

**Verifikation eines  
Europäischen  
Prüfverfahrens  
(SATS-Prüfung)  
zur Beurteilung der  
Dauerhaftigkeit  
von Asphalt**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 98**

**bast**

# **Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens (SATS-Prüfung) zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt**

von

Stefan Böhm  
Lada Beara

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Verkehr Fachgebiet Straßenwesen  
mit Versuchsanstalt

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 98**

**bast**

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

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

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

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

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 07.0229/2008/ERB:**  
Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

### Fachbetreuung

Franz Bommert

### Herausgeber

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

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-256-8

Bergisch Gladbach, Juli 2016

## Kurzfassung – Abstract

### **Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens (SATS-Prüfung) zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt**

Mit dem Forschungsvorhaben wird das Ziel verfolgt, die Dauerhaftigkeit von Asphalt mit der SATS-Prüfung zu untersuchen. Es handelt sich um ein Klimatisierungsverfahren, bei dem Feuchtigkeit, Wärme und Druck auf Asphalt-Probekörper einwirken und mittels des dynamischen Spaltzugversuchs, oder auch einer anderen Vergleichsprüfung, untersucht werden. Daraus wird der SATS-Dauerhaftigkeitsindex bzw. SATS-Verhältnis ermittelt.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit soll überprüft werden, ob die SATS-Prüfung für die in Deutschland üblichen Asphaltmischungen anwendbar ist und somit grundlegende Erfahrungen gesammelt werden, so dass eine aussagekräftige Bewertung möglich ist. Basierend auf dem Entwurf der europäischen Prüfnorm (prEN 12697-45) werden mit diesem Prüfverfahren verschiedene Asphaltmischungen (AC 16 B und AC 32 T mit Bindemitteln 10/20, 50/70, 30/45, 10/40-65 A und 25/55-55 A und drei Gesteinsarten) untersucht. Für die SATS-Prüfung wurde der dynamischer Spaltzugversuch und der direkter Zugversuch verwendet. Anschließend wurden die Ergebnisse aus der SATS-Prüfung mit den Ergebnissen aus dem Flaschen-Rollverfahren verglichen.

Es konnte festgestellt werden, dass alle ermittelten Ergebnisse unterhalb der Anforderung des englischen Regelwerks liegen, d. h. der SATS-Dauerhaftigkeitsindex, des geprüften Asphalts mit dem Bindemittel 10/20 ist kleiner als 80 %. Obwohl sich tendenziell die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe, die mittels dynamischem Spaltzugversuch ermittelt wurden, bei Verwendung des Bitumens 10/20 zeigen, sind bei den anderen vier verwendeten Bindemitteln keine eindeutigen Differenzierungen zwischen den Ergebnissen zu identifizieren.

Die ermittelten Werte aus den Versuchen mit dem direkten Zugversuch haben eine tendenziell stärkere Differenzierung der Ergebnisse gezeigt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der SATS-Prüfung im Vergleich zum Flaschen-Rollverfahren ist kein signifikanter Zusammenhang erkennbar, außer bei den Ergebnissen mit Verwendung des Bitumens 10/20.

### **Verification of an European testing method (SATS test) for evaluation of asphalts durability**

The aim of this research project is to test the durability of asphalt with the SATS test. SATS test consist of treating asphalt sample with humidity, heat and pressure in an environment controlled chamber, followed by dynamic indirect test or other comparing tests, to determine a SATS Durability Index.

The main objective of the research project is to find out if the SATS test is adaptive to the average German asphalt mixture, so that basic experience can be gained to make a significant evaluation possible. This test is conducted on several asphalt mixtures (AC 16 B and AC 32 T with 10/20, 50/70, 30,45, 10/40-65 A and 25/55-55 A binder and three types of rocks), as per European testing standard (prEN-12697-45). For SATS test the dynamic indirect test and the uniaxial tension-test is utilised. Then the results from above tests were compared with the results from the rolling-bottle-test.

During the research project, it was observed that the results were lower than the requirements of the English regulation; the SATS Durability Index of 10/20 binder of the tested asphalt is lower than 80%. Also SATS Durability Index values obtained from 10/20 binder were highest, as measured by dynamic indirect tension test. The other four binders showed no significant difference in between their results.

The determined values by tension test tend to be more differential in their results.

From the comparison of results from the SATS test and the rolling-bottle-test no correlation was found, except when 10/20 binder was used.

## Summary

### Verification of an European testing method (SATS test) for evaluation of asphalts durability

#### 1 Introduction

For a durable asphalt surface, the enduring bond between bitumen and filler is necessary. The bonding between asphalt and filler depends on the properties of the used material. Retardant and aiding influences have been studied for years. Theories of the adhesion-process as well as of the failure-process and the corresponding tests are available in plenty. Disadvantage of many tests is that the adhesion is related only to a few asphalt-properties. The combination of various influences to the bonding has not been considered in any testing method. Based on this observation and the existing statements it is noticeable, that there are no testing method that is capable to evaluate the bonding between filler and bitumen.

A combined investigation is possible with the SATS test (Saturation Ageing Tensile Stiffness-Test), which was developed in the United Kingdom to study asphalt binders and asphalt base layers with relatively high voids content and low binder content for evaluating the durability of asphalt. SATS test consists of treating asphalt sample with humidity, heat and pressure in an environment controlled chamber, followed by dynamic indirect test or other comparing tests. So a SATS Durability Index can be determined. This Value can be used to evaluate the adhesion between filler surface and bitumen.

The SATS test has been included in the European Standards and also to the German standard DIN EN 12697-45 (release: July 2012).

#### 2 Research program

The research program arises from the specification and requirements of the testing standard (prEN 12697-45 (release: March 2008) and its possible implementation in Germany. In this research program, the effect of different types of bitumen, filler and void contents on durability of asphalt has been observed. Also the effect of these parameters on the asphalt has been studied.

From the program, it is possible to evaluate the different parameters which influence (Table 1) the

|                      |   |
|----------------------|---|
| Asphalt              | AC 16 B, AC 32 T  |
| Binder               | 10/20, 30/45, 50/70 (SATS),<br>50/70 (Norm)<br>25/55-55 A, 10/40-65 A |
| Filler/type of rocks | Basalt, Greywacke, Mikrodiorit  |
| Void content         | 6-, 8- and 10- ( $\pm 0,5$ ) Vol.-%                                   |
| Sample               | Marshall-specimen (MPK)   |
|                      | Cored specimen (PPK)  |
|                      | Prismatic specimen  |
| Testing method       | SATS-test:<br>• Dynamic indirect testing<br>• Direct tension test     |
|                      | Rolling-bottle-test   |

Tab. 1: Research program

asphalt's durability. It is also possible to evaluate and compare the results obtained from SATS test to that from the past experience. During the experimental investigation, asphalt binder 0/16 and asphalt base layer 0/32 were tested.

The asphalt mixtures were considered as per TL Asphalt-Stb 07 and were selected based upon the experience. Different types of test specimens were prepared by combining three types of rocks and five different binders. The air void content in the mixtures was also varied.

The results of the SATS test were compared with the results of the rolling-bottle-test. For the comparison, the standard bitumen 50/70 was used. While both testing methods (SATS test and rolling-bottle-test) deal with the bonding operation of binder and the aggregate surface, the evaluation of the bonding properties of different asphalts this new developed experimental method can help to find parallels of both the testing methods.

#### 3 Results

The parameters obtained from the SATS test are the retained stiffness and the retained saturation of the asphalt specimen. From these values the SATS Durability Index ( $DI_{SATS}$ ) is determined which is the average of the retained stiffness ( $CTR_R$  – ratio of comparative test results, the proportion of the stiffness after and before test) of the upper four specimens on the port filter frame. Using a different testing method as the dynamic indirect tensile test, the result is to be named SATS Ratio.

In this investigation for the SATS tests dynamic indirect tensile testing (DIN EN 12697-26, (Part C))

and direct tension tests (DIN EN 12697-46) were used, for determining the index.

Figure 1 and 2 shows the results for asphalt binder 0/16 (Marshall-specimen with a void content of 6 Vol.-% and 10 Vol.-%)

The asphalt mixtures with binder 10/20 have the highest  $DI_{SATS}$ . While this was expected, the results with the other four binders were pretty surprising. There is a significant reduction of the SATS Durability Index by the four binders (30/45, 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A) which is not comparable to real operational binders. The 10 Vol.-% asphalt compositions show analogical results, in which the SATS values are higher.

The influence of method of sample preparation was less significant than expected. Marshall-specimen and cored specimen lead to comparable results.

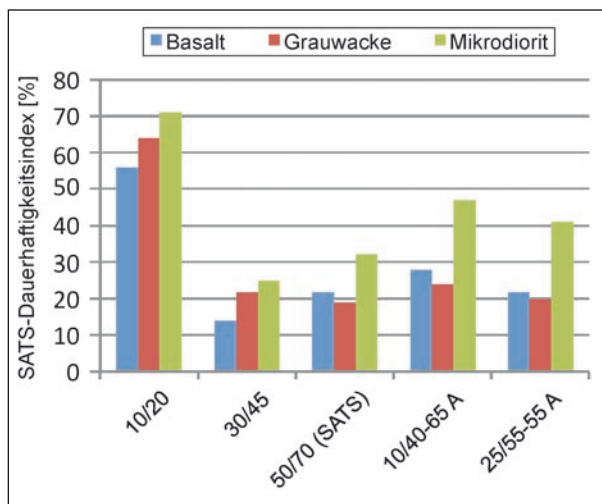


Fig. 1:  $DI_{SATS}$  – AC 16 B (MPK), V = 6 Vol.-%

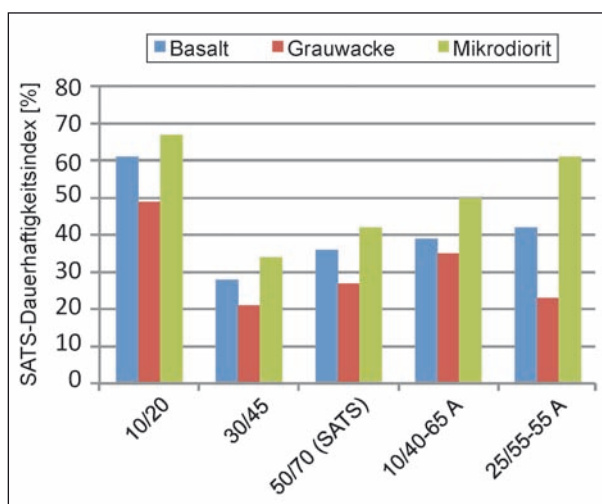


Fig. 2:  $DI_{SATS}$  – AC 16 B (MPK), V = 10 Vol.-%

The SATS test was developed to evaluate the durability of asphalt binder layers and asphalt base layers. As these layers have a void content of 6 Vol.-% or more, there is high possibility that water and mechanical stress weakens the bond between the bitumen and aggregate causing stripping. Therefore asphalt base layer 0/32 was also investigated along with asphalt binder 0/16.

It can be noticed in table 2 that SATS Durability Index is higher for asphalt mixtures with higher air void content. Using air void contents of 10 Vol.-% SATS Durability Index values higher than 100% is possible (Basalt with 10/20 and Greywacke with 50/70). The load used for testing may be the reason a partial reason; it is the same load as used for tests with asphalt binder 0/16. The investigations were made by using a higher load. The determined

| Asphalt               |        | AC 32 T     |                 |
|-----------------------|--------|-------------|-----------------|
| Void content [Vol.-%] |        | 6           | 10              |
| Sample                | Binder | Rock type   | $DI_{SATS}$ [%] |
| MPK                   | 10/20  | Basalt      | 61              |
|                       |        | Mikrodiorit | 54              |
|                       |        | Greywacke   | 74              |
|                       | 50/70  | Basalt      | 30              |
|                       |        | Mikrodiorit | 90              |
|                       |        | Greywacke   | 75              |

Tab. 2: SATS Durability Index – AC 32 T

| SATS Ratio [%]     |                 |                                |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|
| Testing temp. [°C] | Rock/binder     | Remaining tensile strength [%] |
| +20                | Basalt 10/20    | 77                             |
|                    | Basalt 30/45    | 68                             |
|                    | Greywacke 10/20 | 75                             |
|                    | Greywacke 30/45 | 43                             |
| +5                 | Basalt 10/20    | 81                             |
|                    | Basalt 30/45    | 51                             |
|                    | Greywacke 10/20 | 68                             |
|                    | Greywacke 30/45 | 46                             |
| 0                  | Basalt 10/20    | 72                             |
|                    | Basalt 30/45    | 55                             |
|                    | Greywacke 10/20 | 92                             |
|                    | Greywacke 30/45 | 60                             |

Tab. 3: SATS Ratio – AC 16 B (V = 6 Vol.-%)



results showed in comparison to the interpreted results above that the values are more or less on the same level, showing no relation as well.

The second test to compare the asphalt mixtures used in the SATS test was the direct tension test. The determined results lead to higher SATS values than the results interpreted from above.

Comparing the results of the SATS test with that of the rolling-bottle-test, no specific correlation was certifiable. Out of all the investigations the binder 10/20 lead to best values. The Basalt combination showed the best covering values. The other two rock types had no clear ranking. It was confirmed that with a polymer modified bitumen a better bonding behavior was produced than using road pavement bitumen. This knowledge was not proved by the SATS results.

#### 4 Summary

In this research project the SATS test, used in the United Kingdom to investigate asphalt mixtures with low binder proportions and high void contents, was reviewed. The developers of this testing method specify to make an approximation concerning the lifetime of asphalt compositions using the SATS Durability Index to get information's about the bonding between binder and aggregates.

Based on the results obtained it has been determined that the investigated asphalt mixtures with bitumen 10/20 have, as expected, the highest SATS Durability Indexes. Following the requirement of the English standards, the SATS Durability Index has to be at least 80% in order to classify asphalts adorable and suitable material for heavy stresses. In this research project, the necessary values were not found in the investigated mixtures.

Investigations have shown that the application of the SATS test does not provide plausible results. This may be due to the fact that the comparison test has been carried out, among others, by means of dynamic in direct test, which is expressed by the SATS Durability Index. A problem with this type of testing's it not only lacks the precision in the procedure but also the test affects only the outer surface of the asphalt sample. So the inner portion of the sample is unaffected and there by the bond between the aggregated and bitumen cannot be identified. The specimens before and after conditioning are in a completely different state, so a

test that can "only" influence the surface of the sample is not enough. Another finding relates to the aggregate type. The idea of the SATS test is, among other things, that the asphalt mixtures with critical adhesive aggregates should have a lower SATS Durability Index than the asphalt mixes with a noncritical adhesive rock. This was not confirmed in this project. The favorable results can be seen in the greywacke and mikrodiorit asphalt mixtures, these aggregate types can be described as adhesive critical. The mikrodiorit used in this study is known for its swelling ability. The asphalt mixtures with basalt have the lowest durability index values. This observation is contrary to the conclusion of practice.

When considering the saturation values (before and after the air conditioning) it was found that the first four specimens in pressure aging vessel have a similar behavior and the results of a similar level, regardless of their position in the pressure aging vessel. In all studied variants the lower saturation values were found after conditioning. The asphalt sample placed below the water showed, as expected, the highest saturation value after the conditioning.

By SATS test, the question was clarified and investigated that to what extent the SATS Durability Indexes the characteristic for the quantitative valuation of the durability of asphalt mixtures depends ones electively varying factors-namely, the type of aggregate, the binder type/grade, the void content and asphalt type/specimen. It was found that with the variation of the air void content there is no significant difference in the results. Overall, it should be noticed that no direct correlation between the different parameters is available. However it is evident that the conditioning process in the pressure aging vessel, i.e. the simulated aging process, has a strong effect on the sample. This is shown by the rapidly decreasing stiffness values for the conditioning process. The extraction of binder from the conditioned Marshall specimens has confirmed this theory. An increase of ring and ball softening point by about 10 K, compared to original binder, was found in almost all the binders used.

In summary, it has been noticed that no general trend in the results can be found. The results from the SATS test expressed by the SATS Durability Index probably be only influenced by the bitumen state and so the influence of the aggregate type on the SATS Durability Indexes to be small. An

evaluation of the bonding behavior between the aggregates and the bitumen cannot be derived from the SATS Durability Index. The reason for this is that results were similar for the same type of bitumen regardless of the aggregate type. Based on the results obtained by direct tensile test it is shown that the asphalt mixture comprises both the binder 10/20 and with binder 30/45 similar behavior and the results do not differ so much, as observed in the determination of the stiffness. From the direct tensile test results, it could be shown that the tensile strengths of original and conditioned specimens expressed by SATS ratio is affected at all three test temperatures, not only from the binder, as a dominant influence, but also by the aggregate type. The favorable properties of basalt could be clearly observed from the direct tensile test results.

## **5 Prospect**

With those identified in the research results and applied research system no implementation of the SATS test or the resulting SATS Durability Indexes to the German regulations can be derived. Nevertheless, the research customer believes that the method of optimizing the test has potential for addressing the aging resistance of asphalt.

There is a need for one, to find a suitable test method, in which the previously developed testing conditions shall be optimized and to find a method such as the direct tension test that can be conducted on the test specimens before and after the conditioning, which can detect and relate the influences of different variables (the pressure, heat, water). Thereby the results obtained are more sensitive to different variables and can be differentiated easily with variation in parameters.

This potential should be explored in further research





## Inhalt

|                          |   |          |                                      |  |    |
|--------------------------|---|----------|--------------------------------------|--|----|
| <b>Abkürzungen</b> ..... | 10  | <b>5</b> | <b>Untersuchungsergebnisse</b> ..... | 27   |    |
| <b>1</b>                 | <b>Problemstellung und Zielsetzung</b> ..                   | 11       | 5.1                                  | Allgemeines .....  | 27 |
| <b>2</b>                 | <b>Stand des Wissens, Dauerhaftigkeit von Asphalt</b> ..... | 11       | 5.2                                  | Ergebnisse: SATS-Prüfung dynamischer Spaltzugversuch (Steifigkeit) – AC 16 B ..... | 28 |
| 2.1                      | Entwicklung der SATS-Prüfung .....                          | 11       | 5.2.1                                | Allgemeines .....  | 28 |
| 2.2                      | Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit .....              | 12       | 5.2.2                                | SATS-Dauerhaftigkeitsindex .....   | 28 |
| 2.3                      | Einflüsse auf die Steifigkeit .....                         | 13       | 5.2.3                                | Sättigung vor und nach dem Klimatisierungsvorgang .....                            | 40 |
| <b>3</b>                 | <b>Angewendete Prüfverfahren</b> .....                      | 14       | 5.3                                  | Ergebnisse: SATS-Prüfung dynamischer Spaltzugversuch (Steifigkeit) – AC 32 T ..... | 47 |
| 3.1                      | SATS-Prüfung .....  | 14       | 5.3.1                                | Allgemeines .....  | 47 |
| 3.1.1                    | Verfahrensprinzip .....                                     | 14       | 5.3.2                                | SATS-Dauerhaftigkeitsindex .....   | 48 |
| 3.1.2                    | Prüfgerät .....   | 15       | 5.3.3                                | Sättigung vor und nach dem Klimatisierungsvorgang .....                            | 51 |
| 3.1.3                    | Herstellung der Probekörper .....                           | 16       | 5.4                                  | Ergebnisse: SATS-Prüfung direkter Zugversuch – AC 16 B .....                       | 53 |
| 3.1.4                    | Vorbereitung und Klimatisierung der Probekörper .....       | 16       | 5.5                                  | Ergebnisse: Flaschen-Rollverfahren ..  | 58 |
| 3.2                      | Dynamischer Spaltzugversuch .....                           | 19       | 5.5.1                                | Allgemeines .....  | 58 |
| 3.3                      | Direkter Zugversuch .....                                   | 20       | 5.5.2                                | Einfluss des Bindemittels .....  | 58 |
| 3.4                      | Flaschen-Rollverfahren .....                                | 21       | 5.5.3                                | Einfluss der Gesteinsart .....   | 59 |
| <b>4</b>                 | <b>Untersuchungsmethodik</b> .....                          | 23       | <b>6</b>                             | <b>Zusammenfassung</b> .....   | 63 |
| 4.1                      | Untersuchungsprogramm .....                                 | 23       | <b>7</b>                             | <b>Ausblick</b> .....  | 65 |
| 4.1.1                    | Gesteine .....  | 24       | <b>8</b>                             | <b>Literatur</b> .....   | 66 |
| 4.1.2                    | Bitumen .....   | 25       | <b>Anhang</b> .....                  | 68   |    |
| 4.2                      | Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltvarianten ..   | 25       |                                      |  |    |
| 4.2.1                    | Allgemeines .....   | 25       |                                      |  |    |
| 4.2.2                    | Voruntersuchung .....                                       | 26       |                                      |  |    |
| 4.2.3                    | Zusammensetzung des Asphalts AC 16 B .....                  | 26       |                                      |  |    |
| 4.2.4                    | Zusammensetzung des Asphalts AC 32 T .....                  | 27       |                                      |  |    |

## Abkürzungen

|      |   |
|------|---|
| EF   | Eigenfüller   |
| FF   | Fremdfüller   |
| MPK  | Marshall-Probekörper  |
| PPK  | aus mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probepplatten gebohrte Probekörper |
| WVS  | Walzsektor-Verdichtungsgerät  |
| SATS | Saturation Ageing Tensile Stiffness   |
| NAT  | Nottingham Asphalt Test   |

## Abkürzungen/Zeichen nach prEN 12697-45

|             |  |
|-------------|--|
| $G_{mm}$    | Rohdichte der Asphaltmischung  |
| $G_{mb}$    | Raumdichte des Probekörpers  |
| $M_d$       | Masse des Probekörpers im trockenen Zustand  |
| $M_w$       | Masse des Probekörpers nach Wasserlagerung (vor der Klimatisierung)  |
| $M_{w2}$    | Masse des Probekörpers nach der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter   |
| S           | die anteilige Sättigung der Probekörper mit Wasser vor der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter                                |
| $S_a$       | die anteilige Sättigung der Probekörper nach der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter  |
| $CTR_U$     | das Vergleichsprüfergebnis für den nicht klimatisierten Zustand (Steifigkeit vor der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter)     |
| $CTR_C$     | das Vergleichsprüfergebnis für den klimatisierten Zustand (Steifigkeit nach der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter)          |
| $CTR_R$     | das Verhältnis der Vergleichsprüfergebnisse (Verhältnis der Steifigkeit nach und vor der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter) |
| $DI_{SATS}$ | SATS-Dauerhaftigkeitsindex des Gemischs (bei Verwendung des dynamischen Spaltzugversuchs als Vergleichstest)                       |

## 1 Problemstellung und Zielsetzung

Für eine dauerhafte Asphaltbefestigung ist die dauerhafte Verbindung von Gesteinskörnung und Bitumen wesentlich. Der Haftvorgang zwischen Bitumen und Gestein ist von der Beschaffenheit der einzelnen Komponenten abhängig. Begünstigende sowie hemmende Einflüsse auf diese Verbindung werden schon seit Jahrzehnten untersucht. Theorien zur Adhäsion sowie zum Versagen und darauf aufbauende Prüfverfahren liegen in großer Menge vor. Nachteilig bei vielen Prüfverfahren ist, dass die Adhäsion meist nur mit einzelnen Asphalteeigenschaften in Verbindung gebracht wird. Eine Kombination aus mehreren Einflüssen, die das Haftverhalten von Asphalt beeinträchtigen, ist in keinem bisherigen Prüfverfahren erfasst. Aufgrund dieser Beobachtung und der existierenden Aussagen ist festzustellen, dass zur Ansprache und Beurteilung des Haftverhaltens zwischen Gestein und Bitumen bis heute noch kein geeignetes Prüfverfahren existiert.

Eine kombinierte Untersuchung bietet die sogenannte SATS-Prüfung (Saturation Ageing Tensile Stiffness-Test), die im Vereinigten Königreich für die Untersuchung von relativ hohlraumreichen und bindemittelarmen Asphaltbinder- und Asphalttragschichten entwickelt wurde, um die Dauerhaftigkeit von Asphaltmischgut zu bewerten. Die SATS-Prüfung wurde inzwischen mit der Europäischen Normung eingeführt und liegt im deutschen Normenwerk mit der DIN EN 12697-45 (Ausgabe: Juli 2012) vor.

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages sollen Erfahrungen mit der SATS-Prüfung gewonnen werden, insbesondere hinsichtlich der Anwendbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse auf die in Deutschland üblichen Asphalte. Die geprüften Asphaltmischgutarten und -sorten variieren in der Gesteinsart sowie Art und Sorte des verwendeten Bitumens. Weiterhin werden die Art der Herstellung der Probekörper (Walzsektor-Verdichtungsgerät, Marshall-Verdichtungsgerät) und der Hohlraumgehalt variiert. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen des Flaschen-Rollverfahrens, den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche sowie den Erfahrungen aus der Praxis verglichen und bewertet.

## 2 Stand des Wissens, Dauerhaftigkeit von Asphalt

### 2.1 Entwicklung der SATS-Prüfung

Die SATS-Prüfung wurde im Vereinigten Königreich zur Simulation von in der Praxis beobachteten (zum Teil unerwarteten) Abnahmen der Steifigkeit entwickelt. Einige untere Asphaltsschichten, die im Zuge des Trends der langlebigen Konzeption von Straßenbefestigungen mit härterem Bitumen (z. B. 10/20) hergestellt wurden, zeigten deutliche Abnahmen in der Steifigkeit (um ungefähr 60 %) nach einer Nutzungsdauer von etwa 8 Jahren. Da die Verkehrsbelastung dieser Strecken nicht hoch war, wurde dies auf die Alterung des Bitumens und das Einwirken der Feuchtigkeit zurückgeführt. Feuchtigkeitsschäden an Asphaltmischungen können als Verlust von Steifigkeit und Kohäsion sowie Verlust der Adhäsion zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen aufgrund von Feuchtigkeit definiert werden [COLLOP, 2007].

Um dies jedoch genau untersuchen zu können, wurde die SATS-Prüfung entwickelt, bei dem Asphalt-Probekörper unter Wärme, Feuchtigkeit und Druck beansprucht werden.

- Der Druck dient vorrangig zur Erhöhung der Auswirkungen der beiden anderen (Feuchtigkeit und Wärme) Einflussfaktoren.
- Unter dem Einfluss von Wärme werden insbesondere das Bitumen und die Veränderungen seiner Eigenschaften durch Alterungsvorgänge angesprochen. Da Bitumen ein thermoplastischer Stoff ist, wird eine Verschiebung des Gleichgewichtes zwischen den einzelnen Bitumenkomponenten durch die thermische Beanspruchung verursacht.
- Mit der Feuchtigkeit wird die Haftung zwischen Bitumen und Gestein angesprochen.

Da dieses Prüfverfahren für hohlraumreiche und bindemittelarme Asphaltmischungen geeignet ist, beziehen sich die ersten Untersuchungen im Vereinigten Königreich überwiegend auf die dortigen Asphaltmischungen DBM 28 mm (Dense Bitumen Macadam) mit Bitumen 10/20. Aufgrund des gewählten Bitumens handelt es sich um ein relativ steifes Material, das auch als HBM (high modulus base) bekannt ist.

Die im Rahmen der Verfahrensentwicklung untersuchten Asphaltmischungen wurden folgendermaßen zusammengesetzt:

- Bitumensorte: 10/20 (15 B) und 40/60 (50 C),
- Bindemittelgehalt: 4,0 M.-%,
- Hohlraumgehalt der Probekörper:  $8 \pm 2$  Vol.-%.
- Gesteinsart
  - Kalkstein (basisch) und
  - Granit (sauer).
- Kalksteinfüller als „control“-Füller mit 2 M.-%,
- Granitfüller.

Die Versuchsergebnisse zeigten eine gute und praktisch plausible Differenzierung zwischen der Dauerhaftigkeit der Asphaltmischungen mit Kalkstein bzw. Granit. Während der sogenannte Dauerhaftigkeitsindex (siehe hierzu im Detail die Verfahrensbeschreibung in Kapitel 3.1) der Asphaltmischungen mit Kalkstein überwiegend zwischen 60 % und 80 % lag, betrug er bei den Asphaltmischungen mit Granit überwiegend 10 % bis 60 %. Dabei sank bei den Asphaltmischungen mit Granit der Dauerhaftigkeitsindex mit zunehmender Sättigung der Probekörper mit Wasser. Einige Versuche wurden auch mit Granitfüller durchgeführt. Bei der Untersuchung des Einflusses des Füllers zeigten sich deutlich günstigere Werte bei der Verwendung eines Kalksteinfüllers in einem Asphaltmischgut, als die Ergebnisse bei den Asphaltmischungen mit dem Granitfüller. Bei dem Austausch von Granitfüller durch Kalksteinfüller stiegen die Ergebnisse um 50 %. Ein Einfluss der Bitumensorte wurde hier nicht näher analysiert [COLLOP, 2007].

Aufgrund dieser Erkenntnisse und vereinzelter weiterer Untersuchungen wurde das Prüfverfahren im Vereinigten Königreich eingeführt und für die Bewertung der hohlraumreichen Asphaltmischungen vorgeschrieben. Dabei wird an das in den Asphaltbinder- und Asphalttragschichten verwendete Asphaltmischgut die Anforderung gestellt, dass dieses bei der Verwendung in Hauptverkehrsstraßen und Autobahnen einen SATS-Dauerhaftigkeitsindex von mindestens 80 % aufweisen soll [MCHW, 2008].

## 2.2 Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit eines Bauteils ist nach DIN EN 206-1 die Anforderung an ein Bauwerk, über die geplante Nutzungsdauer die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen.

Die Dauerhaftigkeit von Asphalt ist kein eindeutig definierter Begriff. Unter der Dauerhaftigkeit einer Asphaltbefestigung wird die Zeitfestigkeit verstanden. Sie lässt sich umschreiben mit der Eigenschaft von Asphalt, langfristig die auf ihn wirkende Belastung und Beanspruchung aufzunehmen. Im Straßenbau spricht man von der Lebensdauer oder Nutzungsdauer einer Asphaltstraße. Um eine lange Lebensdauer zu erzielen, muss die Asphaltbefestigung als eine Einheit wirken, um eine erfolgreiche und schadlose Lastabtragung zu gewährleisten [LYTTON, 2009].

Die Nutzungsdauer einer Asphaltstraße wird über ihre schadlose Haltbarkeit definiert. Wenn diese nicht mehr vorhanden ist, beschäftigt man sich mit den Ursachen bzw. Einflüssen, die zu diesem Verlust geführt haben. Die Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Asphalt sind nach den bestehenden Erkenntnissen vielseitig. Unter anderem können folgende Aspekte genannt werden [LYTTON, 2009]:

- Einwirkung von Feuchtigkeit,
- Eigenschaften des Bitumens und ihre Veränderung infolge der Alterung,
- Adhäsion von Bitumen und Gestein,
- mineralogische Eigenschaften des Gesteins,
- mechanische und thermische Beanspruchung des Asphalts.

Die wesentlichen Faktoren stellen erfahrungsgemäß dabei die Alterung bzw. Verhärtung des Bitumens und die Einwirkung der Feuchtigkeit dar. Die Alterung des Bitumens wird durch die Einwirkung von Luftsauerstoff und Sonnenlicht mit UV-Anteil hervorgerufen. Mit der Verhärtung des Bitumens nimmt die Steifigkeit des Asphalts bzw. dessen Viskosität zu. Hinsichtlich des Verformungswiderstands bei Wärme und der Tragfähigkeit mag dies positiv bewertet werden, hinsichtlich der Rissbildung jedoch als ungünstig.

Die Einwirkung von Feuchtigkeit führt zur Reduzierung der Kohäsion der Mischung und zur Reduzie-

rung der Adhäsion zwischen Bitumen- und Gesteinsoberfläche. Dadurch wird der strukturelle Verbund gestört und die Festigkeit sowie die Steifigkeit des Asphalts vermindert [NÖSLER, 2003].

Der Haftvorgang zwischen Bitumen und Gestein ist von der Beschaffenheit der einzelnen Komponenten abhängig. Bei einem Gestein spielen die mineralogische/petrographische und chemische Zusammensetzung, sowie die Oberflächenrauigkeit und Porosität eine wichtige Rolle. Das Haftverhalten von Bitumen wird von seiner Viskosität, seiner Grenzflächenspannung, seinem Säuregehalt und seinem Paraffingehalt beeinflusst. Wasser ist eine der häufigsten und vielschichtigsten Ursachen von Straßenschäden und zweifellos die Hauptsache für den Adhäsionsverlust zwischen Gestein und Bitumen. Das Verhalten des Wassers wird anhand seiner chemischen Inhaltsstoffe und Temperatur beurteilt. Das Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen wird mit Adhäsionstheorien und Versagensstheorien erklärt. Bei den Adhäsionstheorien werden die Haftungseigenschaften, die ein Bitumen bzw. ein Gestein aufweist, umfassender und detaillierter angesprochen. Bei den Versagenstheorien werden die Ursachen, die zu einem Versagen geführt haben, näher analysiert [RENKEN, 2003].

Zusammenfassend kann man sagen, dass Strukturstörungen von Asphaltbefestigungen durch verschiedene Einflüsse hervorgerufen werden können und sich im Laufe der Zeit deutlicher erkennen lassen. Mit der Zeit werden diese Strukturstörungen intensiver und man spricht von Schäden, die eine Abnahme der Leistungsfähigkeit und Funktionalität einer Straße bewirken. Wie bereits erwähnt können mit den bisher existierenden Prüfverfahren nur einzelne Aspekte abgebildet und untersucht werden. Da die Faktoren sich zum Teil aber gegenseitig beeinflussen und auch überlagern bzw. gegenteilig wirken, ist eine klare Zuordnung nicht immer möglich und eine für die Praxis geeignete Aussage zur Dauerhaftigkeit der konzipierten Asphaltmischung nicht einfach zu definieren.

### 2.3 Einflüsse auf die Steifigkeit

Die Formänderungseigenschaften sowie Festigkeitseigenschaften von Asphalt lassen sich mit folgenden drei mechanischen Eigenschaften charakterisieren: Steifigkeit (E-Modul), Ermüdungsverhalten und plastisches Verformungsverhalten.

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) wird als Materialkonstante für starre Materialien, wie etwa Stahl, bezeichnet und ist für Zug- und Druckbedingungen als Verhältnis von Spannung und Dehnung definiert (Gleichung 1). Zur Beschreibung der elastischen Eigenschaften von Asphalt wird der absolute Elastizitätsmodul  $|E|$  verwendet [HÜRTGEN, 2000].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit

$E$  [N/mm<sup>2</sup>] Elastizitätsmodul

$\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] Spannung

$\varepsilon$  [-] Dehnung

In einer Studie von van der POEL aus dem Jahr 1954 beschreibt er eine neue Kenngröße, die von dem Konstanten  $E$  zu unterscheiden ist und die von der Temperatur und von der Belastungszeit abhängt. Diese neue Kenngröße bezeichnet er als Steifigkeitsmodul.

Wenn die Spannung in einem Bitumen konstant gehalten wird, nimmt die Dehnung im Laufe der Zeit infolge verzögerter elastischer Verformung und viskosen Fließens zu, sodass die Größe des Moduls dementsprechend in einem von der Temperatur abhängigen Maße kleiner wird [HEUKELOM, 1974].

Die Steifigkeit des Asphalts (im Folgenden hierzu [LYTTON, 2009]) variiert im Wesentlichen mit

- der Temperatur und der Geschwindigkeit der Lastaufbringung,
- dem Spannungszustand,
- der Gesteinskörnung (Kornform, Korngröße und Korngrößenverteilung) und dem Füller,
- dem Bindemittel und
- der Oberflächenenergie der Komponenten und dem Hohlraumgehalt.

