der bleibenden Deformation ist somit in diesem Falle weitgehend unabhängig von der verwendeten Fillersorte. Die Fillersorte bewirkt vor allem eine Vertikalverschiebung der Kurven (Abbildung 160 und Abbildung 161). Demgegenüber nimmt die Spurrinntiefe bei der Mischung mit dem Bindemittel Olexobit SMA weniger rasch zu (schwächste Steigung).

Nach 30'000 Zyklen treten bei den verschiedenen Mischungen jedoch meistens unterschiedlich tiefe Spurrinnen auf (Tabelle 81 und Tabelle 82). Die gemessenen Spurrinntiefen liegen im Bereich von 3,9 % bis 5,5 % der Ausgangsdicke der Prüfkörper. Das heisst aber auch, dass diese Werte deutlich jene unterschreiten, welche in der Schweizer Norm SN 640 431 als Grenzwerte empfohlen werden. Dies vermutlich durch die hohe Standfestigkeit richtig konzipierter Splittmastixasphalte.

Im weiteren fällt auf, dass sich die in Abbildung 162 und Abbildung 163 dargestellten Werte der Spurrinnentiefe zwischen etwa 1'000 und 30'000 Zyklen anders verhalten wie die Werte bei geringerer Anzahl Zyklen.



**Abbildung 162** SMA 11, Steigung ( $\text{tg } \alpha$ ) in Funktion der Anzahl Zyklen



**Abbildung 163** SMA 16, Steigung ( $\text{tg } \alpha$ ) in Funktion der Anzahl Zyklen

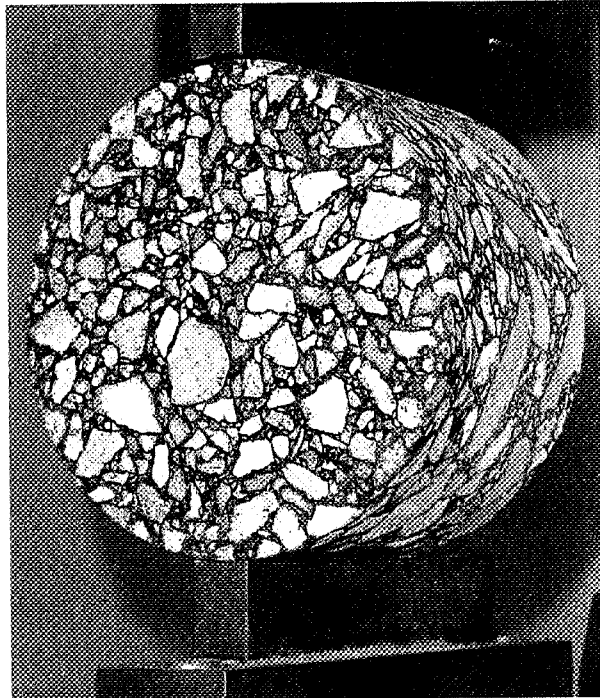
Werden die Steigungen zwischen den einzelnen Mittelwerten der Spurrinnentiefe als Tangens ( $\text{tg } \alpha$ ) für die SMA 11 S sowie SMA 16 Mischungen berechnet und in einem Diagramm dargestellt (Abbildung 162 und Abbildung 163), dann wird deutlich, dass die Zunahme der Spurrinnentiefe mit zunehmender Anzahl Zyklen zu Beginn der Prüfung starken Schwankungen unterworfen ist und erst allmählich einem monotonen Verlauf folgt.

Das führt zu dem Schluss, dass die Spurrinnenbildungen der Mischungen des SMA 11 S nach 30'000 Zyklen noch nicht zum Stillstand gekommen sind. Hingegen werden die Spurrinnenbildungen der Mischungen des SMA 16 S nach 10'000 Zyklen insbesondere bei Filler Netstal und Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal und Olexobit SMA geringer und streben allem Anschein nach einem Endpunkt zu.

## 15.2 Bruchverhalten in der Kälte

### 15.2.1 Spaltzugprüfung

Schon seit den 60er Jahren wurde auf die Anwendung der Spaltzugprüfung [Literatur 20] als Prüfmethode (Indirect Tensile Test) für bituminöse Baustoffe im Strassenbau hingewiesen. In der Zwischenzeit ist es aber in der Schweiz noch nicht zu einer verbindlichen, generellen Prüfvorschrift für bituminöses Mischgut und Beläge für den Strassenbau gekommen. Die Prüfmethode wird nur in der Schweizer Norm SN 640 452, "Heissmischfundationsschichten HMF", im Abschnitt 14., "Festigkeit nach Wasserlagerung", grob beschrieben. Auch in den Gremien der europäischen Harmonisierung von Prüfvorschriften für den Asphaltstrassenbau bestehen bezüglich der Prüfbedingungen für diese Methode erhebliche Meinungsverschiedenheiten.



**Abbildung 164** Eingebauter Prüfkörper für die Durchführung der Spaltzugprüfung

In den USA wird die Spaltzugfestigkeitsprüfung mit der Bestimmung der Wasserempfindlichkeit der bituminösen Mischungen kombiniert ähnlich wie in der oben zitierten Schweizer Norm. In der Forschungsarbeit 27/98, "Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischfundationsschichten" [Literatur 20] wird ausführlich auf die Spaltzugprüfung eingegangen.

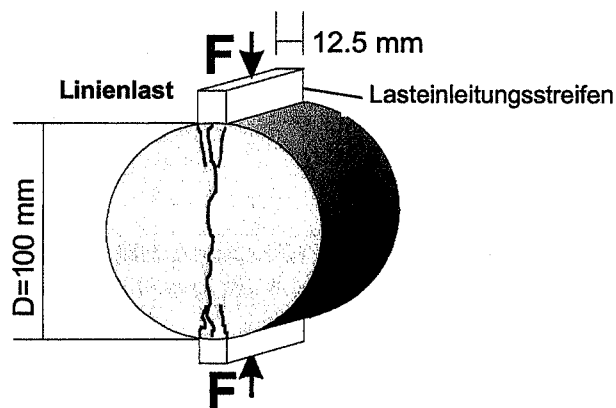
In dieser Arbeit wurde die Spaltzugprüfung durchgeführt, um Hinweise auf das Rissverhalten der Mischungen bei tiefen Temperaturen zu erhalten. Von jeder Mischung wurden beim optimalen Gehalt an löslichem Bindemittel Marshallprüfkörper hergestellt. Die Bestimmung der maximalen Kraft sowohl bei 0 °C wie auch bei -10 °C erfolgte mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 mm/min. Dabei wurde über zwei gegenüber liegende parallele Metallstreifen von 12,7 mm Breite mit einer der Oberfläche der Prüfkörper ange-

passten Rundung die Kraft zentrisch in die Prüfkörper eingeleitet (Abbildung 164 und Abbildung 165).

Die Spaltzugfestigkeit wird berechnet gemäss:

$$\sigma_{sz} = 2 \cdot P / (\pi \cdot h \cdot d)$$

- $\sigma_{sz}$  = Spaltzugfestigkeit  
P = maximale Kraft  
h = Höhe des Marshallprüfkörpers  
d = Durchmesser des Marshallprüfkörpers



**Abbildung 165** Prinzipskizze zur Durchführung der Spaltzugprüfung

Als vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper wurde der Weg des Druckkolbens der Prüfmaschine gemessen vom Zeitpunkt des Anstieges der Kraft bis zum Bruch des Prüfkörpers.

### 15.2.2 Ergebnisse der Spaltzugprüfung bei 0 °C

In Tabelle 83 und Tabelle 84 sowie in Abbildung 166 bis Abbildung 171 sind die einzelnen Ergebnisse der Spaltzugprüfungen bei 0 °C angegeben. Auffallend ist die erhebliche Streuung im Verlauf der Kraft-Verformungs-Diagramme, welche darauf zurückzuführen ist, dass durch die lokale Kraffteinleitung das Versagen nicht an der schwächsten Stelle des Prüfkörpers sondern in der Vertikalen erzwungen wird.

Spaltzugprüfung bei 0 °C		Mischung SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit						
Prüfkörper	Nr.	4	13	10	7	5	6
Höhe	mm	66,2	65,1	65,4	65,1	65,2	64,7
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,368	2,380	2,381	2,387	2,397	2,400
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,0	4,5	4,5	4,3	3,9	3,8
Kraft beim Bruch	kN	22,0	32,1	38,4	39,8	38,7	30,6
Spaltzugfestigkeit	kPa	2088	3090	3678	3831	3717	2961

**Tabelle 83** SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C

Spaltzugprüfung bei 0 °C		Mischung SMA11 mit Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit						
Prüfkörper-Nummer		13	14	1	3	9	6
Höhe	mm	67,6	66,9	67,1	66,2	65,9	66,1
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,338	2,350	2,356	2,356	2,361	2,363
Hohlraumgehalt	Vol.-%	6,1	5,6	5,4	5,4	5,2	5,1
Kraft beim Bruch	kN	32,8	35,2	35,2	35,2	32,8	37,4
Spaltzugfestigkeit	kPa	3042	3298	3289	3334	3124	3549

**Tabelle 84** SMA11 mit Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C

Spaltzugprüfung bei 0 °C		Mischung SMA11 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA					
	Einheit						
Prüfkörper-Nummer		3	7	11	9	4	
Höhe	mm	62,0	61,9	62,0	61,9	60,9	
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,385	2,389	2,393	2,397	2,399	
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,7	4,5	4,3	4,2	4,1	
Kraft beim Bruch	kN	36,4	41,9	45,9	44,2	45,1	
Spaltzugfestigkeit	kPa	3678	4246	4639	4480	4637	

**Tabelle 85** SMA11 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C

Spaltzugprüfung bei 0 °C		Mischung SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit	6	12	3	9	1	10
Prüfkörper-Nummer							
Höhe	mm	64,4	64,9	64,5	65,8	62,1	62,1
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,326	2,353	2,364	2,372	2,379	2,390
Hohlraumgehalt	Vol.-%	7,5	6,4	6,0	5,6	5,4	4,9
Kraft beim Bruch	kN	27,1	30,0	29,7	23,4	24,0	25,9
Spaltzugfestigkeit	kPa	2639	2898	2891	2227	2418	2610

**Tabelle 86** SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C

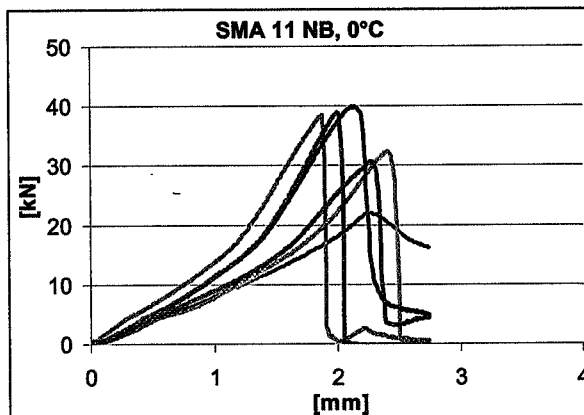
Spaltzugprüfung bei 0 °C		Mischung SMA16 mit Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit	11	1	9	8	3	4
Prüfkörper-Nummer							
Höhe	mm	67,1	66,1	65,5	64,4	64,4	58,7
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,341	2,344	2,349	2,358	2,363	2,369
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,9	5,8	5,6	5,2	5,1	4,8
Kraft beim Bruch	kN	29,2	20,9	32,7	28,4	27,2	30,0
Spaltzugfestigkeit	kPa	2731	1983	3123	2762	2651	3202

**Tabelle 87** SMA16 mit Filler Zeobit und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C

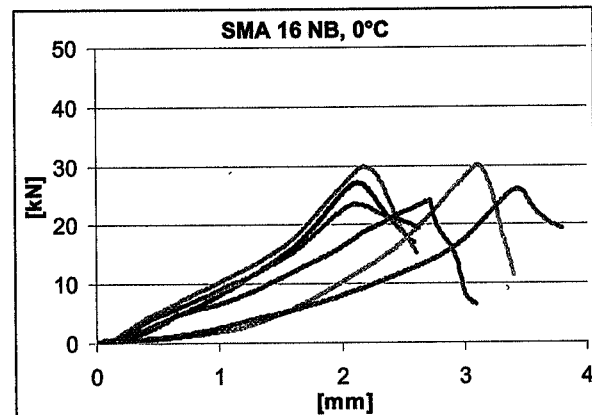
Spaltzugprüfung bei 0 °C		Mischung SMA16 mit Filler Netstal und 4,4 Masse-% Olexobit SMA					
	Einheit	3	11	8	6	13	1
Prüfkörper-Nummer							
Höhe	mm	67,4	68,5	66,4	65,4	68,5	65,7
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,366	2,367	2,380	2,386	2,387	2,391
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,9	5,9	5,4	5,2	5,1	5,0
Kraft beim Bruch	kN	38,4	35,8	34,1	40,0	36,9	39,3
Spaltzugfestigkeit	kPa	3570	3273	3222	3832	3376	3750

**Tabelle 88** SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C

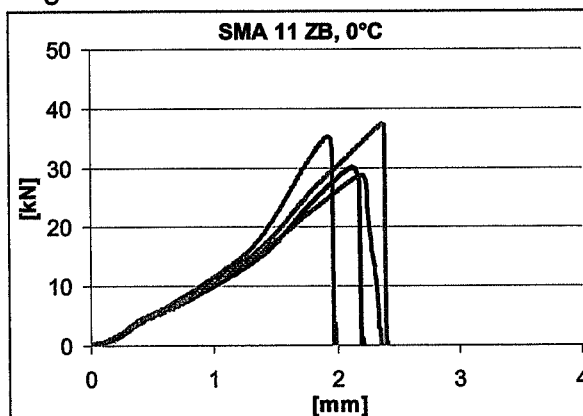
Im Vergleich des SMA 11 mit dem SMA 16 ist die Streuung der Mischungen mit dem grösseren nominellen Grösstkorn infolge der grösseren Materialinhomogenitäten deutlicher ausgeprägt. Die Kraft-Verformungs-Diagramme zeigen einen bilinearen Verlauf, wobei die Steigungen vom SMA 11 tendenziell grösser sind als diejenigen vom SMA 16. Der Grund dafür ist versuchsbedingt, indem sich der Lasteinleitungstreifen in einer ersten Phase in den Scheiteln der Prüfkörper eindrückt und sich erst in der zweiten Phase die volle Kraftereinleitung entfalten kann. Der Knickpunkt in den grafischen Darstellungen liegt bei allen Prüfkörpern bei etwa 1,2 mm.



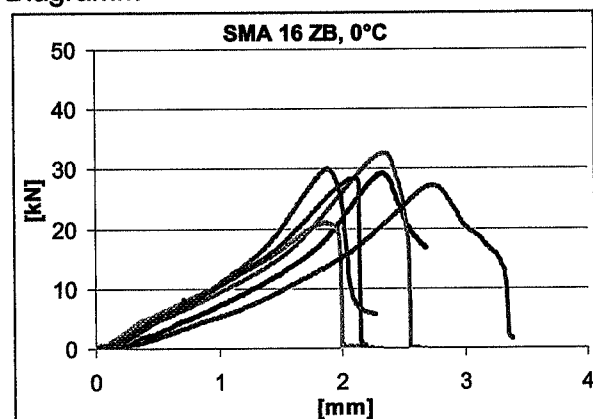
**Abbildung 166** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



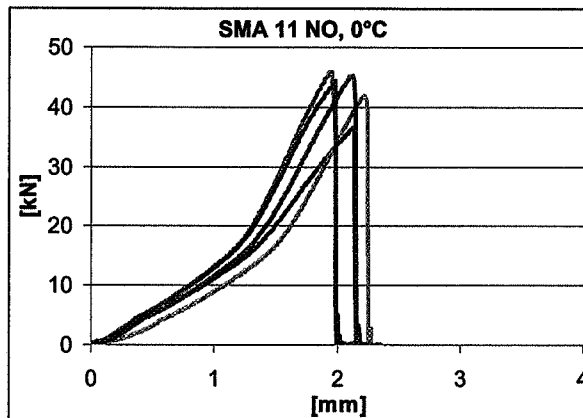
**Abbildung 167** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



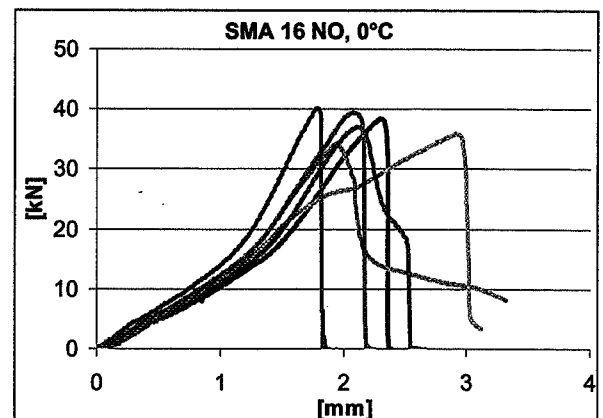
**Abbildung 168** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



**Abbildung 169** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



**Abbildung 170** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm



**Abbildung 171** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm

### 15.2.3 Ergebnisse der Spaltzugprüfung bei -10 °C

In Tabelle 89 und Tabelle 90 sowie in Abbildung 172 bis Abbildung 177 sind die einzelnen Ergebnisse der Spaltzugprüfungen bei -10 °C angegeben. Auch bei den Prüfungen bei -10 °C fallen die erheblichen Streuungen in den Kraft-Verformungs-Diagrammen auf, welche auf ähnliche Ursachen wie bei den Prüfungen bei 0 °C zurückzuführen sind.

Spaltzugprüfung bei -10 °C		Mischung SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit	8	9	11	12	2	3
Prüfkörper	Nr.	8	9	11	12	2	3
Höhe	mm	66,0	65,8	66,0	64,5	64,3	65,2
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,380	2,381	2,381	2,388	2,398	2,400
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,6	4,5	4,5	4,2	3,8	3,7
Kraft beim Bruch	kN	42,8	40,6	42,8	45,9	40,5	40,2
Spaltzugfestigkeit	kPa	4056	3868	4058	4456	3948	3868

**Tabelle 89** SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C

Spaltzugprüfung bei -10 °C		Mischung SMA11 mit Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit						
Prüfkörper	Nr.	4	7	8	11	12	
Höhe	mm	66,4	66,1	66,8	66,2	66,3	
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,348	2,355	2,356	2,360	2,363	
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,7	5,4	5,4	5,2	5,1	
Kraft beim Bruch	kN	32,4	35,5	27,4	29,7	32,9	
Spaltzugfestigkeit	kPa	3059	3368	2576	2812	3115	

**Tabelle 90** SMA11 mit Filler Zeobit und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C

Spaltzugprüfung bei -10 °C		Mischung SMA11 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA					
	Einheit						
Prüfkörper	Nr.	10	5	2	12	14	8
Höhe	mm	62,6	61,0	61,3	61,4	61,3	61,3
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,385	2,389	2,394	2,398	2,402	2,404
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4,6	4,5	4,3	4,1	4,0	3,9
Kraft beim Bruch	kN	39,3	46,8	47,9	44,8	46,6	49,0
Spaltzugfestigkeit	kPa	3928	4816	4898	4569	4763	5007

**Tabelle 91** SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C

Spaltzugprüfung bei -10 °C		Mischung SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit						
Prüfkörper	Nr.	2	13	11	8	5	4
Höhe	mm	66,1	64,3	64,2	63,0	63,4	63,4
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,345	2,359	2,367	2,372	2,383	2,398
Hohlraumgehalt	Vol.-%	6,7	6,2	5,8	5,6	5,2	4,6
Kraft beim Bruch	kN	35,9	29,4	23,7	34,7	35,7	40,1
Spaltzugfestigkeit	kPa	3404	2862	2315	3453	3534	3968

**Tabelle 92** SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C

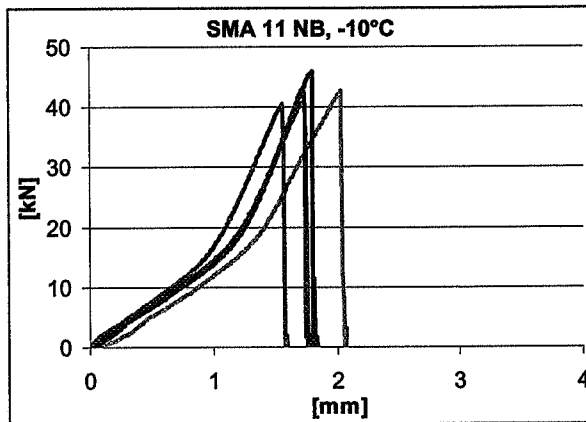
Spaltzugprüfung bei -10 °C		Mischung SMA16 mit Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70					
	Einheit						
Prüfkörper	Nr.	5	7	2	13	10	6
Höhe	mm	65,0	65,8	65,1	63,7	63,3	63,9
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,342	2,348	2,357	2,360	2,365	2,369
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,9	5,6	5,3	5,1	4,9	4,8
Kraft beim Bruch	kN	34,2	33,6	23,5	23,5	31,4	31,0
Spaltzugfestigkeit	kPa	3300	3204	2259	2309	3111	3038

**Tabelle 93** SMA16 mit Filler Zeobit und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C

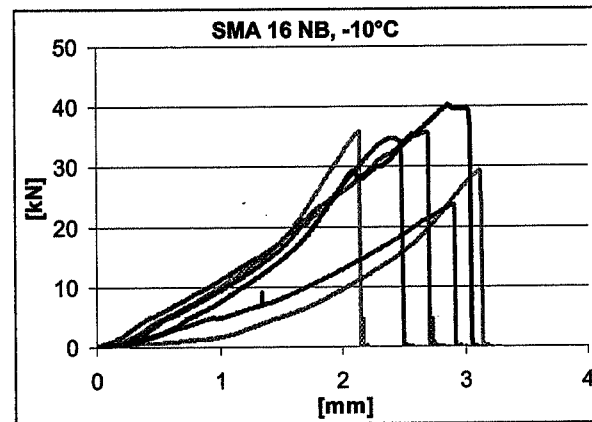
Spaltzugprüfung bei -10 °C		Mischung SMA16 mit Filler Netstal und 4,4 Masse-% Olexobit SMA					
	Einheit						
Prüfkörper	Nr.	10	2	12	4	5	7
Höhe	mm	68,3	68,4	67,8	66,6	68,3	67,9
Rohdichte	t·m <sup>-3</sup>	2,366	2,378	2,384	2,387	2,388	2,394
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,9	5,5	5,2	5,1	5,1	4,8
Kraft beim Bruch	kN	44,8	38,2	37,8	31,4	45,2	23,8
Spaltzugfestigkeit	kPa	4109	3496	3490	2957	4145	2200

**Tabelle 94** SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C

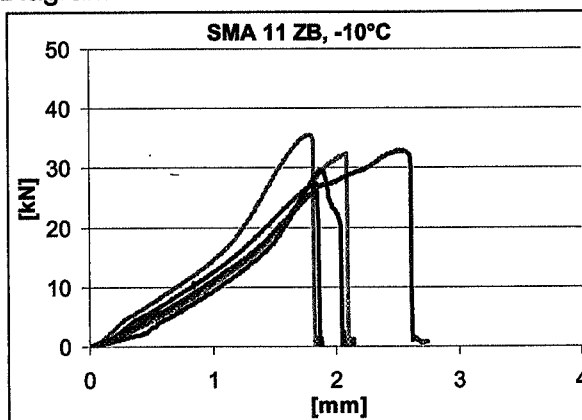
Im Vergleich des SMA 11 mit dem SMA 16 zeigt sich wiederum, dass die Streuungen der Mischungen mit dem grösseren nominellen Grösstkorn infolge der grösseren Materialinhomogenitäten deutlich ausgeprägt sind. Auch die übrigen beobachteten Charakteristika werden bestätigt. Der Knickpunkt in den grafischen Darstellungen liegt bei allen Prüfkörpern ebenfalls bei etwa 1,2 mm.