Wird der Asphaltprobekörper bei gegebener Temperatur langsam belastet, wird der Probekörper sich langsam und kontinuierlich verformen, während bei einer hohen Belastungsgeschwindigkeit der Probekörper sich zunächst steifer verhält und vornehmlich bricht. Bei gegebener Belastung wird bei hohen Temperaturen eine größere kontinuierliche plastische Verformung vorzufinden sein als bei geringeren Temperaturen. Ab einer bestimmten, von der Asphaltmischung abhängigen Temperatur



wird das Material schnell genug nachgeben, sodass sich kaum Spannungen in dem Probekörper ansammeln und die Steifigkeit sinkt. Ein hoher Feuchtigkeitsgehalt bewirkt hinsichtlich der Steifigkeit denselben Effekt wie hohe Temperaturen, allerdings ist der Schadensmechanismus unterschiedlich [LYTTON, 2009].

Asphalt wird als ein Dreiphasensystem bezeichnet, das aus fester, flüssiger und gasförmiger Komponente besteht und ein elastisches, viskoses und plastisches Verformungsverhalten aufweist. Dieses Verformungsverhalten ist nicht nur von Temperatur, Last und Frequenz der Belastung abhängig, sondern auch von den Eigenschaften der einzusetzenden bzw. eingesetzten Baustoffe. Die Steifigkeit des Asphalts steht außerdem in Zusammenhang mit der Verformungsresistenz der Asphaltbefestigungen, die im Zuge der ständigen Verkehrszunahme und den steigenden Anforderungen an Straßen an Bedeutung gewinnt [BOREK, 2003].

Die Gesteinskörnungen verhalten sich bei Belastung als Einzelkorn elastisch. Im Kornhaufwerk jedoch ist ihr Verhalten unter Druckbeanspruchung plastisch, was eine Folge von Verschiebungen der Einzelkörner ist. Die Korngröße und die Korngrößenverteilung bestimmen die Lagerungsdichte des verdichteten Gemischs und somit auch die Möglichkeit ihrer Verschiebung [XIAOSONG, 1996].

Der Füller versteift den Mörtel in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren z. B. Korngröße, Korngrößenverteilung, gleichmäßiger Verteilung im Mörtel sowie dessen Klebwirkung mit Bitumen [SCHELLENBERG, 1979].

Das Bitumen hat die Aufgabe den Widerstand des Asphalt gegen Spurrinnen- und Rissbildung zu gewährleisten. Dies erfolgt zum einen durch die Verkittung des Kornhaufwerks mit der Umhüllung der Gesteinskörner und einer begrenzten Ausfüllung der Hohlräume. Zum anderen wird das Haufwerk durch das Bitumen und den Feinanteil des Gesteinsgemischs (Füller und feine Gesteinskörnung), der sich in das Bindemittel eingelagert hat, versteift. Das Bindemittel bestimmt mit seinen Eigenschaften, insbesondere seiner Nachgiebigkeit bzw. seinem (Verformungs-)Widerstand gegenüber einer konstant aufgetragenen Kraft, die Asphaltsteifigkeit [PEFFEKOVEN, 1971].

Der Hohlraum kann als Teilchen mit einer Steifigkeit von null betrachtet werden. Sind die Hohlräume klein und gleichmäßig in dem verdichteten Asphalt-

gemisch verteilt, dienen sie zum Ausgleich von Temperaturendehnungen und können die Verbreitung von Mikrorissen behindern, das plastische Verformen wird allerdings begünstigt. Sind die Hohlräume zu groß, besteht die Gefahr der verstärkten Alterung und Mikrorissbildung [LYTTON, 2009].

Die Oberflächenspannung zwischen den Asphaltkomponenten bestimmt das Maß der Adhäsionskräfte im Asphalt. Wenn dieser Spannungszustand, der sich zwischen zwei miteinander verbundenen Stoffen gebildet hat, groß ist, führt er zu einer schlechten Benetzung. An den Kontaktflächen zwischen Bitumen und Gestein kann bei zu geringen Adhäsionskräften durch die wiederholte Belastung die Bindung/Haftung gestört und schließlich aufgehoben werden [NÖSLER, 2003]. Wird das Wasser an der Asphaltoberfläche gehalten, kann es in den Asphalt (in Abhängigkeit der Dicke des Mörtelfilms, des Sättigungsdrucks und der direkten Umgebung der Gesteine) diffundieren und Schädigungen im Mörtel hervorrufen sowie die Schädigungen an der Kontaktfläche zwischen Bitumen und Gestein verstärken. Eine davon ist die Ablösung des Bitumens beziehungsweise des Asphaltmörtels von der Oberfläche der größeren Gesteinskörner, wodurch substanzgefährdende Gefügestörungen im Asphalt ausgelöst werden [ARAND, 2000].

## 3 Angewendete Prüfverfahren

### 3.1 SATS-Prüfung

#### 3.1.1 Verfahrensprinzip

Die SATS-Prüfung (Saturation Ageing Tensile Stiffness conditioning test) dient zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Adhäsion von Bitumen und Gesteinskörnung. Dabei werden die Probekörper aus Asphalt unter Einwirkung von Druck, Wärme und Feuchtigkeit in einem sogenannten Druckalterungsbehälter (Bild 1) für eine definierte Zeitdauer beansprucht. Dieser Vorgang wird als Klimatisierungsverfahren bezeichnet.

Die Messgrößen (Steifigkeitsmodul und der Sättigungsgrad) sind nach der SATS-Prüfung jeweils vor und nach den Klimatisierungsverfahren zu bestimmen.

Der anfängliche Steifigkeitsmodul wird mittels dynamischem Spaltzugversuch nach DIN EN 12697-26



(Anhang C, indirekte Zugprüfung an zylindrischen Probekörpern) bei 20 °C ermittelt. Nach dem Klimatisierungsverfahren im Druckalterungsbehälter, die insgesamt  $91,5 \pm 1$  Stunden dauert, wird erneut das Steifigkeitsmodul der Probekörper bestimmt. Das Verhältnis zwischen der ermittelten Steifigkeit nach und vor der Klimatisierung dient als Maßzahl für die Dauerhaftigkeit der geprüften Asphaltmischung und für ihre Empfindlichkeit gegen Alterung und Feuchtigkeit. Wird die Steifigkeit mit dem dynamischen Spaltzugversuch bestimmt, ist die Maßzahl als SATS-Dauerhaftigkeitsindex (SATS-Durability-Index) zu bezeichnen und wird prozentual ausgedrückt. Wenn als Vergleichsprüfung statt des dynamischen Spaltzugversuchs eine andere z. B. eine zerstörende Prüfung genommen wird, dann ist das Ergebnis als SATS-Verhältnis zu bezeichnen.

Die zweite Kenngröße, die mittels SATS-Prüfung bestimmt wird, ist die anteilige (Wasser) Sättigung des Probekörpers vor und nach der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter. Die Sättigung der Probekörper mit Wasser gibt Auskunft über die mögliche Wasseraufnahme der Asphalt-Probekörper.

Der gesamte Prozess wird als SATS-Klimatisierungsprüfung bezeichnet.

Auf die Vorbereitung der Proben für die Untersuchung sowie den genauen Versuchsverlauf wird in Kapitel 3.1.4 näher eingegangen.

Zu Beginn des Forschungsprojektes lag der Entwurf für die Norm mit der prEN 12697-45 (Ausgabe: März 2008) vor. Die in dieser Norm definierten wesentlichen Schritte und Randbedingungen werden im Folgenden beschrieben. Die Unterschiede zu der aktuell gültigen Fassung sind primär formaler Art und daher für die Durchführung der Prüfung und für das Forschungsprojekt vernachlässigbar.

### 3.1.2 Prüfgerät

Die Proben werden in dem Druckalterungsbehälter (siehe Bild 1) beansprucht bzw. klimatisiert, der prinzipiell gleichartig zu dem ist, der in den DIN EN 14769 (2006) beschrieben und für die Prüfung der beschleunigten Langzeit-Alterung (PAV) von Bitumen verwendet wird. Abweichend vom PAV (Presser Ageing Vessel) sind die Innenmaße: Der zylindrische Behälter muss 150 mm im Durchmesser und 435 mm in der Höhe messen (jeweils mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  mm).



Bild 1: Druckalterungsbehälter für die SATS-Prüfung



Bild 2: Siebträgergestell für die SATS-Prüfung

Über die Versuchsdauer muss sichergestellt sein, dass in dem Druckalterungsbehälter der Druck von  $2,1 \pm 0,1$  MPa und die Temperatur von  $85 \pm 1$  °C aufgebaut und gehalten werden kann.

In den Druckalterungsbehälter wird ein Siebträgergestell (siehe Bild 2) eingesetzt, auf dem die Probekörper während der Klimatisierungsdauer gelagert werden. Damit der unterste Siebträger nicht direkt auf dem Boden des Druckalterungsbehälters aufliegt, wird in der prEN 12697-45 vorgeschlagen, eine 5 mm dicke poröse Scheibe mit einem Durch-

messer von 100 mm (wie sie im Triaxial-Versuch verwendet wird) unterzulegen. In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden Füße unter das Siebträgergestell montiert. Die Füße weisen eine Höhe von etwa 8 mm auf.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes verwendeten Druckalterungsbehälter sind eine Sonderanfertigung für den Forschungsnehmer nach den Vorgaben der Norm und ergänzenden Anforderungen des Forschungsnehmers. Es wurden insgesamt zwei Druckalterungsbehälter für die vorgesehenen Untersuchungen angefertigt. Die Druckalterungsbehälter und die Parameter des Prüfprogramms lassen sich von einem PC mit einer ebenfalls an die Anforderungen des Forschungsnehmers angepassten Software steuern.

### 3.1.3 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper können nach prEN 12697-45 auf verschiedene Weise hergestellt werden:

- durch Ausbohren aus Asphalt-Probeplatten, die mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt wurden,
- mithilfe des Marshall-Verdichtungsgeräts oder
- mithilfe des Gyrator-Verdichters.

Die erstgenannte Möglichkeit soll bevorzugt werden und ist auch nach den Bestimmungen der britischen „Highways Agency“ anzuwenden [MCHW, 2008].

Wird der Probekörper durch Ausbohren aus der Platte hergestellt, soll die Platte etwa 100 mm dick sein und an jedem Ende nahezu gleichviel abgesägt werden, um die erforderliche Höhe der Probekörper zu erreichen. Insgesamt werden für die Prüfung einer Asphaltmischung fünf Probekörper benötigt, wenn die Steifigkeitsprüfung nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) erfolgt. Da es sich bei dieser Prüfung um eine zerstörungsfreie Prüfung handelt, sind für eine Versuchsreihe fünf hergestellte Asphalt-Probekörper ausreichend. Falls statt dem dynamischen Spaltzugversuch nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) ein zerstörendes Vergleichsprüfverfahren verwendet wird, muss die Anzahl der Probekörper erhöht werden.

Die Probekörper müssen eine Höhe von  $60 \pm 5$  mm und einen Durchmesser zwischen 95 mm und 100 mm aufweisen. Der Hohlraumgehalt soll im Be-

reich  $8 \pm 2$  Vol.-% liegen. Mit der unteren Grenze des Hohlraumgehalts soll sichergestellt werden, dass der Druck bei der Beanspruchung im gesamten Probekörper gleichmäßig ist.

Abweichend zu der Vorgabe der Norm werden in dem Forschungsprojekt mit dem Marshall-Verdichtungsgerät hergestellte Probekörper mit einem Durchmesser von  $101,6 \pm 0,1$  mm verwendet. Dieser Durchmesser entspricht den TP Asphalt-StB (Teil 30) und wird aus Gründen der Praktikabilität für die Marshall-Probekörper beibehalten.

Nach der Norm pr12697-45 ist die Verwendung von Bitumen 10/20 in der zu prüfenden Asphaltmischung vorgesehen. Durch die einheitliche Verwendung des Straßenbaubitumens 10/20 als Normbitumen können vergleichende Aussagen über die Eignung des Gesteins und die gewählte Korngrößenverteilung getroffen werden, da die Härte des Bitumens eine Auswirkung auf die Ergebnisse hat.

### 3.1.4 Vorbereitung und Klimatisierung der Probekörper

Zu Beginn ist an der Asphaltmischung die Rohdichte ( $\rho_m$  bzw.  $G_{mm}$ ) und an den einzelnen Probekörpern die Raumdichte ( $\rho_b$  bzw.  $G_{mb}$ ) zu ermitteln. Darauf aufbauend ist der Hohlraumgehalt der Probekörper zu berechnen. Probekörper, die einen Hohlraumgehalt außerhalb des vorgegebenen Bereichs von  $8 \pm 2$  Vol.-% aufweisen, sind von der Prüfung auszuschließen und durch geeignete Probekörper zu ersetzen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden die Hohlraumgehalte gezielt variiert. Dadurch werden auch Probekörper mit Hohlraumgehalten außerhalb dieses Anforderungsbereiches geprüft.

Bevor die Probekörper in dem Druckalterungsbehälter konditioniert werden, ist an ihnen der gewählte Vergleichstest durchzuführen. Gemäß prEN 12697-45 wird als Vergleichstest die Ermittlung der Steifigkeit mit dem dynamischen Spaltzugversuch gemäß DIN EN 12697-26 (Anhang C) genannt. Da diese Prüfung nicht zerstörend ist, können dieselben Probekörper für die weitere Prüfung verwendet werden. Das Ergebnis des Vergleichstestes für den nicht klimatisierten Zustand der Probekörper ist mit  $CTR_U$  zu bezeichnen.

Die Masse der einzelnen Probekörper ist im trockenen Zustand und nach Durchführung des Vergleichstestes mit  $M_d$  festzustellen. Im Weiteren er-

folgt an den Probekörpern die Bestimmung der anteiligen Sättigung (S).

In einem Vakuum-Exsikkator werden anschließend die mit Wasser bedeckten Probekörper teilweise gesättigt. Die Temperatur des Wassers soll  $20 \pm 1$  °C betragen. Das Vakuum soll zwischen 40 und 70 kPa betragen, innerhalb von 60 s aufgebaut sein und über eine Dauer von  $(30 \pm 2)$  min konstant gehalten werden. Nach dieser teilweisen Wassersättigung ist die Masse der leicht mit einem Tuch abgetrockneten Probekörper zu bestimmen ( $M_w$ ).

Die anteilige Sättigung der Probekörper vor der Klimatisierung (S) ist dann mit folgender Formel (Gleichung 2) zu berechnen:

$$S = 100 \cdot \left( \frac{M_w - M_d}{M_d \cdot (1/G_{mb} - 1/G_{mm})} \right) \quad \text{Gleichung 2}$$

mit

S [%] die anteilige Sättigung vor der Klimatisierung

$M_d$  [g] die Masse des trockenen Probekörpers

$M_w$  [g] die Masse des feuchten Probekörpers

$G_{mb}$  [g/cm<sup>3</sup>] die Raumdichte im trockenen Zustand

$G_{mm}$  [g/cm<sup>3</sup>] die Asphaltmischgutrohndichte

Das Ergebnis ist auf 1 % genau anzugeben. Probekörper, die eine Sättigung größer 80 % aufweisen, sind nicht für die weitere Prüfung zu verwenden und durch geeignete Probekörper zu ersetzen.

In den Druckalterungsbehälter ist so viel frisches, destilliertes Wasser einzufüllen, dass die Wasseroberfläche bei eingesetztem und mit Probekörpern bestücktem Siebträgergestell sich etwa  $5 \pm 5$  mm über dem zweiten unteren Sieb von unten befindet (in dem Forschungsprojekt hat sich eine Menge von etwa 1,2 l Wasser als geeignet erwiesen). Der Druckalterungsbehälter ist mit dem Wasser auf 85 °C über eine Dauer von mindestens 2 Stunden aufzuheizen, bevor das Klimatisierungsverfahren der Probekörper im Druckalterungsbehälter erfolgt.

Die Probekörper sind in das Siebträgergestell einzulegen und mit diesem in den Druckalterungsbehälter zu setzen. Das Siebträgergestell ist dabei mittig zu positionieren und soll nahezu horizontal

sein. Anschließend ist in dem Druckalterungsbehälter innerhalb von 20 Minuten ein Druck von 2,1 MPa aufzubauen. Der Druck ist mit einer Toleranz von  $\pm 0,1$  MPa über eine Dauer von  $65 \pm 1$  Stunden bei der Temperatur von  $85 \pm 1$  °C zu halten.

Nach Ablauf der Prüfzeit von  $65 \pm 1$  Stunden ist die Temperatur auf 30 °C abzusenken. Der Druck darf dabei nicht reduziert werden, sondern muss weiterhin 2,1 MPa betragen. Die Abkühlung ist unter dieser Bedingung innerhalb einer Dauer von 24 Stunden möglich. Erst wenn die Temperatur von 30 °C erreicht wurde, sind das Heizelement auszuschalten und der Druck im Druckalterungsbehälter über eine Zeitspanne von 20 bis 30 Minuten abzubauen. Dieses Vorgehen dient dazu, Schäden an den Probekörpern infolge eines unkontrollierten oder schlagartigen Druckabfalls zu vermeiden. Anschließend kann der Druckalterungsbehälter geöffnet und das Siebträgergestell mit den Probekörpern herausgenommen werden.

Nach dem Herausnehmen der Probekörper aus dem Druckalterungsbehälter ist innerhalb von drei Minuten die Masse der leicht mit einem Tuch abgetrockneten Probekörper zu bestimmen ( $M_{w2}$ ). Die Sättigung nach Klimatisierungsvorgang  $S_a$  ist für jeden Probekörper mit folgender Formel (Gleichung 3) zu bestimmen und auf 1 % genau anzugeben:

$$S_a = 100 \cdot \left( \frac{M_{w2} - M_d}{M_d \cdot (1/G_{mb} - 1/G_{mm})} \right) \quad \text{Gleichung 3}$$

mit

$S_a$  [%] die anteilige Sättigung nach der Klimatisierung

$M_d$  [g] die Masse des trockenen Probekörpers

$M_{w2}$  [g] die Masse des feuchten Probekörpers nach der Klimatisierung

$G_{mb}$  [g/cm<sup>3</sup>] die Raumdichte im trockenen Zustand

$G_{mm}$  [g/cm<sup>3</sup>] die Asphaltmischgutrohndichte

Der  $S_a$ -Wert wird als „anteilige Sättigung nach der Klimatisierung“ oder „retained saturation“ definiert und dient zur Beschreibung der Wasserempfindlichkeit der untersuchten Proben.

Bevor an den Probekörpern der gewählte Vergleichstest durchgeführt wird, sind die Probekörper auf Risse und ungewöhnliche Erscheinungen zu

überprüfen. Bei Bedarf sind die Auffälligkeiten zu dokumentieren.

Der Vergleichstest ist innerhalb von 8 Stunden nach Ausschalten des Heizelementes durchzuführen. Das Ergebnis des Vergleichstests nach dem Klimatisierungsverfahren ist mit  $CTR_C$  zu bezeichnen.

Das Verhältnis der Vergleichsprüfergebnisse nach zu vor der Klimatisierung ( $CTR_R$ ) ist für jeden Probekörper zu bestimmen und ebenfalls auf 1 % genau anzugeben und wird wie folgt berechnet (Gleichung 4):

$$CTR_R = 100 \cdot \frac{CTR_C}{CTR_U} \quad \text{Gleichung 4}$$

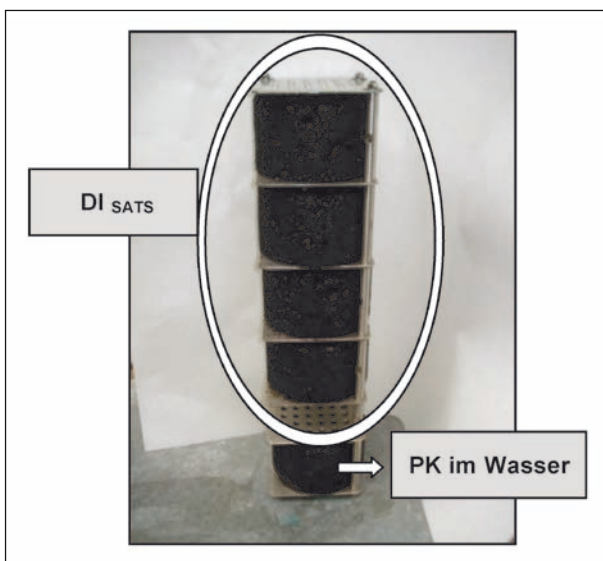
mit

$CTR_R$  [%] das Verhältnis der Vergleichsprüfergebnisse

$CTR_C$  [MPa] das Vergleichsprüfergebnis für den klimatisierten Zustand

$CTR_U$  [MPa] das Vergleichsprüfergebnis für den nicht klimatisierten Zustand

Der Mittelwert der Vergleichsprüfergebnisse ( $CTR_R$ ) (Steifigkeitsverhältnisse) der vier Probekörper, die bei dem Klimatisierungsverfahren auf den oberen vier Siebträgern (Bild 3), also nicht im Wasser, gelagert wurden, ist als „SATS-Dauerhaftigkeitsindex“ ( $DI_{SATS}$ ) zu bezeichnen, sofern als Vergleichstest der dynamische Spaltzugversuch gemäß DIN EN 12697-26 (Anhang C) gewählt



**Bild 3:** Probekörper im Siebträgergestell

wurde. Dieser Wert ist ein relativer Wert und wird deshalb in Prozent ausgedrückt.

Falls der Vergleichstest ein anderer ist, darf diese Bezeichnung nicht verwendet werden, stattdessen ist die Bezeichnung „SATS-Verhältnis“ zu verwenden.

Zusammenfassend kann der Versuchsablauf der SATS-Prüfung in drei Phasen unterteilt werden:

- Als erste Phase oder Vorbereitungsphase wird der Versuchsablauf vor der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter bezeichnet. Hierbei wird die anfängliche Steifigkeit bzw. das Steifigkeitsmodul ( $CTR_U$ ) und die anteilige Sättigung vor der Klimatisierung (S) bestimmt.
- Bei der zweiten Phase oder der Klimatisierungsphase werden die Probekörper unter Einwirkung von Druck, Wärme und Feuchtigkeit insgesamt  $91,5 \pm 0,5$  Stunden im Druckalterungsbehälter beansprucht. Diese wird als „Klimatisierungsvorgang“ bezeichnet. Alle bei dieser Prüfung verwendeten Begriffe, sind darauf basiert.
- Als dritte Phase oder auch als Endphase wird der Versuchsablauf nach der Klimatisierung bezeichnet. Die ermittelten Werte sind die Steifigkeit ( $CTR_C$ ) und die anteilige Sättigung ( $S_a$ ) nach der Klimatisierung.

Im Bild 4 ist ein typisches „SATS“-Prüfergebnis dargestellt, welches aus Untersuchungen in Vereinigten Königreich resultierte [COLLOP, 2007].

Diese Art der Darstellung des Ergebnisses eines einzelnen Versuchs, das mittels SATS-Prüfung ermittelt wurde, soll nach DIN EN 12697-45, wie im Bild 4 erfolgen und im Prüfbericht, falls gefordert, eingesetzt werden. Auf der x-Achse wird der  $S_a$  (anteilige Sättigung nach der Klimatisierung) und auf der y-Achse das Steifigkeitsverhältnis für jeden einzelnen Probekörper aufgetragen.

„Der Graph muss lineare Achsen für das Steifigkeitsverhältnis (y-Achse) und die Sättigung nach der Klimatisierung (x-Achse) haben. Die Skalen des Graphen müssen einen Bereich des Steifigkeitsverhältnisses von mindestens 0 bis 1,0 und der anteiligen Sättigung nach der Klimatisierung von 0 % bis 100 % abdecken“ [DIN EN 12697-45 (Abschnitt 11 i)].



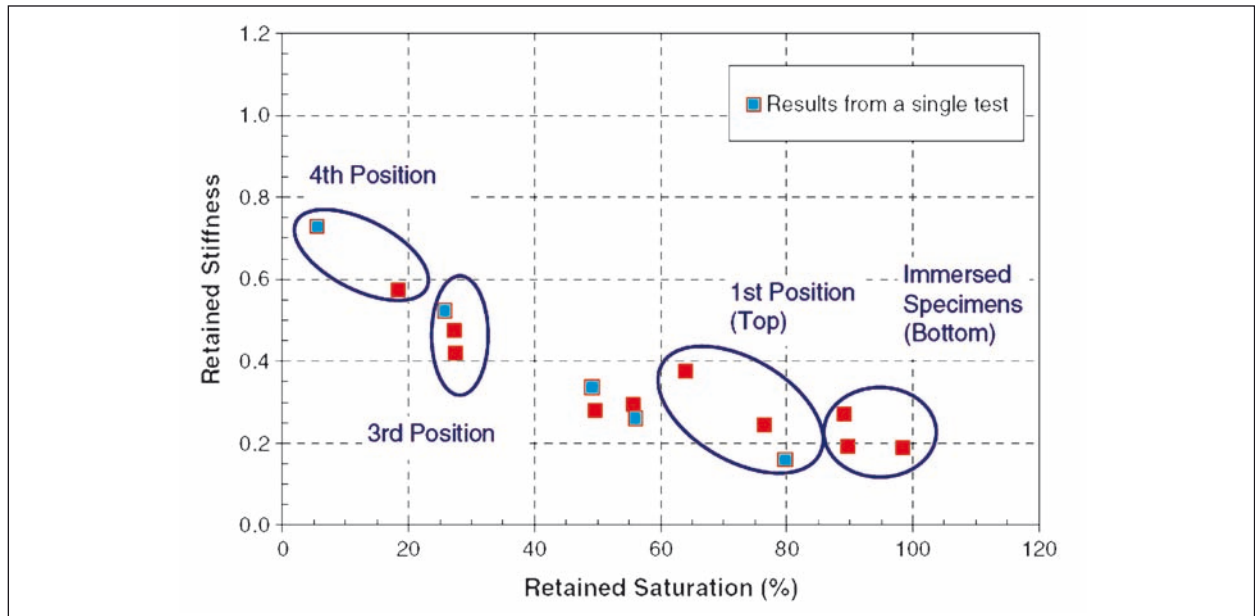


Bild 4: Darstellung eines SATS Prüfergebnisses [COLLOP, 2007]

### 3.2 Dynamischer Spaltzugversuch

Der Spaltzugversuch stammt aus der Betontechnologie, wo er Anfang der 60er Jahre unter der Bezeichnung „Brasilien-Test“ zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Betonen eingeführt wurde [PROVETI, 2006].

Da er sich dort bewährte, wurde er schließlich auch in der Asphalttechnologie eingesetzt. Anfangs konnte der Versuch allerdings nur zur Ermittlung der statischen Spaltzugfestigkeit an Asphalt-Probekörpern eingesetzt werden [ARAND, 2000].

Der Versuch wurde kontinuierlich weiterentwickelt, und nach heutigem Stand kann er mit statischer und dynamischer Belastung durchgeführt werden. Im Rahmen des Untersuchungsprogramms der SATS-Prüfung wird der dynamische Spaltzugversuch zur Anwendung vorgesehen und die Bestimmung der Steifigkeit erfolgt gemäß DIN EN 12697-26 (Anhang C). Diese Prüfung ist auch als NAT (Nottingham Asphalt Test) bekannt.

Bei dem dynamischen Spaltzugversuch wird eine sinusförmige Druckschwellbelastung in einem senkrecht liegenden zylindrischen Probekörper über zwei auf der Mantelfläche diametral gegenüberliegende Lastverteilungstreifen eingetragen, die entsprechend belastet werden.

So wird eine indirekte, horizontale Zugspannung in dem Probekörper erzeugt. Gleichzeitig werden die resultierende Dehnung, der Spannungsverlauf und

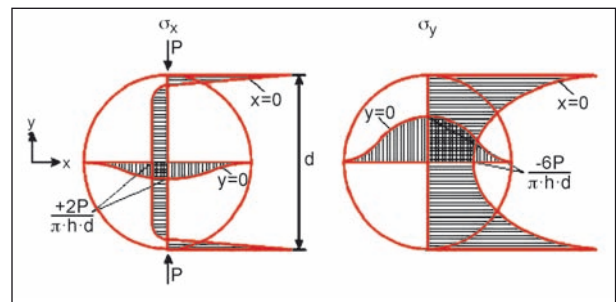


Bild 5: Spannungsverteilung [HADLEY, 1998]

die Phasenverschiebung zwischen entstehender Spannung und resultierender Dehnung gemessen [BOREK, 2003].

Der Theorie nach sind bei dieser Prüfung die Zugspannungen über die Probekörperdurchmesser gleich, während die Druckspannungen zum Rand ansteigen. So bildet sich in dem Probekörper ein annähernd zweiachsiger Spannungszustand aus (Bild 5), was jedoch auch als ein Nachteil des Versuchs betrachtet werden kann, da in den Straßenbefestigungen dreiaxiale Spannungszustände auftreten [HADLEY, 1998].

Bei dem dynamischen Spaltzugversuch an zylindrischen Probekörpern nach DIN EN 12697-26 (Steifigkeit (Anhang C)), der für die SATS-Prüfung bevorzugt bzw. vorgesehen ist, werden die Probekörper wiederholt belastet und im linearen Bereich verformt, sodass nur eine elastische Verformung in der Probekörpermitte erzeugt und eine Beschädigung des Probekörpers ausgeschlossen wird. Mit Steifig-

keit eines Körpers wird der Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft und resultierender elastischer Verformung unter Berücksichtigung der Geometrie beschrieben.

Die Kraft wird dabei so gewählt, dass die Deformation der Probekörper im geforderten Bereich liegt. Die erzeugte Dehnung soll laut Empfehlung nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) für die Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm, im Bereich  $(5 \pm 2) \mu\epsilon$  sein.

Um die Anpassung zwischen dem Probekörper und den Lastverteilungstreifen zu erzeugen, sollen mindestens zehn Lastimpulse auf die Probekörper aufgebracht werden bevor die letzten fünf Auswertungs-Lastimpulse zur Ermittlung der Steifigkeit eingetragen werden. Damit wird ermöglicht, dass die Belastungshöhe und Belastungszeit an der Ausrüstung so eingestellt ist, dass sich die festgelegte horizontale diametrale Verformung und die Anstiegs-Zeit ergeben.

Die empfohlenen Temperaturen für die Prüfung betragen:  $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , wobei auch andere Temperaturen verwendet werden dürfen. Für die Untersuchungen im Rahmen der SATS-Prüfung wurden die Versuche bei einer Prüftemperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden verschiedene Asphaltmischungen hergestellt und untersucht. Zur Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten dieser Asphaltmischungen (aufgrund der unterschiedlichen Gesteinsarten) wären dementsprechend unterschiedliche Kräfte zu wählen. Da hier aber das Verhältnis der Steifigkeit betrachtet wird, hätte eine unterschiedliche Kraftaufbringung die Auswirkung der Beanspruchung und der Eigenschaften der Asphaltmischungen relativieren können, sodass ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht mehr möglich gewesen wäre. Die Verwendung verschiedener Kräfteinstellungen für die untersuchten Asphaltmischungen wäre somit nicht praktikabel gewesen. Auf Basis dieser Überlegung wurde für alle untersuchten Asphaltmischungen bzw. Asphalt-Probekörper vor und nach der Klimatisierung die gleiche Kraft eingestellt.

Die untersuchten Asphalt-Probekörper wurden in zwei zueinander um  $90^\circ \pm 10^\circ$  verdrehten Richtungen (Richtung A und Richtung B) beansprucht. Als Richtwert diente eine Markierung. Die Markierung gewährleistet, dass nach der Klimatisierung im Druckalterungsbehälter die erneuten dynamischen

Spaltzugversuche an denselben Stellen durchgeführt werden. Aus einer Messung mittels dynamischem Spaltzugversuch (Ermittlung der Steifigkeit nach DIN EN 12697-Teil 26 (Anhang C)) werden fünf Steifigkeitsmodule gewonnen. Der arithmetische Mittelwert aus diesen fünf Werten wird als Steifigkeitsmodul für eine Richtung bezeichnet. Nach einer wiederholten Beanspruchung des um neunzig Grad gedrehten Probekörpers kann der Mittelwert des Steifigkeitsmoduls für die zweite Richtung berechnet werden. Als Endergebnis wird das Steifigkeitsmodul des Probekörpers als arithmetischer Mittelwert aus den zwei Mittelwerten je Richtung gebildet.

Aus den Ergebnissen des dynamischen Spaltzugversuches nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) können laut den Untersuchungen aus dem Vereinigten Königreich die Eingangswerte für eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Asphaltmischungen ermittelt werden.

### 3.3 Direkter Zugversuch

Im Zuge der Bearbeitung dieses Forschungsprojektes wurde beschlossen noch zusätzlich zu dem dynamischen Spaltzugversuch an ausgewählten Asphaltmischungen den direkten Zugversuch nach DIN EN 12697-46 durchzuführen. Hierbei handelt es sich, im Gegensatz zu dem dynamischen Spaltzugversuch nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) um ein zerstörendes bzw. ein destruktives Prüfverfahren.

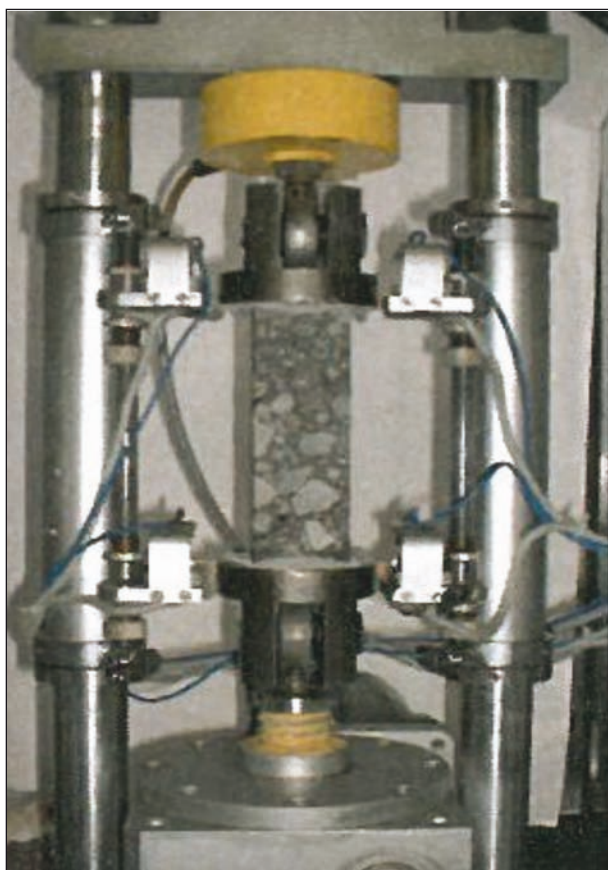
Eine der wesentlichen Baustoffeigenschaften, die das Gebrauchsverhalten und die Nutzungsdauer und somit die Dauerhaftigkeit von Asphaltstraßen beeinflussen, ist das Kälteverhalten bzw. das Verhalten bei tiefen Temperaturen. Zur Beschreibung der Rissresistenz von Asphalten bei tiefen Temperaturen d. h. des Kälteverhaltens eines Asphalts, werden zurzeit meistens zwei Prüfverfahren angewendet: der direkte Zugversuch und der Abkühlversuch. Hierbei werden die prismatischen Probekörper bei verschiedenen Temperaturen unter festgelegten Prüfbedingungen untersucht.

Diese Prüfverfahren lassen eine Bewertung hinsichtlich der thermisch induzierten Zugspannungen zu, die aufgrund behinderten thermischen Schrumpfens bei Abkühlprozessen auftreten. Im Allgemeinen reagieren Asphalte auf Zugbeanspruchungen bei sehr tiefen Temperaturen reinelastisch, während sie im höheren bis mittleren Temperaturbereich elasto-viskoses bis visko-

elastisches Verhalten zeigen. Dieses Verformungsverhalten von Asphalt ermöglicht, dass Zugspannungen mit Relaxation über die Zeit abgebaut werden. Bei sehr tiefen Temperaturen ist das Relaxationsvermögen der Asphalte stark abgeschwächt, sodass bei ausreichend großen thermisch induzierten Zugspannungen, bei denen Asphalt die maximal mögliche Zugfestigkeit erreicht hat, eine vorzeitige Rissbildung folgt [SÖRENSEN, 2000].