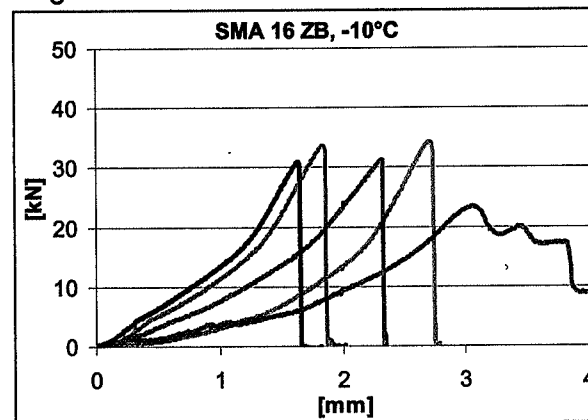
**Abbildung 172** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



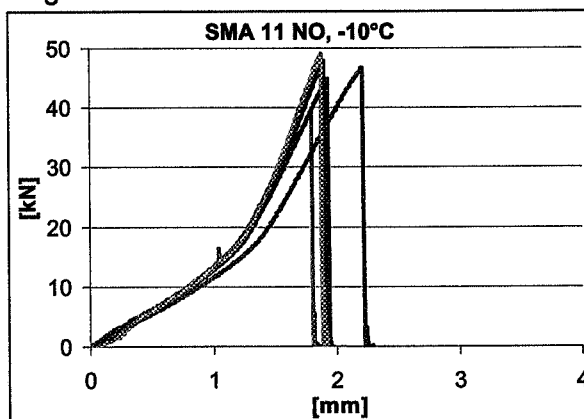
**Abbildung 173** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



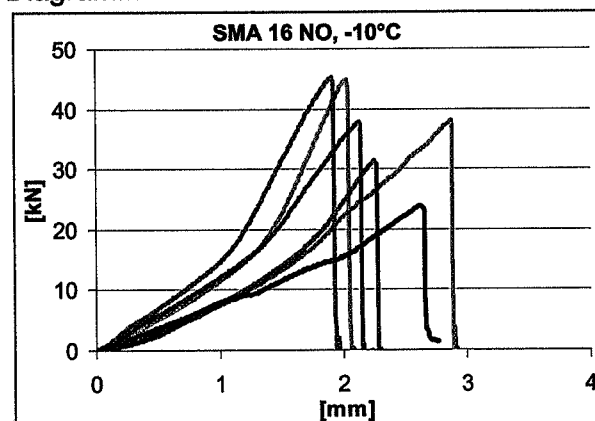
**Abbildung 174** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



**Abbildung 175** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm



**Abbildung 176** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm



**Abbildung 177** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm

### 15.2.4 Steigung der Kraft-Verformungs-Kurvenabschnitte der Spaltzugprüfungen bei 0 °C und -10 °C

Da die Kraft-Verformungs-Diagramme einen bilinearen Verlauf zeigen, wurden im Sinne eines Steifigkeitsindikators die Steigungen berechnet für jeweils den unteren sowie den oberen Kurvenabschnitt bei den beiden Prüftemperaturen 0 °C sowie -10 °C. Die Ergebnisse sind für die Mischungen des SMA 11 in Tabelle 95 sowie für die Mischungen des SMA 16 in Tabelle 96 zusammengefasst und in den Abbildung 178 bis Abbildung 183 grafisch dargestellt.

SMA 11	unten	oben	
NB 0°C	10,1	24,6	KN/mm
ZB 0°C	10,2	27,8	KN/mm
NO 0°C	10,8	35,9	KN/mm

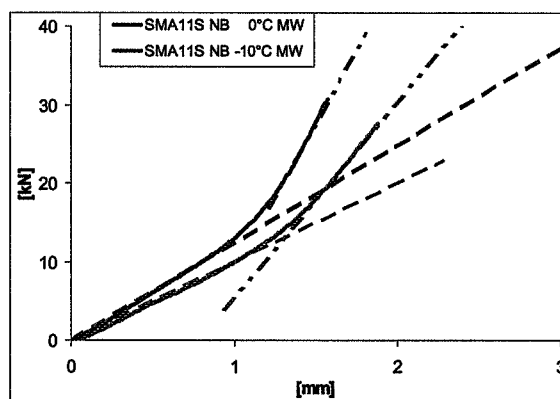
SMA 16	unten	oben	
NB 0°C	6,3	14,4	KN/mm
ZB 0°C	8,5	18,1	KN/mm
NO 0°C	11,5	29,0	KN/mm

SMA 11	unten	oben	
NB -10°C	12,4	37,0	KN/mm
ZB -10°C	10,4	22,4	KN/mm
NO -10°C	12,1	35,8	KN/mm

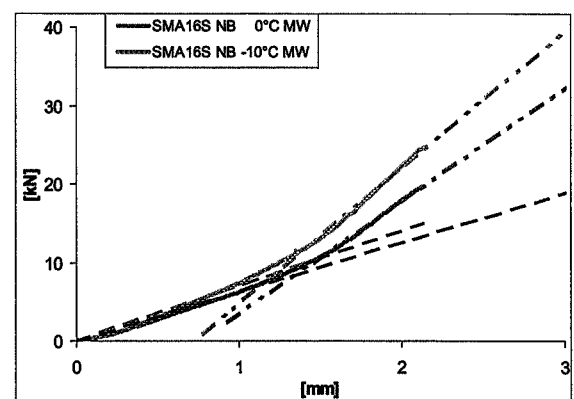
SMA 16	unten	oben	
NB -10°C	7,0	17,4	KN/mm
ZB -10°C	6,8	16,6	KN/mm
NO -10°C	9,6	25,2	KN/mm

**Tabelle 95** Spaltzugprüfungen des SMA 11, Mittelwerte der Steigung der Kurvenabschnitte

**Tabelle 96** Spaltzugprüfungen des SMA 16, Mittelwerte der Steigung der Kurvenabschnitte

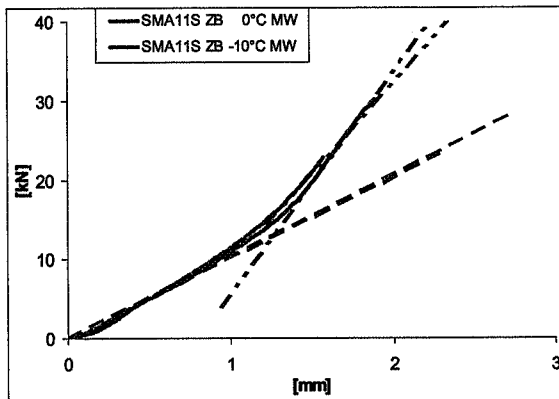


**Abbildung 178** SMA 11 mit Filler Netzal und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte

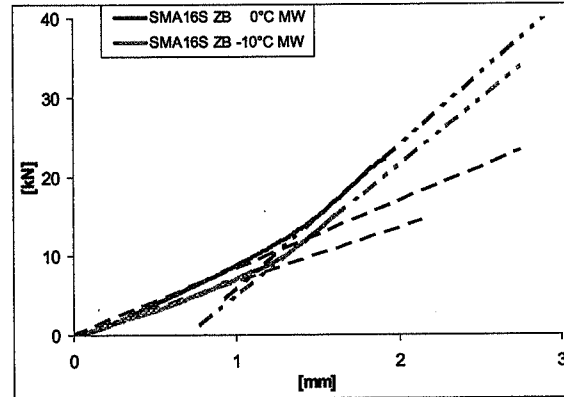


**Abbildung 179** SMA 16 mit Filler Netzal und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte

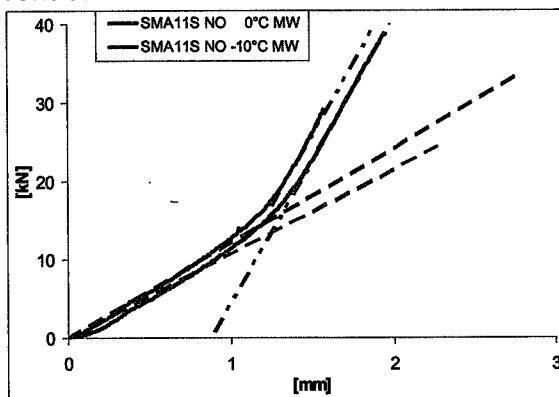
Für die Bewertung der Mischungen scheint es im konkreten Fall keine signifikante Rolle zu spielen, ob die Steigungen im unteren oder oberen Bereich, bzw. bei 0 °C oder bei -10 °C beobachtet werden.



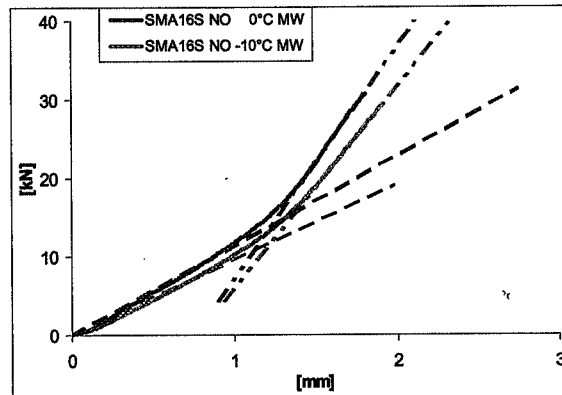
**Abbildung 180** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte



**Abbildung 181** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte



**Abbildung 182** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Steigung der Kurvenabschnitte



**Abbildung 183** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Steigung der Kurvenabschnitte

Es zeigt sich, dass die SMA 16 Mischungen im allgemeinen tiefere Steigungen liefern als SMA 11 und somit eine gewisse bessere Steifigkeit aufweisen.

Die Mischungen mit Filler Netstal und Olexobit SMA weisen sowohl im unteren als auch oberen Kurvenverlauf, verglichen mit den anderen Mischungen, die höchste Steifigkeit auf. Die geringsten Steifigkeiten besitzen dagegen die Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70.

### 15.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Spaltzugprüfung

In Tabelle 97 bis Tabelle 100 sowie in Abbildung 184 und Abbildung 185 sind die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen zusammengefasst.

Mischung SMA11 mit	Einheit	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimalwert	Maximalwert	Anzahl Prüfkörper
Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	3228	663	2961	3831	6
Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	3273	177	3124	3549	6
Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA	kPa	4336	401	4246	4639	5

**Tabelle 97** SMA11 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei 0 °C

Mischung SMA16 mit	Einheit	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimalwert	Maximalwert	Anzahl Prüfkörper
Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	2614	263	2227	2891	6
Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	2742	434	1983	3202	6
Filler Netstal und 4,4 Masse-% Olexobit SMA	kPa	3504	254	3222	3832	6

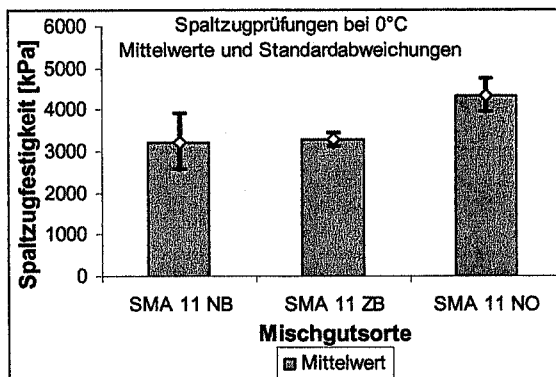
**Tabelle 98** SMA16 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei 0 °C

Mischung SMA11 mit	Einheit	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimalwert	Maximalwert	Anzahl Prüfkörper
Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	4042	220	3868	4456	6
Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	2986	303	2576	3115	5
Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA	kPa	4664	401	4569	5007	6

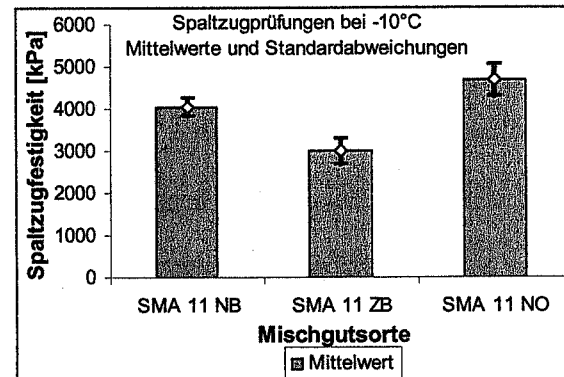
**Tabelle 99** SMA11 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei -10 °C

Mischung SMA16 mit	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung	Minimalwert	Maximalwert	Anzahl Prüfkörper
Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	3256	581	2315	3968	6
Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70	kPa	2870	463	2259	3111	6
Filler Netstal und 4,4 Masse-% Olexobit SMA	kPa	3400	737	2200	4145	6

**Tabelle 100** SMA16 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei -10 °C

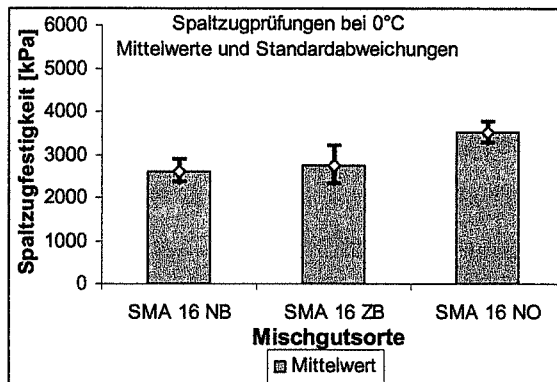


**Abbildung 184** SMA 11, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei 0 °C

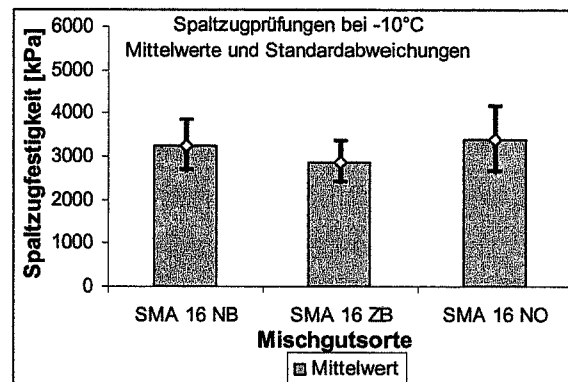


**Abbildung 185** SMA 11, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei -10 °C

Wie aus Abbildung 184 und Abbildung 185 hervorgeht, ist für die Mischungen SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Filler Netstal und Olexobit SMA eine deutliche Zunahme der Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit zwischen 0 °C und der tieferen Temperatur -10 °C ersichtlich. Hingegen ist bei der Mischung mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 kein wesentlicher Unterschied beim Mittelwert der Spaltzugfestigkeit zwischen SMA 11 und SMA 16 feststellbar.



**Abbildung 186** SMA 16, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei 0 °C



**Abbildung 187** SMA 16, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei -10 °C

Beim SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 tritt eine Zunahme des Mittelwertes der Spaltzugfestigkeit bei -10 °C Abbildung 187 gegenüber 0 °C Abbildung 186 für die Mischung auf. Die Mischungen mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal und Olexobit SMA zeigen dagegen keinen wesentlichen Unterschied bei der Spaltzugfestigkeit zwischen SMA 11 und SMA 16.

## 16 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

### 16.1 Fragen der Zielsetzung

Im Folgenden wird versucht, aufgrund dieser Untersuchungen eine Antwort auf die in Kapitel 1 und 2 formulierten Fragen der Zielsetzung zu geben. Dabei ist selbstverständlich zu berücksichtigen, dass sich die Aussagen nur auf die untersuchten Materialien beziehen können und eine Verallgemeinerung ohne weitere Erfahrungen noch nicht möglich ist.

#### 16.1.1 Führt die volumetrische und mechanische Optimierung von Mischgut gemäss SN 640 432 tatsächlich zu mechanisch optimalen Kennwerten?

In SN 640 432 a wird keine mechanische sondern vor allem eine volumetrische Optimierung von SMA vorgenommen. Die Optimierung basiert auf einem Richtwertbereich für die Bindemitteldosierung von 6,5 bis 7,5 Masse-% für SMA 11 und 6,0 bis 7,2 Masse-% für SMA 16.

Im vorliegenden Fall lagen die ermittelten optimalen löslichem Bindemittelanteile erheblich unterhalb dieser Bindemittelbereiche, unabhängig davon, ob der optimale lösliche Bindemittelanteil nach dem Marshall-Verfahren oder mit der Gyratorverdichtung ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass in bezug auf die untersuchten SMA-Mischungen die in der Schweizer Norm SN 640 432 a empfohlenen Richtwertbereiche für die Bindemitteldosierung sich als zu hoch angesetzt erwiesen haben und somit die Optimierung nach Schweizer Norm nicht zu optimalen Kennwerten geführt hätte. Diesem Punkt ist bei der nächsten Normenrevision entsprechende Beachtung zu schenken.

#### 16.1.2 Ist die volumetrische Optimierung von SMA-Mischgut unabhängig von der Verdichtungsart?

Aufgrund der Resultate der vorliegenden Untersuchungen muss diese Frage klar verneint werden. Die Auswertung der Marshall- sowie der Gyrator Kennwerte bei  $N_{des}$  führt nicht zu gleichen Ergebnissen des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel für die untersuchten Mischungen aus SMA.

Die in dieser Arbeit ermittelten volumetrischen Marshallkennwerte ergeben einen optimalen Gehalt an löslichem Bindemittel von etwa 5,6 Masse-% für alle geprüften Mischungen des SMA 11 sowie 5,0 für SMA 16. Grundlage für diese Aussage sind die Trendlinien der Diagramme, welche den Hohlraumgehalt-Marshall in Funktion der löslichen Bindemittel-

telanteile darstellen (Abbildung 53 bis Abbildung 55) sowie andererseits den Hohlraumfüllungsgrad HFB in Funktion der löslichen Bindemittelanteile zeigen (Abbildung 65 bis Abbildung 67).

Aufgrund der Gyrator Kennwerte muss von einem geringeren, mittleren, optimalen Gehalt an löslichem Bindemittel von ungefähr 4,5 Masse-% ausgegangen werden. Diese Feststellung basiert auf der Auswertung der volumetrischen Kennwerte der Prüfkörper (Kapitel 13.2), insbesondere des Hohlraumgehaltes sowie des Hohlraumfüllungsgrades HFB bei  $N_{des}$  in Funktion der Anzahl Umdrehungen (Abbildung 100 bis Abbildung 105).

Die Bestimmung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel nach der Marshall- wie auch nach der Gyrator-Methode führt in beiden Fällen also nicht zu gleichen Ergebnissen (Tabelle 74) sowie Abbildung 188 und Abbildung 189). Eine Ausnahme bildet die Mischung SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA

Sowohl für die untersuchten Mischungen des SMA 11 wie auch die Mischungen des SMA 16 liegen die ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile erheblich unterhalb des unteren Richtwertbereichs für die Bindemitteldosierung nach SN 640 432 a. Dabei spielt es dabei grundsätzlich keine Rolle ob der optimale lösliche Bindemittelanteil nach dem Marshall-Verfahren oder mit Gyratorverdichtungen ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass im konkreten Fall die in der Schweizer Norm SN 640 432 a empfohlenen Richtwertbereiche für die Bindemitteldosierung ermittelten zu hoch angesetzt sind.

Mischungen	Verdichtungsart	Einheit	Optimale lösliche Bindemittelanteile von allen untersuchten Mischungen			Richtwertbereiche für die Bindemitteldosierung nach SN 640432a
			Filler Netstal und Bitumen 50/70	Filler Zeobit und Bitumen 50/70	Filler Netstal und Olexobit SMA	
11	Marshall	Masse-%	5,6	5,6	5,7	6,5 bis 7,5
	Gyrator	Masse-%	4,2	4,5	4,8	
16	Marshall	Masse-%	5,0	5,1	5,0	6,0 bis 7,2
	Gyrator	Masse-%	4,3	4,7	5,3	

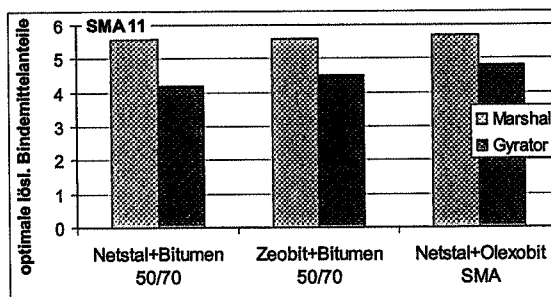
**Auszug aus Tabelle 74**      Untersuchte SMA-Mischungen, optimale lösliche Bindemittelanteile durch Marshall- und Gyratorverdichtungen ermittelt

### 16.1.3 Kann die Marshall- bzw. die Gyratorverdichtung für SMA-Mischungen überhaupt angewendet werden?

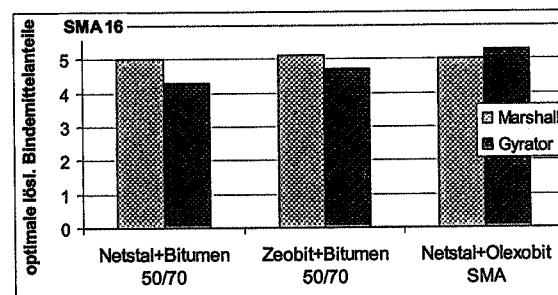
Diese Frage kann durchaus positiv beantwortet werden. Im Gegensatz zu den bekannten Darstellungen der Marshallkennwerte in Funktion der löslichen Bindemittelanteile von Asphaltbeton (AB) oder Heissmischtragschicht (HMT) sind jedoch die Kurven der Kennwerte von Splittmastixasphalt unterschiedlich. Besonders auffallend sind dabei die geraden oder schwach gekrümmten Kurven von Stabilität und Fließen bei der Marshallprüfung in Funktion der löslichen Bindemittelanteile. Ausnahmen bilden nur die Mischungen mit dem Filler Zeobit, deren Kurven der Kennwerte mehr den bekannten Erscheinungsbildern der Ergebnisse von AB- sowie HMT-Untersuchungen folgen.

Bei der Gyratorverdichtung unterscheiden sich die Kurven der Verdichtung von Splittmastixasphalt ebenso von den Verdichtungskurven von Asphaltbeton (AB) oder Heissmischtragschicht (HMT). Die Mischungen aus Splittmastixasphalt verlaufen weniger steil, als diejenigen der anderen Mischungen. Diese Unterscheidungen werden wiedergegeben durch den in der prEN 12 697-10 beschriebenen k-Wert (Verdichtungsgegenstand). Für Mischungen aus Splittmastixasphalt liegt der k-Wert mit 3,0 bis 4,0 eher tiefer als dies nach Empfehlungen der EMPA für Asphaltbeton (AB) oder Heissmischtragschicht (HMT) der Fall ist.

Die ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile gemäss SHRP-Empfehlung mit Gyratorverdichtungen liegen deutlich unterhalb denjenigen, die durch Anwendung des Marshall-Verfahrens ermittelt worden sind. Ausser bei der einen Mischung des SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA.



**Abbildung 188** SMA 11, optimale lösliche Bindemittelanteile mit Marshall-Methode sowie mit Gyrator-Methode ermittelt (vgl. Tabelle 60)



**Abbildung 189** SMA 16, optimale lösliche Bindemittelanteile mit Marshall-Methode sowie mit Gyrator-Methode ermittelt (vgl. Tabelle 61)

## 17 AUSBLICK

Grundsätzlich soll mit diesem Projekt erreicht werden, dass Splittmastixasphalt, SMA, problemlos auf schweizerischen Strassen eingebaut, benutzt und unterhalten werden kann als bisher. Die aus dieser Forschungsarbeit resultierende Verringerung der empfohlenen Angaben zu den Bindemittelbereichen für die Herstellung von Splittmastixasphalt verbessert die Standfestigkeit der aus solchem Mischgut hergestellten Beläge.

Ausserdem sollte für eine Eignungsprüfung empfohlen werden, nicht nur die Sandkomponente zu wechseln sondern jeweils auch einen Filler mit schwach sowie mit stark versteifender Wirkung zu verwenden.

Die gemäss Schweizer Norm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", empfohlenen Richtwertbereiche für die Bindemitteldosierung sind zu hoch angesetzt für Splittmastixasphalte, wenn die in der Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung", angegebenen Bereiche der Korngrössenverteilung sowie Anforderungen an andere physikalische Kennwerte eingehalten werden sollen.

Beim Vergleich der in den Empfehlungen der Schweizer Norm SN 640 431 b, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung" enthaltenen Richtwertbereiche mit den ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteilen ist eindeutig ersichtlich, dass sowohl für die untersuchten Mischungen des SMA 11 wie auch für die Mischungen des SMA 16 die ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile erheblich unterhalb den unteren Richtwertbereichen liegen. Es spielt dabei grundsätzlich keine Rolle ob der optimale lösliche Bindemittelanteil nach dem Marshall-Verfahren oder gemäss SHRP-Empfehlung mit Gyratorverdichtungen ermittelt wurde, die ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteile der untersuchten Mischungen der Splittmastixasphalte liegen immer unterhalb von den Richtwertbereichen.

Folglich müssen die Richtwertbereiche für die Bindemitteldosierung der verschiedenen SMA-Sorten neu formuliert werden.

Aus den Bestimmungen des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel mit der Marshall- und der Gyratorverdichtung kann gefolgert werden, dass die Verdichtung von bituminösem Mischgut mit dem Marshallverdichtungsgerät nicht so effektiv erfolgt wie mit dem Gyratorverdichtungsgerät. Hier scheint sich die Vermutung zu bestätigen, dass den Mineralstoffen in der Mischung während der Schlagverdichtung nicht genügend Möglichkeit gegeben wird um sich ausreichend drehen und umlagern zu können damit mit der dabei aufgewendeten Verdichtungsenergie ein optimal verdichteter Prüfkörper hergestellt werden kann. Der mit dem Marshallverdichtungsgerät gegenüber dem Gyratorverdichtungsgerät ermittelte höhere Bindemittelgehalt wird notwendig, da er während der stampfenden Verdichtung als Schmiermittel zwischen den Mineralstoffkörnern und zur Füllung der aufgrund der geringeren Verdichtung verbleibenden Hohlräume in bituminösem Mischgut dient.

Daraus ergibt sich, dass bei der Bestimmung des optimalen Gehaltes an löslichem Bindemittel von bituminösem Mischgut mit dem Marshallverdichtungsgerät um so grössere Differenzen gegenüber der Bestimmung mit dem Gyrator gefunden werden je schwerer sich das entsprechende bituminöse Mischgut aufgrund seiner inneren Reibung verdichten lässt.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse der untersuchten Mischungen des SMA 11 sowie des SMA 16 stellt sich heraus, dass zwischen rein mechanischer Optimierung von Mischgut nach dem Marshall-Verfahren wie es heute für Asphaltbeton und Heissmischtrag-schichten angewendet wird und volumetrischer Optimierung von Mischgut signifikante Unterschiede auftreten.