Mit dem direkten Zugversuch lassen sich die Zugspannungen, die Asphalte in Verkehrsflächenbefestigungen beim Abkühlen erleiden, gut untersuchen, da die Wirklichkeit gut nachgebildet wird.

Hierbei werden die prismatischen Asphalt-Probekörper bei einer konstanten Temperatur mit konstanter Geschwindigkeit so lange gedehnt, bis sie reißen bzw. brechen. Die prismatischen Asphalt-Probekörper werden nach Einbau in den Prüfraumen zunächst spannungsfrei auf die vorgegebene Prüftemperatur temperiert (Bild 6). Nach Erreichen der Soll-Temperatur wird der Probekörper mit einer Dehngeschwindigkeit von 1 mm/min in axialer Richtung bis zum Bruch belastet.



**Bild 6:** Prüfvorrichtung [DIN EN 12697-46]

Die Ergebnisse sind:

- die maximal gemessene Spannung (Zugfestigkeit)  $\beta_z(T)$  bei der Prüftemperatur (T) und
- die Bruchdehnung  $\varepsilon(T)$  bei der Prüftemperatur (T).

Die maximale Spannung (die Zugfestigkeit) wird durch Division der gemessenen maximalen Zugkraft mit dem Ausgangsquerschnitt der Probe berechnet. Die Bruchdehnung wird durch Division der gemessenen Verformung beim Versagen mit der Länge der ursprünglichen Probe berechnet.

### 3.4 Flaschen-Rollverfahren

Als begleitende Untersuchung wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes das bereits lange Zeit in der Praxis angewendete Flaschen-Rollverfahren durchgeführt, um die gewonnenen Ergebnisse der SATS-Prüfung, besser nachvollziehen, vergleichen und interpretieren zu können.

Bei der messtechnischen Ansprache zur Charakterisierung der Hafteigenschaften eines Asphalts stellt sich als wesentliches Problem die Tatsache, dass Asphalt ein komplexer und in seinem Verformungsverhalten komplizierter Baustoff ist. Die Haftschiäden entstehen nicht nur durch die ständige Verkehrsbeanspruchung, sondern auch durch die Umwelteinflüsse wie Feuchte oder UV Strahlen, denen ein Asphalt ausgesetzt ist. Alle diese Einflüsse werden noch durch den entsprechenden Hohlraum begünstigt und verstärkt. Vor diesem Hintergrund, wurden im Straßenbau bisher einige Prüfverfahren zur Ansprache des Haftverhaltens zwischen Bitumen und Gestein entwickelt. Trotz zahlreichen Prüfeinrichtungen, lassen sich oben genannte Einflussfaktoren schwer mit einem Prüfverfahren erfolgreich erfassen und simulieren, sodass eine aussagekräftige und praxisrelevante Beurteilung möglich ist. Obwohl die Suche nach geeigneten Prüfverfahren zur Bewertung der Haftung zwischen einem Bitumen und Gestein noch immer aktuell ist, existieren zurzeit einige aussagekräftige genormte Prüfverfahren. Zu den aussagekräftigsten Prüfverfahren zählt das Flaschen-Rollverfahren.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse wird zur Beurteilung des mangelhaften Haftverbunds zwischen Bitumen und Gestein vorwiegend das Flaschen-Rollverfahren angewendet. Dieses Prüfverfahren





**Bild 7:** Flaschen-Rollgerät

hat viele Vorteile gegenüber anderen bisher entwickelten Prüfmethode. Die Prüfeinrichtung ist

- einfach und übersichtlich,
- günstig in der Anschaffung und
- unkompliziert in der Handhabung.

Bei dem Flaschen-Rollverfahren (Rolling-Bottle-Test) entsprechend DIN EN 12697-11 und TP Gestein-StB (Teil 3.4) werden mit Bindemittel umhüllte Gesteinskörner in einer mit Wasser gefüllten, rotierenden Flasche beansprucht (Bild 7). Dadurch werden die Haftung von Bitumen und Gesteinskörnungen und die Anfälligkeit der Materialien für das Ablösen des Bindemittels von der Gesteinskörnung angesprochen.

Als Maß dient der Umhüllungsgrad der Gesteinskörner mit Bitumen, der visuell nach einer Rolldauer von 6, 24, 48 und 72 Stunden ermittelt wird. Dieser Wert ist durch Augenschein von zwei Prüfern (unabhängig von einander) auf 5 % Genauigkeit zu schätzen. Hinsichtlich dieses Wertes existieren keine klar formulierten Anforderungen im nationalen Technischen Regelwerk.

Obwohl bei diesem Prüfverfahren die visuelle Bestimmung des Umhüllungsgrades als ein Kritikpunkt betrachtet wird, da die Abschätzung der bitumenfreien Gesteinskornoberfläche subjektiv beeinflusst ist, zeigen aktuelle Forschungsberichte, dass dieses Prüfverfahren grundsätzlich geeignet ist, um das Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen beurteilen zu können.

Neben dem Einfluss des Wassers auf die Adhäsion wird infolge der rollenden Bewegung und durch das Reiben der Gesteinskörner aneinander eine mechanische Beanspruchung erzeugt. Hierbei ist die

Gesteinskorngröße von großer Bedeutung. Für die Untersuchungen ist die Verwendung der Kornklasse 5/8 und 8/11 möglich. Die letztgenannte Kornklasse wird bevorzugt, weil die visuelle Abschätzung einfacher ist.

Dementsprechend sind die Ergebnisse mit einer geringeren Ungenauigkeit verbunden. Bei der Kornklasse 5/8 ist die Abschätzung des Umhüllungsgrades schwieriger, obwohl die Ergebnisse tendenziell wie bei der Kornklasse 8/11 in die gleiche Richtung deuten. Kürzlich durchgeführte Untersuchungen haben diesen Erkenntnis bestätigt [RENKEN, 2010].

Der Einfluss der Gesteinsart zeigt sich durch das Ausmaß der Abrasion zwischen den Gesteinskörnern. Hierbei spielt die Kornform eine wichtige Rolle. Bei den Gesteinskörnern bilden sich beim Brechen des Gesteins spezifische Bruchformen aus, wobei kantige und eckige Strukturen als potenzielle Schwachstellen zu betrachten sind. Diese Stellen sind für den Verlust des Bindemittelfilms anfälliger. Weiterhin ist das von dem Bindemittel bzw. der kohäsiven Wirkung des Bindemittels abhängig. Bindemittel mit hoher Viskosität haben bekanntlich eine stärkere kohäsive Wirkung als Bindemittel mit niedrigerer Viskosität [BAST, 2009].

Die Versuchsergebnisse bei dem Flaschen-Rollverfahren stellen sich laut bisherigen Forschungsberichten, bezogen auf Gesteinsart sowie Bitumenart/-sorte, plausibel und erwartungskonform dar. Allgemein bietet dieses Prüfverfahren eine Möglichkeit, mit der die Verwendung der vorgesehenen Baustoffe in Hinblick auf das Haftverhalten bewertet werden kann.

Nach den Technischen Prüfvorschriften für Gestein TP Gestein-StB (Teil 3.4) wird das Prüfgut nach einer Rolldauer von 6 und 24 Stunden bewertet. Hierbei wird das Gestein mit einem Normbitumen 50/70 überprüft. Bei der Prüfung nach TP Asphalt-StB (Teil 11) ist das in der Asphaltmischung vorgesehene Bitumen zu verwenden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde der Umhüllungsgrad nach Rolldauern von 6, 24, 48 und 72 Stunden betrachtet und bewertet. Die Mischungen werden sowohl mit dem Normbitumen 50/70 als auch mit den weiteren im Forschungsprojekt verwendeten Bitumen hergestellt.

## 4 Untersuchungsmethodik

### 4.1 Untersuchungsprogramm

Um die Aufgabe dieses Forschungsprojektes hinsichtlich der Anwendbarkeit des SATS-Prüfverfahrens realisieren zu können, wurde ein umfassendes, im Detail ausgearbeitetes Untersuchungsprogramm zusammengestellt (Anhang 1).

Dieses Untersuchungsprogramm entstand unter Berücksichtigung der Vorgaben und Möglichkeiten der Fassung der Prüfnorm (pr 12697-45, Ausgabe: März 2008) und der möglichen Anwendung in Deutschland. Des Weiteren sollte mit dem Untersuchungsprogramm ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Asphaltmischungen hinsichtlich der Bitumenart/-sorte abgedeckt werden, um bei der Auswertung einerseits die Einflüsse verschiedenster Faktoren auf die Dauerhaftigkeit von Asphalt betrachten und andererseits die Differenzierung des Prüfverfahrens mit Kenntnissen aus der Praxis prüfen zu können.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei verschiedene Asphalte vorgesehen: Asphaltbinder 0/16 und Asphalttragschicht 0/32. Diese wurden in Kombinationen mit drei Gesteinsarten und fünf Bindemitteln eingesetzt. Auf die Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten wird in Kapitel 4.2 näher eingegangen. Weiterhin wurden unterschiedlich hergestellte Probekörper verwendet:

- Marshall-Probekörper (MPK),
- gebohrte Probekörper (PPK), aus mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probepplatten,
- prismatische Probekörper, gesägt ebenfalls aus mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probepplatten, die mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt wurden.

Die Herstellung von Marshall-Probekörpern erfolgt nach den TP Asphalt-StB (Teil 30): Herstellung von Marshall-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG).

Die Herstellung der Asphalt-Platten erfolgte nach den TP Asphalt-StB (Teil 33): Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV).

Die Untersuchungen an den Marshall-Probekörpern wurden überwiegend bei einem Hohlraumge-

halt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-% durchgeführt. Einige Kombinationen wurden außerdem mit einem Hohlraumgehalt von  $8\pm 0,5$  Vol.-% untersucht. Allerdings zeigte sich frühzeitig, dass die Ergebnisse bei den geprüften Kombinationen keine eindeutige Tendenz aufweisen und keine deutliche Differenz in den Ergebnissen bei einem Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% bzw.  $10\pm 0,5$  Vol.-% vorliegt. Aus diesem Grund wurden die weiteren vorgesehenen Kombinationen der Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von  $8\pm 0,5$  Vol.-% in Absprache mit dem Betreuungskreis nicht untersucht (daher sind nur für einzelne Asphaltmischungs-Kombinationen Ergebnisse vorhanden). Die weiteren Untersuchungen wurden an den Probekörpern, die einen Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-% durchgeführt. Damit wurden die Randbereiche nach Prüfnorm pr EN 12697-45 (minimal und maximal) betrachtet, um eine möglichst große Differenzierung zu erreichen und eine mögliche Systematik im Hinblick auf das Verhalten der Asphaltmischungen zu erkennen.

Ein allgemeiner, breit aufgestellter Bewertungshintergrund sollte so als Ergebnis der Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Die Untersuchungen an den aus einer Asphalt-Probepplatten ausgebohrten Probekörpern wurden überwiegend bei einem Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% durchgeführt. Es wurden auch einige Versuche sowohl an den Marshall-Probekörpern als auch an den ausgebohrten Probekörper, mit den anderen Hohlraumgehalten durchgeführt. Hierbei handelt sich vorwiegend um einzelne Ergebnisse.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ergänzend an ausgewählten Asphaltmischungen der direkte Zugversuch nach DIN EN 12697-46 durchgeführt. Diese zusätzliche Untersuchung erfolgte nach Antrag des Betreuungsausschusses am 14.09.2011.

Zu dieser Entscheidung kam es im Laufe der Bearbeitung des Forschungsprojektes aufgrund der Zwischenergebnisse. Die Versuche wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgten an den prismatischen Asphalt-Probekörpern die aus einer mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probepplatte herausgesägt wurden und einen Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% aufweisen. Die prismatischen Asphalt-Probekörper weisen eine Länge von 160 mm auf. Die Querschnittsfläche wird in Abhän-

gigkeit vom vorhandenen Größtkorn-Durchmesser der Gesteinskörnung im Asphalt vorgegeben und beträgt für einen Asphaltbinder 0/16: 50 x 50 mm. Hierbei wurden nur die Asphaltmischungen AC 16 B mit den Bindemitteln 10/20 und 30/45 und den Gesteinsarten Basalt und Grauwacke untersucht. Die Zugversuche wurden bei drei Temperaturen (0 °C, +5 °C und +20 °C) sowohl an unkonditionierten als auch an konditionierten Asphalt-Probekörpern durchgeführt. Anderes als bei der Bestimmung der Steifigkeit nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) konnten hier allerdings nicht dieselben Probekörper geprüft werden, da der direkte Zugversuch eine zerstörende Prüfung ist.

#### 4.1.1 Gesteine

Im Rahmen des Untersuchungskonzeptes wurden drei Gesteinsarten für die Untersuchungen herangezogen. Es handelt sich dabei um folgende Gesteine (in der Reihenfolge der zunehmenden haftkritischen Eigenschaften):

- Basalt (Westerwald),
- Mikrodiorit (Kreimbach),
- Grauwacke (Scheda).

Aufgrund des großen Umfangs wurden die für die gesamten Prüfungen erforderlichen Mengen der verschiedenen Körnungen der Gesteine beschafft, um sicher zu stellen, dass die Gesteine aus einer Charge stammen. Zeigen sich Unterschiede zwischen den Prüfergebnissen eines Gesteins, können Einflüsse aus abweichenden Gesteinseigenschaften ausgeschlossen werden.

Als Füllmaterial kam für alle Asphaltvarianten, neben dem Eigenfüller, ein Kalksteinmehl (Medenbach) zur Anwendung.

Um einen allgemeinen Überblick zu erhalten, werden die hier verwendeten Gesteine (Basalt, Grauwacke und Mikrodiorit) in der Hinsicht auf ihre allgemeinen Merkmale näher erläutert:

Basalt ist ein Ergussgestein (Vulkanit), dicht bis mittelkörniges, auch porphyrisches, dunkelgraues bis schwarzes Gestein (Bild 8). Mineralbestand: Plagioklas, Augit, Olivin und Erz [ROTHER, 2010].

Mikrodiorit ist ein Ganggestein (Subvulkanite), meist mittelkörniges, grünliches auch rostrot geflecktes magmatisches Gestein (Bild 9). Mineralbestand: ursprünglich vorwiegend Plagioklas, Pyroxen



**Bild 8:** Basalt – Gesteinskörnungen 8/11



**Bild 9:** Mikrodiorit – Gesteinskörnungen 8/11



**Bild 10:** Grauwacke – Gesteinskörnungen 8/11

[ROTHER, 2010]. Der hier verwendete Mikrodiorit (bekannt auch als Kuselit) ist für seine Quellungsneigung bekannt und weist eine raue und poröse Oberfläche auf.

Grauwacke ist ein Sedimentgestein, graues bis grüngraues Gestein (Bild 10). Mineralbestand:



| Variation der Gesteinsart | Asphaltmischgut |         |
|---------------------------|-----------------|---------|
|                           | AC 32 T         | AC 16 B |
| Basalt                    | X               | X       |
| Mikrodiorit               | X               | X       |
| Grauwacke                 | X               | X       |

**Tab. 1:** Variation der Gesteinsart bei den unterschiedlichen Asphaltmischungen

Quarz, Feldspalt, Glimmer, Chlorit und Karbonate [ROTHE, 2010].

Bei der Auswahl der Gesteinsart wurde besonders darauf geachtet, dass die Gesteine unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich der Haftung aufweisen und so vermutlich zu differenzierten Ergebnissen führen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Kombinationen von Gesteinsart und Asphaltart/-sorte, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersucht wurden.

#### 4.1.2 Bitumen

Das Bitumen wurde in Anlehnung an die praktische Verwendung bei den verschiedenen Asphaltmischungen variiert (siehe Tabelle 2). Ferner wurde jede Asphaltmischung entsprechend pr EN 12697-45 mit dem Bitumen 10/20 hergestellt.

Entsprechend dem Untersuchungskonzept waren sechs Bindemitteln unterschiedlicher Art und Sorte für die Untersuchungen heranzuziehen. Bei dem Bitumen 50/70 handelt es sich um zwei verschiedene Hersteller. Die Bezeichnung 50/70 (Norm) bezieht sich auf das nach TP Gestein-StB (Teil 3.4) vorgeschriebene Bitumen.

Dieses wurde nur für die Untersuchungen mit dem Flaschen-Rollverfahren benutzt. Das Bitumen 50/70 (SATS) wurde für die Herstellung der Asphaltmischungen für die SATS-Prüfung verwendet.

Um den Einfluss möglicher Streuungen eines Bitumens gleicher Art und Sorte auf die Prüfergebnisse zu minimieren, wurde für die gesamte Untersuchung ebenfalls Bitumen aus jeweils einer einzelnen Lieferung verwendet.

Zur Orientierung ist in Anhang 2 eine Übersicht über die Bitumenkenndaten der verwendeten Bitumen gegeben. An den gelieferten Bitumen wurden folgende physikalischen Kennwerte ermittelt:

| Variation des Bindemittels | Asphaltmischgut |         |
|----------------------------|-----------------|---------|
|                            | AC 32 T         | AC 16 B |
| 10/20                      | X               | X       |
| 30/45                      |                 | X       |
| 50/70 (SATS)               | X               | X       |
| 10/40-65 A                 |                 | X       |
| 25/55-55 A                 |                 | X       |
| 50/70 (Norm)               |                 |         |

**Tab. 2:** Variation des Bindemittels bei den unterschiedlichen Asphaltmischungen

- Nadelpenetration gemäß DIN EN 1426,
- Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß DIN EN 1427,
- Brechpunkt nach FRAAß gemäß DIN EN 12593 und
- elastische Rückstellung (bei 10/40-65 A und 25/55-55 A) gemäß DIN EN 13398.

Zusätzlich wurde noch die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach der Kurzzeitalterung mittels RTFOT-Verfahren nach DIN EN 12607-1 bestimmt.

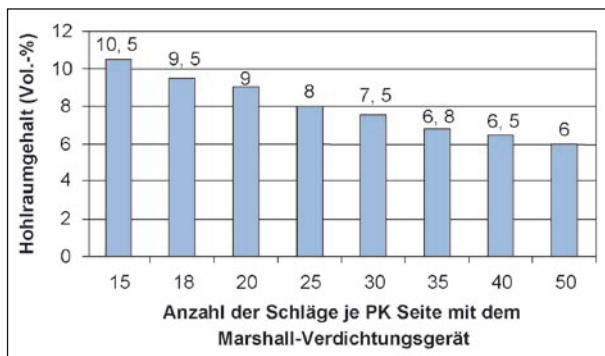
Alle Bitumen erfüllen die Anforderungen nach TL Bitumen-StB 07.

## 4.2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltvarianten

### 4.2.1 Allgemeines

Das Gesteinskörnungsgemisch wurde komplett aus den gewaschenen Kornklassen 0,063/0,125, 0,125/2, 2/5, 5/8, 8/11, 11/16, 16/22, 22/32 der jeweiligen Gesteine zusammengesetzt. Darüber hinaus wurden die einzelnen Körnungen der Gesteine vom Über- und Unterkorn befreit um die in den Erstprüfungen gewählten Sieblinien exakt und reproduzierbar zusammensetzen zu können. Als Füller wurde Eigenfüller (EF) und Fremdfüller (FF) verwendet. Der Fremdfüller ist Kalksteinmehl.

Bei der Konzeption der verschiedenen Asphaltmischungen wurde unter Berücksichtigung der Prüfnorm für den Asphaltbinder und für die Asphalttragschicht einheitlich ein Hohlraumgehalt von 6 Vol.-% angestrebt. Die höheren Hohlraumgehalte der



**Bild 11:** Hohlraumgehalt in Abhängigkeit von der Anzahl der Verdichtungsschläge mit dem Marshall-Verdichtungsgerät für das Asphaltmischgut AC 16 B mit Grauwacke und Bitumen 30/45

Asphaltmischungen wurden mit der gezielten Reduzierung der Verdichtungsleistung erreicht, damit die Zusammensetzung des Asphalts aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht verändert werden muss. Bei der Verdichtung mittels Marshall-Verdichtungsgerät wurde die erforderliche Anzahl an Verdichtungsschlägen mithilfe der Verdichtungswilligkeit des Asphaltmischguts abgeschätzt und anschließend geprüft (siehe Bild 11, exemplarisch für das Asphaltmischgut AC 16 B mit Grauwacke und Bitumen 30/45). Um die erforderliche Höhe des Probekörpers weiterhin einzuhalten, wurde die Einwaage gleichzeitig reduziert.

#### 4.2.2 Voruntersuchung

Für die Zusammensetzung einer Asphaltmischung und die Eigenschaften des Asphaltmörtels spielt die Wahl des Füllers eine bedeutsame Rolle. Aus diesem Grund wurde im Rahmen von Voruntersuchungen [BEARA, 2009], bei denen die SATS-Prüfung mit verschiedenen Asphaltmischungen AC 16 B durchgeführt wurde, die Füllerart variiert.

Die verwendete Gesteinsart war Basalt und Mikrodiorit, die Bitumensorte Straßenbaubitumen 30/45. Die Zusammensetzung des Füllers wurde in drei Kombinationen betrachtet:

- Asphaltmischgut ausschließlich mit Eigenfüller (EF),
- Asphaltmischgut ausschließlich mit Fremdfüller (FF; Kalksteinmehl) und
- Asphaltmischgut mit Zugabe von Eigen- und Fremdfüller in gleichen Anteilen.

Die Voruntersuchungen haben keine deutliche Differenzierung zwischen den Ergebnissen der unter-

suchten Asphaltmischungen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Wahl des Füllers gezeigt. Der Einfluss des Eigen-/Fremdfüllers konnte hier nicht eindeutig verifiziert werden. Zusammenfassend war festzustellen, dass die Frage welche der oben genannten Füller-Kombinationen sich am besten eignet, nicht mit der SATS-Prüfung zu beantworten ist.

Eine Veränderung des Prüfergebnisses ist somit weder in eine positive noch in eine negative Richtung zu erwarten, wenn – wie in der Praxis häufig angewendet – dem Asphaltmischgut zusätzlich Fremdfüller hinzugefügt wird. Die positive Wirkung des Kalkfüllers in einem Asphaltmischgut ist aus bisherigen zahlreichen Untersuchungen bekannt. Die Asphaltmischungen werden somit unter Verwendung von Fremdfüller aus Kalksteinmehl und Eigenfüller (Verhältnis 1:1) zusammengesetzt.

#### 4.2.3 Zusammensetzung des Asphalts AC 16 B

Die Asphaltbinderschicht besteht aus einem Gesteinskörnungsgemisch mit abgestufter Korngrößenverteilung (die Körner haben einen maximalen Durchmesser von 22 mm), und Straßenbaubitumen oder Polymermodifizierten Bitumen als Bindemittel [TL Asphalt-StB 07].

Die Konzeption des Asphaltmischguts AC 16 B, welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersucht wurde, orientiert sich an den Anforderungen für einen AC 16 B N. Die Kornzusammensetzung entspricht auch den Anforderungen für einen AC 16 B S, wobei der Siebdurchgang bei 0,125 mm und 2 mm hierbei an der obersten Grenze liegt. Im Weiteren wird auf eine präzisere Bezeichnung verzichtet, sodass die Asphaltmischungen mit AC 16 B bezeichnet werden.

Die Zusammensetzung der Asphaltmischungen erfolgte unter Berücksichtigung der TL Asphalt-StB 07 und wurde unter dreifacher Variation des Bindemittelgehalts festgelegt. Die verwendeten Gesteinskörnungen wurden hinsichtlich TL Gestein-StB, um die gesteinspezifischen Eigenschaften zu bestimmen, nicht untersucht.

Der Mindest-Bindemittelgehalt soll nach TL Asphalt-StB 07 für eine Asphaltbinderschicht AC 16 B (N oder S) mindestens 4,4 M.-% betragen. Dieser Wert ist auf eine Rohdichte eines Gesteinskörnungsgemisches von 2,650 g/cm<sup>3</sup> bezogen. Der Mindest-Bindemittelgehalt wurde dementsprechend unter

Berücksichtigung der Rohdichte der verwendeten Gesteinskörnungsgemische berechnet.

In Anhang 3 ist die Zusammensetzung der Asphaltmischung für die verschiedenen Gesteinsarten dargestellt.

Der vergleichsweise geringe Bindemittelgehalt beim Asphaltbinder 0/16 mit Basalt resultiert aus der hohen Gesteinsrohndichte von  $3,010 \text{ g/cm}^3$ .

In Abhängigkeit von der Bindemittelsorte variiert der Bindemittelgehalt für eine Gesteinsart (siehe Anhang 3, Spalte „Ist“), um einen Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$  zu erreichen.

Für die drei untersuchten Gesteinsarten, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes verwendet wurden, liegt der Mindest-Bindemittelgehalt bei  $3,9 \text{ M.-%}$  (Basalt) bzw.  $4,3 \text{ M.-%}$  (Grauwacke und Mikrodiorit).

Die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches bleibt für alle drei Gesteinsarten bei den vorgesehenen Varianten (Hohlraumgehalt, Bindemittel) jeweils unverändert und kann dem Anhang 3 entnommen werden.

#### 4.2.4 Zusammensetzung des Asphalts AC 32 T

Die Zusammensetzung der Asphaltmischung für eine Asphalttragschicht AC 32 T entspricht den Vorgaben nach den TL Asphalt-StB 07.

Die Zusammensetzung der Asphaltmischung orientierte sich an den Anforderungen an AC 32 T S. Gleichzeitig wurden aber auch die Anforderungen an AC 32 T N erfüllt. Es handelt sich, wie bei der Binderschicht um die bewährten Rezepturen aus der Praxis. Im Weiteren wurde auf eine präzisere Bezeichnung verzichtet, sodass die Asphaltmischungen mit AC 32 T bezeichnet werden.

Hierbei wurde das Verhältnis Fremdfüller zu Eigenfüller wie bei den Asphaltbindermischungen 1:1 angesetzt.

Der Mindest-Bindemittelgehalt beträgt nach TL Asphalt-StB 07 für AC 32 T S  $3,8 \text{ M.-%}$  und für AC 32 T N  $4,0 \text{ M.-%}$ . Zur Ermittlung des Mindest-Bindemittelgehaltes wurde (wie bei der Asphaltbinderschicht) die Rohdichte des verwendeten Gesteinskörnungsgemisches berücksichtigt.

In Abhängigkeit von der Bindemittelsorte variiert der Bindemittelgehalt je nach Gesteinsart (siehe Anhang 4, Spalte „Ist“), um einen Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$  zu erreichen.

Die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches bleibt für alle drei Gesteinsarten bei den vorgesehenen Varianten (Hohlraumgehalt, Bindemittel) jeweils unverändert und kann dem Anhang 4 entnommen werden.

## 5 Untersuchungsergebnisse

### 5.1 Allgemeines

Im Weiteren werden die gewonnenen Ergebnisse aus der SATS-Prüfung getrennt für die Asphaltbinderschicht AC 16 B und für die Asphalttragschicht AC 32 T dargestellt. Dabei werden die zwei zu ermittelnden Kenngrößen, SATS-Dauerhaftigkeitsindex und die anteilige Sättigung der Asphalt-Probekörper vor und nach der Klimatisierung, analysiert. Nach den in Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 dargestellten Rezepturen wurden die Asphaltmischungen mit den verschiedenen Gesteinsarten hergestellt.

Anschließend werden die gewonnenen Ergebnisse aus dem Flaschen-Rollverfahren dargestellt. Die Untersuchungsergebnisse werden in vier Abschnitten vorgestellt und teilweise bereits kommentiert. Es wurden folgende Kombinationen untersucht:

- 1) Untersuchte Kombinationen (siehe Tabelle 3) mittels der SATS-Prüfung für AC 16 B mit der Vergleichsprüfung: Ermittlung der Steifigkeit nach DIN EN 12697-26 (Anhang C),
- 2) Untersuchte Kombinationen (siehe Tabelle 4) mittels der SATS-Prüfung für AC 32 T mit der

| Bindemittel  | Gesteinsart |             |           |
|--------------|-------------|-------------|-----------|
|              | Basalt      | Mikrodiorit | Grauwacke |
| 10/20        | x           | x           | x         |
| 30/45        | x           | x           | x         |
| 50/70 (SATS) | x           | x           | x         |
| 10/40-65 A   | x           | x           | x         |
| 25/55-55 A   | x           | x           | x         |

Tab. 3: Untersuchte Kombinationen – AC 16 B

| Bindemittel  | Gesteinsart |             |           |
|--------------|-------------|-------------|-----------|
|              | Basalt      | Mikrodiorit | Grauwacke |
| 10/20        | x           | x           | x         |
| 50/70 (SATS) | x           | x           | x         |

Tab. 4: Untersuchte Kombinationen – AC 32 T

Vergleichsprüfung: Ermittlung der Steifigkeit nach DIN EN 12697-26 (Anhang C),

- 3) Untersuchte Kombinationen (siehe Tabelle 5) mittels der SATS-Prüfung für AC 16 B mit der Vergleichsprüfung: Ermittlung der Zugspannung nach DIN EN 12697-46 (direkter Zugversuch),
- 4) Untersuchte Kombinationen (siehe Tabelle 6) mittels des Flaschen-Rollverfahrens nach DIN EN 12697-11 (Teil A).

Die Variation der Art der Probekörper hinsichtlich des Hohlraumgehaltes und der Asphaltart ist in der Tabelle 7 anzusehen. Die Bezeichnungen x und y beziehen sich auf die Asphaltart:

- AC 16 B wird mit (X) und
- AC 32 T mit (Y) gekennzeichnet.

| Gesteinsart |         | Basalt |       | Grauwacke |       |
|-------------|---------|--------|-------|-----------|-------|
|             |         | 10/20  | 30/45 | 10/20     | 30/45 |
| Temperatur  | 0 °C    | x      | x     | x         | x     |
|             | + 5 °C  | x      | x     | x         | x     |
|             | + 20 °C | x      | x     | x         | x     |

Tab. 5: Untersuchte Kombinationen AC 16 B – direkter Zugversuch

| Bindemittel  | Gesteinsart |             |           |
|--------------|-------------|-------------|-----------|
|              | Basalt      | Mikrodiorit | Grauwacke |
| 10/20        | x           | x           | x         |
| 30/45        | x           | x           | x         |
| 50/70 (SATS) | x           | x           | x         |
| 50/70 (Norm) | x           | x           | x         |
| 10/40-65 A   | x           | x           | x         |
| 25/55-55 A   | x           | x           | x         |

Tab. 6: Untersuchte Kombinationen – Flaschen-Rollverfahren

| Probekörper     | Hohlraumgehalt [Vol.-%] |   |    |
|-----------------|-------------------------|---|----|
|                 | 6                       | 8 | 10 |
| MPK             | x/y                     | x | x  |
| PPK             | x/y                     |   |    |
| Prismatische PK | x                       |   |    |

Tab. 7: Variation des Probekörpers

## 5.2 Ergebnisse: SATS-Prüfung dynamischer Spaltzugversuch (Steifigkeit) – AC 16 B

### 5.2.1 Allgemeines

Die Konzeption des Asphaltmischguts AC 16 B mit Basalt, Grauwacke und Mikrodiorit wurde in Kapitel 4.2.3 dargestellt.

Da es sich bei der SATS-Prüfung um einen zeit- aufwändigen Versuchsablauf handelt, wurde in Absprache mit dem Betreuungsausschuss beschlossen, dass die Untersuchungen an den Probekörper AC 16 B, die einen Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% aufweisen, vorrangig durchzuführen sind. Dieser Hohlraumgehalt wurde in Anlehnung an die Praxis gewählt. Dementsprechend wurden die Versuche an diesen Probekörpern überwiegend dreimal durchgeführt.

Bei den Probekörpern mit einem Hohlraumgehalt von  $10\pm 0,5$  Vol.-% und  $8\pm 0,5$  Vol.-% wurden die Versuche zweimal durchgeführt. Wie bereits erwähnt, wurden bei den Marshall-Probekörpern mit dem Hohlraumgehalt von  $8\pm 0,5$  Vol.-% die Versuche nur für einige Varianten durchgeführt.

Die ermittelten Ergebnisse wurden hierbei laufend auf Plausibilität geprüft. Bei einer Unplausibilität wurde ein weiterer Versuch durchgeführt.

### 5.2.2 SATS-Dauerhaftigkeitsindex

Das Ergebnis der SATS-Prüfung ist das SATS-Verhältnis bzw. der SATS-Dauerhaftigkeitsindex ( $DI_{SATS}$ ), wenn die Vergleichsprüfung mittels dynamischen Spaltzugversuchs bestimmt wurde. Dies ist der Mittelwert der verbleibenden Steifigkeiten ( $CTR_R$  – das Verhältnis der Steifigkeit nach und vor der Klimatisierung) aus den oberen vier Probekörpern im Siebträgergestell. Der SATS-Dauerhaftigkeitsindex ( $DI_{SATS}$ ) dient als ein Maß zur Beurteilung des Haftverhaltens der geprüften Probekörper.

Die Untersuchungsergebnisse der SATS-Prüfung sind als arithmetisches Mittel aus zwei oder drei Einzelversuchen, ausgedrückt durch den SATS-Dauerhaftigkeitsindex ( $DI_{SATS}$ ), dargestellt.

Im Folgenden werden die im Rahmen dieses Forschungsprojektes ermittelten Ergebnisse für eine Binderschicht AC 16 B dargestellt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt getrennt für die Marshall-Probekörper (MPK), (s. Tabelle 8 bis



| SATS-Dauerhaftigkeitsindex [%]          |              |         |     |    |
|---|--------------|---------|-----|----|
| Asphalt                                 |              | AC 16 B |     |    |
| Gesteinsart                             |              | Basalt  |     |    |
| Probekörper                             |              | MPK     |     |    |
| Hohlraumgehalt [Vol.-%]                 |              | 6       | 8   | 10 |
| Bindemittel                             | 10/20        | 56      | 50  | 61 |
|   | 30/45        | 14      | - * | 28 |
|   | 50/70 (SATS) | 22      | 32  | 36 |
|   | 10/40-65 A   | 28      | - * | 39 |
|   | 25/55-55 A   | 22      | 29  | 42 |
| * Es wurden keine Versuche durchgeführt |              |         |     |    |

Tab. 8: DI<sub>SATS</sub> – Basalt AC 16 B, (MPK)

| SATS-Dauerhaftigkeitsindex [%]          |              |           |     |    |
|---|--------------|-----------|-----|----|
| Asphalt                                 |              | AC 16 B   |     |    |
| Gesteinsart                             |              | Grauwacke |     |    |
| Probekörper                             |              | MPK       |     |    |
| Hohlraumgehalt [Vol.-%]                 |              | 6         | 8   | 10 |
| Bindemittel                             | 10/20        | 64        | 52  | 49 |
|   | 30/45        | 22        | 27  | 21 |
|   | 50/70 (SATS) | 19        | - * | 32 |
|   | 10/40-65 A   | 24        | - * | 35 |
|   | 25/55-55 A   | 20        | 21  | 23 |
| * Es wurden keine Versuche durchgeführt |              |           |     |    |

Tab. 9: DI<sub>SATS</sub> – Grauwacke AC 16 B, (MPK)

| SATS-Dauerhaftigkeitsindex [%]          |              |             |     |    |
|---|--------------|-------------|-----|----|
| Asphalt                                 |              | AC 16 B     |     |    |
| Gesteinsart                             |              | Mikrodiorit |     |    |
| Probekörper                             |              | MPK         |     |    |
| Hohlraumgehalt [Vol.-%]                 |              | 6           | 8   | 10 |
| Bindemittel                             | 10/20        | 71          | - * | 67 |
|   | 30/45        | 25          | - * | 34 |
|   | 50/70 (SATS) | 32          | - * | 42 |
|   | 10/40-65 A   | 47          | - * | 50 |
|   | 25/55-55 A   | 41          | - * | 61 |
| * Es wurden keine Versuche durchgeführt |              |             |     |    |

Tab. 10: DI<sub>SATS</sub> – Mikrodiorit AC 16 B, (MPK)

Tabelle 10) und für die aus der Asphalt-Probepatte ausgebohrten Probekörper (PPK), (s. Tabelle 11).

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in den Tabellen 8 bis 11 auf die Bezeichnung des Hohlraumgehaltes mit dem Zusatz-Wert d. h. ( $\pm 0,5$ ) verzichtet.

| SATS-Dauerhaftigkeitsindex [%] |         |            |             |
|--------------------------------|---------|------------|-------------|
| Asphalt                        |         | AC 16 B    |             |
| Hohlraumgehalt                 |         | 6 [Vol.-%] |             |
| Probekörper                    |         | PPK        |             |
| Bindemittel                    | Gestein |            |             |
|                                | Basalt  | Grauwacke  | Mikrodiorit |
| 10/20                          | 50      | 53         | 72          |
| 30/45                          | 28      | 24         | 23          |
| 50/70 (SATS)                   | 28      | 28         | 35          |
| 10/40-65 A                     | 23      | 30         | 35          |
| 25/55-55 A                     | 32      | 29         | 39          |

Tab. 11: DI<sub>SATS</sub> – AC 16 B, (PPK)

Aus den ermittelten Ergebnissen konnte folgendes abgeleitet werden:

- Die Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 zeigen das günstigste Verhalten bei Klimatisierungsvorgang mittels SATS-Prüfung. Obwohl dies zu erwarten war, ist das Ergebnis bei den Asphaltmischungen in Kombination mit den anderen vier Bindemitteln deutlicher als angenommen.
- Insgesamt ist eine deutliche Abnahme des SATS-Dauerhaftigkeitsindex bei den Asphaltbindervarianten mit den vier anderen Bindemitteln (30/45, 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A) zu beobachten, was sich nicht mit Erfahrungen aus der Praxis deckt. Es scheint hier der Einfluss der verschiedenen Bitumenarten/-sorten kaum eine Auswirkung auf die Ergebnisse zu haben. Dies ist nicht mit den Erfahrungen aus der Praxis zu bestätigen.
- Es fällt auf, dass die Asphaltmischungen mit Basalt und dem Bitumen 10/20, aber auch in Kombination mit vier anderen Bindemitteln, im Vergleich zu den Asphaltmischungen mit Grauwacke und Mikrodiorit deutlich niedrigere SATS-Dauerhaftigkeitsindexe aufweisen. Diese Feststellung ist insofern widersprüchlich, da aus der Praxis bekannt ist, dass Basalt in der Regel ein günstigeres Haftverhalten hat.

- Der Einfluss der Herstellung des Probekörpers scheint gering zu sein. Sowohl bei den Marshall-Probekörpern als auch bei den ausgebohrten Probekörpern lassen sich tendenziell ähnliche bzw. vergleichbare Werte erzielen. Bei den aus Asphalt-Probepatten gebohrten Probekörpern

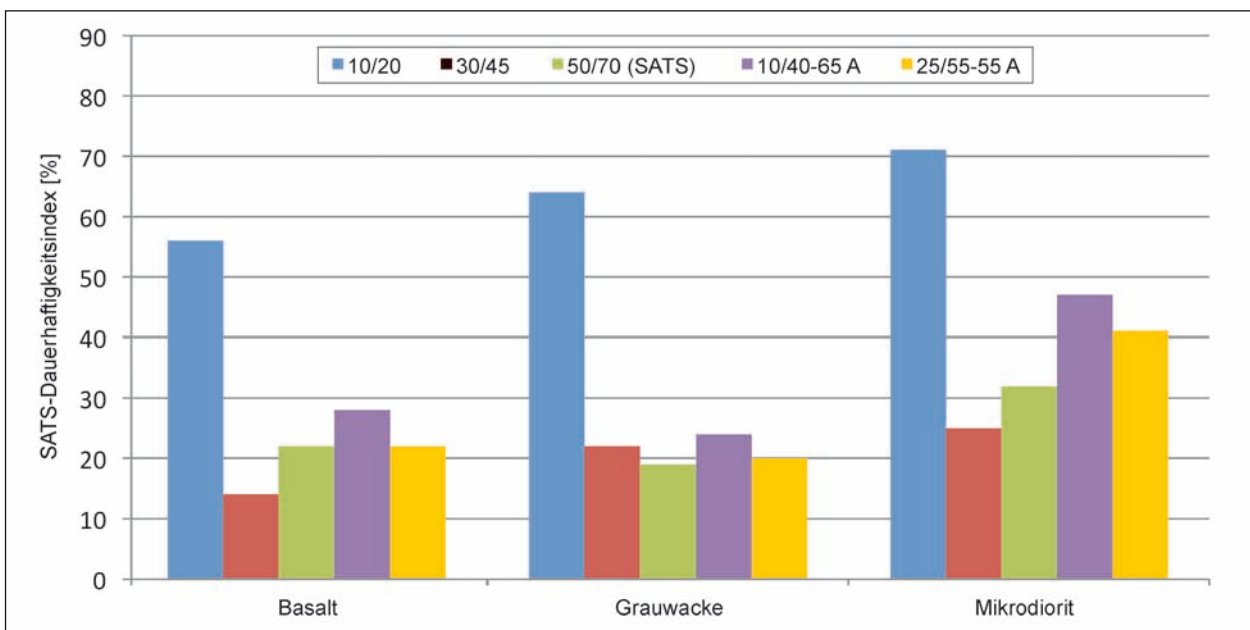
zeigt sich generell eine kleinere Ergebnisspannweite zwischen den Bindemitteln, außer bei 10/20, je Gesteinsart. Mit diesen Probekörpern ist die Ermittlung der Steifigkeit mittels indirektem Spaltzugversuch vorteilhafter, weil die Mantelfläche homogener ist. Demgegenüber ist der Herstellungsvorgang bei den Marshall-Probekörpern einfacher und weniger zeitaufwendig als bei den aus den Asphalt-Probekörpern ausgebohrten Probekörpern.

Probekörper ist dem Bild 12 und Bild 13 zu entnehmen. Die untersuchten Probekörper weisen einen Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-% auf.

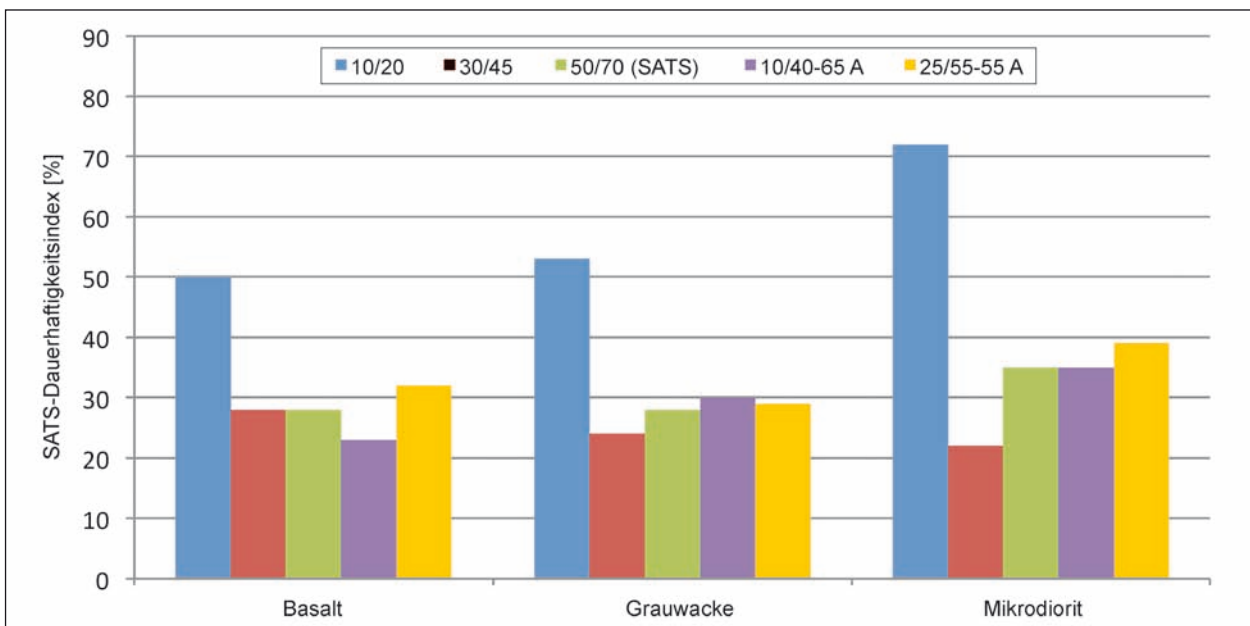
Um Systematiken innerhalb der Ergebnisse zu erkennen, wurden die untersuchten Asphaltmischungen für jede Bitumensorte in Balkenform dargestellt. Es können daraus die jeweils ermittelten Größenordnungen für die Asphaltmischungen abgelesen und untereinander verglichen werden.

Eine grafische Gegenüberstellung der Ergebnisse der Asphaltmischungen hinsichtlich der Art der Pro-

Deutlich wird, dass alle ermittelten Ergebnisse unterhalb der Anforderung des englischen Regel-



**Bild 12:** SATS-Dauerhaftigkeitsindex – AC 16 B (MPK mit V = 6±0,5 Vol.-%)



**Bild 13:** SATS-Dauerhaftigkeitsindex – AC 16 B (PPK mit V = 6±0,5 Vol.-%)

werks liegen, d. h. der SATS-Dauerhaftigkeitsindex des geprüften Asphalts ist kleiner als 80 %. Diese Anforderung des Regelwerks gilt allerdings für Asphaltmischungen mit der Bitumensorte 10/20; bei Verwendung des Bitumens 10/20 wurde zumindest tendenziell je Gesteinsart der höchste SATS-Dauerhaftigkeitsindex je Gesteinsart ermittelt

Die grafische Darstellung der Dauerhaftigkeitsindexe ( $DI_{SATS}$ ) für alle anderen untersuchten AC 16 B Kombinationen befindet sich im Anhang 5 und Anhang 6.

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse bezüglich Bindemittel, Gesteinsart, Hohlraumgehalt und den Steifigkeits-Werten näher analysiert und interpretiert.

### Bindemittel

Wie erwartet weisen die Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe auf. Bei den vier anderen Bindemitteln (30/45, 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A) zeigt sich kein einheitliches Bild. Die Ergebnisse sind für jede Gesteinsart unterschiedlich auf- und absteigend und weisen keinen eindeutigen Trend auf. Auffällig ist die „kleine“ Ergebnisspannweite zwischen den Bitumen 30/45, 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A (siehe Bild 12 und Bild 13).

Da es sich hier um Asphaltmischungen handelt, die aus vier unterschiedlichen Bindemitteln und drei unterschiedlichen Gesteinsarten hergestellt wurden, war ein differenziertes Verhalten zwischen den untersuchten Kombinationen zu erwarten. Vor allem, da sich die Eigenschaften zwischen einem Straßenbaubitumen und einem Polymermodifizierten Bitumen hinsichtlich der Hafteigenschaften stark voneinander unterscheiden sollten. Zusammenfassend lässt sich aus den oben dargestellten Ergebnissen hinsichtlich der Bitumenart/-sorte Folgendes ableiten:

- Bei den Marshall-Probekörpern mit dem Bitumen 10/20, die einen Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-% aufweisen, liegen die SATS-Dauerhaftigkeitsindexe zwischen 71 % (Mikrodiorit) und 56 % (Basalt).

Bei den ausgebohrten Probekörpern, die die gleiche Zusammensetzung wie die Marshall-Probekörper haben, befinden sich die SATS-Dauerhaftigkeitsindexe zwischen 72 % (Mikrodiorit) und 50 % (Basalt).

- Bei den Marshall-Probekörpern in Kombination mit den vier anderen Bindemitteln, die einen Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-% aufweisen, liegen die SATS-Dauerhaftigkeitsindexe zwischen 14 % (beim Asphaltmischgut mit Basalt und Bitumen 30/45) und 47 % (beim Asphaltmischgut mit Mikrodiorit und Bitumen 10/40-65 A).

Bei den ausgebohrten Probekörpern befinden sich die SATS-Dauerhaftigkeitsindex-Werte, zwischen 22 % (beim Asphaltmischgut mit Mikrodiorit und Bitumen 30/45) und 39 % (beim Asphaltmischgut mit Mikrodiorit und Bitumen 25/55-55 A).

- Bei den Marshall-Probekörpern (außer mit dem Bindemittel 10/20) zeigt sich bei allen drei Gesteinsarten tendenziell gleiches Verhalten hinsichtlich der Bitumenart/-sorte, d. h. die niedrigsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe sind bei den Varianten mit dem Bitumen 30/45 zu entnehmen und die höchsten mit dem Bitumen 10/40-65 A.
- An den untersuchten Asphaltbinder-Varianten stellt sich der Einfluss des Bindemittels (30/45, 50/70, 10/40-65 A, 25/55-55 A) auf die Beurteilung der Dauerhaftigkeit mittels SATS-Prüfung als unsystematisch und schwach heraus. Obwohl sich diese vier Bindemittel sowohl in ihrer physikalischen Struktur als auch in ihrem chemischen Aufbau unterscheiden, ist dies hier nicht deutlich zu erkennen.
- Ein weiteres unerwartetes Ergebnis trat bei Asphaltmischungen mit der Bitumensorte 30/45 auf. Die Bitumensorte 30/45 gehört zu den härtesten Sorten unter den Straßenbaubitumen in Deutschland, weshalb deutlich höhere Werte des SATS-Dauerhaftigkeitsindex zu erwarten waren, insbesondere wenn die Ergebnisse mit den Bitumensorten 10/20 und 50/70 verglichen werden.
- Aus den ermittelten Ergebnissen ist abzulesen, dass sich die Asphaltmischungen mit dem Bitumen 50/70 im Vergleich zu den Asphaltmischungen mit den anderen drei Bindemitteln (30/45, 25/55-55 A und 10/40-65 A) kaum unterscheiden. Für alle untersuchten Asphaltbindervarianten in Kombination mit dem Bindemittel 50/70 liegen die SATS-Dauerhaftigkeitsindexe höher als bei dem Bindemittel 30/45.
- Bei den Marshall-Probekörpern für die Asphaltmischungen in Kombination mit der Bitumen-

sorte 10/40-65 A sind bei allen drei Gesteinsarten tendenziell höhere Werte als unter Verwendung der Bitumensorte 25/55-55 A festzustellen. Bei den ausgebohrten Probekörpern hingegen sind die Unterschiede in den Ergebnissen weniger deutlich, sodass die SATS-Dauerhaftigkeitsindexe keine einheitliche Tendenz aufweisen. Aufgrund der niedrigeren Viskosität und der niedrigeren Polymermodifizierung der Bitumensorte 25/55-55 A gegenüber der Bitumensorte 10/40-65 A wurden hier eindeutigere Unterschiede erwartet.

Die untersuchten Probekörper mit Hohlraumgehalt  $8\pm 0,5$  Vol. % und  $10\pm 0,5$  Vol.-% zeigen, hinsichtlich der Bitumenart/-sorte, ein ähnliches Verhalten wie die Probekörper mit dem Hohlraumgehalt  $6\pm 0,5$  Vol.-%. Die grafische Darstellung der Ergebnisse ist Anhang 6 zu entnehmen.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Klimatisierungsvorgang im Druckalterungsbehälter, d. h. der simulierte Alterungsprozess, eine deutliche Auswirkung auf die Asphaltproben hat. Dies ist durch die stark abfallenden Steifigkeits-Werte, die zu niedrigeren SATS-Dauerhaftigkeitsindexe geführt haben, erkennbar. Um diese Erkenntnis zu überprüfen, wurden Marshall-Probekörper, die im Druckalterungsbehälter im Siebträger auf vierter Position (von oben gesehen) lagen, extrahiert und der Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt. Zum besseren Vergleich wurden hier auch unconditionierte Marshall-Probekörper extrahiert und der Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt. Somit konnte das Verhalten des Bindemittels in den Marshall-Probekörper vor und nach dem Klimatisierungsvorgang im Vergleich zu dem Anlieferungszustand des Bindemittels gegenübergestellt werden.

Hier konnte festgestellt werden, dass die Viskosität des Bindemittels stark gestiegen ist, was zu einem erwartungsgemäß höheren Erweichungspunkt Ring und Kugel geführt hat. Dies ist beim Bindemittel 10/20 am deutlichsten zu erkennen.

Der Anstieg des Wertes „Erweichungspunkt Ring und Kugel“ des Bindemittels in Anlieferungszustand zum rückgewonnenem Bindemittel aus den Marshall-Probekörpern nach der Klimatisierung ist

- beim Bindemittel 10/20 zwischen 18,1 K (Basalt) und 20,6 K (Mikrodiorit),
- beim Bindemittel 30/45 zwischen 12,3 K (Grauwacke) und 13,3 K (Basalt),

- beim Bindemittel 50/70 zwischen 10,8 K (Basalt) und 12,8 K (Mikrodiorit),
- beim Bindemittel 25/55-55 A zwischen 11,8 K (Mikrodiorit) und 9,4 K (Basalt),
- beim Bindemittel 10/40-65 A zwischen 5,9 K (Grauwacke) und 2,9 K (Basalt). Hier ist der niedrigste Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel zu verzeichnen.

Die grafische und tabellarische Darstellung der Ergebnisse ist Anhang 7 zu entnehmen.

### Gesteinsart

In Bild 14 und 15 sind die Ergebnisse für die Marshall-Probekörpern AC 16 B mit dem Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-% dargestellt.

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich Folgendes ableiten:

- Beim Vergleich der Gesteinsarten fällt auf, dass die gewonnen SATS-Dauerhaftigkeitsindexe bei den Basalt-Asphaltmischungen mit den Bindemitteln 10/20 und 30/45 am niedrigsten sind. In Kombination mit den Bindemitteln 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A liegen die Werte bei den Basalt-Asphaltmischungen auf einem vergleichbaren Niveau mit den Grauwacke-Asphaltmischungen. Dies stimmt nicht mit den aus der Praxis bekannten günstigen Haftenigenschaften von Basalt gegenüber Grauwacke überein.
- Auffällig sind hingegen die Ergebnisse bei den Mikrodiorit-Asphaltmischungen, die bei allen hier verwendeten Bitumenarten/-sorten am

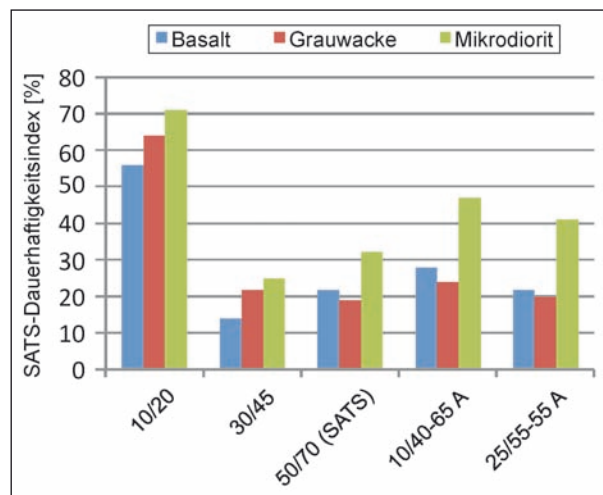


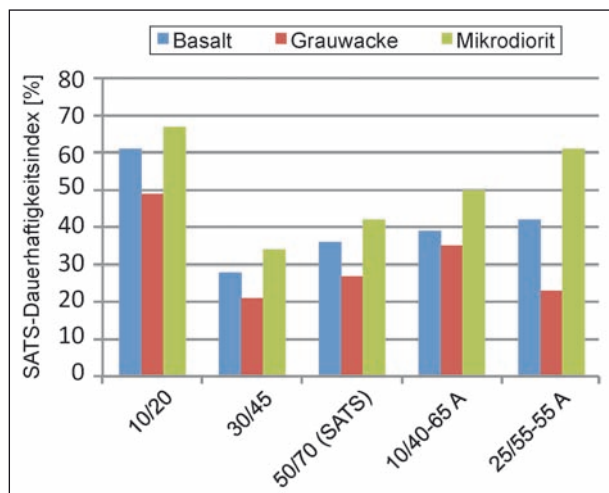
Bild 14: SATS-Dauerhaftigkeitsindex – AC 16 B, Vergleich der Gesteinsart, MPK mit V =  $6\pm 0,5$  Vol.-%

höchsten sind. Dieses Ergebnis deckt sich nicht mit den praktischen Erfahrungen, da der verwendete Mikrodiorit für seine Quellneigung bekannt ist und demzufolge als ein problematisches Gestein bezeichnet wird.

- Die dritte untersuchte Gesteinsart ist die Grauwacke. Dieses Gestein wird als haftkritisch und wasseraffin bezeichnet. Da es sich bei der SATS-Prüfung um die Prüfung der Adhäsion zwischen dem Gestein und dem Bitumen handelt, wurde bei den Grauwacke-Asphaltmischungen ein noch ungünstigeres Verhalten gegenüber den Basalt-Asphaltmischungen erwartet. Aus den vorliegenden Ergebnissen (Bild 14 und Bild 15) ist dies nicht eindeutig zu identifizieren. Bei den Marshall-Probekörpern mit dem Hohlraumgehalt von  $10\pm 0,5$  Vol.-% weisen die Grauwacke-Asphaltmischungen im Vergleich zu den anderen zwei Gesteinsarten die niedrigsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe auf (Bild 15).

Sowohl beim Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% als auch bei dem Hohlraumgehalt von  $10\pm 0,5$  Vol.-% lässt sich die gleiche Reihenfolge (Mikrodiorit, Basalt, Grauwacke) bezüglich der Gesteinsart, die die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe aufweist, identifizieren. Ausnahme sind die Werte der Grauwacke-Asphaltmischungen mit den Bindemitteln 10/20 und 30/45 am zuerst genannten Hohlraumgehalt.

Generell ist festzustellen, dass die Ergebnisse für alle drei untersuchten Gesteinsarten (Basalt, Mikrodiorit und Grauwacke) trotz ihrer unterschiedlichen Gesteinseigenschaften tendenziell ein ähnliches Verhalten aufweisen.



**Bild 15** SATS-Dauerhaftigkeitsindex – AC 16 B, Vergleich der Gesteinsart, MPK mit  $V = 10\pm 0,5$  Vol.-%

Da es sich hierbei um drei Gesteinsarten handelt, die sich sowohl in ihrem petrografischen als auch in ihrer mineralogischen Zusammensetzung stark unterscheiden, war eine stärkere Differenzierung der Ergebnisse zu erwarten.

### Hohlraumgehalt

Eine weitere Einflussgröße, die hier betrachtet wird, ist der Hohlraumgehalt der Asphaltmischungen. Die Untersuchungen wurden an den Probekörpern, die einen Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-% aufweisen, durchgeführt. Die Untersuchungen an Probekörpern, mit einem Hohlraumgehalt von  $8\pm 0,5$  Vol.-% wurden nur an ausgewählten Varianten durchgeführt. In den Bildern 16 bis 18 sind die Ergebnisse der SATS-Prüfung in Hinsicht auf den unterschiedlichen Hohlraumgehalt getrennt nach der Gesteinsart zusammengefasst.

Die Auswertung der Zusammenhänge zwischen dem Hohlraumgehalt und des SATS-Dauerhaftigkeitsindex ergaben folgende Erkenntnisse:

- Es lassen sich bei fast allen untersuchten Asphalt-Kombinationen die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe bei dem Hohlraumgehalt von  $10\pm 0,5$  Vol.-% entnehmen.
- Bei den Grauwacke- und Mikrodiorit-Asphaltmischungen mit den Bindemitteln 10/20 und 30/45 ist der Einfluss des Hohlraumgehaltes nicht einheitlich abgebildet. Bei den Asphaltmischungen mit den Bindemitteln 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A lässt sich tendenziell ein ähnliches Verhalten feststellen, d. h. die Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt  $10\pm 0,5$  Vol.-% weisen die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe auf.
- Insgesamt sind die Ergebnisse für die Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von  $8\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-% schwer zu interpretieren, weil sie auf ein günstigeres und somit untypisches Verhalten hindeuten. Laut dem Entwickler der SATS-Prüfung werden die höheren SATS-Dauerhaftigkeitsindexe positiv bewertet, weil sie auf eine längere Nutzungsdauer bzw. eine bessere Dauerhaftigkeit hinweisen.

Aus den bisherigen Erfahrungen ist bekannt, dass ein höherer Hohlraumgehalt das Tragfähigkeitsverhalten der fertigen Schicht sowie den Grad des Zutrittes von Feuchtigkeit in die Schicht negativ beeinflusst. Grundsätzlich führt ein niedriger Hohlraumgehalt zu einer Verzögerung der Haftverluste zwi-



schen Gesteinskörner und Bitumen, da unter anderem die Feuchtigkeit in geringerem Maße als bei einem höheren Hohlraumgehalt in die Schicht eindringen kann. Bei hohlraumreichen Asphaltmischungen treten die Alterungseffekte schneller ein, als bei hohlraumarmen Asphaltmischungen.

Diese Kenntnis zeigte sich nicht mit der SATS-Prüfung, die durch die SATS-Dauerhaftigkeitsindexe ausgedrückt wird. Es scheint hier so zu sein, dass

ein höherer Hohlraumgehalt hinsichtlich der Bewertung der Dauerhaftigkeit eines Asphalts vorteilhafter ist. Hierbei zeigen die Ergebnisse, dass mit steigendem Hohlraumgehalt eine unerwartete Verbesserung der Nutzungsdauer der Asphaltmischungen und somit eine Verbesserung der Verformungsbeständigkeit zu erwarten ist.

Um den Einfluss des Hohlraumgehaltes noch genauer zu überprüfen, wurden im Rahmen dieses

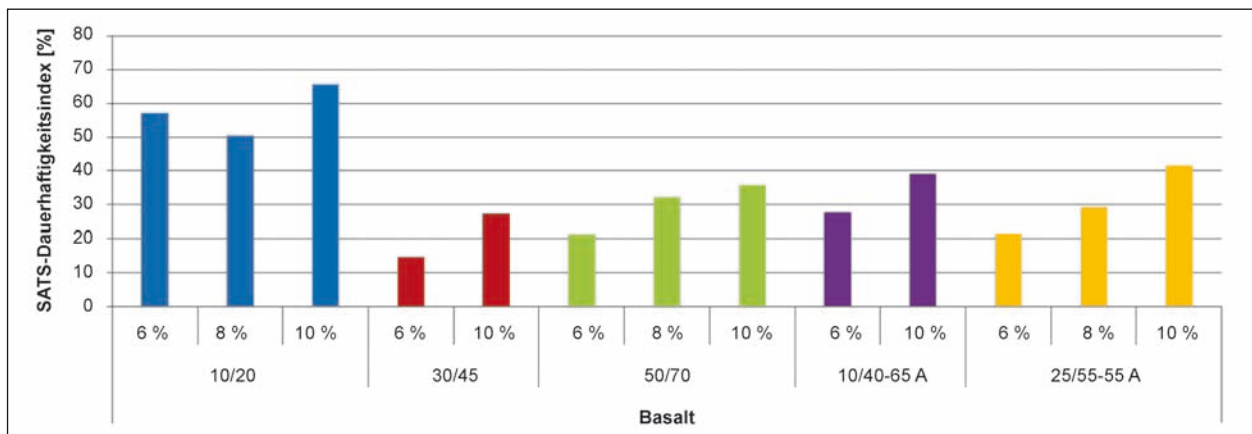


Bild 16: Basalt AC 16 B mit Hohlraumgehalten 6 Vol.-%, 8 Vol.-% und 10 Vol.-%

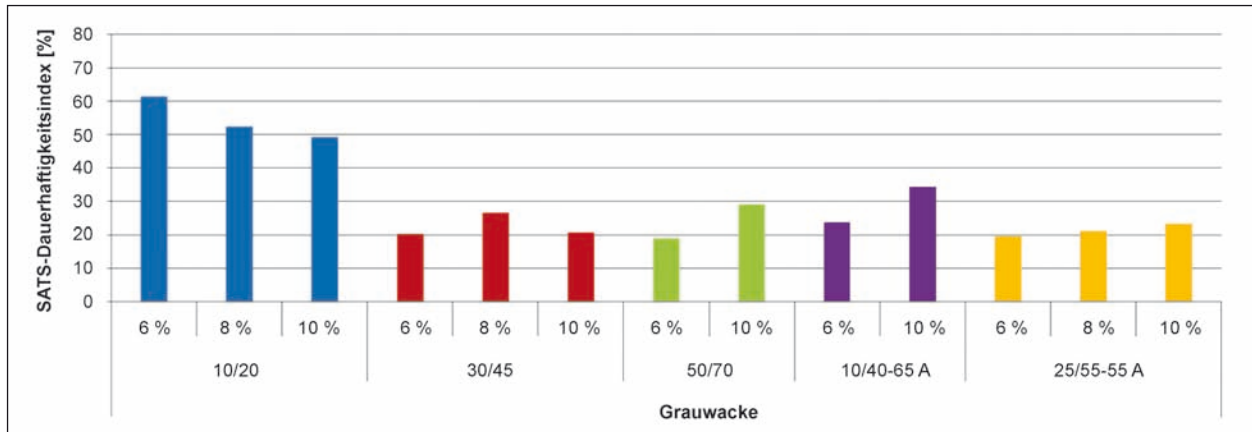


Bild 17: Grauwacke AC 16 B mit Hohlraumgehalten 6 Vol.-%, 8 Vol.-% und 10 Vol.-%

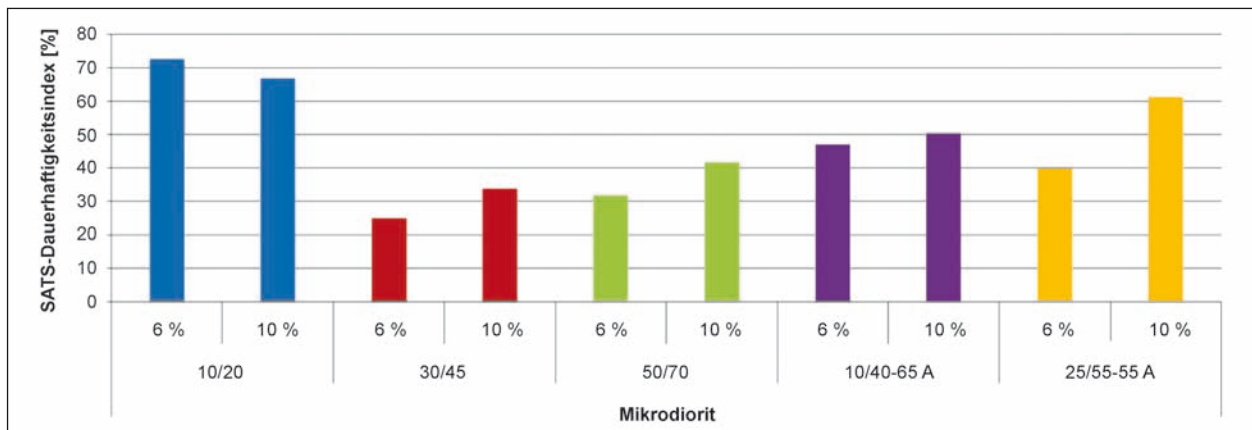


Bild 17: Mikrodiorit AC 16 B mit Hohlraumgehalten 6 Vol.-% und 10 Vol.-%

Forschungsprojektes zusätzlich zum Untersuchungsprogramm, die Asphaltmischungen mit den Hohlraumgehalten von 4 Vol.-%, 5 Vol.-%, 7 Vol.-% und 9 Vol.-% untersucht. Die Ergebnisse sind überwiegend nur einfach belegt und als Tastversuche zu betrachten. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse, getrennt nach der Probekörperart MPK oder PPK, sind dem Anhang 6 zu entnehmen.

Obwohl ein Einfluss des Hohlraumgehaltes aus den ermittelten Ergebnissen zu erkennen ist, zeigen sich keine eindeutigen Tendenzen. Eine systematische Betrachtung der Ergebnisse je Gesteinsart oder Bindemittelart/-sorte in der Hinsicht auf den Hohlraumgehalt ist hier erschwert, weil die Ergebnisse nicht qualitativ bestätigt werden konnten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchten Zusammenhänge für eine aussagekräftige Beurteilung in Hinsicht auf das Haftverhalten zwischen dem Gestein und dem Bitumen bzw. die Dauerhaftigkeit eines Asphalts mit diesen Verfahren nicht zu begründen sind.

Bei allen untersuchten Asphalt-Variationen konnte die Signifikanz des Hohlraumgehaltes nicht nachgewiesen werden. Der Hohlraumgehalt als Merkmalsgröße zur quantitativen Bewertung des Haftverhaltens zwischen dem Bitumen und den Gesteinen zeigt keinen erkennbaren Trend.

### Steifigkeit

Die Ermittlung der Steifigkeiten wurde im Kapitel 3.1.4 erläutert. Der SATS-Dauerhaftigkeitsindex ist das Verhältnis der Steifigkeiten nach und vor der Klimatisierung, daher werden diese im Folgenden analysiert. Problematisch an dieser Art der Auswertung ist, dass die absoluten Steifigkeiten unberücksichtigt bleiben, und somit Asphalte mit niedriger Anfangssteifigkeit besonderes günstig beurteilt werden. Dies liegt unter anderem an der Streubreite der Messergebnisse, die mit dieser Art der Prüfung zu erwarten sind.

Um eine Übersicht zu bekommen wurden die Steifigkeits-Werte, die mittels indirektem Spaltzugversuch nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) gewonnen wurden, in Tabelle 12 bis Tabelle 14 zusammengefasst. Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse erfolgte getrennt nach der Art der Probekörper, d. h. Marshall-Probekörper oder ausgebohrter Probekörper und dem Hohlraumgehalt:  $6\pm 0,5$  Vol. %,  $8\pm 0,5$  Vol.-%, und  $10\pm 0,5$  Vol.-%. Hierbei wurden minimale und maximale Steifig-

keitsmodule, vor und nach der Klimatisierung aufgelistet, die aus drei (zwei) durchgeführten Versuchen ermittelt wurden. Anschließend wurde ein durchschnittliches Steifigkeitsmodul (aus allen durchgeführten Versuchen je Variante) ermittelt. In der letzten Spalte befinden sich die SATS-Dauerhaftigkeitsindex-Werte ( $DI_{SATS}$ ), die auf Basis diesen Steifigkeiten berechnet wurden.

Für alle anderen untersuchten Hohlraumgehalte befinden sich die Ergebnisse getrennt nach der Gesteinsart in den Anhängen 8, 9 und 10.

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, wurden alle Asphalt-Probekörper, wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der gleichen Kraft beansprucht. Dies hat dazu geführt, dass die Ergebnisse bzw. die Steifigkeiten vor der Klimatisierung für die Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 bei einigen Asphalt-Varianten am unteren Grenzbereich des empfohlenen Verformungsbereiches lagen. Hierbei hätte man eine höhere Kraft aufbringen können, wobei diese nach der Klimatisierung wieder zu hoch und für alle anderen Varianten ungünstig gewesen wäre.

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich folgendes ableiten:

In Bezug auf das Bindemittel wurden für alle untersuchten Asphaltmischungen in Kombination mit dem Bindemittel 10/20 die höchsten Steifigkeiten, sowohl vor dem Klimatisierungsvorgang als auch nach dem Klimatisierungsvorgang, ermittelt. Danach folgen die Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/40-65 A, gefolgt von den Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 30/45. Die niedrigsten Steifigkeiten sind bei den Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 50/70 festzustellen. Die Steifigkeiten der Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 25/55-55 A liegen in einem ähnlichen Bereich wie die beim Bindemittel 50/70, aber auf einem höheren Niveau.