Wird verdichtungswilliges, bituminöses Mischgut auf einer Strassenbaustelle zu einem bituminösen Strassenbelag verarbeitet, muss damit gerechnet werden, dass die Nachverdichtung durch den Verkehr mit der Verdichtungswilligkeit des Mischgutes einhergeht und dadurch die Bildung von Spurrinnen ähnlich begünstigt fortschreitet.

Da sich die Reihenfolge der Mischungen zwischen den SMA 11 (Abbildung 158) sowie SMA 16 (Abbildung 159) ändert, ist anzunehmen, dass die geringen Unterschiede bei den löslichen Bindemittelanteilen der Filler-Bindemittel-Kombinationen einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse der bleibenden Deformation der Prüfkörper nehmen.

Solche Einflüsse der Filler-Bindemittel-Kombinationen auf die bleibenden Deformationen bei 60 °C (Spurrinnentiefe) sollten in einer separaten Forschungsarbeit ermittelt werden.

Zu den Bestimmungen der Spaltzugfestigkeiten mit der Spaltzugprüfung wird aufgrund des Literaturstudiums - mindestens für Asphaltbeton und Heissmischtragschichten, wie auch für die in diesem Forschungsauftrag untersuchten Mineralmischungen - eine Beziehung zwischen der Spaltzugfestigkeit und der Rohdichte als sehr wahrscheinlich angenommen. Auch der Einfluss des bituminösen Mörtels spiegelt sich wider in den Resultaten der Spaltzugprüfung. Diese Thesen müssen jedoch in separaten, folgenden Forschungsarbeiten abgeklärt werden.

Die Behauptung der Nachverdichtung durch den Verkehr und die dadurch rasch gebildeten Spurrinnen muss in einer folgenden Forschungsarbeit untersucht und bestätigt werden.

Dies sind klar erkennbare Massnahmen aus dieser Forschungsarbeit, welche am ehesten dazu beitragen die in der Praxis entstehenden Probleme zu reduzieren und somit zu wesentlichen volkswirtschaftlich relevanten Kosteneinsparungen führen.

---

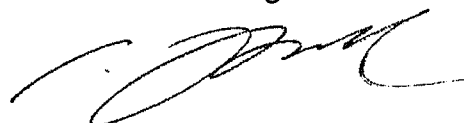
Dübendorf, 9.11.1998

Der Sachbearbeiter:



O. Neubauer

EMPA Dübendorf  
Strassenbau, Abdichtungen  
Der Abteilungsleiter:



Dr. M. N. Partl

## 18 VERZEICHNIS DER LITERATUR

- Literatur 1 Rundlaufversuch Nr. 6, "Zementstabilisierte Fundationsschichten aus Asphaltgranulat und Kiessand unter dünnen bituminösen Deckschichten", 2000
- Literatur 2 F. de Quervain, Technische Gesteinskunde, 1967, Birkhäuser Verlag, Basel
- Literatur 3 M.N. Partl, EMPA Dübendorf, Ted S. Vinson, R. Gary Hicks and Krey Younger, Performance-Related Testing of Stone Mastic Asphalt, Dept. of Civil Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, 1994
- Literatur 4 M.E. Nunn, Evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA): A High Stability Wearing Course Material, TRL Project Report 65
- Literatur 5 Kevin Stuart, Fed. Highway Admin., Walaa S. Mogawer, Effect of Coarse Aggregate Content on Stone Matrix Asphalt (SMA) Durability and Low-Temperature Cracking, University of Massachusetts Dartmouth, Transportation Research Board 74<sup>th</sup> Annual Meeting January 22-28, 1995, Washington D.C.
- Literatur 6 Gerald Reinke, Gail Jensen, Design and Construction of SMA Pavements in Wisconsin, Mathy Construction Company, Onalaska, WI, January 10, 1996, TRB Meeting, 1996
- Literatur 7 Donald Watson, David Jared, Summary of Georgia's Experience with Stone Matrix Asphalt Mixes, Georgia Dept. of Transportation, Office of Materials and Research, 1996, TRB Meeting
- Literatur 8 E. Ray Brown, John E. Haddock, Characterisation of Stone Matrix Asphalt Mortars, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, AL 36839 USA, 1996
- Literatur 9 James A. Scherocman, The Construction and Performance of Stone Mastic Asphalt Pavements in the United States, Consulting Engineer, Cincinnati, Ohio 45249 USA, 1996
- Literatur 10 Louw, C.J. Semmelink, B.M.J.A. Verhaeghe, Development of Stone Mastic Asphalt, Design Method for South African Conditions, L. Transportek, CSIR, Pretoria, South Afrika, 1996
- Literatur 11 N. Kläntzchi, P. Lienemann, P. Richner, H. Vonmont, Elementaranalytik: Instrumenteller Nachweis und Bestimmung von Elementen und deren

- 
- Verbindungen, Akad. Verl. Heidelberg; Berlin; Oxford: Spektrum-Analytik (ISBN 3-86025-13-1) , 1996
- Literatur 12 O. Neubauer, Study of Selected Parameters Relevant for Gyrotory Compaction, EMPA Dübendorf, Report held on International Workshop on the Use of the Gyrotory Shear Compactor, Nantes 1996
- Literatur 13 M.N. Partl, O. Neubauer, Verdichtbarkeit von Walzasphalt im Gyrator, Einfluss von Wärmealterung und wiederholter Verdichtung, EMPA Dübendorf, 1997
- Literatur 14 J.C. Nicholls, Road trials of Stone Mastic Asphalt and other thin surfacings, TRL Report 314, 1998
- Literatur 15 E.R. Brown and L.A. Cooley, Jr., Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements, NCHRP Report 425, Part 1: Summary of Research Results Nat. Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL, 1999
- Literatur 16 E.R. Brown and L.A. Cooley, Jr., J.E. Haddock, C.S. Hughes, and T.A. Lynn, Part 2: Mixture Design Method, Construction Guidelines, and Quality Control Procedures, July 1999
- Literatur 17 Asphalt Institute, Superpave Level 1 Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), 1995
- Literatur 18 R.M. Anderson, Asphalt Institute, Lexington, H.U. Bahia, Evaluation and Selection of Aggregate Gradations for Asphalt Mixtures Using Superpave, University of Wisconsin, Transportation Research Board 1583
- Literatur 19 Elk Richter, Spaltzugprüfung – eine einfache Methode zur Beurteilung der Flexibilität des Asphaltes, Bitumen 4/99, 1999
- Literatur 20 S. Gonzalez Lakehal, M.N. Partl, Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Heissmischtragschichten, EMPA Dübendorf, 2000

**19 VERZEICHNIS DER TABELLEN**

Tabelle 1	Tabellarische Übersicht über das Prüfprogramm für die unterschiedlich verdichteten Prüfkörper sowie Spezialuntersuchungen beim Optimum der löslichen Bindemittelanteile	14
Tabelle 2	Filler, Gehalt an Karbonaten	19
Tabelle 3	Filler, Petrografische Beschaffenheit	20
Tabelle 4	Filler, Tonminerale, Glimmer, Verunreinigungen, Montmorillonit	20
Tabelle 5	Filler, wasserlösliche Salze und freier Kalk, freies CaO	21
Tabelle 6	Filler, anorganische Verunreinigungen	21
Tabelle 7	Filler, organische Verunreinigungen	21
Tabelle 8	Filler, Sieb- und Sedimentationsanalyse, Anteil < 0,063 mm	23
Tabelle 9	Filler, Tonminerale, Glimmer	24
Tabelle 10	Filler, Dichte bei 25 °C, Hohlraumgehalt nach Rigden	24
Tabelle 11	Filler, Hohlraumgehalt nach Rigden	25
Tabelle 12	Filler, Charakterisierung von Gemischen aus Filler und Bitumen	25
Tabelle 13	Filler, Beurteilung der versteifenden Wirkung	26
Tabelle 14	Filler, Volumenänderung von Prüfkörpern nach Wasserlagerung	26
Tabelle 15	Filler, Volumenänderung nach Wasserlagerung	27
Tabelle 16	Korngrößenverteilung, Brechsand und Splitte	28
Tabelle 17	Dichte der Mineralstoffe, mit Toluol bestimmt	29
Tabelle 18	Eigenschaften der Bindemittel, Makroskopische Beurteilung	30
Tabelle 19	Eigenschaften der Bindemittel, Massgebende Werte	30
Tabelle 20	Prüfungen, die ausschliesslich an Olexobit SMA durchgeführt wurden	31
Tabelle 21	Prozentuale Zusammensetzung der Mineralstoffe für SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA und für SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	32
Tabelle 22	Dichte der Mineralstoffgemische von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	33
Tabelle 23	Prozentuale Zusammensetzung der Mineralstoffe für SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	33
Tabelle 24	Dichte der Mineralstoffgemische von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	34
Tabelle 25	Mischtemperaturen für die verwendeten Bindemittel	35
Tabelle 26	Übersicht über untersuchte Mischungen und deren lösliche Bindemittelanteile. Bis 4,0 Masse-% lösliche Bindemittelanteile wurden die Mischungen ausschliesslich für Marshallprüfungen hergestellt und untersucht.	41
Tabelle 27	Einzuhaltende Aufbereitungs- und Einbautemperaturen nach Schweizer Norm SN 640 431 b, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"	43
Tabelle 28	Verwendete Verdichtungstemperaturen für Marshall- sowie Gyrotorprüfkörper	43
Tabelle 29	Sollwertbereiche der Korngrößenverteilung gemäss Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"	44

Tabelle 30	Korngrössenverteilung, Sollwerte der angestrebten Siebkurven und Bereiche der zulässigen Abweichungen der Mittelwerte der Siebkurven vom Sollwert des SMA 11 sowie des SMA 16 gemäss Schweizer Norm SN 640 432 a, "Splittmastixasphalt-Deckschichten, Konzeption, Anforderungen, Ausführung"	45
Tabelle 31	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	47
Tabelle 32	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	48
Tabelle 33	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	48
Tabelle 34	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	49
Tabelle 35	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	49
Tabelle 36	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	50
Tabelle 37	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{ini}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	51
Tabelle 38	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{des}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	51
Tabelle 39	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{max}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	51
Tabelle 40	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{ini}$ , SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	52
Tabelle 41	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{des}$ , SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	52
Tabelle 42	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{max}$ , SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	53
Tabelle 43	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{ini}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	53
Tabelle 44	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{des}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	54
Tabelle 45	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{max}$ , SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	54
Tabelle 46	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{ini}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	55
Tabelle 47	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{des}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	55
Tabelle 48	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{max}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	55
Tabelle 49	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{ini}$ , SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	56
Tabelle 50	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{des}$ , SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	57
Tabelle 51	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{max}$ , SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	57
Tabelle 52	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{ini}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	58
Tabelle 53	Mittelwerte der Gyratorkennwerte bei $N_{des}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	58

Tabelle 54	Mittelwerte der Gyrator Kennwerte bei $N_{max}$ , SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	58
Tabelle 55	K-Wert von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, gemäss prEN 12697-10, jeweils berechnet zwischen 1 und 204 Umdrehungen sowie 1 und 100 und 1 und 20 Umdrehungen	84
Tabelle 56	K-Wert, gemäss prEN 12697-10, von SMA 11-Mischungen jeweils berechnet zwischen 1 und 204 Umdrehungen	84
Tabelle 57	K-Wert, gemäss prEN 12697-10, von SMA 16-Mischungen jeweils berechnet zwischen 1 und 204 Umdrehungen	84
Tabelle 58	SMA 11, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllt werden.	87
Tabelle 59	SMA 16, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen der Schweizer Norm an Marshallkennwerte erfüllt werden.	88
Tabelle 60	SMA 11, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyrator Kennwerte erfüllt werden.	98
Tabelle 61	SMA 16, tabellarische Zusammenfassung der Bindemittelbereiche innerhalb derer die Anforderungen gemäss SHRP-Methodologie an die Gyrator Kennwerte erfüllt werden.	98
Tabelle 62	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	104
Tabelle 63	Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	104
Tabelle 64	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	105
Tabelle 65	Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	105
Tabelle 66	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	105
Tabelle 67	Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	105
Tabelle 68	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	106
Tabelle 69	Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	106
Tabelle 70	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	106
Tabelle 71	Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	106
Tabelle 72	Mittelwerte der Marshallprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	107
Tabelle 73	Mittelwerte der Gyratorprüfkörper von SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	107
Tabelle 74	Untersuchte SMA-Mischungen, optimale lösliche Bindemittelanteile sowie Differenzen zwischen dem ermittelten optimalen löslichen Bindemittelanteil durch Marshall- und Gyratorprüfungen	115
Tabelle 75	Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	119
Tabelle 76	Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	119