Es ist weiterhin zu erkennen, dass die Klimatisierung im Druckalterungsbehälter eine deutliche Abnahme der Steifigkeits-Werte bewirkt hat. Wenn man die Anfangs-Steifigkeits-Werte betrachtet, kann eine plausible Reihenfolge des Bindemittels erkannt werden. Tendenziell sinken die Steifigkeits-Werte zunehmend von der Bitumensorte 10/20 über 10/40-65 A zu 50/70. Nach dem Klimatisierungsvorgang weisen die Bindemittel bzw. die Steifigkeits-Werte eine ähnliche Reihung wie vor dem Klimatisierungsvorgang auf, wobei hier die Ergebnisse viel weniger differenzieren. Auffällig sind bei allen unter-



| Asphalt                 |             |                 | AC 16 B  |        |            |   |       |            |                    |     |
|-------------------------|-------------|-----------------|--|--------|------------|---|-------|------------|--------------------|-----|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |             |                 | (6 ± 0,5)  |        |            |   |       |            |                    |     |
| Probekörper             | Gesteinsart | Bindemittel     | Steifigkeit – vor der Klimatisierung<br>CTR <sub>U</sub> |        |            | Steifigkeit – nach der Klimatisierung<br>CTR <sub>C</sub> |       |            | DI <sub>SATS</sub> |     |
|                         |             |                 | Min.   | Max.   | Mittelwert | Min.  | Max.  | Mittelwert |                    |     |
|                         |             |                 | [MPa]  |        |            | [MPa]   |       |            |                    | [%] |
| MPK                     | Basalt      | 10/20           | 8.650  | 10.270 | 9.350      | 4.840   | 6.400 | 5.220      | 56                 |     |
|                         | Mikrodiorit |                 | 7.840  | 9.570  | 8.770      | 5.770   | 6.730 | 6.310      | 71                 |     |
|                         | Grauwacke   |                 | 7.810  | 10.460 | 8.990      | 4.120   | 6.800 | 5.760      | 64                 |     |
|                         | Basalt      | 30/45           | 6.330  | 11.160 | 7.970      | 920   | 1.340 | 1.130      | 14                 |     |
|                         | Mikrodiorit |                 | 6.520  | 7.320  | 6.230      | 1.050   | 1.970 | 1.530      | 25                 |     |
|                         | Grauwacke   |                 | 5.360  | 8.400  | 6.950      | 1.130   | 2.040 | 1.470      | 22                 |     |
|                         | Basalt      | 50/70<br>(SATS) | 4.000  | 5.400  | 4.440      | 730   | 1.440 | 954        | 22                 |     |
|                         | Mikrodiorit |                 | 4.170  | 5.160  | 4.740      | 1.200   | 2.040 | 1.510      | 32                 |     |
|                         | Grauwacke   |                 | 4.210  | 5.300  | 4.720      | 620   | 1.380 | 900        | 19                 |     |
|                         | Basalt      | 10/40-65 A      | 8.720  | 12.300 | 9.260      | 1.880   | 3.540 | 2.530      | 28                 |     |
|                         | Mikrodiorit |                 | 7.060  | 8.710  | 7.760      | 2.570   | 5.250 | 3.650      | 47                 |     |
|                         | Grauwacke   |                 | 6.230  | 10.070 | 7.570      | 1.520   | 1.940 | 1.790      | 24                 |     |
|                         | Basalt      | 25/55-55 A      | 4.230  | 7.750  | 5.990      | 950   | 2.260 | 1.280      | 22                 |     |
|                         | Mikrodiorit |                 | 4.730  | 5.680  | 5.140      | 1.440   | 2.750 | 2.070      | 41                 |     |
|                         | Grauwacke   |                 | 3.800  | 5.800  | 4.540      | 700   | 1.180 | 910        | 19                 |     |
|                         | PPK         | Basalt          | 10/20  | 8.540  | 11.400     | 10.020  | 3.690 | 7.370      | 5.180              | 50  |
|                         |             | Mikrodiorit     |  | 4.970  | 10.780     | 7.670   | 4.530 | 6.900      | 5.360              | 72  |
|                         |             | Grauwacke       |  | 7.320  | 10.510     | 8.430   | 3.750 | 4.760      | 4.470              | 53  |
| Basalt                  |             | 30/45           | 3.840  | 5.830  | 4.710      | 1.080   | 1.510 | 1.310      | 28                 |     |
| Mikrodiorit             |             |                 | 4.070  | 6.200  | 4.970      | 770   | 1.340 | 1.095      | 22                 |     |
| Grauwacke               |             |                 | 3.980  | 5.030  | 5.190      | 1.010   | 1.500 | 1.230      | 24                 |     |
| Basalt                  |             | 50/70<br>(SATS) | 2.750  | 3.690  | 3.290      | 810   | 1.140 | 920        | 28                 |     |
| Mikrodiorit             |             |                 | 3.550  | 4.470  | 3.920      | 1.020   | 1.740 | 1.330      | 35                 |     |
| Grauwacke               |             |                 | 2.420  | 3.410  | 3.160      | 620   | 1.170 | 850        | 28                 |     |
| Basalt                  |             | 10/40-65 A      | 6.070  | 8.950  | 6.980      | 1.300   | 1.900 | 1.570      | 23                 |     |
| Mikrodiorit             |             |                 | 4.330  | 6.690  | 5.780      | 1.540   | 2.620 | 2.050      | 35                 |     |
| Grauwacke               |             |                 | 5.320  | 6.250  | 5.810      | 1.430   | 2.080 | 1.740      | 30                 |     |
| Basalt                  |             | 25/55-55 A      | 3.420  | 4.890  | 4.080      | 1.120   | 1.430 | 1.280      | 32                 |     |
| Mikrodiorit             |             |                 | 3.450  | 4.130  | 3.860      | 1.090   | 2.030 | 1.500      | 39                 |     |
| Grauwacke               |             |                 | 2.740  | 4.130  | 3.440      | 920   | 1.080 | 990        | 29                 |     |

Tab. 12: Steifigkeits-Werte AC 16 B, V = 6±0,5 Vol.-%

suchten Asphaltmischungen die stark abfallenden End-Steifigkeiten. Diese ist besonderes bei den Bindemitteln 10/40-65 A und 30/45 festzustellen.

Obwohl der kleinste „Abfall“ der Werte bei den Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 zu erkennen ist, wurde der angestrebte SATS-Dauerhaftigkeitsindex von 80 % trotzdem nicht erreicht. Bei allen anderen Varianten zeigt sich ein ähnliches Bild, d. h. die Steifigkeiten sind stark abgefallen und die Differenz der Steifigkeits-Werte zwischen den vier Bindemitteln (30/45, 50/70, 25/55-55 A und 10/40-65 A) ist in viel kleinerem Maß im Vergleich zu den Anfangs-Steifigkeiten festzustellen. Hier-

durch liegt der SATS-Dauerhaftigkeitsindex für alle untersuchten Varianten auf einem vergleichbaren Niveau.

Bei dem Vergleich der Steifigkeiten hinsichtlich der Art der Probekörper lässt sich bei allen untersuchten Varianten mit beiden Probekörperarten tendenziell ein gleiches Verhalten erkennen.

In Tabelle 12 sind die Steifigkeiten für die Marshall-Probekörper und für die ausgebohrten Probekörper zusammengefasst. Die erreichten Steifigkeiten bei den ausgebohrten Probekörpern sind insgesamt niedriger als die ermittelten Steifigkeiten bei den

| Asphalt                 |             |              | AC 16 B  |        |            |   |       |            |                    |
|-------------------------|-------------|--------------|--|--------|------------|---|-------|------------|--------------------|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |             |              | (8 ± 0,5)  |        |            |   |       |            |                    |
| Probekörper             | Gesteinsart | Bindemittel  | Steifigkeit – vor der Klimatisierung<br>CTR <sub>U</sub> |        |            | Steifigkeit – nach der Klimatisierung<br>CTR <sub>C</sub> |       |            | DI <sub>SATS</sub> |
|                         |             |              | Min.   | Max.   | Mittelwert | Min.  | Max.  | Mittelwert |                    |
|                         |             |              | [MPa]  |        |            | [MPa]   |       |            | [%]                |
| MPK                     | Basalt      | 10/20        | 9.080  | 11.740 | 9.860      | 4.060   | 5.890 | 4.940      | 49                 |
|                         |             | 50/70 (SATS) | 3.520  | 4.240  | 3.850      | 790   | 1.830 | 1.170      | 33                 |
|                         |             | 25/55-55 A   | 3.230  | 4.350  | 3.800      | 1.040   | 1.120 | 1.100      | 29                 |
|                         | Grauwacke   | 10/20        | 7.010  | 8.900  | 8.010      | 3.500   | 4.950 | 4.170      | 52                 |
|                         |             | 30/45        | 4.700  | 7.330  | 5.410      | 940   | 2.110 | 1.460      | 27                 |
|                         |             | 25/55-55 A   | 3.990  | 4.250  | 4.130      | 760   | 970   | 870        | 21                 |

Tab. 13: Steifigkeits-Werte AC 16 B, V = 8±0,5 Vol.-%

| Asphalt                 |             |              | AC 16 B  |       |            |   |        |            |                    |    |
|-------------------------|-------------|--------------|--|-------|------------|---|--------|------------|--------------------|----|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |             |              | (10 ± 0,5)   |       |            |   |        |            |                    |    |
| Probekörper             | Gesteinsart | Bindemittel  | Steifigkeit – vor der Klimatisierung<br>CTR <sub>U</sub> |       |            | Steifigkeit – nach der Klimatisierung<br>CTR <sub>C</sub> |        |            | DI <sub>SATS</sub> |    |
|                         |             |              | Min.   | Max.  | Mittelwert | Min.  | Max.   | Mittelwert |                    |    |
|                         |             |              | [MPa]  |       |            | [MPa]   |        |            | [%]                |    |
| MPK                     | Basalt      | 10/20        | 6.800  | 9.720 | 8.250      | 3.990   | 6.400  | 5.290      | 61                 |    |
|                         |             |              | Mikrodiorit  | 6.420 | 8.030      | 7.110   | 4.520  | 5.180      | 4.740              | 67 |
|                         |             |              | Grauwacke  | 6.610 | 8.670      | 7.510   | 31.990 | 4.350      | 3.680              | 49 |
|                         | Basalt      | 30/45        | 4.590  | 5.580 | 4.960      | 1.130   | 1.550  | 1.350      | 28                 |    |
|                         |             |              | Mikrodiorit  | 4.690 | 6.320      | 5.690   | 1.510  | 2.260      | 1.860              | 34 |
|                         |             |              | Grauwacke  | 3.450 | 5.400      | 4.370   | 670    | 800        | 910                | 21 |
|                         | Basalt      | 50/70 (SATS) | 2.670  | 3.890 | 3.280      | 1.000   | 1.500  | 1.210      | 36                 |    |
|                         |             |              | Mikrodiorit  | 2.900 | 3.790      | 3.360   | 1.170  | 1.580      | 1.380              | 42 |
|                         |             |              | Grauwacke  | 2.920 | 3.700      | 3.150   | 810    | 1.650      | 1.120              | 32 |
|                         | Basalt      | 10/40-65 A   | 6.500  | 7.450 | 7.140      | 2.180   | 3.130  | 2.750      | 39                 |    |
|                         |             |              | Mikrodiorit  | 6.540 | 8.990      | 7.370   | 710    | 3.810      | 3.630              | 50 |
|                         |             |              | Grauwacke  | 5.340 | 7.430      | 6.260   | 1.760  | 2.640      | 2.130              | 35 |
|                         | Basalt      | 25/55-55 A   | 2.770  | 3.800 | 3.190      | 940   | 1.830  | 1.320      | 42                 |    |
|                         |             |              | Mikrodiorit  | 2.910 | 3.700      | 3.220   | 1.730  | 2.120      | 1.960              | 61 |
|                         |             |              | Grauwacke  | 2.720 | 3.760      | 3.150   | 610    | 1.120      | 720                | 23 |

Tab. 14: Steifigkeits-Werte AC 16 B, V = 10±0,5 Vol.-%

Marshall-Probekörpern, aber sie zeigen tendenziell die gleiche Reihenfolge.

Hierbei zeigt sich, wie bei den Marshall-Probekörpern, zwischen den Anfangs-Steifigkeiten eine deutliche Differenzierung bezüglich der Bindemittelart/-sorte. Demgegenüber sind die End-Steifigkeiten schwer einzuordnen. Durchgängig ist eine geringere Differenzierung zwischen den Ergebnissen zu erkennen. Bei den Basalt- und Grauwacke Asphaltmischungen liegen die End-Steifigkeiten für beide Probekörper-Arten in der gleichen Höhe. Bei den Mikrodiorit-Asphaltmischungen sind bei den ausgebohrten Probekörpern niedrigere Werte, sowohl vor der Klimatisierung als auch

nach der Klimatisierung, zu erkennen. Da die Anfangs-Steifigkeiten niedriger als bei den Marshall-Probekörpern sind, hat dies teilweise zu den höheren SATS-Dauerhaftigkeitsindex-Werten geführt.

Weiterhin wurde der Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die Steifigkeit untersucht. Obwohl die Ergebnisse bei den Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von 10±0,5 Vol.-% tendenziell auf niedrigeren Niveau als die Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von 6±0,5 Vol.-% liegen, ist dies nicht immer der Fall. Aus den grafischen Darstellungen (Bild 19 bis Bild 21) ist deutlich zu erkennen, dass die End-Steifigkeits-Werte für die bei-

den Hohlraumgehalte und alle drei Gesteinsarten eng beieinander liegen.

Um den Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Hohlraumgehalten genauer zu analysieren, wurden die gewonnenen Steifigkeiten zur Veranschaulichung in Bild 19 bis Bild 21 exemplarisch je Gesteinsart dargestellt.

Bei den Grauwacke- und Mikrodiorit-Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 lässt sich eine größere Ergebnisspannweite erkennen. Demgegenüber sind bei den Basalt-Asphaltmischungen höhere End-Steifigkeits-Werte beim Hohlraumgehalt von  $10 \pm 0,5$  Vol.-% zu erkennen als bei den entsprechenden Kombinationen mit einem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-%.

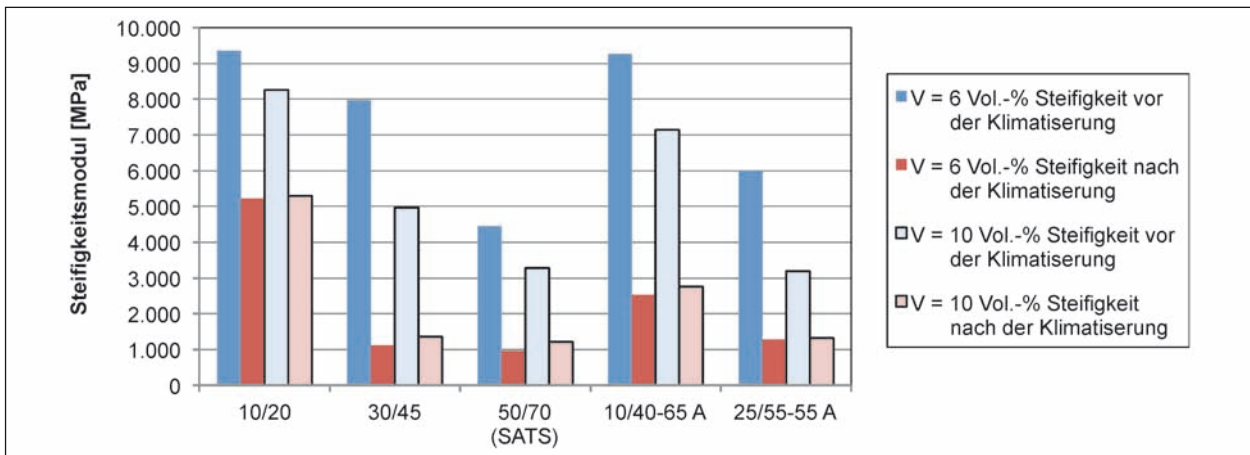


Bild 19: Steifigkeitsmodul – Basalt AC 16 B (MPK)

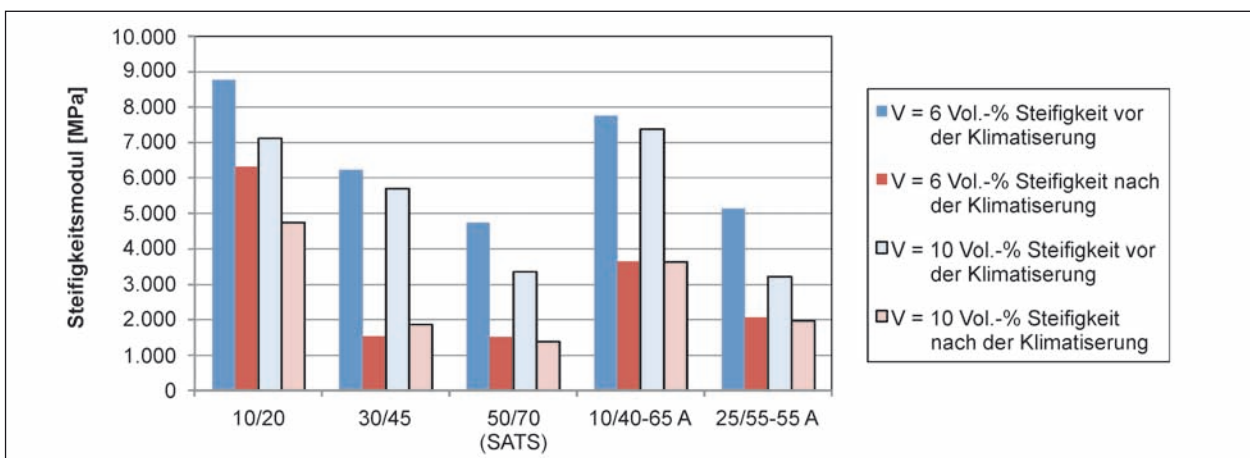


Bild 20: Steifigkeitsmodul – Mikrodiorit AC 16 B (MPK)

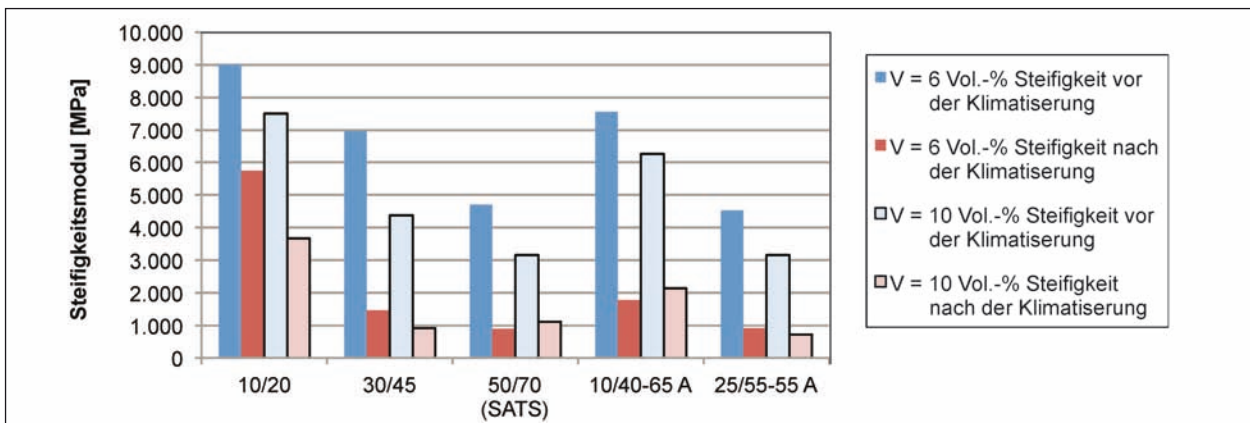


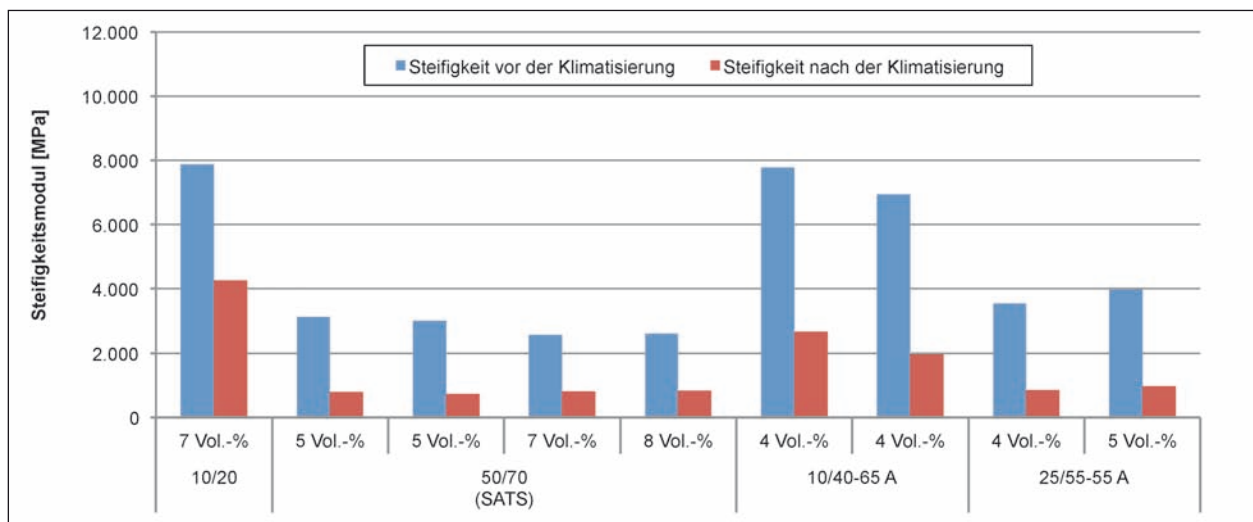
Bild 21: Steifigkeitsmodul – Grauwacke AC 16 B (MPK)

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, zeigen die Kombinationen mit einem Hohlraumgehalt von  $8 \pm 0,5$  Vol.-% kein eindeutiges Verhalten, sodass eine Klassifizierung der Ergebnisse weder in die eine noch in die andere Richtung möglich ist. Auffällig sind die Ergebnisse bei Basalt. Hierbei lassen sich höhere Steifigkeiten als bei einem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol. % erkennen. Die ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 12 angegeben.

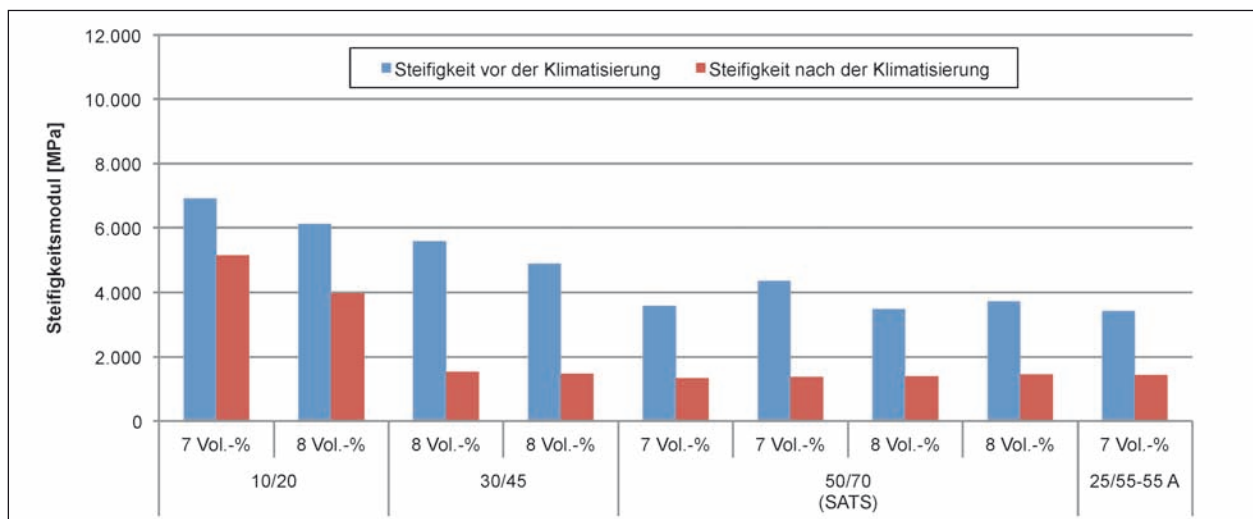
Aus der bisherigen Erfahrung ist bekannt, dass der Hohlraumgehalt ein signifikanter Faktor bei der Beurteilung der Nutzungsdauer eines Asphalts ist. Aus dieser Überlegung wurden, wie bereits erwähnt, einige Varianten mit dem Hohlraumgehalt von 4 Vol.-%, 5 Vol.-%, 7 Vol.-% und 9 Vol. % untersucht. Die Versuche wurden überwiegend an ausgebohrten Probekörpern durchgeführt. Eine ta-

bellarische Zusammenfassung aller Ergebnisse ist den Anhängen 8 bis 10 zu entnehmen. In Bild 22 und Bild 23 ist eine grafische Darstellung der einzelnen Versuche für Asphaltmischungen mit Grauwacke und Mikrodiorit dargestellt, da hier die meisten Versuche durchgeführt wurden.

Anhand der ermittelten Ergebnissen lässt sich ein ähnlicher Verlauf der Ergebnisse wie bei allen bisher interpretierten Hohlraumgehalten erkennen, d. h. die ermittelten Steifigkeiten sind bei den Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 am höchsten. Die Steifigkeiten vor der Klimatisierung sind deutlich unterschiedlich und bilden plausibel die erwartete Reihenfolge der Ergebnisse ab. Nach der Klimatisierung pendeln sich die Ergebnisse auf ein vergleichbar niedriges Niveau ein, die Unterschiede vor der Klimatisierung sind nicht mehr vorhanden.



**Bild 22:** Steifigkeitsmodule – Grauwacke AC 16 B (PPK), unterschiedlicher Hohlraumgehalt



**Bild 23:** Steifigkeitsmodule – Mikrodiorit AC 16 B (PPK), unterschiedlicher Hohlraumgehalt

Überwiegend ist eine Abnahme der Steifigkeiten mit zunehmendem Hohlraumgehalt bei untersuchten Varianten erkennbar, wobei dies nicht immer zutrifft (z. B. bei dem Mikrodiorit mit dem Bindemittel 50/70 und einem Hohlraumgehalt von 7 Vol.-% bzw. 8 Vol.-%).

Bei dem Vergleich der Hohlraumgehalte am Beispiel der Grauwacke-Asphaltnmischungen in Kombination mit dem Bindemittel 50/70 kann bei den Hohlraumgehalten 5 Vol.-%, 7 Vol.-% und 8 Vol.-% praktisch kein Unterschied zwischen den Ergebnissen festgestellt werden (Bild 22).

Bei der Betrachtung des Einflusses der Gesteinsarten auf die Steifigkeit kann festgehalten werden:

- Vor der Klimatisierung sind die höchsten Steifigkeiten bei den Basalt-Asphaltnmischungen mit dem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-% – außer in Kombination mit dem Bindemittel 50/70 – zu entnehmen. Bei dem Hohlraumgehalt  $10 \pm 0,5$  Vol.-% sind überwiegend höhere Werte als bei den Mikrodiorit-Asphaltnmischungen zu erkennen. Nach der Klimatisierung sind bei den Basaltnmischungen tendenziell niedrigere Steifigkeiten als bei den Mikrodiorit-Asphaltnmischungen zu entnehmen.
- Bei den Grauwacke-Asphaltnmischungen lassen sich überwiegend die niedrigsten Steifigkeiten sowohl vor der Klimatisierung als auch nach der Klimatisierung feststellen.
- Wie bereits angedeutet, weisen die Mikrodiorit-Asphaltnmischungen bei den meisten Varianten die höchsten Steifigkeiten auf. Diese sind bei den Ergebnissen nach der Klimatisierung deutlich zu erkennen.

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die Ergebnisse bei allen drei Gesteinsarten auf einem vergleichbaren Niveau liegen, sodass eine erwartete Differenzierung der Ergebnisse nicht zu erkennen ist.

Nachteilig bei dieser Art der Bewertung ist, dass die gewonnenen Steifigkeiten eine breite Spannweite aufweisen, d. h. dass die Ergebnisse stark variieren. Durch die Mittelung relativiert sich das Endergebnis.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem gewonnenen Datenmaterial keine klare Systematik des Verhaltens, infolge Klimatisierung, im Hinblick auf Größenordnung und Richtung der Asphaltmi-

schungen bezüglich des Hohlraumgehaltes oder der Gesteinseigenschaften zu erkennen ist.

### 5.2.3 Sättigung vor und nach dem Klimatisierungsvorgang

Die Sättigung vor und nach der Klimatisierung soll als weiteres Ergebnisse der SATS-Prüfung Angaben über die Wasseraufnahme und die Wasserempfindlichkeit ermöglichen.

Die Wasseraufnahme setzt sich aus Haftwasser, Kristallwasser und innerkristallinem Quellwasser zusammen [HERBST, 2003]. Je höher der Wert der Sättigung nach der Klimatisierung ist, desto stärker wurde die Feuchtigkeit in dem Probekörper gebunden und desto geringer ist die Resistenz der Probe gegen die Folgen von Feuchtigkeitseinwirkungen.

Die Ermittlung des Sättigungswertes vor und nach der Klimatisierung wurde in Kapitel 3.1.4 beschrieben. Gemäß Prüfnorm werden die Probekörper, welche eine Sättigung vor der Klimatisierung von über 80 % aufweisen, nicht mehr verwendet und aus der weiteren Prüfung ausgeschlossen.

Die zunächst gewonnenen Werte aus der anteiligen Sättigung, dienen für weitere Berechnungen, sodass die Sättigungs-Werte vor und nach der Klimatisierung nach den vorgegebenen Gleichungen (siehe Kapitel 3.1.4) berechnet werden können. Die Sättigung vor der Klimatisierung wird mit ( $S$ ) und die Sättigung nach der Klimatisierung wird mit ( $S_a$ ) bezeichnet. Beide Werte werden prozentual ausgedrückt.

In Tabelle 15 und Tabelle 16 sind die Untersuchungsergebnisse für die Prokörper mit den Hohlraumgehalten  $6 \pm 0,5$  Vol.-% und  $10 \pm 0,5$  Vol.-% aufgeführt. Die Sättigungen ( $S$  und  $S_a$ ) sind als arithmetisches Mittel aus drei (zwei) Einzelwerten zusammengefasst.

Vorerst werden zur Verdeutlichung der Entstehung des Einzelwertes bzw. Endergebnis ( $S$  und  $S_a$ ) für einen Versuch, die Ergebnisse exemplarisch getrennt nach Gesteinsart gegenübergestellt (siehe Bild 24 bis Bild 26). Die Bezeichnung der Probekörper von eins (1) bis fünf (5) ist auf ihre Lage in dem Siebträgergestell bezogen. Der oben positionierte Probekörper ist mit der Nummer 1 bezeichnet und die darunter liegenden Probekörper folgen mit aufsteigender Zahl. Der unten positionierte Probekörper Nummer fünf, der vollkommen im Wasser liegt, wird separat betrachtet und bewertet.



| Asphalt                 |                 |             | AC 16 B  |   |      |
|-------------------------|-----------------|-------------|--|---|------|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |                 |             | (6 ± 0,5)                                      |   |      |
| Probekörper             | Bindemittel     | Gesteinsart | Sättigung (S) in [%]<br>vor der Klimatisierung | Sättigung (S <sub>a</sub> ) in [%]<br>nach der Klimatisierung |      |
|                         |                 |             | PK 1 bis 5                                     | PK 1 bis 4  | PK 5 |
| MPK                     | 10/20           | Basalt      | 43   | 27  | 84   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 49   | 30  | 119  |
|                         |                 | Grauwacke   | 34   | 14  | 107  |
|                         | 30/45           | Basalt      | 49   | 28  | 82   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 42   | 26  | 111  |
|                         |                 | Grauwacke   | 51   | 24  | 116  |
|                         | 50/70<br>(SATS) | Basalt      | 50   | 28  | 98   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 39   | 28  | 136  |
|                         |                 | Grauwacke   | 38   | 19  | 126  |
|                         | 10/40-65 A      | Basalt      | 32   | 17  | 67   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 50   | 32  | 120  |
|                         |                 | Grauwacke   | 35   | 15  | 113  |
|                         | 25/55-55 A      | Basalt      | 50   | 29  | 92   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 55   | 39  | 135  |
|                         |                 | Grauwacke   | 33   | 16  | 112  |
| PPK                     | 10/20           | Basalt      | 49   | 33  | 82   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 63   | 33  | 117  |
|                         |                 | Grauwacke   | 46   | 23  | 107  |
|                         | 30/45           | Basalt      | 62   | 35  | 92   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 53   | 36  | 129  |
|                         |                 | Grauwacke   | 47   | 21  | 105  |
|                         | 50/70<br>(SATS) | Basalt      | 71   | 39  | 108  |
|                         |                 | Mikrodiorit | 56   | 37  | 115  |
|                         |                 | Grauwacke   | 37   | 20  | 104  |
|                         | 10/40-65 A      | Basalt      | 44   | 31  | 73   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 56   | 35  | 113  |
|                         |                 | Grauwacke   | 52   | 26  | 114  |
|                         | 25/55-55 A      | Basalt      | 61   | 39  | 98   |
|                         |                 | Mikrodiorit | 68   | 38  | 127  |
|                         |                 | Grauwacke   | 52   | 29  | 112  |

Tab. 15: Sättigung vor und nach der Klimatisierung – MPK und PPK mit V = 6±0,5 Vol.-% (AC 16 B)

Die Bezeichnung eines Versuches (der Diagrammtitel in Bild 24 bis Bild 26) beinhaltet die Gesteinsart (Grauwacke-G, Basalt-B oder Mikrodiorit-M), die Probekörperart (MPK oder PPK), den Hohlraumgehalt (6 oder 10 Vol.-%), die Asphaltart (Binderschicht mit B oder Tragschicht mit T abgekürzt) und die Bitumenart/-sorte (10/20, 30/45, 50/70 usw.). Die letzte Zahl deutet auf die Anzahl der Versuche hin.

Aus den vorliegenden Ergebnissen wird deutlich, dass die Sättigungswerte nach der Klimatisierung (S<sub>a</sub>) bei allen untersuchten Varianten um etwa 40 % bis 50 % im Vergleich zu den Sättigungswerten vor der Klimatisierung (S) abgefallen sind.

Durch die Lagerung an Luft (obere vier Probekörper), die Temperatur von 85 °C und den Druck von



| Asphalt                 |              |             | AC 16 B                                     |  |      |
|-------------------------|--------------|-------------|---|--|------|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |              |             | (10 ± 0,5)                                  |  |      |
| Probekörper             | Bindemittel  | Gesteinsart | Sättigung (S) in [%] vor der Klimatisierung | Sättigung (S <sub>a</sub> ) in [%] nach der Klimatisierung |      |
|                         |              |             | PK 1 bis 5                                  | PK 1 bis 4   | PK 5 |
| MPK                     | 10/20        | Basalt      | 50  | 22   | 68   |
|                         |              | Mikrodiorit | 55  | 21   | 79   |
|                         |              | Grauwacke   | 49  | 18   | 80   |
|                         | 30/45        | Basalt      | 45  | 19   | 55   |
|                         |              | Mikrodiorit | 45  | 22   | 77   |
|                         |              | Grauwacke   | 52  | 20   | 82   |
|                         | 50/70 (SATS) | Basalt      | 45  | 17   | 56   |
|                         |              | Mikrodiorit | 52  | 20   | 97   |
|                         |              | Grauwacke   | 47  | 14   | 71   |
|                         | 10/40-65 A   | Basalt      | 47  | 26   | 57   |
|                         |              | Mikrodiorit | 51  | 21   | 91   |
|                         |              | Grauwacke   | 48  | 16   | 78   |
|                         | 25/55-55 A   | Basalt      | 51  | 20   | 59   |
|                         |              | Mikrodiorit | 56  | 17   | 90   |
|                         |              | Grauwacke   | 44  | 21   | 78   |

Tab. 16: Sättigung vor und nach der Klimatisierung – MPK mit V = 10±0,5 Vol.-% (AC 16 B)

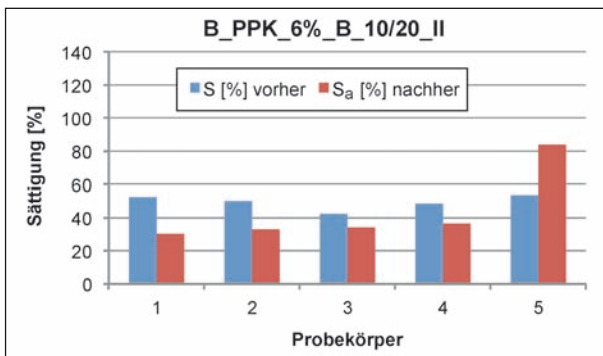


Bild 24: Sättigung vor und nach der Klimatisierung – Basalt

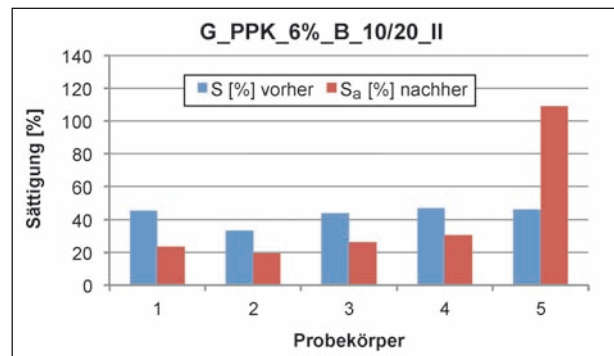


Bild 26: Sättigung vor und nach der Klimatisierung – Grauwacke

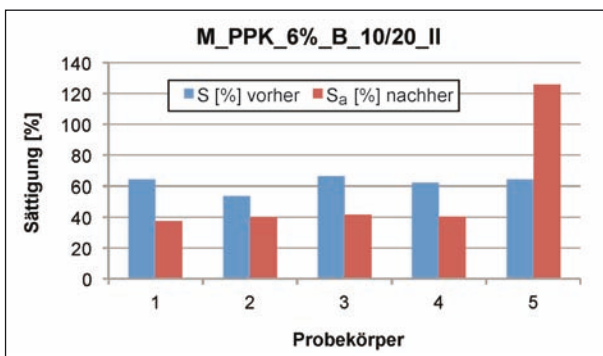


Bild 25: Sättigung vor und nach der Klimatisierung – Mikrodiorit

21 bar, hat sich die anfängliche Wassermenge in den Asphalt-Probekörpern reduziert.

Dieses Verhalten ist bei allen untersuchten Kombinationen zu erkennen. Die in dem Siebträgergestell unten positionierte Probe (Position 5), d. h. der im Wasser liegende Probekörper, hat erwartungsgemäß den höchsten S<sub>a</sub>-Wert.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Versuche (Bild 24 bis Bild 26) fällt auf, dass die Sättigungs-Werte sowohl vor der Klimatisierung (S) als

auch nach der Klimatisierung bei den ersten vier im Siebträgergestell positionierten Probekörpern auf vergleichbarem Niveau liegen. Dieses Verhalten ist bei allen untersuchten Varianten, unabhängig von Hohlraumgehalt, Gesteinsart oder Bindemitteln, durchgehend zu erkennen.

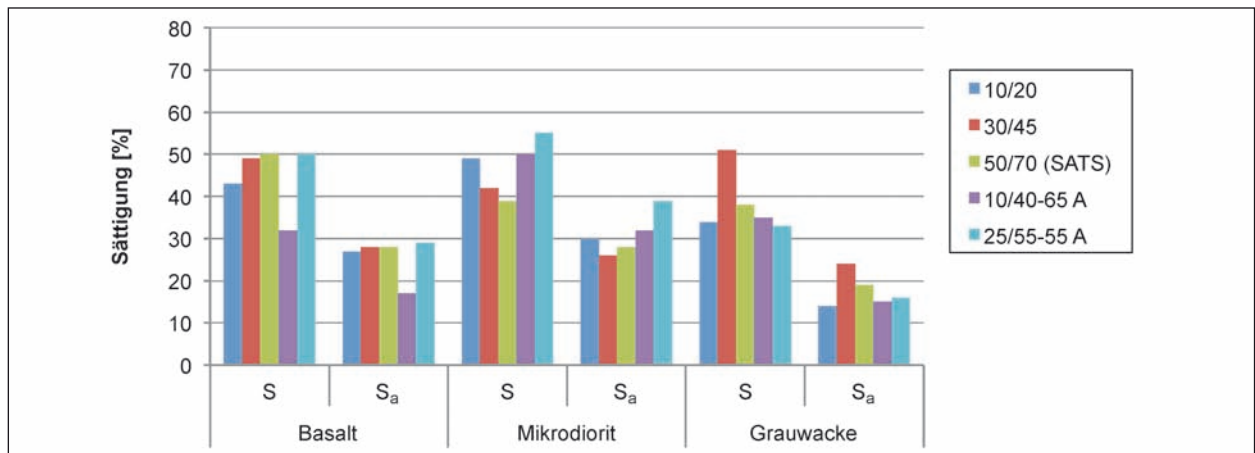
Bei den hier untersuchten Asphaltbindervarianten hat eine teilweise Sättigung von 30 Minuten auf den drei Gesteinsarten keinen signifikanten Unterschied bewirkt, sodass die Ergebnisse weder nach Gesteinsart noch nach Bitumenart/-sorte eingeordnet werden können. Die Ergebnisse deuten auf keinen systematischen Zusammenhang hin.

Zur Verdeutlichung sind die Ergebnisse in Bild 27 bis Bild 29 in Form eines Histogramms wiedergegeben worden.

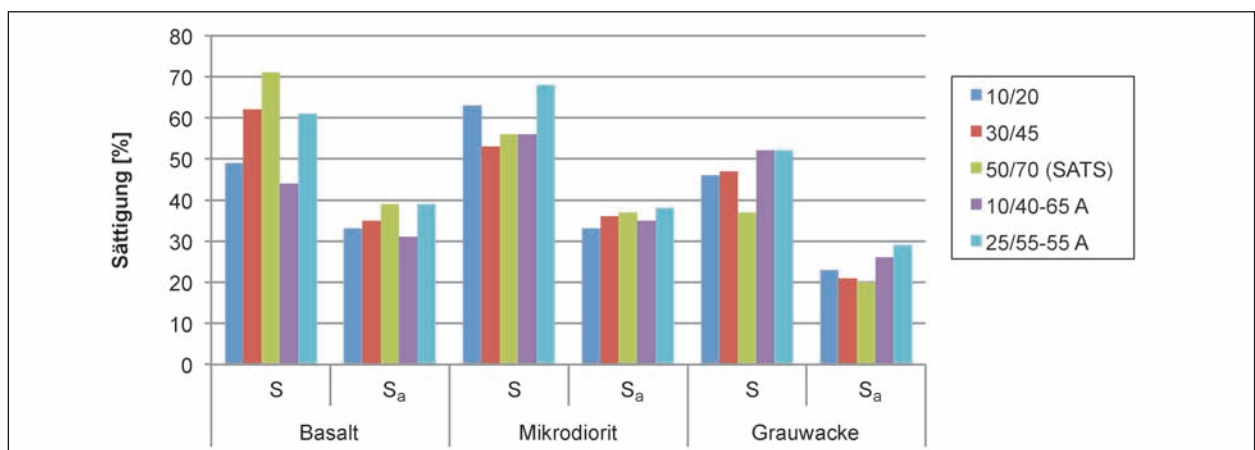
Auf den ersten Blick zu erkennen sind die erhöhten Sättigung-Werte bei den ausgebohrten Asphalt-Probekörpern. Die Art der Probekörper macht sich hier bemerkbar. Es zeigt sich bei den ausgebohrten

Probekörpern für alle drei Gesteinsarten eine Steigerung des S- und  $S_a$ -Wertes um etwa 10 %, wobei die Ergebnisse tendenziell in die gleiche Richtung wie bei den Marshall-Probekörpern hindeuten. Dies ist mit der Beschaffenheit der Oberfläche zu begründen. Bei den ausgebohrten Probekörpern, deren Oberfläche geschlossener als bei den Marshall-Probekörper ist, bleibt die zuerst aufgenommene Wassermenge in der Probe, sodass bei der Bestimmung der anteiligen Sättigung vor der Klimatisierung, die unmittelbar nach der Entnahme der Probekörper aus den Wasserbecken erfolgt, höher ausfällt.

Eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Gesteinsarten ist nicht deutlich erkennbar. Dieses Verhalten ist besonders bei den Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von  $10 \pm 0,5$  Vol.-% auffällig. Hierbei liegen die Ergebnisse, d. h. der S- und  $S_a$ -Wert, bei allen untersuchten Varianten auf einem vergleichbaren Niveau. Eine Klassifizierung hinsichtlich der Gesteinsart infolge von einem



**Bild 27:** Sättigung S und  $S_a$  – MPK mit  $V = 6 \pm 0,5$  Vol.-% – AC 16 B



**Bild 28:** Sättigung S und  $S_a$  – PPK mit  $V = 6 \pm 0,5$  Vol.-% – AC 16 B

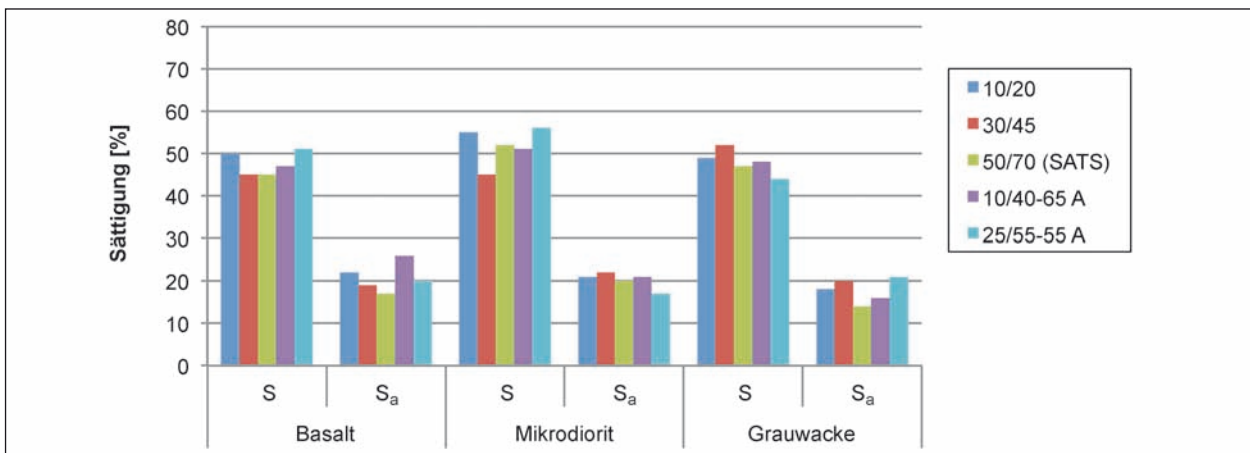


Bild 29: Sättigung S und S<sub>a</sub> – MPK mit V = 10±0,5 Vol.-% – AC 16 B

halbstündigen anteiligen Sättigungs-Verfahren scheint hier nicht aussagekräftig zu sein.

Bei dieser Art der Prüfung handelt es sich um eine Wasseraufnahme, bei der die Proben mit gleichem Hohlraumgehalt für lediglich 30 Minuten unter einem Druck von 40 bis 70 kPa im Wasser eingetaucht werden. Aus diesem Grund scheint diese Beanspruchung eine vergleichbare Auswirkung auf alle Asphalt-Probekörpern mit gleichem Hohlraumgehalt, ausgedrückt durch die Sättigungs-Werten (S) und (S<sub>a</sub>), zu haben.

Es ist hier sehr wichtig zu erläutern, dass sich bei den gewonnenen Sättigungsergebnissen, die nach der vorgegebenen Gleichung (siehe Kapitel 3.1.4) berechnet und prozentual ausgedrückt werden, um eine Art der Auswertung handelt, bei der ein Unterschied von einem Gramm schon eine Veränderung von über 3 % bewirkt. Allein aus diesem Grund sind Ergebnis-Schwankungen zu erwarten.

Es ist viel entscheidender herauszufinden, wie sich diese „verbleibende Feuchtigkeit“ in den Proben auf weitere Kenngrößen auswirkt.

Nach der SATS-Prüfung ist der unterste Probekörper Nummer fünf nicht weiter zu bewerten. Da Probekörper fünf während des kompletten Klimatisierungsvorgangs im Wasser liegt, sind die Steifigkeiten erwartungsgemäß am ungünstigsten und mit den anderen vier Probekörpern nicht vergleichbar. Aufgrund dieser Tatsache wird Probekörper Nummer fünf bei der Ermittlung des SATS-Dauerhaftigkeitsindex nicht herangezogen und aus der Auswertung ausgeschlossen. Es mag dieser Ausschluss bei der Ermittlung des SATS-Dauerhaftigkeitsindex begründet sein, aber ein endgültiger Ausschluss dieses Wertes bei der Bewer-

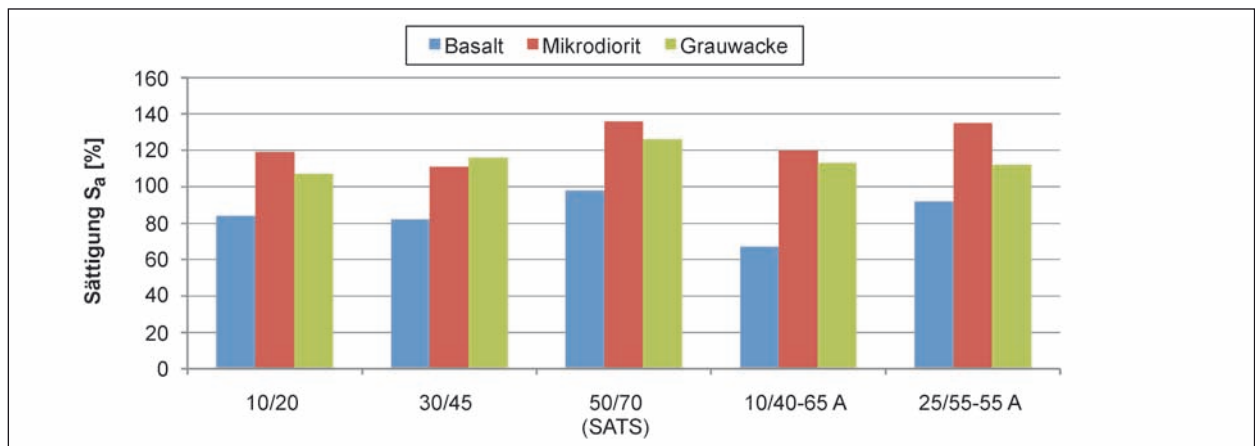
tung eines Asphalts bezüglich der Wasseraufnahme scheint nicht sinnvoll zu sein.

Aufgrund der Wasserlagerung von etwa 91 Stunden lassen sich bei den Probekörpern fünf die wesentlichen Unterschiede zwischen den Gesteinsarten deutlich erkennen. Demzufolge wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der S<sub>a</sub>-Wert beim Probekörper Nummer fünf näher untersucht und analysiert.

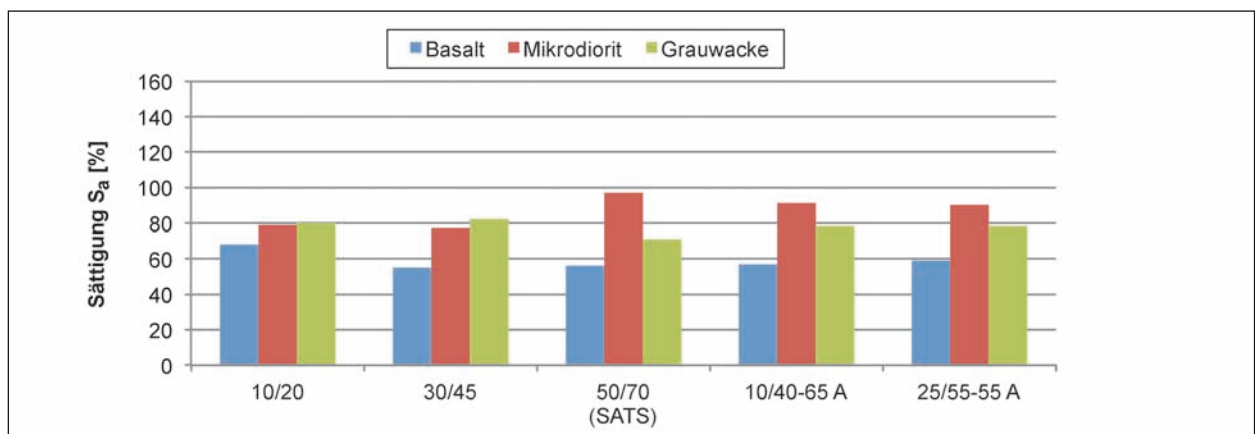
In Bild 30 und Bild 31 sind die Untersuchungsergebnisse (S<sub>a</sub>) für die Marshall-Probekörper, die einen Hohlraumgehalt von 6±0,5 Vol.-% und 10±0,5 Vol.-% aufweisen, zusammengefasst. Bei dieser Art der Darstellung sind die S<sub>a</sub>-Werte nach der Klimatisierung für die Probekörper fünf in Balkenform für die unterschiedlichen Gesteinsarten und Bitumenarten/-sorten anzusehen.

Wie bereits erwähnt, macht sich der Einfluss des Wassers, ausgedrückt durch den S<sub>a</sub>-Wert, zwischen unterschiedlichen Gesteinsarten bei Probekörper fünf, im Vergleich zu den vier oben positionierten Probekörpern bemerkbar. Mithilfe des S<sub>a</sub>-Wertes wird die Beständigkeit der Probekörper gegenüber einer mäßigen Wasseraufnahme bewertet. Ein niedrigerer S<sub>a</sub>-Wert kann als positiv angesehen werden, weil dieser auf eine niedrigere Wasseraufnahme hindeutet. Anhand der ermittelten Ergebnisse kann festgehalten werden:

- Insgesamt weisen die Basalt Probekörper bei allen untersuchten Varianten die niedrigsten S<sub>a</sub>-Werte auf. Beim Hohlraumgehalt von 6±0,5 Vol.-% liegen die Sättigungs-Werte (S<sub>a</sub>) bei Basalt zwischen 67 % (10/40-65 A) und 92 % (50/70 SATS).



**Bild 30:** Sättigung nach der Klimatisierung – MPK 5 mit  $V = 6 \pm 0,5$  Vol.-% (AC 16 B)



**Bild 31:** Sättigung nach der Klimatisierung – MPK mit  $V = 10 \pm 0,5$  Vol.-% (AC 16 B)

- Danach folgen die Grauwacke-Asphaltmischungen mit den  $S_a$ -Werten zwischen 107 % (10/20) und 126 % (50/70 SATS). Ausnahme hier ist der  $S_a$ -Wert von 116 % in Kombination mit dem Bindemittel 30/45.
  - Der höchste  $S_a$ -Wert von 136 % ist bei den Mikrodiorit-Asphaltmischungen in Kombination mit dem Bindemittel 50/70 (SATS) festzustellen. Die Ergebnisse bei den anderen Kombinationen liegen zwischen 111 % (30/45) und 135 % (25/55-55 A).
  - Bei den Marshall-Probekörpern mit dem Hohlraumgehalt von  $10 \pm 0,5$  Vol.-% zeigt sich tendenziell ein gleiches Verhalten wie bei Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-%. Eine klare Reihenfolge zwischen den Grauwacke- und Mikrodiorit-Asphaltmischungen ist hier nicht eindeutig festzustellen, demgegenüber sind bei den Basalt-Asphaltmischungen die niedrigsten  $S_a$ -Werte zu entnehmen. Wie erwartet sind hier generell niedrigere  $S_a$ -Werte als beim Hohlraumgehalt  $6 \pm 0,5$  Vol.-% zu erkennen.
  - Insgesamt kann dieser Verlauf der Ergebnisse als plausibel und praxisnah bezeichnet werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den bisherigen Erfahrungen und Erkenntnissen in der Hinsicht auf die Gesteinsart.
- Bei der Betrachtung des Einflusses des Hohlraumgehaltes auf Asphaltmischungen zeigt sich dieser als eine signifikante Einflussgröße. Aus den Darstellungen ist ein deutlicher Unterschied der Sättigungswerte zwischen den Marshall-Probekörpern mit einem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-% und dem von  $10 \pm 0,5$  Vol.-% zu erkennen.
- Es sind insgesamt bei allen Gesteinsarten mit dem Hohlraumgehalt von  $10 \pm 0,5$  Vol.-% niedrigere Sättigungswerte nach der Klimatisierung zu erkennen. Eine klare Reihenfolge ist hier, genau wie bei den Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-%, nicht zu identifizieren.

Der Einfluss des Hohlraumgehaltes ist generell bei den Probekörpern fünf, am deutlichsten zu sehen. Hierbei ist der höchste Wert von 97 % bei Mikrodiorit-Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 30/45 zu entnehmen und der niedrigste  $S_a$ -Wert liegt bei 55 % und ist bei den Basalt-Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 30/45 zu finden.

Für alle anderen untersuchten Varianten sind die Ergebnisse, d. h. Sättigung (S) vor und Sättigung ( $S_a$ ) nach der Klimatisierung anzusehen.

Weiterhin wird die Lage der Asphalt-Probekörper analysiert. Laut den Entwicklern dieses Prüfverfahrens soll sich die unterschiedliche Lage bzw. die Positionierung im Siebträgergestell auf die Ergebnisse bemerkbar machen. Nach Untersuchungen in Vereinigtem Königreich wäre ein sogenannter „Kaskadeneffekt“ zu erwarten gewesen (Bild 32). Mit diesem Begriff ist ein unterschiedlicher Sättigungsgrad der Proben in Abhängigkeit von ihrer Positionierung im Siebträgergestell gemeint.

Die Überlegung besteht darin, dass die oberste Probe durch das aufsteigende, sich am Deckel sammelnde und schließlich abtropfende Wasser, am meisten Wasser aufnimmt. Schließlich tropft das Wasser durch den Probekörper weiter von oben nach unten. Durch den Kaskadeneffekt werden immer kleinere Wassermengen auf die jeweils darunter liegende Probe abgegeben.

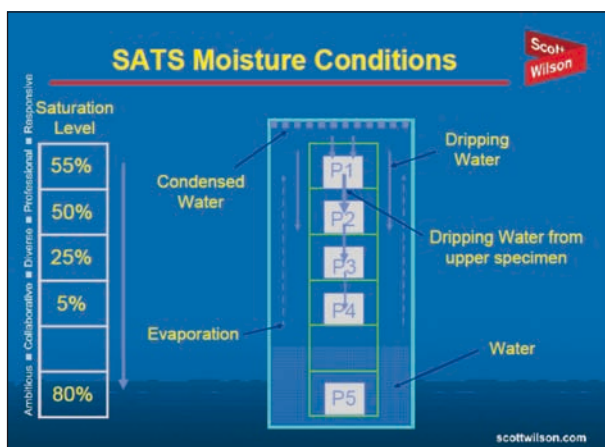


Bild 32: Kaskadeneffekt [COLLOP, 2007]

Je weiter die Probe unten liegt, desto weniger Wasser bekommt sie [COLLOP, 2007].

Ein höherer Sättigung-Wert ( $S_a$ ) wirkt sich negativ auf den SATS-Dauerhaftigkeitsindex bzw. auf den  $CTR_R$ -Wert aus. Mit dem  $CTR_R$ -Wert wird, wie bereits im Kapitel 3.1.4 beschrieben, die „verbleibende Steifigkeit“ für einen Probekörper bezeichnet, d. h. das Verhältnis der Steifigkeiten nach und vor der Klimatisierung.

Der „Kaskadeneffekt“ hat sich in der vorliegenden Forschungsarbeit nicht bestätigt. Obwohl die Asphalt-Probekörper im Druckalterungsbehälter unterschiedlich positioniert sind und damit ungleichmäßig durch den Klimatisierungsvorgang, die über die Feuchtigkeit, Druck und Wärme erfolgt, beansprucht „werden sollen“, ähneln sich die Werte der ersten vier Proben. Dieses Verhalten hat sich generell bei allen hier untersuchten Kombinationen bestätigt. In den bereits erläuterten Bildern (Bild 24 bis Bild 26) ist diese Erkenntnis deutlich zu sehen.

Die Entwickler dieses Prüfverfahrens geben an, dass die oben positionierten Probekörper einen geringeren  $CTR_R$ -Wert (verbleibende Steifigkeit) aufweisen als die unten positionierten Probekörper. Dies soll mit einem höheren Sättigungs-Wert belegt werden. Eine Differenzierung der Ergebnisse hinsichtlich der unterschiedlichen Positionierung des Probekörpers im Siebträgergestell und damit eine unterschiedliche Feuchtigkeitsbeanspruchung, haben sich im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht gezeigt. Um dies zu verdeutlichen sind die einzelnen Ergebnisse aus den drei Versuchen beim AC 16 B mit dem Bindemittel 10/20 und 30/45 für die ausgebohrten Probekörpern mit dem Hohlraumgehalt von  $6 \pm 0,5$  Vol.-% in den Bildern 33 und 34 dargestellt. Für den direkten Vergleich sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Vereinigten Königreich für zwei verschiedene Gesteinsarten (basisch und sauer) mit den drei Bindemitteln 15 (15 B, 15 D und 15 E) und dem Bindemittel 50 C herangezogen worden. Im Bild 35 sind die Ergebnisse für jeden Probekörper einzeln angegeben. Die Versuche wurden für jede Variante zweimal durchgeführt (nur die Variante 15 B dreimal).



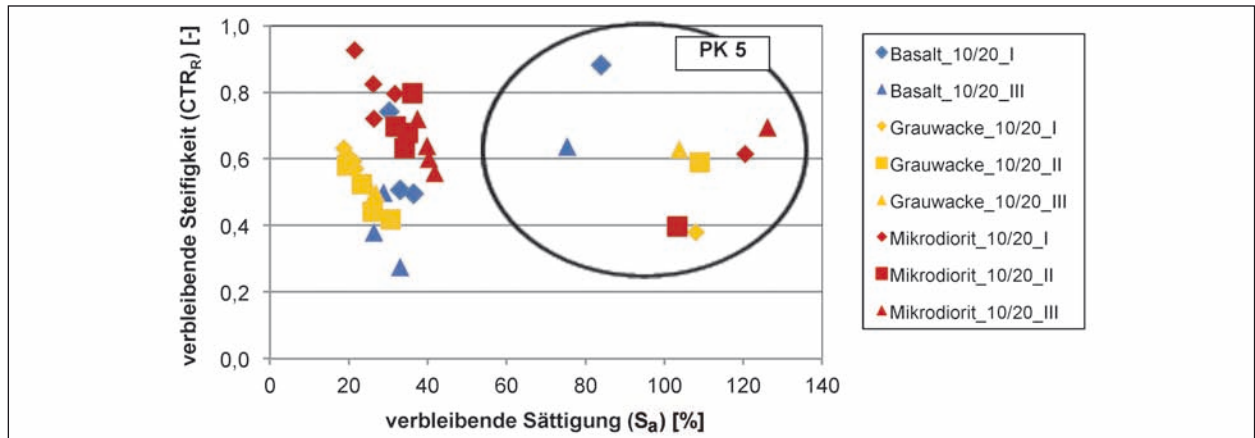


Bild 33: SATS-Prüfergebnisse – AC 16 B (Bindemittel 10/20), PPK mit  $V = 6 \pm 0,5$  Vol.-%

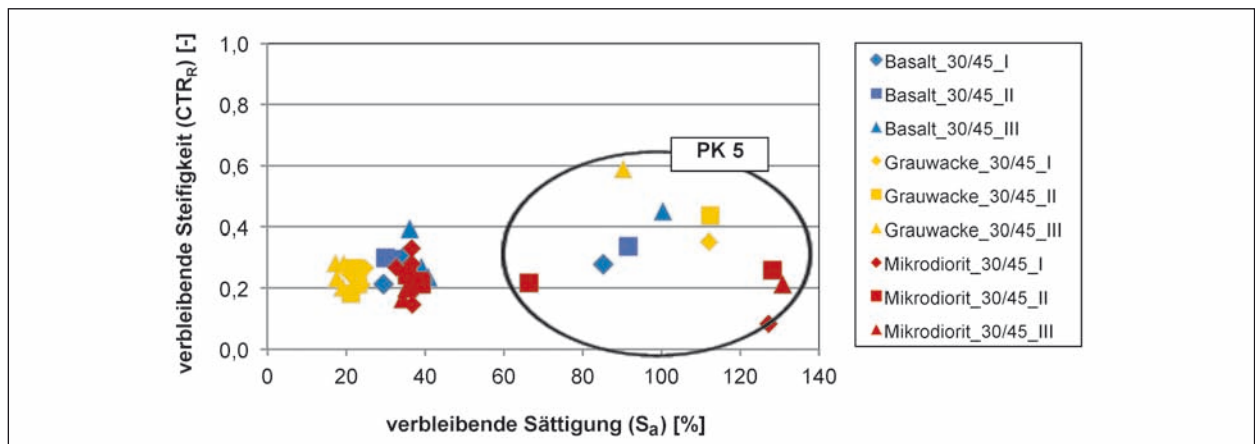


Bild 34: SATS-Prüfergebnisse – AC 16 B (Bindemittel 30/45), PPK mit  $V = 6 \pm 0,5$  Vol.-%

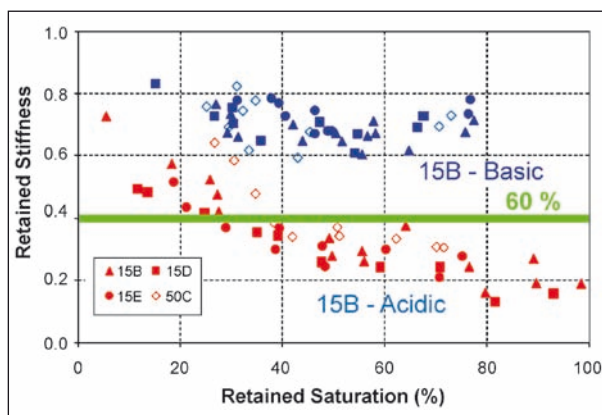


Bild 35: SATS-Prüfergebnisse aus dem Vereinigten Königreich [COLLOP, 2007]

## 5.3 Ergebnisse: SATS-Prüfung dynamischer Spaltzugversuch (Steifigkeit) – AC 32 T

### 5.3.1 Allgemeines

Die SATS-Prüfung wurde zur Bewertung der Dauerhaftigkeit der hohlraumreichen Asphalte, d. h. Asphaltbinder- und Asphalttragschicht, entwickelt. Da diese Asphaltmischungen einen Hohlraumgehalt von über 6 Vol.-% aufweisen, sind bei ihnen eine frühzeitige Alterung infolge von Feuchte, neben der mechanischen Beanspruchung, zu erwarten. Für eine aussagekräftige Bewertung wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes neben dem Asphaltbinder 0/16 noch die Asphalttragschicht 0/32 untersucht. Als Bindemittel kamen hier die Straßenbaubitumen der Sorte 10/20 und 50/70 zum Einsatz.

Anhand der Marshall-Probekörper und der aus den Asphalt-Probepplatten gewonnenen Probekörper wurden ausgewählte Asphaltmischungen geprüft.

- Die Untersuchungen wurden an den Marshall-Probekörpern (MPK) durchgeführt, die einen Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-% aufweisen.
- Die Asphaltplatten haben die gleiche Zusammensetzung wie die Asphaltmischungen, die für die Herstellung der Marshall-Probekörper verwendet wurden und weisen einen Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% auf. Hierbei wurden nur ausgewählte Varianten untersucht. In Tabelle 17 sind die fehlenden Ergebnisse mit (-) gekennzeichnet.

Wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert wurde, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes in Absprache mit dem Betreuungsausschuss das Untersuchungskonzept aufgrund der Ergebnisse während der Bearbeitung überarbeitet. Hierbei wurde beschlossen, dass die Untersuchungen vorwiegend an AC 16 B und den Probekörpern mit einem Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% durchgeführt werden sollen.

Aus diesem Grund wurden die Versuche bei dem AC 32 T überwiegend an Marshall-Probekörpern (zwei Versuche je Variante) durchgeführt.

Im Folgenden werden die gewonnenen Kenngrößen SATS-Dauerhaftigkeitsindex und die Sättigung vor und nach der Klimatisierung dargestellt.

### 5.3.2 SATS-Dauerhaftigkeitsindex

In der Tabelle 17 sind die ermittelten Ergebnisse aus zwei Versuchen, sowohl für die Marshall-Probekörper als auch für die ausgebohrten Probekörper. Aus diesen zwei Versuchen wurde der arithmetische Mittelwert gebildet. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse für die Marshall-Probekörper ist dem Bild 36 zu entnehmen.

Auf den ersten Blick lassen sich hier vorwiegend höhere SATS-Dauerhaftigkeitsindexe als bei Untersuchungen des Asphaltbinders 0/16 entnehmen. Beim Hohlraumgehalt  $10\pm 0,5$  Vol.-% sind Werte von über 100 %, (Basalt mit 10/20 und Grauwacke mit 50/70), zu entnehmen. Dies liegt teilweise daran, dass die Untersuchungen hier mit der gleichen Krafteinstellung, wie beim Asphaltbinder 0/16 durchgeführt worden sind. Aus der Überlegung, dass möglichst weniger Parameter variiert werden sollen, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wurde hier zuerst für alle Varianten die gleiche Kraft verwendet. Da bei dieser Art der Prüfung, d. h. Ermittlung der

| Asphalt                 |         |             | AC 32 T                |     |
|-------------------------|---------|-------------|------------------------|-----|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |         |             | 6                      | 10  |
| PK                      | Bitumen | Gestein     | DI <sub>SATS</sub> [%] |     |
| MPK                     | 10/20   | Basalt      | 61                     | 128 |
|                         |         | Mikrodiorit | 54                     | 77  |
|                         |         | Grauwacke   | 74                     | 89  |
|                         | 50/70   | Basalt      | 30                     | 27  |
|                         |         | Mikrodiorit | 90                     | 69  |
|                         |         | Grauwacke   | 75                     | 111 |
| PPK                     | 10/20   | Basalt      | 73                     | -*  |
|                         |         | Mikrodiorit | 73                     | -*  |
|                         |         | Grauwacke   | 68                     | -*  |
|                         | 50/70   | Basalt      | 27                     | -*  |
|                         |         | Mikrodiorit | -*                     | -*  |
|                         |         | Grauwacke   | 56                     | -*  |

\* Es wurden keine Versuche durchgeführt

Tab. 17: SATS-Dauerhaftigkeitsindex AC 32 T

Steifigkeit, nur die Oberfläche der Proben erfasst wird und die Proben im elastischen Verformungsbereich bleiben sollen, scheint diese Krafteinstellung bei einer Korngröße von 32 mm bei einigen Varianten unzureichend zu sein. Demzufolge zeigten sich hier (Bild 37) im Vergleich zum Asphaltbinder 0/16 (siehe Kapitel 5.2.2) in Kombination mit dem Bindemittel 10/20 viel höhere Steifigkeiten vor der Klimatisierung. Da der Klimatisierungsvorgang eine wesentliche Veränderung des Zustandes der Probekörper bewirkt, ist nach der Klimatisierung eine deutliche Abnahme der Steifigkeits-Werte festzustellen. Gleichwohl ist hier die Ermittlung der Steifigkeit mit derselben Kraft weniger problematisch, d. h. die aufgebrachte Beanspruchung stellt sich wieder als ausreichend dar.