Tabelle 77	Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	119
Tabelle 78	Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	120
Tabelle 79	Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	120
Tabelle 80	Bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntiefe), SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	120
Tabelle 81	SMA 11, Marshall- und Spurrinntest-Kennwerte	122
Tabelle 82	SMA 16, Marshall- und Spurrinntest-Kennwerte	122
Tabelle 83	SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C	129
Tabelle 84	SMA11 mit Filler Zeobit und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C	129
Tabelle 85	SMA11 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C	129
Tabelle 86	SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C	130
Tabelle 87	SMA16 mit Filler Zeobit und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C	130
Tabelle 88	SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei 0 °C	130
Tabelle 89	SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C	132
Tabelle 90	SMA11 mit Filler Zeobit und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C	133
Tabelle 91	SMA11 mit Filler Netstal und 4,7 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C	133
Tabelle 92	SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C	133
Tabelle 93	SMA16 mit Filler Zeobit und 4,5 Masse-% Bitumen 50/70, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C	134
Tabelle 94	SMA16 mit Filler Netstal und 4,5 Masse-% Olexobit SMA, Kraft und vertikale Verformung bis zum Bruch der Prüfkörper (Spaltzugprüfung) bei -10 °C	134
Tabelle 95	Spaltzugprüfungen des SMA 11, Mittelwerte der Steigung der Kurvenabschnitte	136
Tabelle 96	Spaltzugprüfungen des SMA 16, Mittelwerte der Steigung der Kurvenabschnitte	136
Tabelle 97	SMA11 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei 0 °C	138

---

Tabelle 98	SMA16 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei 0 °C	138
Tabelle 99	SMA11 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei -10 °C	138
Tabelle 100	SMA16 mit allen untersuchten Filler-Bitumen-Kombinationen, Spaltzugfestigkeit bei -10 °C	139
Tabelle 101	berechnete Dichte des Mischgutes von SMA 11	166
Tabelle 102	berechnete Dichte des Mischgutes von SMA 16	166

## 20 VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1	Schematische Darstellung der Kombinationen von Bindemittel und Filler sowie der Optimierung der löslichen Bindemittelanteile mittels Marshall-Stabilität	13
Abbildung 2	Korngrößenverteilung, Filler Netstal	23
Abbildung 3	Korngrößenverteilung, Filler Zeobit	23
Abbildung 4	Korngrößenverteilung, Eigenfiller	23
Abbildung 5	Versteifende Wirkung, Filler Netstal	25
Abbildung 6	Versteifende Wirkung, Filler Zeobit	25
Abbildung 7	Versteifende Wirkung, Eigenfiller	25
Abbildung 8	Volumen-änderung, Filler Netstal	26
Abbildung 9	Volumen-änderung, Filler Zeobit	26
Abbildung 10	Volumen-änderung, Eigenfiller	26
Abbildung 11	Rohdichte während Volumenänderung, Filler Netstal	27
Abbildung 12	Rohdichte während Volumenänderung, Filler Zeobit	27
Abbildung 13	Rohdichte während Volumenänderung, Eigenfiller	27
Abbildung 14	Korngrößenverteilungen der verwendeten Mineralstoffe	29
Abbildung 15	Korngrößenverteilung, Grenzkurven der SN 640 432 (Sollwertbereich) und angestrebte Korngrößenverteilung aufgrund der berechneten Summe der prozentualen Kornfraktionen für SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA wie auch für SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	32
Abbildung 16	Korngrößenverteilung, Grenzkurven der SN 640 432 (Sollwertbereich) und angestrebte Korngrößenverteilung aufgrund der berechneten Summe der prozentualen Kornfraktionen für SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 bzw. Olexobit SMA sowie für SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	34
Abbildung 17	Marshallverdichtungsgerät	37
Abbildung 18	herausgehobene Führungsstange mit Fallkörper, Bodenstück und Marshall-Einstampfform	38
Abbildung 19	Herstellen und Verdichten von Prüfkörpern mit dem Gyrator	39
Abbildung 20	Gyrator Verdichtungsform	40
Abbildung 21	Sollwerte der Korngrößenverteilung mit Sollwertbereich SMA 11 gemäss Schweizer Norm SN 640 432 und oberen und unteren Grenzen für den Mittelwert	45
Abbildung 22	Sollwerte der Korngrößenverteilung mit Sollwertbereich für SMA 16 gemäss Schweizer Norm SN 640 432 und oberen und unteren Grenzen für den Mittelwert	45
Abbildung 23	SMA 11 mit Filler Netstal, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte	46
Abbildung 24	SMA 16 mit Filler Netstal, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte	46
Abbildung 25	SMA 11 mit Filler Zeobit, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte	46
Abbildung 26	SMA 16 mit Filler Zeobit, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte	46
Abbildung 27	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte	46

Abbildung 28	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Siebanalysen, Maximal- und Minimalwerte	46
Abbildung 29	Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	52
Abbildung 30	Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile (Bdm); SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	52
Abbildung 31	Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	53
Abbildung 32	Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	53
Abbildung 33	Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	54
Abbildung 34	Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	54
Abbildung 35	Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	56
Abbildung 36	Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	56
Abbildung 37	Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	57
Abbildung 38	Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	57
Abbildung 39	Höhen der Prüfkörper nach dem Verdichten mit 204 Umdrehungen in Funktion der löslichen Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	59
Abbildung 40	Höhen der Prüfkörper in Funktion der Anzahl Umdrehungen für verschiedene lösliche Bindemittelanteile; SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA	59
Abbildung 41	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	62
Abbildung 42	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	62
Abbildung 43	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	62
Abbildung 44	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	62
Abbildung 45	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	62
Abbildung 46	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Stabilität-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	62
Abbildung 47	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Fliesen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	64

Abbildung 48	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Fliessen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	64
Abbildung 49	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Fliessen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	64
Abbildung 50	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Fliessen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	64
Abbildung 51	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Fliessen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	64
Abbildung 52	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Fliessen-Marshall, Trendlinie und Grenze gemäss SN 640 431	64
Abbildung 53	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431	66
Abbildung 54	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431	66
Abbildung 55	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431	66
Abbildung 56	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431	66
Abbildung 57	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431	66
Abbildung 58	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt-Marshall, Trendlinie und Grenzen gemäss SN 640 431	66
Abbildung 59	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie	67
Abbildung 60	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie	67
Abbildung 61	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie	67
Abbildung 62	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie	67
Abbildung 63	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie	67
Abbildung 64	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA und Hohlraumgehalt HMM und Trendlinie	67
Abbildung 65	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	68
Abbildung 66	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	68
Abbildung 67	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	68
Abbildung 68	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	69
Abbildung 69	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	69
Abbildung 70	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	69
Abbildung 71	SMA 11 und SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	70
Abbildung 72	SMA 11 und SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	70
Abbildung 73	SMA 11 und SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	70

Abbildung 74	SMA 11, Filler Netstal mit Bitumen 50/70, Filler Zeobit mit Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal mit Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	71
Abbildung 75	SMA 16, Filler Netstal mit Bitumen 50/70, Filler Zeobit mit Bitumen 50/70 sowie Filler Netstal mit Olexobit SMA Hohlraumfüllungsgrad HFB und Trendlinie	71
Abbildung 76	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper	74
Abbildung 77	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper	74
Abbildung 78	SMA 11 mit Filler Netstal mit Olexobit SMA, Höhe der Prüfkörper	74
Abbildung 79	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper	74
Abbildung 80	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Höhe der Prüfkörper	74
Abbildung 81	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Höhe der Prüfkörper	74
Abbildung 82	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Rohdichte	75
Abbildung 83	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Rohdichte	75
Abbildung 84	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Rohdichte	75
Abbildung 85	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Rohdichte	75
Abbildung 86	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Rohdichte	75
Abbildung 87	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Rohdichte	75
Abbildung 88	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt	76
Abbildung 89	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt	76
Abbildung 90	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt	76
Abbildung 91	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt	76
Abbildung 92	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt	76
Abbildung 93	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt	76
Abbildung 94	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM	77
Abbildung 95	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM	77
Abbildung 96	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM	77
Abbildung 97	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM	78
Abbildung 98	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM	78
Abbildung 99	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM	78
Abbildung 100	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB	78
Abbildung 101	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB	78
Abbildung 102	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB	78
Abbildung 103	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB	79
Abbildung 104	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB	79
Abbildung 105	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB	79
Abbildung 106	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtung	80
Abbildung 107	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtung	80
Abbildung 108	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtung	80
Abbildung 109	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtung	81
Abbildung 110	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtung	81
Abbildung 111	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtung	81

Abbildung 112	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand	85
Abbildung 113	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand	85
Abbildung 114	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtungswiderstand	85
Abbildung 115	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand	85
Abbildung 116	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Verdichtungswiderstand	85
Abbildung 117	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Verdichtungswiderstand	85
Abbildung 118	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	89
Abbildung 119	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	89
Abbildung 120	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	89
Abbildung 121	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	90
Abbildung 122	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	90
Abbildung 123	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom optimalen löslichen Bindemittelanteil aufgrund der Marshallkennwerte	90
Abbildung 124	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plaziert werden kann	99
Abbildung 125	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plaziert werden kann	99
Abbildung 126	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plaziert werden kann	99
Abbildung 127	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plaziert werden kann	100
Abbildung 128	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plaziert werden kann	100
Abbildung 129	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Bereiche vom löslichen Bindemittelanteil innerhalb deren der optimale aufgrund der Gyratorkennwerte plaziert werden kann	100
Abbildung 130	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator	107
Abbildung 131	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator	107
Abbildung 132	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator	107
Abbildung 133	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator	108
Abbildung 134	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator	108

Abbildung 135	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt Marshall und Hohlraumgehalt Gyrator	108
Abbildung 136	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator	110
Abbildung 137	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator	110
Abbildung 138	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator	110
Abbildung 139	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator	111
Abbildung 140	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator	111
Abbildung 141	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumgehalt HMM Marshall und Hohlraumgehalt HMM Gyrator	111
Abbildung 142	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator	112
Abbildung 143	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator	112
Abbildung 144	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator	112
Abbildung 145	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator	113
Abbildung 146	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator	113
Abbildung 147	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Hohlraumfüllungsgrad HFB Marshall und Hohlraumfüllungsgrad HFB Gyrator	113
Abbildung 148	Verdichtungsgerät zur Herstellung von Prüfkörpern für die Durchführung des Spurrinntestes mit Ornièreur	117
Abbildung 149	Ansicht des Spurrinntestes mit Ornièreur zur Durchführung und Bestimmung der Spurrinntiefe von Prüfkörpern	118
Abbildung 150	SMA 11 mit Filler Netstal und 4,8 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinntiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert	121
Abbildung 151	SMA 11 mit Filler Zeobit und 4,7 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinntiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert	121
Abbildung 152	SMA 11 mit Filler Netstal und 4,6 Masse-% Olexobit SMA, Spurrinntiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert	121
Abbildung 153	SMA 16 mit Filler Netstal und 4,6 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinntiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert	121
Abbildung 154	SMA 16 mit Filler Zeobit und 5,0 Masse-% Bitumen 50/70, Spurrinntiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert	121
Abbildung 155	SMA 16 mit Filler Netstal und 4,4 Masse-% Olexobit SMA, Spurrinntiefe in Funktion der Anzahl Zyklen, Einzel- und Mittelwert	121
Abbildung 156	SMA 11, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntest nach 30'000 Zyklen) lösliche Bindemittelanteile, Spurrinntiefe und Hohlraumgehalt der Prüfkörper	123
Abbildung 157	SMA 16, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntest nach 30'000 Zyklen) lösliche Bindemittelanteile, Spurrinntiefe und Hohlraumgehalt der Prüfkörper	123
Abbildung 158	SMA 11, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntest nach 30'000 Zyklen); Spurrinntiefe, Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper, Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper und Dichte des Mischgutes in Funktion der löslichen Bindemittelanteile	124

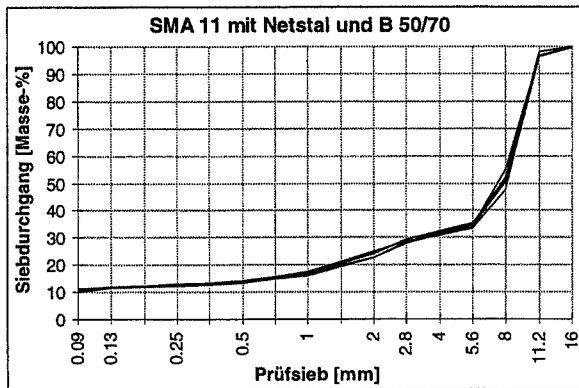
Abbildung 159	SMA 16, bleibende Deformation bei 60 °C (Spurrinntest nach 30'000 Zyklen); Spurrinntiefe, Hohlraumgehalt der Gyratorprüfkörper, Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper und Dichte des Mischgutes in Funktion der löslichen Bindemittelanteile	124
Abbildung 160	SMA 11, Spurrinntiefe bei 60 °C in Funktion der Anzahl Zyklen	125
Abbildung 161	SMA 16, Spurrinntiefe bei 60 °C in Funktion der Anzahl Zyklen	125
Abbildung 162	SMA 11, Steigung ( $\text{tg } \alpha$ ) in Funktion der Anzahl Zyklen	126
Abbildung 163	SMA 16, Steigung ( $\text{tg } \alpha$ ) in Funktion der Anzahl Zyklen	126
Abbildung 164	Eingebauter Prüfkörper für die Durchführung der Spaltzugprüfung	127
Abbildung 165	Prinzipskizze zur Durchführung der Spaltzugprüfung	128
Abbildung 166	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	131
Abbildung 167	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	131
Abbildung 168	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	131
Abbildung 169	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	131
Abbildung 170	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm	132
Abbildung 171	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm	132
Abbildung 172	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	135
Abbildung 173	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	135
Abbildung 174	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	135
Abbildung 175	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70 Kraft-Verformungs-Diagramm	135
Abbildung 176	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm	135
Abbildung 177	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA Kraft-Verformungs-Diagramm	135
Abbildung 178	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte	136
Abbildung 179	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte	136
Abbildung 180	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte	137
Abbildung 181	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Steigung der Kurvenabschnitte	137
Abbildung 182	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Steigung der Kurvenabschnitte	137
Abbildung 183	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Steigung der Kurvenabschnitte	137
Abbildung 184	SMA 11, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei 0 °C	139
Abbildung 185	SMA 11, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei -10 °C	139
Abbildung 186	SMA 16, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei 0 °C	140
Abbildung 187	SMA 16, Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit bei -10 °C	140
Abbildung 188	SMA 11, optimale lösliche Bindemittelanteile mit Marshall-Methode sowie mit Gyrator-Methode ermittelt (vgl. Tabelle 60)	143

---

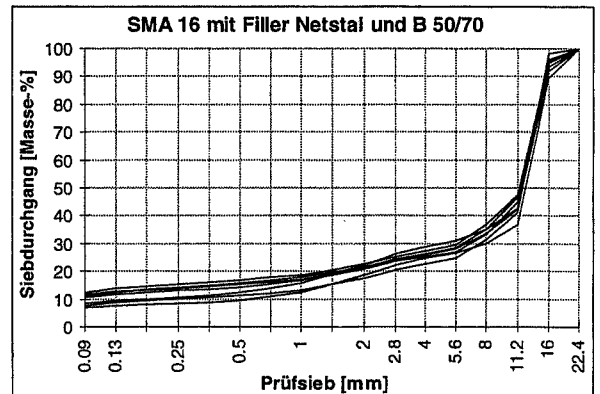
Abbildung 189	SMA 16, optimale lösliche Bindemittelanteile mit Marshall-Methode sowie mit Gyrator-Methode ermittelt (vgl. Tabelle 61)	143
Abbildung 190	SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen	162
Abbildung 191	SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen	162
Abbildung 192	SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen	162
Abbildung 193	SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen	162
Abbildung 194	SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Korngrößenverteilungen der Mischungen	162
Abbildung 195	SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Korngrößenverteilungen der Mischungen	162
Abbildung 196	Dichte des Mischgutes SMA 11 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	163
Abbildung 197	Dichte des Mischgutes SMA 11 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Olexobit SMA	164
Abbildung 198	Dichte des Mischgutes SMA 11 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	164
Abbildung 199	Dichte des Mischgutes SMA 16 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Bitumen 50/70	164
Abbildung 200	Dichte des Mischgutes SMA 16 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Olexobit SMA	165
Abbildung 201	Dichte des Mischgutes SMA 16 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70	165

## 21 ANHANG

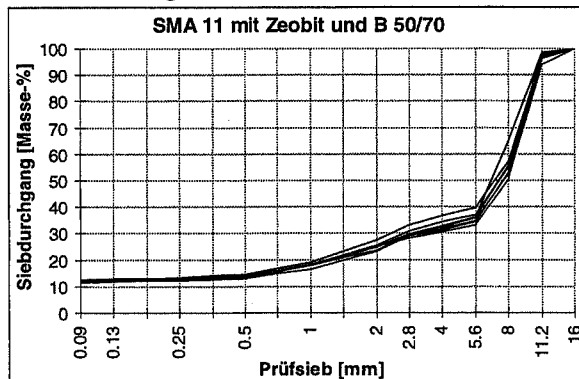
### 21.1 Korngrößenverteilungen von den untersuchten Mischungen



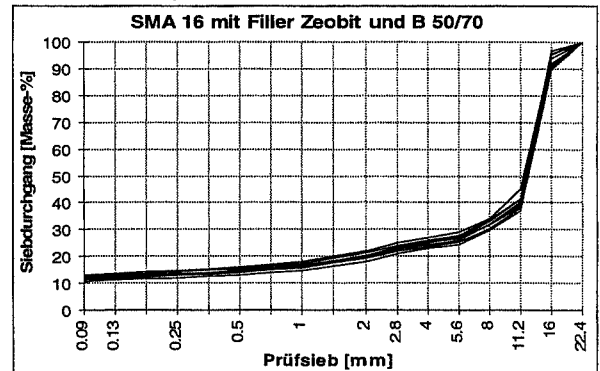
**Abbildung 190** SMA 11 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen



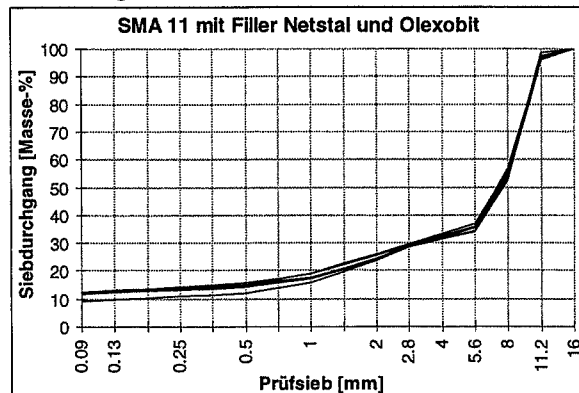
**Abbildung 191** SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen



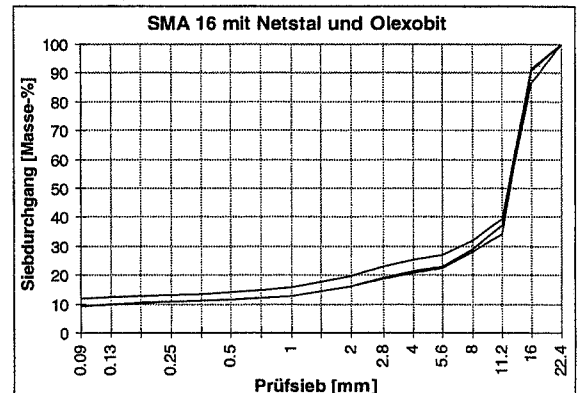
**Abbildung 192** SMA 11 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen



**Abbildung 193** SMA 16 mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70, Korngrößenverteilungen der Mischungen



**Abbildung 194** SMA 11 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Korngrößenverteilungen der Mischungen



**Abbildung 195** SMA 16 mit Filler Netstal und Olexobit SMA, Korngrößenverteilungen der Mischungen

## 21.2 Ausgewählte Berechnungsmethoden von Mischgut- und Prüfkörper-Kennwerten

### 21.2.1 Dichte von Mischgut berechnen

Die Dichte des Mischgutes wird gemäss Schweizer Norm SN 671 965 a bestimmt oder berechnet aus den einzeln bestimmten Dichten der Mineralstoffkomponenten und des verwendeten Bindemittels.

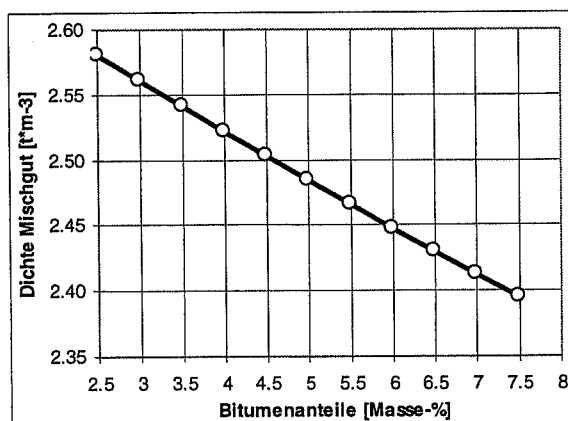
$$\text{Dichte Mischgut} = \frac{100}{\frac{\% - \text{Anteil Bitumen}}{\text{Dichte Bitumen}} + \frac{\% - \text{Anteil Mineral}}{\text{Dichte Mineral}}} = \text{t} \cdot \text{m}^{-3}$$

Die Dichte des Mischgutes ist jeweils berechnet worden aus der Dichte des Bindemittels und den mit Toluol bestimmten Rohdichten der Mineralstoffkomponenten.

Dichte Mischgut in  $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$  =

$$\frac{100}{\frac{\% - \text{Anteil Bitumen}}{\text{Dichte Bitumen}} + \frac{\% - \text{Anteil Mineral 1}}{\text{Dichte Mineral 1}} + \frac{\% - \text{Anteil Mineral 2}}{\text{Dichte Mineral 2}} + \dots + \frac{\% - \text{Anteil Mineral n}}{\text{Dichte Mineral n}}}$$

Mineral 1 bis Mineral n stellen die numerierten Mineralstoffkomponenten dar, welche für die Mischungen verwendet wurden.

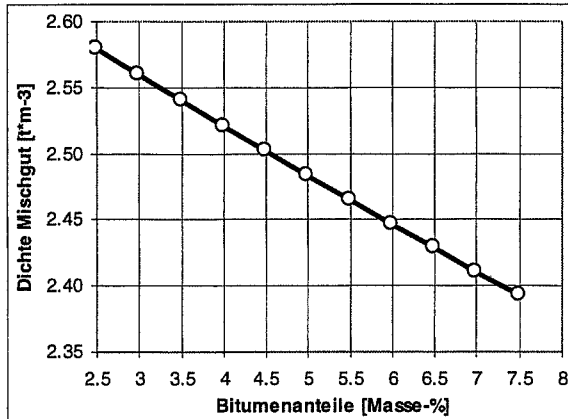


**SMA 11**

Dichte Bitumen 50/70  $1,028 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

Dichte Mineralgemisch (Filler Netstal)  $2,684 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

**Abbildung 196** Dichte des Mischgutes SMA 11 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

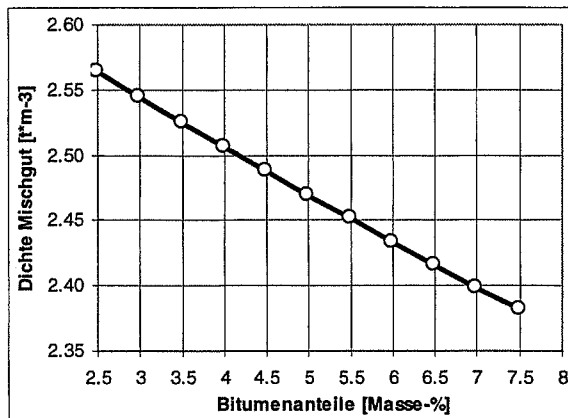


**SMA 11**

Dichte Olexobit SMA 1,024 t·m<sup>-3</sup>

Dichte Mineralgemisch (Filler Netstal) 2,684 t·m<sup>-3</sup>

**Abbildung 197** Dichte des Mischgutes SMA 11 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Olexobit SMA

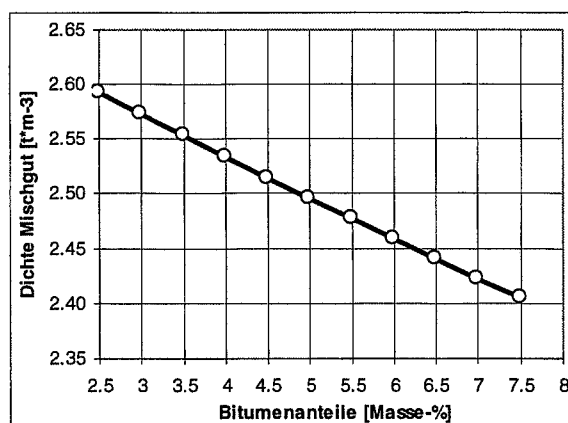


**SMA 11**

Dichte Bitumen 50/70 1,028 t·m<sup>-3</sup>

Dichte Mineralgemisch (Filler Zeobit) 2,666 t·m<sup>-3</sup>

**Abbildung 198** Dichte des Mischgutes SMA 11 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

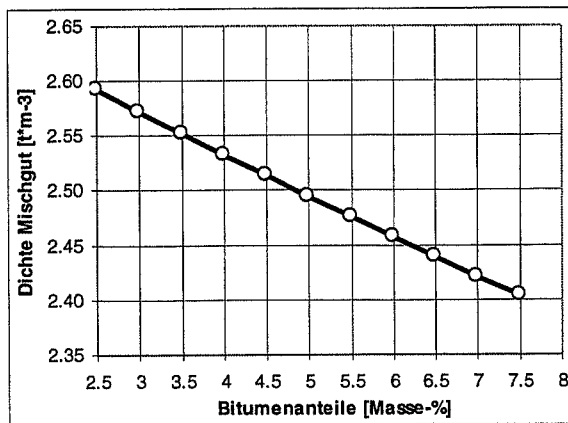


**SMA 16**

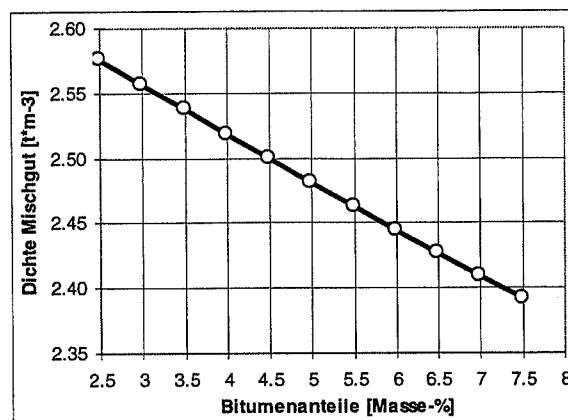
Dichte Bitumen 50/70 1,028 t·m<sup>-3</sup>