Aus den vorliegenden Ergebnissen ist eine deutliche Abnahme der Steifigkeits-Werte bei allen drei Gesteinsarten in Kombination mit dem Bindemittel 10/20 und dem Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% zu erkennen. Die tabellarische Zusammenfassung der Steifigkeits-Werte, sowohl vor der Klimatisierung als auch nach der Klimatisierung wird aus Anhang 11 ersichtlich.

Eine weitere Erkenntnis bezieht sich auf den Hohlraumgehalt der Asphaltproben. Hierbei zeigen sich tendenziell, wie bei Asphaltbinder-mischungen, höhere SATS-Dauerhaftigkeitsindexe bei einem Hohlraumgehalt von  $10\pm 0,5$  Vol.-%.

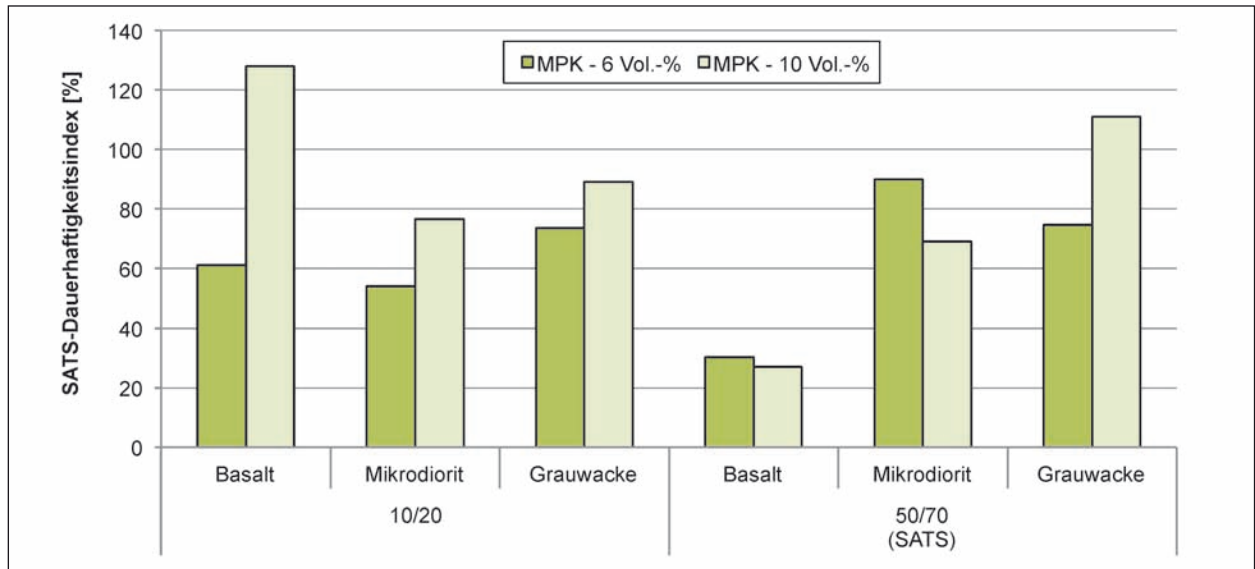


Bild 36: SATS-Dauerhaftigkeitsindex – AC 32 T (MPK)

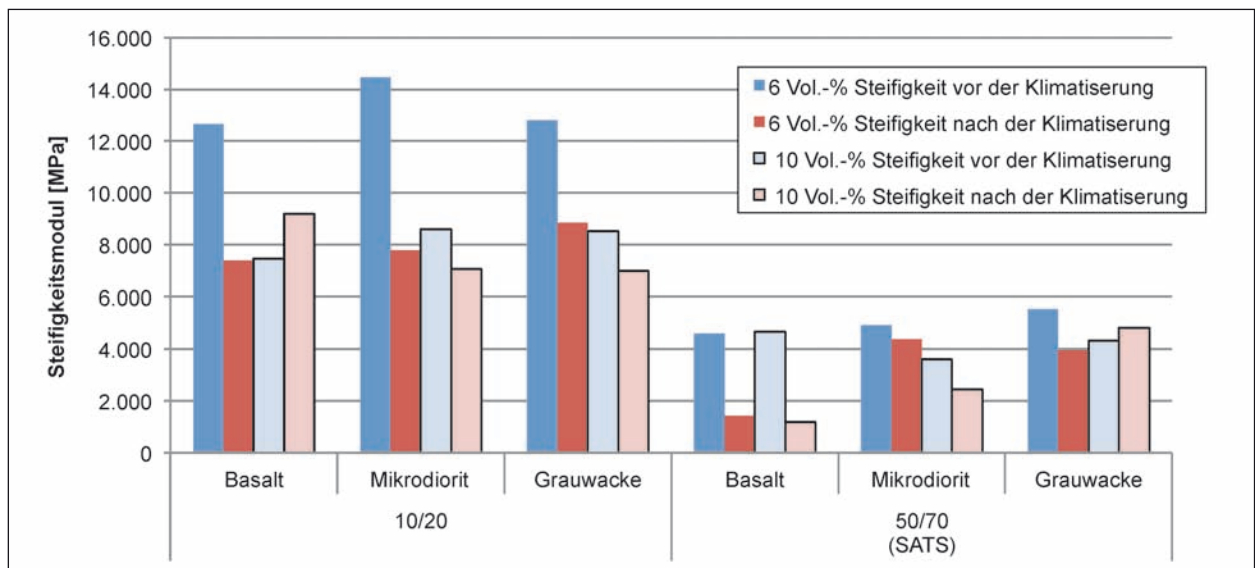


Bild 37: Steifigkeitsmodul – AC 32 T (MPK)

Obwohl die Ergebnisse bei den Asphaltmischungen in Kombination mit dem Bindemittel 50/70 vor der Klimatisierung innerhalb des empfohlenen Verformungsbereichs liegen und somit als gültig eingestuft werden können, fallen sie überraschend hoch aus. Hierbei sind bei den Grauwacke- und Mikrodiorit-Asphaltmischungen die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe zu entnehmen. Aus den ermittelten Ergebnissen bei den Marshall-Probekörpern zeigt sich folgendes:

- Der SATS-Dauerhaftigkeitsindex liegt bei den Grauwacke-Asphaltmischungen zwischen 75 %; Hohlraumgehalt  $6\pm 0,5$  Vol.-% und 111 %; Hohlraumgehalt  $10\pm 0,5$  Vol.-%.
- Bei den Mikrodiorit-Asphaltmischungen befinden sich SATS-Dauerhaftigkeitsindexe zwischen 90 %; Hohlraumgehalt  $6\pm 0,5$  Vol.-% und 69 %; Hohlraumgehalt  $6\pm 0,5$  Vol.-%.
- Die niedrigsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe sind bei den Basalt-Asphaltmischungen zu erkennen. Hierbei liegen die Werte zwischen 30 %; Hohlraumgehalt  $6\pm 0,5$  Vol.-% und 27 %; Hohlraumgehalt  $10\pm 0,5$  Vol.-%.

Bei der Art der Probekörper zeigt sich hier eine breitere Ergebnisspannweite als beim Asphaltbinder 0/16. Obwohl die Ergebnisse tendenziell ein ähnliches Verhalten aufweisen und somit auf dieselbe

Richtung hindeuten, ist eine andere Reihenfolge zwischen den untersuchten Asphaltvarianten zu identifizieren.

Bei den Marshall-Probekörpern mit dem Bindemittel 10/20 und dem Hohlraumgehalt von  $6\pm 0,5$  Vol.-% weisen die Werte folgende Reihenfolge auf: Grauwacke, Basalt und anschließend Mikrodiorit. Bei den ausgebohrten Probekörpern liegen die Werte bei den Basalt- und Mikrodiorit mit einem SATS-Dauerhaftigkeitsindex von 73 % über den Grauwacke-Asphaltmischungen mit einem SATS-Dauerhaftigkeitsindex von 68 %.

Weiterhin wurden die Untersuchungen an der Asphalttragschicht 0/32 erneut mit einer höheren Kraft durchgeführt, um die vorher geschilderte Problematik zu überprüfen. Mit dieser Krafteinstellung lagen alle Werte (horizontale Verformungen) vor der Klimatisierung in einem nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) empfohlenen Bereich, d. h.  $5\pm 2$   $\mu\epsilon$ . Bei der Interpretation der Ergebnisse werden diese als Untersuchungen mit der „Kraft 2“ benannt.

Bei dieser Untersuchung wurden nur ausgewählte Varianten an Marshall-Probekörpern überprüft. Eine erhöhte Aufmerksamkeit ist hier, wie beim Asphaltbinder, dem Hohlraumgehalt zu widmen, da er einer der wesentlichen Einflussgrößen bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit eines Asphalts ist.

Der Hohlraumgehalt wurde gezielt variiert, sodass einige Varianten, neben den  $6\pm 0,5$  Vol.-% und  $10\pm 0,5$  Vol.-%, einen Hohlraumgehalt von  $7\pm 0,5$  Vol.-% und  $9\pm 0,5$  Vol.-% aufweisen.

Da es sich bei der SATS-Prüfung um ein zeitlich aufwändiges Prüfverfahren handelt, war es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich alle Varianten mehrfach zu untersuchen und die Ergebnisse mehrfach zu belegen, sodass die Ergebnisse bei einigen Versuchen einfach belegt sind.

Die grafische Darstellung der Ergebnisse SATS-Dauerhaftigkeitsindex und Steifigkeiten vor und nach der Klimatisierung sind Bild 38 und Bild 39 zu entnehmen.

Eine detaillierte Zusammenstellung aller ermittelten Werte je Gesteinsart ist im Anhang 12 zu finden

Aus den vorliegenden Ergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass die Ergebnisse im Vergleich zu den bereits interpretierten Ergebnissen (mit der zuerst verwendeten „Kraft 1“), auf einem insgesamt niedrigeren Niveau liegen, aber auch kein systemati-

sches Verhalten aufweisen. Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden:

- Der höchste SATS-Dauerhaftigkeitsindex mit einem Wert von 88 % ist beim Mikrodiorit mit dem Bindemittel 10/20 und einem Hohlraumgehalt von  $7\pm 0,5$  Vol.-% zu entnehmen. Auffällig sind hier die Werte bei den anderen zwei untersuchten Hohlraumgehalten. Die Werte liegen zwischen 51 % (bei  $V = 10\pm 0,5$  Vol.-%) und 58 % (bei  $V = 6\pm 0,5$  Vol.-%). Bei der Betrachtung der Steifigkeits-Werte vor der Klimatisierung lässt sich zuerst eine plausible Reihenfolge erkennen, d. h. mit steigendem Hohlraumgehalt sinkt die Steifigkeit ab. Nach der Klimatisierung ist ein ungewöhnliches Bild zu entnehmen. Es zeigt sich kein systematischer Abfall der Steifigkeits-Werte, sodass die Werte unerwartet beim Hohlraumgehalt von  $\pm 0,5$  Vol.-% am höchsten sind bzw. sich kaum verändert haben und somit zu dem höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindex geführt haben. Gleiches Verhalten ist bei der Grauwacke mit dem Hohlraumgehalt von  $7\pm 0,5$  Vol.-% festzustellen. Hierbei liegen die SATS-Werte zwischen 42 % (bei  $V = 9\pm 0,5$  Vol.-%) und 72 % (beim  $V = 7\pm 0,5$  Vol.-%).
- Im Gegensatz zu den interpretierten Ergebnissen mit dem Bitumen 10/20 bei den Grauwacke- und Mikrodiorit-Asphaltmischungen, liegen die Werte bei den Basalt-Asphaltmischungen mit dem Bitumen 50/70 und dem Hohlraumgehalt  $6\pm 0,5$  Vol.-% sowie  $10\pm 0,5$  Vol.-% jedoch in vergleichbarer Größenordnung, wie die Werte mit „Kraft 1“. Hierbei zeigt sich fast das gleiche Ergebnis, d. h. ein SATS-Dauerhaftigkeitsindex von 19 % bzw. 20 %. Somit ist kein Einfluss des unterschiedlichen Hohlraumgehaltes hier zu erkennen.
- Aus den grafischen Darstellungen (Bild 38) lässt sich ableiten, dass die Mischungen mit Mikrodiorit und Grauwacke mit dem Bitumen 50/70 insgesamt einen höheren SATS-Dauerhaftigkeitsindex aufweisen. Obwohl die Steifigkeit vor der Klimatisierung bei hier allen untersuchten Varianten auf einem vergleichbaren Niveau liegt (zwischen 4.000 MPa und 5.900 MPa), zeigen sich nach der Klimatisierung bei der Grauwacke und dem Mikrodiorit höhere Steifigkeiten (sie liegen bei etwa 2.000 MPa) als beim Basalt (Bild 39).

Anhand der ermittelten Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die untersuchten Asphaltmi-

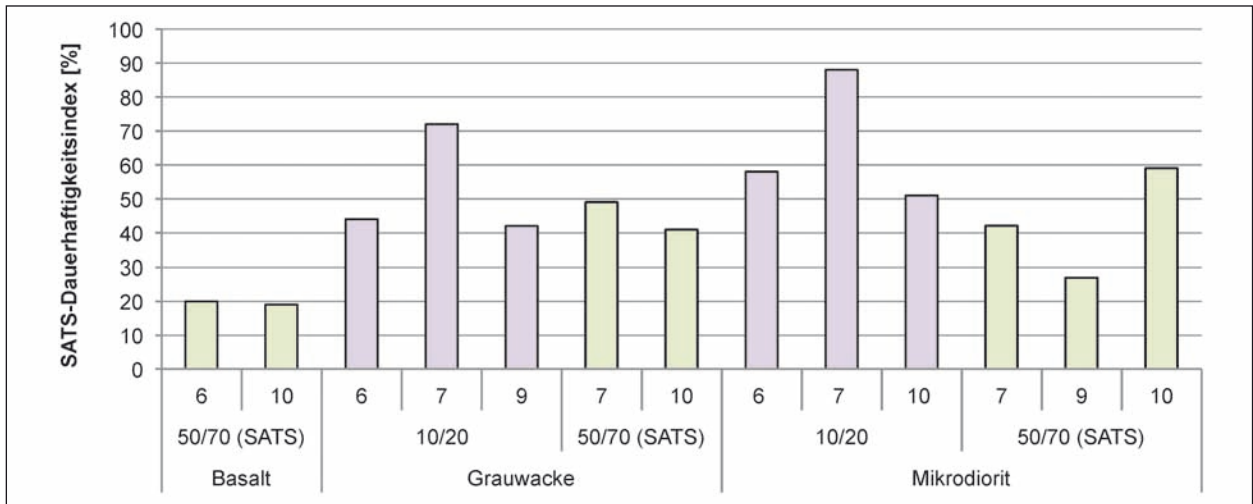


Bild 38: SATS-Dauerhaftigkeitsindex mit Kraft 2 – AC 32 T (MPK)

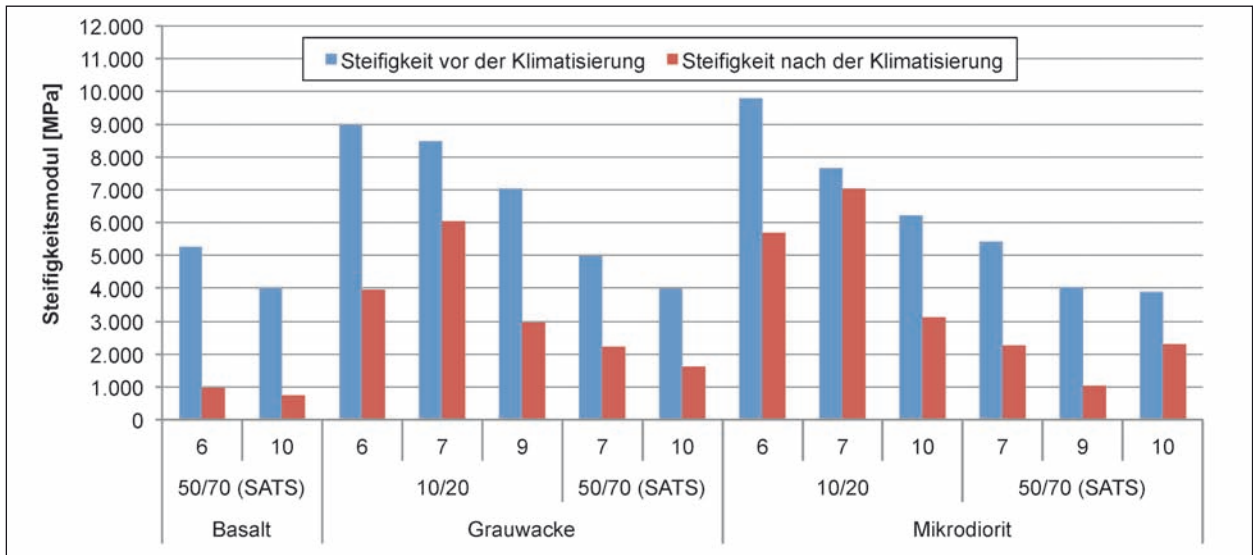


Bild 39: Steifigkeitsmodul mit Kraft 2 – AC 32 T (MPK)

schungen, wie erwartet, den günstigsten bzw. den höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindex mit dem Bitumen 10/20 aufweisen.

Weiterhin weisen die gewonnenen Ergebnisse bei allen untersuchten Varianten auf kein klares Verhalten hin, sodass eine brauchbare Differenzierung des Asphaltmischguts hinsichtlich der verwendeten Gesteinsart oder des Hohlraumgehaltes nicht möglich ist.

### 5.3.3 Sättigung vor und nach dem Klimatisierungsvorgang

In diesem Kapitel sind die Sättigungs-Werte vor und nach der Klimatisierung für den AC 32 T, für die Marshall-Probekörper und ausgebohrten Probekör-

| Asphalt                 |              | AC 32 T     |                |        |
|-------------------------|--------------|-------------|----------------|--------|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |              | (10±0,5)    |                |        |
| anteilige Sättigung [%] |              | S           | S <sub>a</sub> |        |
| PK                      | Bitumen      | Gestein     | PK 1-5         | PK 1-4 |
| MPK                     | 10/20        | Basalt      | 46             | 10     |
|                         |              | Mikrodiorit | 58             | 22     |
|                         |              | Grauwacke   | 54             | 7      |
|                         | 50/70 (SATS) | Basalt      | 45             | 16     |
|                         |              | Mikrodiorit | 62             | 14     |
|                         |              | Grauwacke   | 68             | 9      |

Tab. 18: (S) und (S<sub>a</sub>) – AC 32 T mit V = 10±0,5 Vol.-%

per mit den Bitumensorten 10/20 und 50/70 tabellarisch zusammengefasst (siehe Tabelle 18 und 19).



| Asphalt                 |              | AC 32 T     |                |        |
|-------------------------|--------------|-------------|----------------|--------|
| Hohlraumgehalt [Vol.-%] |              | (6±0,5)     |                |        |
| anteilige Sättigung [%] |              | S           | S <sub>a</sub> |        |
| PK                      | Bitumen      | Gestein     | PK 1-5         | PK 1-4 |
| MPK                     | 10/20        | Basalt      | 45             | 19     |
|                         |              | Mikrodiorit | 62             | 31     |
|                         |              | Grauwacke   | 52             | 12     |
|                         | 50/70 (SATS) | Basalt      | 43             | 20     |
|                         |              | Mikrodiorit | 61             | 25     |
|                         |              | Grauwacke   | 73             | 13     |
| PPK                     | 10/20        | Basalt      | 50             | 26     |
|                         |              | Mikrodiorit | 69             | 37     |
|                         |              | Grauwacke   | 62             | 23     |
|                         | 50/70 (SATS) | Basalt      | 34             | 24     |
|                         |              | Mikrodiorit | -*             | -*     |
|                         |              | Grauwacke   | 81             | 23     |

\* Es wurden keine Versuche durchgeführt

Tab. 19: (S) und (S<sub>a</sub>) – AC 32 T mit V = 6±0,5 Vol.-%

Aus den vorliegenden Ergebnissen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Sättigungs-Werten vor und nach der Klimatisierung zu entnehmen. Es ist bei allen untersuchten Varianten ein Abfall der Sättigungs-Werte nach der Klimatisierung um etwa 50 % bis 80 % im Vergleich zu den Sättigungs-Werten vor der Klimatisierung zu dokumentieren. Es lässt sich folgendes feststellen:

- Es sind allgemein niedrigere Sättigungs-Werte bei den Kombinationen mit der Bitumensorte 10/20 zu erkennen.
- In Bezug auf die Gesteinsart weisen die Basalt-Kombinationen im Vergleich zu den anderen zwei untersuchten Gesteinsarten (Mikrodiorit und Grauwacke) niedrigere Werte auf.
- Der Einfluss des Hohlraumgehaltes ist bei den Sättigungs-Werten vor der Klimatisierung kaum zu erkennen. Die Werte liegen für beide Hohlraumgehalten auf einem vergleichbaren Niveau. Nach der Klimatisierung sind die niedrigere Werte bei den Asphaltmischungen mit dem Hohlraumgehalt 10±0,5 Vol.-% zu entnehmen.

Eine grafische Darstellung der Ergebnisse für Marshall-Probekörpern mit den Hohlraumgehalten 6±0,5 Vol.-% und 10±0,5 Vol.-% ist dem Bild 40 zu entnehmen.

Die Ergebnisse bei den ausgebohrten Probekörpern zeigen tendenziell ein ähnliches Verhalten. Es

sind allgemein höhere Werte zu entnehmen, wobei die Probekörper fünf einen niedrigeren Wert aufweisen als bei den Marshall-Probekörpern.

Bei Probekörper fünf bestätigt sich die Reihenfolge der Asphaltbinderschicht. Hierbei zeigen sich die Basalt-Asphaltmischungen unabhängig von der Bitumensorte wie erwartet als am wenigstens wasseraffin. Zwischen den Grauwacke- und Mikrodiorit-Asphaltmischungen variieren die Ergebnisse in Abhängigkeit von dem Bindemittel, sodass eine deutliche Reihenfolge nicht zu identifizieren ist. Die beiden Gesteinsarten weisen ein ungünstiges Verhalten in der Gegenwart von Wasser auf. Hierbei zeigt sich deutlich die geringere Resistenz gegen Feuchtigkeit bzw. Wasser.

Insgesamt liegen die Werte

- bei den Basalt-Asphaltmischungen zwischen 56 % und 82 % (Bitumen 10/20) und 62 % und 75 % bei der (Bitumen 50/70),
- bei den Grauwacke-Asphaltmischungen zwischen 81 % und 111 % (Bitumen 10/20) und 86 % und 133 % (Bitumen 50/70),
- bei den Mikrodiorit-Asphaltmischungen zwischen 95 % und 126 % (Bitumen 10/20) und 77 % und 125 % (Bitumen 50/70).

Aus Bild 41 sind die Sättigung-Werte nach der Klimatisierung für die Marshall-Probekörper fünf und beide Hohlraumgehalte ersichtlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden, wie bereits im Kapitel 5.3.2 erwähnt, einige Versuche mit einer anderen Krafteinstellung geprüft (Kraft 2). Hierbei ist erwartungsgemäß gleiches Verhalten hinsichtlich der Sättigungs-Werte bei den Asphaltmischungen, wie bei den oben beschriebenen Varianten, zu entnehmen. Allerdings machte sich diese Krafteinstellung bei den Probekörpern fünf bei den Grauwacke- und Mikrodiorit Asphaltmischungen bemerkbar. Die starke Wasseraufnahme der Proben, ausgedrückt durch den S<sub>a</sub>-Wert, hat die Proben so beschädigt, dass bei der Ermittlung der Steifigkeit mittels dynamischen Spaltzugversuchs die Proben in der Prüfvorrichtung zerstört wurden und eine Untersuchung nicht mehr durchzuführen war. Bei den Basalt-Probekörpern war dieser Effekt nicht zu erkennen.

Die Sättigungs-Werte für alle untersuchten Varianten mit der Kraft 2 sind im Anhang 12 zu finden.

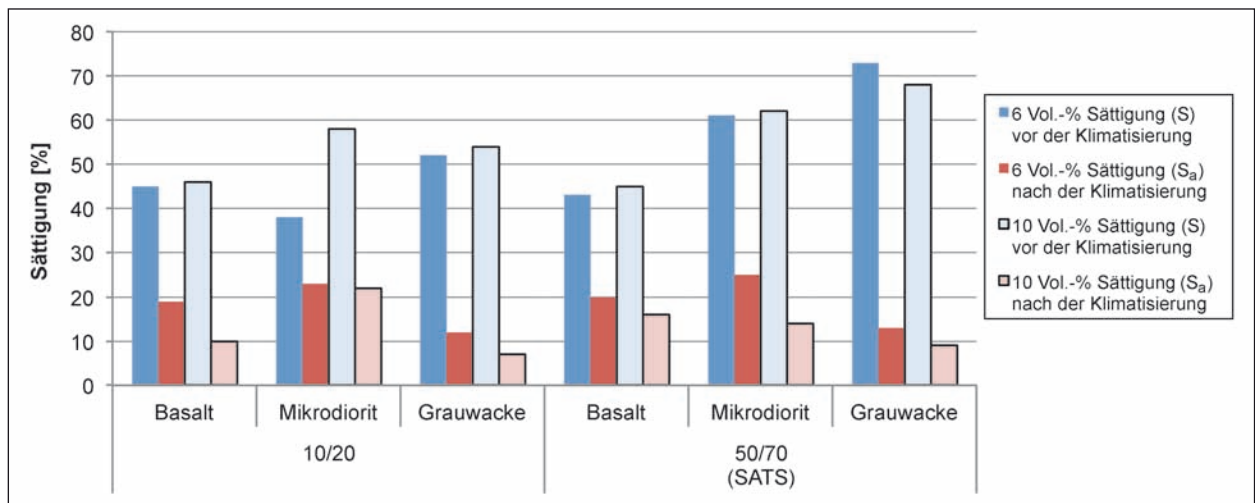


Bild 40: Sättigung vor und nach der Klimatisierung – AC 32 T

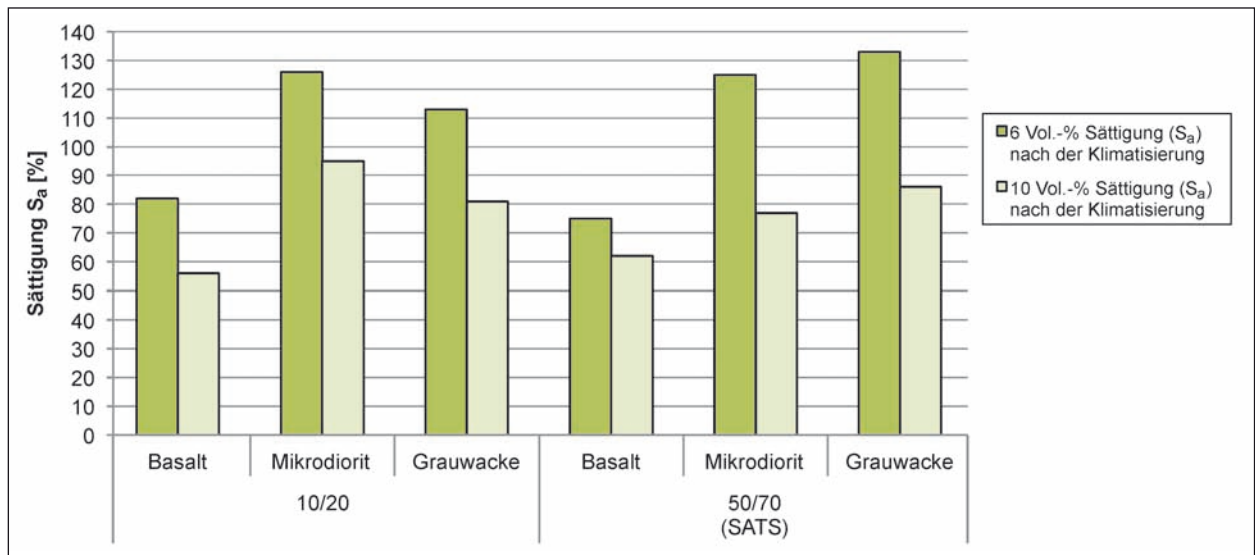


Bild 41: Sättigung nach der Klimatisierung – MPK 5 (AC 32 T)

#### 5.4 Ergebnisse: SATS-Prüfung Direkter Zugversuch – AC 16 B

Die Untersuchungen wurden gemäß DIN EN 12697-46 bei den drei gewählten Temperaturen: +20 °C, +5 °C und 0 °C durchgeführt. Die Festlegung der Prüftemperaturen erfolgte anhand der Ergebnisse aus den Vorversuchen sowie in Anlehnung an die DIN EN 12697-46.

Eine Untersuchung bei den Temperaturen unter 0 °C war an den mittels SATS-Prüfverfahren konditionierten Asphalt-Probekörpern nicht möglich durchzuführen, weil die Proben schon in der Versuchsaufbauphase zum Teil zerbrochen sind.

Für die Durchführung der Zugversuche wurden Asphalt-Platten mittels Walzsektor-Verdichtungs-

gerät hergestellt, aus denen prismatische Probekörper mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 160 mm (für Größtkorndurchmesser von 16 mm) herausgesägt wurden. Der Klimatisierungsvorgang bei den prismatischen Probekörpern erfolgte unter den gleichen Prüfbedingungen wie bei den zylindrischen Probekörpern, d. h. nach den DIN EN 12697-45, wobei hier kein Probekörper im Wasser liegt. In die Prüfeinrichtung werden aus Platzgründen nur zwei Probekörper eingesetzt (Bild 42).

Die Untersuchungen erfolgten an Asphaltmischungen AC 16 B mit den Gesteinsarten: Basalt und Grauwacke und den Bitumensorten: 10/20 und 30/45.

Die prismatischen Asphalt-Probekörper weisen einen Hohlraumgehalt von 6±0,5 Vol.-% auf.

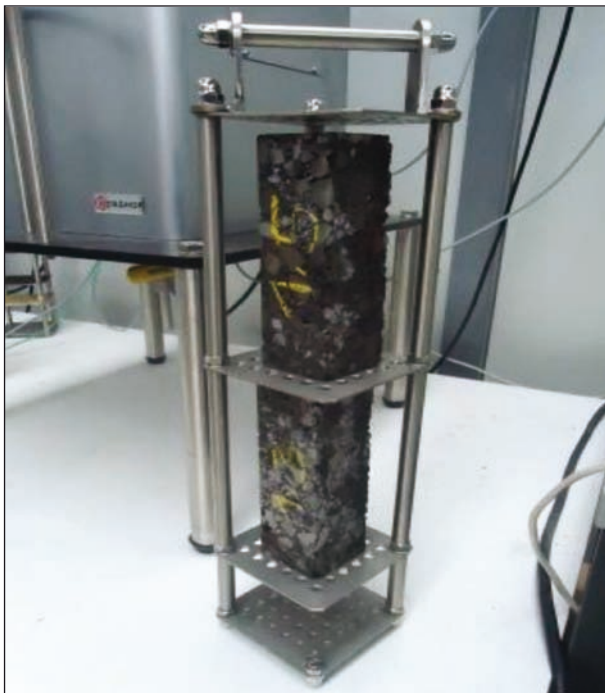


Bild 42: Prismatische Probekörper in der Prüfvorrichtung

Für jede Versuchsreihe wurden zwei Probekörper verwendet, sodass die Ergebnisse der Zugversuche „nur“ eine Doppelbestimmung haben.

Die Ergebnisse der Zugversuche bei den drei Temperaturen, für die unkonditionierten und konditionierten Probekörper, sind als Zugfestigkeit  $\beta_t$  und Ausfallzugdehnung  $\epsilon_{\text{Ausfall}}$  (Bruchdehnungen), als Maße für den inneren Zusammenhalt des Asphalts, in Tabelle 20 und Tabelle 21 als Gruppen von jeweils zwei miteinander verträglichen Einzelwerten sowie deren arithmetischen Mitteln zahlenmäßig angegeben.

Der Tabelle 20 kann entnommen werden, dass die Zugfestigkeit in sehr hohem Maß durch die Temperatur geprägt wird. Während bei den unkonditionierten Probekörpern bei der Versuchstemperatur  $T = +20\text{ °C}$  die Zugfestigkeiten zwischen 0,951 MPa (Basalt 30/45) und 1,784 MPa (Grauwacke 10/20) lagen, lagen bei der Versuchstemperatur  $T = 0\text{ °C}$  die Zugfestigkeiten zwischen 3,531 MPa (Grauwacke 10/20) und 4,474 MPa (Basalt 30/45). Bei der Versuchstemperatur  $T = +5\text{ °C}$  wurden Zugfestigkeiten zwischen 3,301 MPa (Basalt 10/20) und 4,698 MPa (Basalt 10/20) ermittelt. Bei einer Absenkung der Prüftemperatur von  $+5\text{ °C}$  auf  $0\text{ °C}$  ist der Unterschied der Zugfestigkeiten im Vergleich zu den Ergebnissen bei einer Versuchstemperatur  $T = +20\text{ °C}$  in deutlich kleinerem Maß festzustellen. Bei den konditionierten Probekörpern lässt sich ein

| Zugfestigkeit ( $\beta_t$ ) in MPa |                      |                              |                            |
|------------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Prüftemp. [°C]                     | Gestein/ Bindemittel | unkonditionierte Probekörper | konditionierte Probekörper |
| +20                                | Basalt 10/20         | 1,564                        | 1,199                      |
|                                    | Basalt 30/45         | 0,951                        | 0,650                      |
|                                    | Grauwacke 10/20      | 1,784                        | 1,331                      |
|                                    | Grauwacke 30/45      | 1,029                        | 0,446                      |
| +5                                 | Basalt 10/20         | 3,301                        | 2,675                      |
|                                    | Basalt 30/45         | 4,698                        | 2,411                      |
|                                    | Grauwacke 10/20      | 3,907                        | 2,668                      |
|                                    | Grauwacke 30/45      | 4,266                        | 1,962                      |
| 0                                  | Basalt 10/20         | 3,704                        | 2,649                      |
|                                    | Basalt 30/45         | 4,474                        | 2,458                      |
|                                    | Grauwacke 10/20      | 3,531                        | 3,262                      |
|                                    | Grauwacke 30/45      | 4,066                        | 2,428                      |

Tab. 20: Direkter Zugversuch – Zugfestigkeit

| Ausfallzugfestigkeit ( $\epsilon_{\text{Ausfall}}$ ) in ‰ |                      |                              |                            |
|---|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Prüftemp. [°C]  | Gestein/ Bindemittel | unkonditionierte Probekörper | konditionierte Probekörper |
| +20   | Basalt 10/20         | 1,13                         | 1,06                       |
|   | Basalt 30/45         | 4,13                         | 4,65                       |
|   | Grauwacke 10/20      | 1,26                         | 1,12                       |
|   | Grauwacke 30/45      | 4,38                         | 7,02                       |
| +5  | Basalt 10/20         | 0,60                         | 0,66                       |
|   | Basalt 30/45         | 1,37                         | 1,71                       |
|   | Grauwacke 10/20      | 0,77                         | 0,76                       |
|   | Grauwacke 30/45      | 1,41                         | 2,30                       |
| 0   | Basalt 10/20         | 0,36                         | 0,34                       |
|   | Basalt 30/45         | 0,46                         | 0,42                       |
|   | Grauwacke 10/20      | 0,49                         | 0,70                       |
|   | Grauwacke 30/45      | 0,51                         | 0,56                       |

Tab. 21: Direkter Zugversuch – Ausfallzugdehnung

ähnliches Verhalten in Bezug auf die Prüftemperatur erkennen.