Dichte Mineralgemisch (Filler Netstal) 2,698 t·m<sup>-3</sup>

**Abbildung 199** Dichte des Mischgutes SMA 16 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Bitumen 50/70

**SMA 16**

Dichte Olexobit SMA

1,024 t·m<sup>-3</sup>Dichte Mineralgemisch  
(Filler Netstal)2,698 t·m<sup>-3</sup>**Abbildung 200** Dichte des Mischgutes SMA 16 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Netstal und Olexobit SMA**SMA 16**

Dichte Bitumen 50/70

1,028 t·m<sup>-3</sup>Dichte Mineralgemisch  
(Filler Zeobit)2,678 t·m<sup>-3</sup>**Abbildung 201** Dichte des Mischgutes SMA 16 in Abhängigkeit der löslichen Bindemittelanteile mit Filler Zeobit und Bitumen 50/70

**Dichte berechnet, SMA 11**

Filler	Netstal	Netstal	Zeobit
Bindemittel	Bitumen 50/70	Olexobit SMA	Bitumen 50/70
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>
2,5	2,580	2,579	2,564
3	2,560	2,560	2,544
3,5	2,541	2,540	2,525
4	2,522	2,521	2,506
4,5	2,503	2,502	2,488
5	2,484	2,483	2,469
5,5	2,466	2,464	2,451
6	2,447	2,446	2,433
6,5	2,430	2,428	2,416
7	2,412	2,410	2,398
7,5	2,395	2,393	2,381

**Tabelle 101** berechnete Dichte des Mischgutes von SMA 11**Dichte berechnet, SMA 16**

Filler	Netstal	Netstal	Zeobit
Masse-%	Bitumen 50/70	Olexobit SMA	Bitumen 50/70
Masse-%	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>	t·m <sup>-3</sup>
2,5	2,593	2,592	2,579
3	2,573	2,572	2,560
3,5	2,553	2,552	2,540
4	2,533	2,532	2,521
4,5	2,514	2,513	2,502
5	2,495	2,494	2,483
5,5	2,477	2,475	2,464
6	2,458	2,457	2,446
6,5	2,440	2,439	2,428
7	2,423	2,421	2,410
7,5	2,405	2,403	2,393

**Tabelle 102** berechnete Dichte des Mischgutes von SMA 16**21.2.2 Rohdichte der Prüfkörper bestimmen**

Von jedem Prüfkörper die Rohdichte bestimmen. Dazu die trockene Masse eines jeden Prüfkörpers bestimmen und durch sein Volumen (mit allen eingeschlossenen Hohlräumen) dividieren.

Für die Bestimmung des Volumens wird des Archimedischen Prinzip angewendet. Dieses besagt: Wird ein Körper in eine Flüssigkeit getaucht, dann verliert er scheinbar so viel an Masse, wie das von ihm verdrängte Volumen der Flüssigkeit wiegt (= Auftrieb).

Die Rohdichte eines Prüfkörpers berechnet sich nach der Formel

$$\frac{m}{m_3 - m_2} = \rho_R \text{ [t}\cdot\text{m}^{-3}] = \text{[t}\cdot\text{m}^{-3}]$$

$m$  = trockene Masse des Prüfkörpers

$m_2$  = Masse des Prüfkörpers unter Wasser

$m_3$  = Masse des Prüfkörpers in Luft nach Tauchwägung

unter der Annahme, dass die Dichte des Wassers =  $1 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$  ist. Diese Annahme führt in den meisten Fällen zu ausreichend genauen Resultaten. Trifft diese Annahme nicht zu, dann muss  $m$  mit der Dichte der verwendeten Flüssigkeit multipliziert werden.

### 21.2.3 Hohlraumgehalt der Prüfkörper

Der Hohlraumgehalt eines Prüfkörpers berechnet sich nach der Formel

$$\text{Hohlraumgehalt} = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\text{Rohdichte}}{\text{Dichte}} \right) = \text{HG [Vol-\%]}$$

Damit der Hohlraumgehalt eines Prüfkörpers berechnet werden kann, ist es unumgänglich die Dichte des Mischgutes zu kennen. Diese Bestimmung geschieht nach Schweizer Norm SN 671 965 a.

Ausgelöst durch die Erkenntnisse des SHRP-Programmes, wurden in jüngster Zeit verschiedene Untersuchungen zum Splittmastixasphalt (SMA) durchgeführt. Die nachstehende Liste, Kapitel 18, Verzeichnis der Literatur enthält unter anderem eine Auswahl dieser Arbeiten.

### 21.2.4 Hohlraumgehalt HMM von Prüfkörpern

Der Hohlraumgehalt HMM und Hohlraumfüllungsgrad HFB von Prüfkörpern wird berechnet gemäss Beschreibung unter Schweizer Norm **SN 640 431 b**, "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung".

In dieser Norm ist unter "**N. Anhang, Ziffer 76, Hohlraumgehalt des bindemittelfrei gedachten Mineralstoffgerüsts HMM, Hohlraumfüllungsgrad mit Bitumen HFB**" geschrieben:

Der bindemittelfrei gedachte Hohlraumgehalt im Mineralstoffgerüst HMM berechnet sich nach folgender Formel:

$$HMM = HM + V_{LB} = \left(1 - \frac{\rho_{RM}}{\rho}\right) \cdot 100 + \frac{LB}{\rho_B} \cdot \rho_{RM}$$

### 21.2.5 Hohlraumfüllungsgrad HFB von Prüfkörpern

Der Hohlraumfüllungsgrad mit Bindemittel HFB berechnet sich nach folgender Formel:

$$HFB = \frac{V_{LB}}{HM + V_{LB}} \cdot 100$$

oder

$$HFB = \frac{\frac{LB}{\rho_B} \cdot \rho_{RM}}{\left(1 - \frac{\rho_{RM}}{\rho}\right) \cdot 100 + \frac{LB}{\rho_B} \cdot \rho_{RM}}$$

HM	Hohlraumgehalt der Prüfkörper	[Volumen-%]
LB	Löslicher Bindemittelanteil	[Masse-%]
$V_{LB}$	Volumen des löslichen Bindemittels	[Volumen-%]
$\rho$	Dichte des bituminösen Mischgutes	[t·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_B$	Dichte des Bindemittels	[t·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{RM}$	Rohdichte der Prüfkörper	[t·m <sup>-3</sup> ]

### 21.2.6 $N_{\text{initial}}$ , $N_{\text{design}}$ und $N_{\text{maximal}}$

Wie bei anderen Zusammensetzungen von Belägen werden bituminöse Mischungen nach dem Aufwand für die Verdichtung konzipiert. Auch bei der SHRP-Methodologie ist dies so. Bei der Superpave-Methode wurde der Aufwand für die Verdichtung von bituminösem Mischgut in Funktion der Anzahl Umdrehungen der Gyrator-Verdichtungsform aufgefasst.  $N_{\text{design}}$  wurde zugrunde gelegt um den Aufwand für die Verdichtung zu variieren; denn es wurde angenommen, dass  $N_{\text{des}}$  eine Funktion des Klimas und der Beanspruchung des Belages durch die Höhe des Verkehrsaufkommens ist. Dabei wurde für das Klima eine Temperatur, die als Mittelwert der maximalen Temperaturen von 7 aufeinander folgenden heissesten Tagen der letzten drei Jahre ermittelt wird, berücksichtigt. Die Höhe des Verkehrsaufkommens wird bei der SHRP-Methodologie in ESAL's angegeben.

Die beiden anderen Werte für  $N_{\text{initial}}$  ( $N_{\text{ini}}$ ) und  $N_{\text{maximal}}$  ( $N_{\text{max}}$ ) ergeben sich aus der mathematischen Beziehung zu  $N_{\text{des}}$ . Diese Beziehungen lauten:

$$\text{Log } N_{\text{max}} = 1,10 \cdot \text{log } N_{\text{des}}$$

$$\text{Log } N_{\text{ini}} = 0,45 \cdot \text{log } N_{\text{des}}$$

Die Werte von  $N_{\text{design}}$  für die verschiedenen Klimata und Beanspruchungen des Belages durch die Höhe des Verkehrsaufkommens wurden im SHRP-Projekt ermittelt.

### 21.2.7 Berechnen des Prüfkörpervolumens nach jeder Umdrehung des Gyrators

$$V_m = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4} \cdot 0,001$$

$V_m$  = Prüfkörpervolumen während des Verdichtens

$d$  = Durchmesser der Verdichtungsform

$h$  = Prüfkörperhöhe während des Verdichtens

### 21.2.8 Berechnen der geschätzten Rohdichte der Gyratorprüfkörper

$$\rho_{rR} = \frac{M}{V} \quad [\text{t}\cdot\text{m}^{-3}]$$

$\rho_{rR}$  = geschätzte Rohdichte während des Verdichtens

M = Einwaage des Mischgutes

V = Volumen des Mischgutes in der Verdichtungsform

### 21.2.9 Bestimmen des Prüfkörpervolumens nach der maximalen Anzahl Umdrehungen ( $N_{\max}$ ) des Gyrators

Die Rohdichte ohne paraffinieren der Gyratorprüfkörper wurde bestimmt gemäss SN 671 967 a. Diese Untersuchungsergebnisse werden benötigt, damit der Korrekturfaktor berechnet werden kann für die aus der Höhe des Gyratorprüfkörpers und dem Durchmesser der Verdichtungsform berechnete, geschätzte Rohdichte.

### 21.2.10 Korrekturfaktor für die Rohdichte der Gyratorprüfkörper

Aus der gemessenen Höhe der Prüfkörper und dem Durchmesser der Verdichtungsform ergibt sich mit der Masse des eingewogenen Mischgutes eine rechnerische Rohdichte ( $\rho_{rR}$ ). Diese Rohdichte wird in bezug auf die gemessene Rohdichte ( $\rho_{mR}$ , gemäss SN 671 967 bestimmt) korrigiert entsprechend:

$$\rho_{mR} (N) = C (\rho_{rR}) (N)$$

wobei

$$C = \frac{\rho_{mR} (N_{\max})}{\rho_{rR} (N_{\max})}$$

C = Korrekturfaktor

N = Anzahl Umdrehungen

Verdichtungsbedingungen

$N_{\text{initial}}$	( $N_{\text{ini}}$ )	9	Umdrehungen
$N_{\text{design}}$	( $N_{\text{des}}$ )	126	Umdrehungen
$N_{\text{maximal}}$	( $N_{\text{max}}$ )	204	Umdrehungen

### 21.2.11 Verdichtung und Hohlraumgehalt der Prüfkörper

Die Verdichtung der Prüfkörper in % der Dichte des Mischgutes wird berechnet nach der Formel Rohdichte des Prüfkörpers dividiert durch die Dichte des Mischgutes oder aus der Differenz von 100 – Hohlraumgehalt des Prüfkörpers.

Der Hohlraumgehalt wird berechnet aus  $\rho_{mR}$  und der Dichte des Mischgutes.

$\rho_{mR}$  = Rohdichte des Prüfkörpers, gemäss SN 671 967 bestimmt

Wie das Untersuchungsergebnis einer Verdichtung der Gyratorprüfkörper von mehr als 100 % (Tabelle 48) zustande kommt, ist bereits in Abschnitt 11.5.4 "SMA 16 mit Filler Netstal und Bitumen 50/70" beschrieben.