Eine Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Prüftemperatur, d. h. mit sinkender Prüftemperatur steigen die Zugfestigkeiten, ist ebenfalls bekannt, sodass der Anstieg der Werte von  $+20\text{ °C}$  zu  $+5\text{ °C}$  bzw.  $0\text{ °C}$  zu erwarten war. Die Zugfestigkeit bei hohen Temperaturen wird durch die Viskosität des Bindemittels und bei tiefen Temperaturen durch den Hohlraumgehalt der Asphaltmischung bestimmt [EULITZ, 1987]. In Bild 43 und Bild 44

wird der Verlauf der Zugfestigkeit sowohl an den konditionierten als auch an den unkonditionierten Probekörpern getrennt nach Gesteinsart über die drei Prüftemperaturen dargestellt.

Aus Bild 43 und Bild 44 kann zunächst unmittelbar entnommen werden, dass der Klimatisierungsvorgang einen deutlichen Einfluss auf die Zugfestigkeit ausübt. Aus den grafischen Darstellungen ist zu erkennen, dass die Zugfestigkeits-Werte bei den Prüftemperaturen +5 °C und 0 °C beim Basalt bei fast allen untersuchten Kombinationen kaum differieren, sodass ein Temperaturunterschied von 5 K kaum eine Auswirkung auf die Ergebnisse hatte. Bei der Grauwacke lässt sich ein fast linearer Abfall bzw. Anstieg der Werte von 0 °C auf +5 °C erkennen. Bei der Prüftemperatur  $T = +20$  °C liegen die Ergebnisse für beide Gesteinsarten auf einem vergleichbaren Niveau.

Eine weitere Erkenntnis bezieht sich auf die Zugfestigkeits-Werte bei den konditionierten Probekörpern. Hierbei ist bei allen untersuchten Kombinationen deutlich ein Abfall der Werte, d. h. kleinere Zugfestigkeiten im Vergleich zu den unkonditionierten

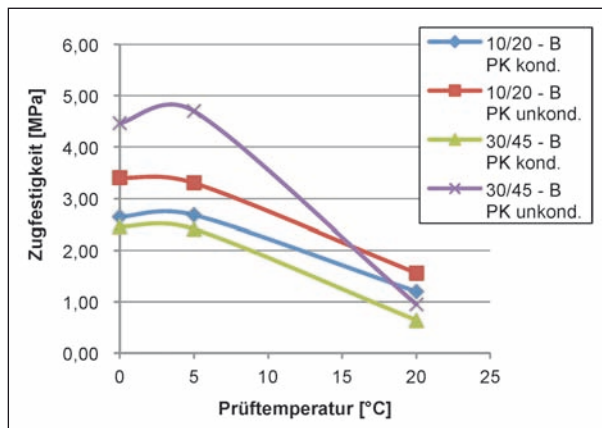


Bild 43: Direkter Zugversuch – Zugfestigkeit: Basalt

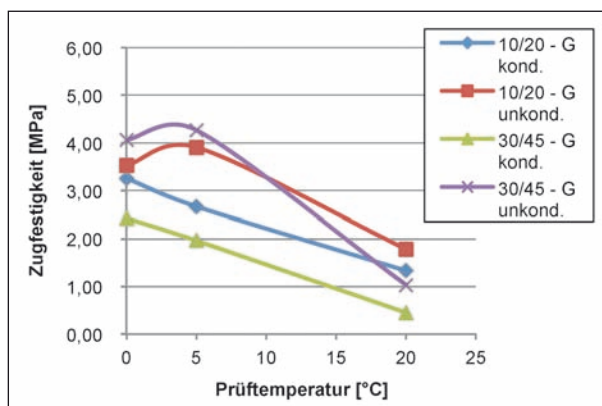


Bild 44: Direkter Zugversuch – Zugfestigkeit: Grauwacke

Probekörpern zu erkennen. Eine Konditionierung der Proben im Druckalterungsbehälter, d. h. ein simulierter Alterungsprozess, hat zu niedrigeren Zugfestigkeiten geführt. Infolge der zunehmenden Alterung des Bindemittels, die durch den Druck, die Temperatur und die Feuchtigkeit im Druckalterungsbehälter hervorgerufen wurde, wurde das Haftverhalten zwischen Bitumen und Gestein abgeschwächt, sodass eine niedrigere Zugfestigkeit im Vergleich zu den ungealterten Proben bzw. Asphaltmischungen festzustellen ist. Dabei fällt auf, dass der Abfall der Zugfestigkeiten bei allen untersuchten Asphaltmischungen tendenziell einen ähnlichen Verlauf hat.

Wenn man diese Ergebnisse mit den bisherigen Ergebnissen aus der Literatur vergleicht, lassen sich einige Unterschiede feststellen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von mit Hochverdichtungsbohlen eingebauten und gewalzten bzw. nicht gewalzten Asphalttragschichten“ [ARAND, 1996], wurde außerdem der direkter Zugversuche an unterschiedlich verdichteten Asphalttragschichtvarianten 0/32 durchgeführt. Hierbei wurden die Asphaltmischungen nach einer Nutzungsdauer von sieben Jahren untersucht.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Zugfestigkeiten der Asphalttragschichtvarianten nach sieben Jahren der Nutzungsdauer bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes d. h. +20 °C und +5 °C, stark erhöht haben. Bei den Temperaturen -10 °C und -20 °C wurden teils größere und teils kleinere Zugfestigkeiten nach der Nutzungsdauer von sieben Jahren ermittelt.

Bei einer weiteren Untersuchung an frischen und mittels BSA (Braunschweiger Alterung) gealtertem Asphalt, die im Rahmen des Forschungsprojektes „Einfluss von modifiziertem Bitumen auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderungen während der Nutzungsdauer“ [BÜCHLER, 2008] durchgeführt wurde, wurden auch höhere Zugfestigkeiten an gealtertem Asphalt im Temperaturbereich von 0 °C bis +20 °C ermittelt. Im tieferen Temperaturbereich, d. h. unter 0 °C, steigen die Zugfestigkeiten bei dem gealterten Asphalt. Dieses Verhalten wird als Folge einer Verhärtung des Asphalts erklärt.

- Zur Verdeutlichung der Entwicklung der Bruchkraft (Zugkraft) über die drei Temperaturen sind die Ergebnisse in Bild 45 in Form eines



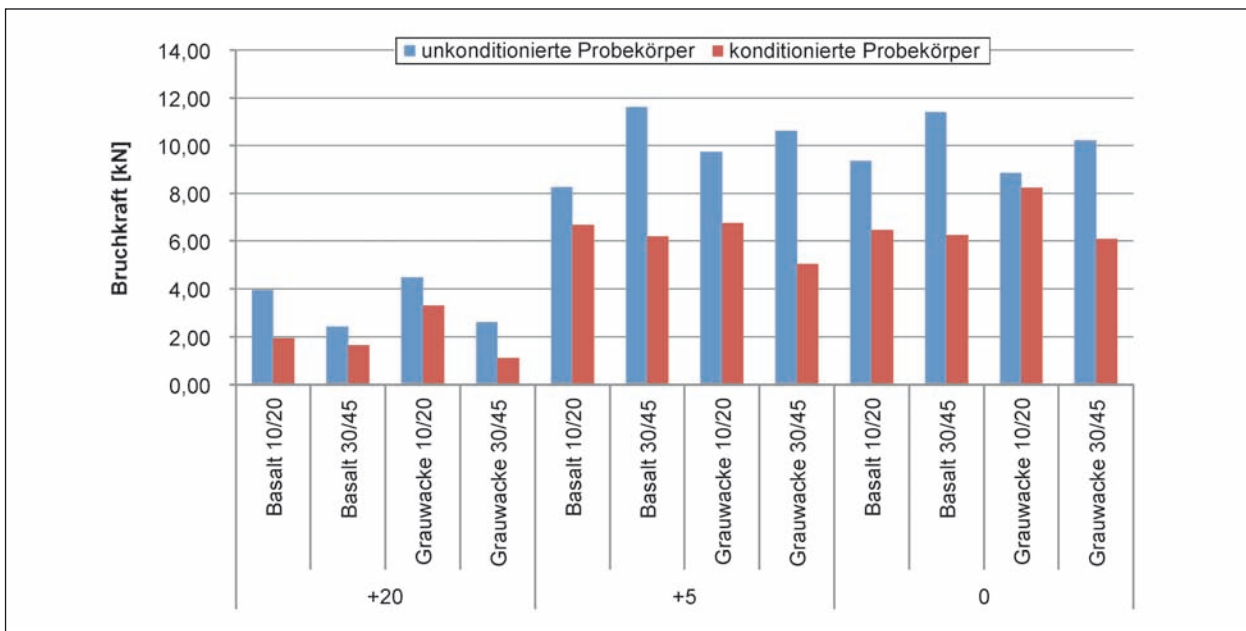


Bild 45: Direkter Zugversuch – Bruchkraft

Histogramms wiedergegeben worden. Auf den ersten Blick sind erhebliche Anstiege der Bruchkraft bei den Temperaturen von +5 °C und 0 °C erkennbar. Die mittels des SATS-Konditionierung Prüfverfahrens gealterten Asphalt-Probekörper sind spröder, sodass eine kleinere Kraft im Vergleich zu dem ungealterten Asphalt bzw. unkonditionierten Probekörper bis zum Bruch des Probekörpers aufgewendet werden muss.

Dem Bild 45 kann entnommen werden, dass bei den unkonditionierten Probekörpern mit dem Bindemittel 30/45 und bei den Prüftemperaturen  $T = 0\text{ °C}$  und  $T = +5\text{ °C}$ , eine höhere Kraft erforderlich ist, die zu einem Bruch führt, als im Vergleich zu den Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20. Es ist hier interessant zu sehen, dass die erreichte Kraft bis zum Bruch an konditionierten Probekörpern bei den Basalt-Asphaltmischungen für die beiden Bitumensorten, in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, auf einem vergleichbaren Niveau liegt. Bei den Grauwacke-Asphaltmischungen wird eine um etwa 2 kN höhere Kraft für die Bitumensorte 10/20 benötigt, um die Probekörper bis zum Bruch zu führen.

- Eine weitere Kenngröße, die im Rahmen dieser Prüfung bewertet wird, ist die Ausfallzugdehnung bzw. die Bruchdehnung. Die Bruchdehnungswerte lassen zumindest tendenziell eine plausible Reihenfolge erkennen. Die Zusammenstellung der Ergebnisse der Bruchdehnung

in Tabelle 21 zeigt, dass bei den tieferen Temperaturen ein Abfall der Werte bzw. niedrigere Bruchdehnungen zu erwarten sind. Bei den Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 10/20 zeigen sich kaum Alterungserscheinungen, die durch gleichmäßige Bruchdehnungswerte sowohl an konditionierten als auch an unkonditionierten Probekörpern ausgedrückt sind. Bei dem Bindemittel 30/45 ist ein Anstieg der Werte bei den Prüftemperaturen +20 °C und +5 °C für beide Gesteinsarten festzustellen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird das SATS-Verhältnis als Merkmalsgröße zur Beschreibung der Dauerhaftigkeit von hohlraumreichen Asphalten betrachtet und bewertet. Bei dieser Vergleichsprüfung ist das SATS-Verhältnis der untersuchten Asphaltmischung der Mittelwert der Zugfestigkeiten nach und vor der Klimatisierung.

Da dieser Versuch zerstörend ist, ist es nicht möglich, die ermittelten Zugfestigkeiten vom gleichen Probekörper ins Verhältnis zu setzen, sodass es sich bei den konditionierten und unkonditionierten Probekörpern um unterschiedliche Probekörper handelt.

In der Tabelle 22 und Bild 46 sind die ermittelten SATS-Verhältnisse aufgeführt.

Bei einer Bewertung des Einflusses des Bindemittels und seiner Temperaturempfindlichkeit zeigt sich, dass durch den Einsatz härterer Bindemittel



(10/20) bei allen drei Prüftemperaturen die Werte der verbleibenden Zugfestigkeiten am höchsten sind. Diese resultieren aus den höheren Zugfestigkeiten, die unter anderem auf den höheren Bindemittelgehalt zurückzuführen sind.

Gleichwohl ist hier zu erkennen, dass die Asphaltmischungen mit Bindemittel 30/45 unabhängig von der Gesteinsart ein ziemlich hohes SATS-Verhältnis im Vergleich zu den SATS-Ergebnissen aufweisen, die mittels Spaltzugversuch ermittelt wur-

| SATS-Verhältnis<br>(Zugfestigkeit in %) |                     |                                   |
|---|---------------------|-----------------------------------|
| Prüftemp.<br>[°C]                       | Gestein/Bindemittel | Verbleibende<br>Zugfestigkeit [%] |
| +20                                     | Basalt 10/20        | 77                                |
|   | Basalt 30/45        | 68                                |
|   | Grauwacke 10/20     | 75                                |
|   | Grauwacke 30/45     | 43                                |
| +5                                      | Basalt 10/20        | 81                                |
|   | Basalt 30/45        | 51                                |
|   | Grauwacke 10/20     | 68                                |
|   | Grauwacke 30/45     | 46                                |
| 0                                       | Basalt 10/20        | 72                                |
|   | Basalt 30/45        | 55                                |
|   | Grauwacke 10/20     | 92                                |
|   | Grauwacke 30/45     | 60                                |

Tab. 22: SATS-Verhältnis (verbleibende Zugfestigkeit)

den (siehe Kapitel 5.2 und 5.3). Bei den letztgenannten Ergebnissen, zeigten sich die Asphaltmischungen mit dem Bindemittel 30/45 als ungünstig in Hinsicht auf die Dauerhaftigkeit, sodass ein SATS-Dauerhaftigkeitsindex von 28 % (AC 16 B, Basalt, V = 6±0,5 Vol.-%) bzw. 34 % (AC 16 B, Mikroditrit, V = 10±0,5 Vol.-%) als höchster Wert festzustellen ist.

In Bild 46 sind die SATS-Verhältnisse in Form eines Histogramms verdeutlicht. Auf den ersten Blick lässt sich bei fast allen drei Prüftemperaturen tendenziell ein ähnliches Verhalten feststellen. Die Basalt-Asphaltmischungen weisen einen niedrigeren Zugfestigkeitsabfall im Vergleich zu den Grauwacke-Asphaltmischungen auf. Aus den Untersuchungsergebnissen kann abgeleitet werden, dass die prüftechnische Ansprache der Dauerhaftigkeit bzw. die Zugfestigkeit der Asphalte, die bei drei Prüftemperaturen (+20 °C, +5 °C und 0 °C) mithilfe des Zugprüfgerätes erfolgte, eine deutlichere Differenzierung der Ergebnisse im Vergleich zu den Steifigkeits-Werten, die mittels indirekten Spaltzugversuchs ermittelt wurden, aufweisen.

Bei der Betrachtung der Prüftemperaturen in Hinsicht auf die Ansprache des Probekörperzustandes vor und nach dem Klimatisierungsvorgangs, lassen sich die ermittelten Zugfestigkeiten bzw. SATS-Verhältnisse bei der Prüftemperatur +5 °C sowohl an konditionierten als auch an unkonditionierten Proben als plausibel bezeichnen.

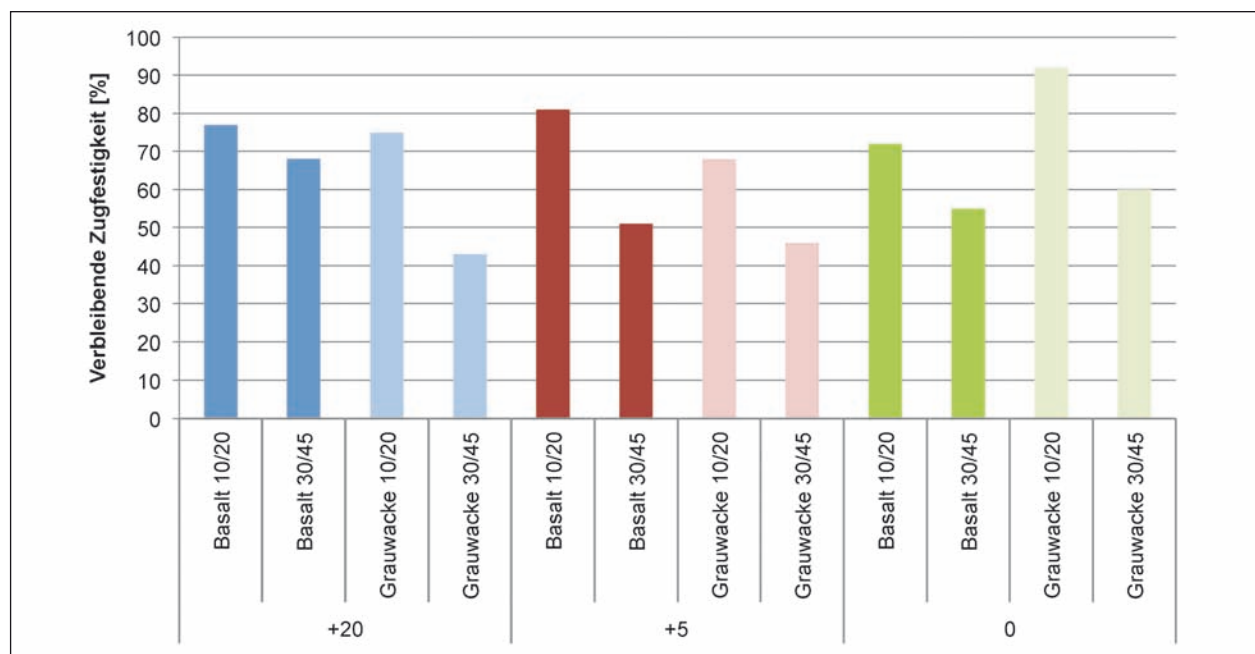


Bild 46: SATS-Verhältnis (verbleibende Zugfestigkeit)

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Prüfung des Asphalts, die der SATS-Prüfung bzw. dem Klimatisierungsvorgang zuerst unterzogen wurden, mit dem direkten Zugversuch bei der Prüftemperatur von +5 °C zielführend ist, um die untersuchten Varianten hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zu unterscheiden und zu bewerten.

## 5.5 Ergebnisse: Flaschen-Rollverfahren

### 5.5.1 Allgemeines

Als begleitende Untersuchung zur SATS-Prüfung wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes das Flaschen-Rollverfahren an Basalt, Mikrodiorit und Grauwacke mit der Gesteinskörnung 8/11 mit sechs verschiedenen Bindemitteln (Normbitumen 50/70 nach TP Gestein, Teil 3.4 und die fünf Bindemitteln, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes in den verschiedenen Asphaltmischungen verwendet wurden) durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten gemäß DIN EN 12697 Teil 11 (A).

Da beide o. g. Prüfverfahren (SATS-Prüfung und Flaschen-Rollverfahren) die Adhäsion bzw. das Haftverhalten zwischen Bitumen und Gestein ansprechen, sollen die Ergebnisse aus diesen zwei Untersuchungen miteinander verglichen und interpretiert werden, um möglicherweise einen Zusammenhang zu finden und die Plausibilität der Ergebnisse zu prüfen.

Bei dem Flaschen-Rollverfahren spricht man von zwei wichtigen Einflussgrößen auf die Ergebnisse: Gestein und Bitumen. Der Mechanismus der Haftfestigkeit zwischen Gestein und Bitumen wird durch verschiedene Theorien beschrieben. Die Haftwirkung des Bitumens hängt überwiegend von der Oberflächenspannung, der Viskosität und des Alterungsverhaltens vom Bitumen ab, wobei mit steigenden Temperaturen die zwischenmolekularen Kräfte abnehmen, sodass die Viskosität und die Oberflächenspannung niedriger werden.

Bei den Gesteinen sind neben der Oberflächenchemie die Form, Mikrotextur und Porosität wichtige Einflussfaktoren, die die Haftung eines Bitumenfilms an der Gesteinsoberfläche bestimmen [BASt, 2000].

Um das Verhalten bzw. den Einfluss der Gesteinsart sowie von Bitumenart/-sorte besser nachvollziehen zu können, werden diese zwei Größen im Folgenden getrennt betrachtet und analysiert.

### 5.5.2 Einfluss des Bindemittels

Für die Untersuchung wurden sechs verschiedene Bindemittel verwendet:

- Normbitumen 50/70,
- (SATS) 50/70 – diese Bitumensorte wurde für die SATS-Prüfung benutzt bzw. für die Herstellung der Asphaltmischungen,
- Straßenbaubitumen 10/20,
- Straßenbaubitumen 30/45,
- Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A,
- Polymermodifiziertes Bitumen 10/40-65 A.

Um eine ausreichende Differenzierung der Versuchsergebnisse zu gewährleisten, wird eine Rolldauer von 6, 24, 48 und 72 Stunden betrachtet und mit dem Umhüllungsgrad als Endergebnis, die prozentual ausgedrückt wird, bewertet.

In Bild 47 bis Bild 52 sind die ermittelten Ergebnisse für jedes untersuchte Bindemittel getrennt dargestellt. Um eine bessere Übersicht zu erhalten, sind die Gesteinsarten in jedem Bild mit gleicher Farbe gekennzeichnet.

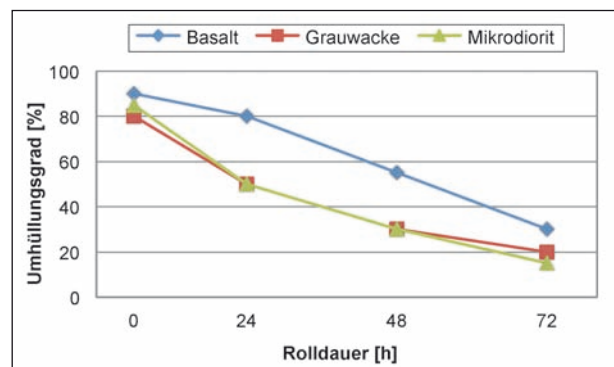


Bild 47: Flaschen-Rollverfahren – Bitumen 50/70 (Normbitumen)

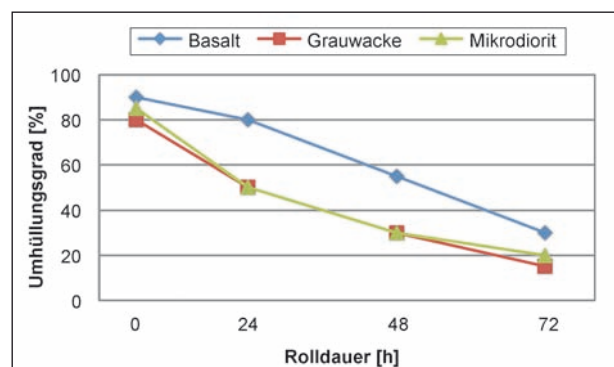


Bild 48: Flaschen-Rollverfahren – Bitumen 50/70 (SATS)

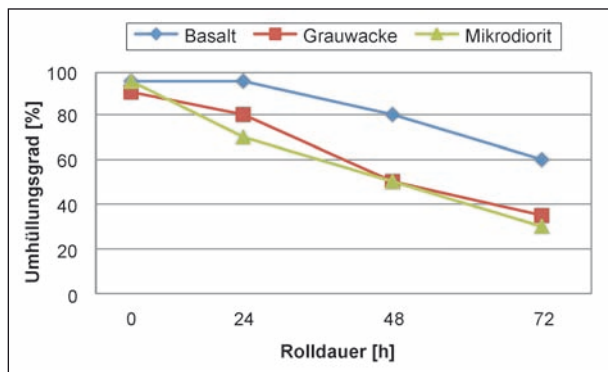


Bild 49: Flaschen-Rollverfahren – Bitumen 10/20

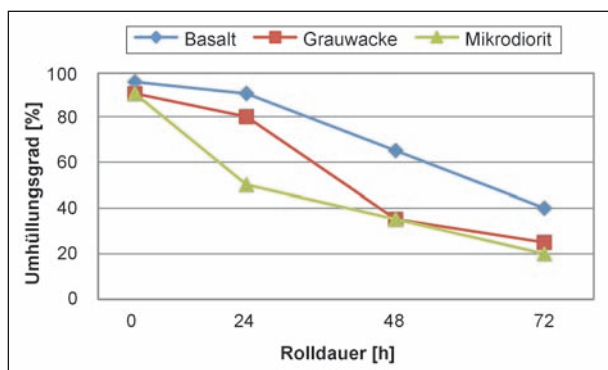


Bild 50: Flaschen-Rollverfahren – Bitumen 30/45

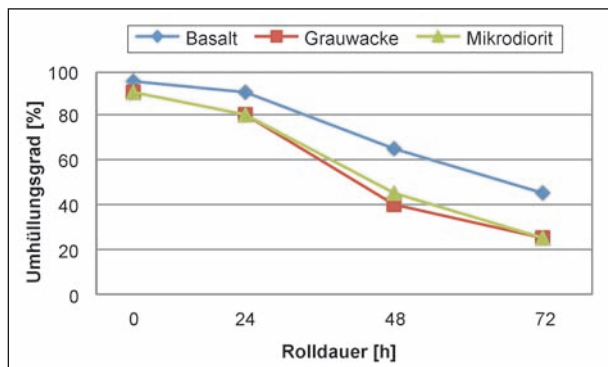


Bild 51: Flaschen-Rollverfahren – Bitumen 25/55-55 A

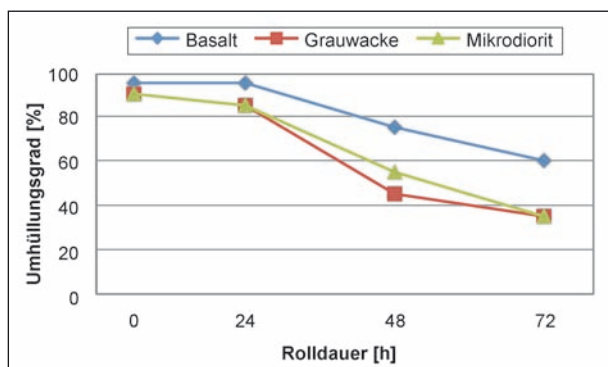


Bild 52: Flaschen-Rollverfahren – Bitumen 10/40-65 A

Aus den vorliegenden Ergebnissen können die folgenden Zusammenhänge festgehalten werden:

- Nach einer Rolldauer von 6 Stunden liegen die Umhüllungswerte bei allen untersuchten Kombinationen zwischen 95 % (Basalt) und 80 % (Grauwacke).
- Der Abfall der Umhüllungswerte (mit steigender Rolldauer) ist bei allen untersuchten Kombinationen festzustellen, was zu erwarten war. Dieser abnehmende Verlauf ist bei den polymermodifizierten Bitumensorten in den ersten 48 Stunden weniger auffällig als bei den Kombinationen mit den Straßenbaubitumen, wobei sich ein „konstant“ abnehmender Verlauf zeigt.
- Bei allen untersuchten Bitumen-Gestein-Kombinationen ist ein stark abnehmender Verlauf zwischen 48 Stunden und 72 Stunden zu erkennen. Insgesamt ist festzustellen, dass die Ergebnisse nach einer Rolldauer von 72 Stunden bezüglich des Umhüllungsgrades tendenziell die Ergebnisse nach 48 Stunden bestätigen. Es sind keine wesentlichen Veränderungen zu erkennen.
- Die höchsten Umhüllungswerte aller untersuchten Kombinationen sind bei dem Straßenbaubitumen 10/20 und bei dem polymermodifiziertem Bitumen 10/40-65 A festzustellen.
- Sowohl nach 48 Stunden Rolldauer als auch nach 72 Stunden weisen die polymermodifizierten Bitumensorten (10/40-65 A und 25/55-55 A) die höchsten Umhüllungswerte auf.
- Bei allen Gesteinsarten mit der Bitumensorte 50/70 sind die niedrigsten Umhüllungswerte zu finden. Obwohl es sich hier um zwei Bindemittel gleicher Sorte aber unterschiedlicher Hersteller handelt, waren keine gravierenden Unterschiede zu erkennen. Ein kleinerer Vorsprung der Umhüllungswerte lässt sich beim Bitumen 50/70 (SATS) feststellen.

### 5.5.3 Einfluss der Gesteinsart

Ein weiterer Einflussfaktor, der das Haftverhalten in einem Asphaltmischgut mitbestimmt, ist das Gestein. Die Haftung zwischen Bitumen und Gestein ist ein Benetzungsprozess, bei dem ein positiv geladenes Bitumenmolekül durch ein negatives Gesteinsmolekül ausgeglichen wird. Allgemein werden Gesteine in zwei Gruppen eingeteilt: saure hydro-

phile und basisch hydrophobe. Saure Gesteine bestehen hauptsächlich aus Quarz, d. h. Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$  und werden als „haftkritisch“ bezeichnet, dagegen bestehen basische Gesteine hauptsächlich aus Kalzit, d. h. Kalziumcarbonat  $\text{CaCO}_3$  und werden als „haftunkritisch“ bezeichnet [NÖSLER, 2007].

Diese Aufteilung in basisch und sauer kommt aufgrund der unterschiedlichen  $\text{SiO}_2$ -Gehalte, die von Geologen und Petrografen als „Kieselsäure“ bezeichnet werden. Man spricht von „saurer“ Feldspaten, wenn sie mehr  $\text{SiO}_2$  enthalten und von „basischen“, wenn sie weniger  $\text{SiO}_2$  enthalten.

- Kalium-Feldspat hat „mehr Kieselsäure“  
 $4\text{SiO}_2 = [\text{Si}_4\text{O}_8] = \text{neutral} -1\text{Si}^{4+} + 1\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{K} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ .
- Calcium-Feldspat hat „weniger Kieselsäure“  
 $4\text{SiO}_2 = [\text{Si}_4\text{O}_8] = \text{neutral} -2\text{Si}^{4+} + 2\text{Al}^{3+} \rightarrow [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]^2 + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Ca} [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ .

Bei letzterem wird ein weiteres Si durch Al ersetzt. Die wesentlichen Bestandteile eines „saurer“ Gesteins sind ein „saurer“ Feldspat und Quarz. Das bekannteste Gestein ist Granit. Die wesentlichen Bestandteile eines basischen Gesteins, wie z. B. Basalt oder Gabbro, sind basische Plagioklase [ROTHER, 2010].

Die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine ist für die Oberflächenaktivität und somit für das Haftverhalten zwischen Bitumen und Gestein von großer Bedeutung. Da die Oberflächen von Gesteinen unterschiedlich starke elektrische Energien aufgrund ihres Dipolcharakters haben, wird Wasser mit seinem hohen Dipolmoment wesentlich mehr von silikatreichen d. h. sauren Gesteinen als von basischen Gesteinen adsorbiert.

Eine günstigere Haftung zwischen dem Bindemittel Bitumen und dem Gestein, die hauptsächlich aus Kalziumkarbonat besteht, wird aufgrund des Dipolmoments von Bitumen, der nahezu null ist, erklärt [NÖSLER, 2003].

Unter Beachtung dieser Erkenntnisse wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes zwei basische Gesteine (Basalt und Mikrodiorit) und ein saures Gestein (Grauwacke) verwendet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse tabellarisch (Tabelle 23 bis Tabelle 25) und grafisch (Bild 53 bis Bild 55) hinsichtlich der Gesteinsart dargestellt.

| Umhüllungsgrad [%] |              |        |      |      |      |
|--------------------|--------------|--------|------|------|------|
| Rolldauer          |              | 6 h    | 24 h | 48 h | 72 h |
| Gestein            |              | Basalt |      |      |      |
| Bindemittel        | 50/70 (norm) | 90     | 80   | 50   | 25   |
|                    | 50/70 (SATS) | 90     | 80   | 55   | 25   |
|                    | 30/45        | 95     | 90   | 65   | 40   |
|                    | 10/20        | 95     | 95   | 80   | 60   |
|                    | 25/55-55 A   | 95     | 90   | 65   | 45   |
|                    | 10/40-65A    | 95     | 95   | 75   | 60   |

Tab. 23: Umhüllungsgrad – Basalt

| Umhüllungsgrad [%] |              |           |      |      |      |
|--------------------|--------------|-----------|------|------|------|
| Rolldauer          |              | 6 h       | 24 h | 48 h | 72 h |
| Gestein            |              | Grauwacke |      |      |      |
| Bindemittel        | 50/70 (norm) | 82        | 50   | 30   | 20   |
|                    | 50/70 (SATS) | 85        | 50   | 35   | 20   |
|                    | 30/45        | 90        | 80   | 35   | 25   |
|                    | 10/20        | 92        | 80   | 55   | 35   |
|                    | 25/55-55 A   | 90        | 80   | 40   | 25   |
|                    | 10/40-65A    | 90        | 85   | 45   | 35   |

Tab. 24: Umhüllungsgrad – Grauwacke

| Umhüllungsgrad [%] |              |             |      |      |      |
|--------------------|--------------|-------------|------|------|------|
| Rolldauer          |              | 6 h         | 24 h | 48 h | 72 h |
| Gestein            |              | Mikrodiorit |      |      |      |
| Bindemittel        | 50/70 (norm) | 85          | 50   | 30   | 15   |
|                    | 50/70 (SATS) | 85          | 50   | 30   | 20   |
|                    | 30/45        | 90          | 65   | 40   | 25   |
|                    | 10/20        | 95          | 70   | 50   | 30   |
|                    | 25/55-55 A   | 90          | 80   | 45   | 25   |
|                    | 10/40-65A    | 90          | 85   | 45   | 35   |

Tab. 25: Umhüllungsgrad – Mikrodiorit

Aus Bild 53 bis Bild 55 werden folgende Tendenzen ersichtlich:

- In den ersten 24 Stunden liegen die Umhüllungsgrad-Werte zwischen 50 % (Grauwacke und Mikrodiorit) und 95 % (Basalt) auf.
- Nach 48 Stunden befinden sich die Umhüllungsgrad-Werte für den Basalt zwischen 55 % und 80 %. Beim Mikrodiorit zwischen 30 % und 50 % und bei der Grauwacke zwischen 30 % und 55 %.

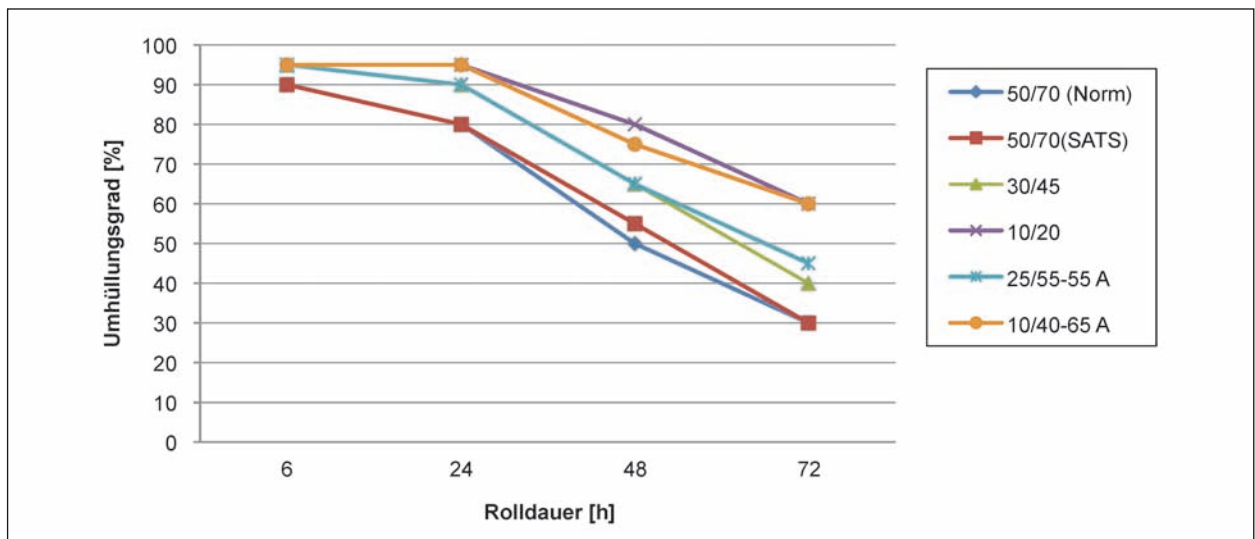


Bild 53: Flaschen-Rollverfahren – Basalt

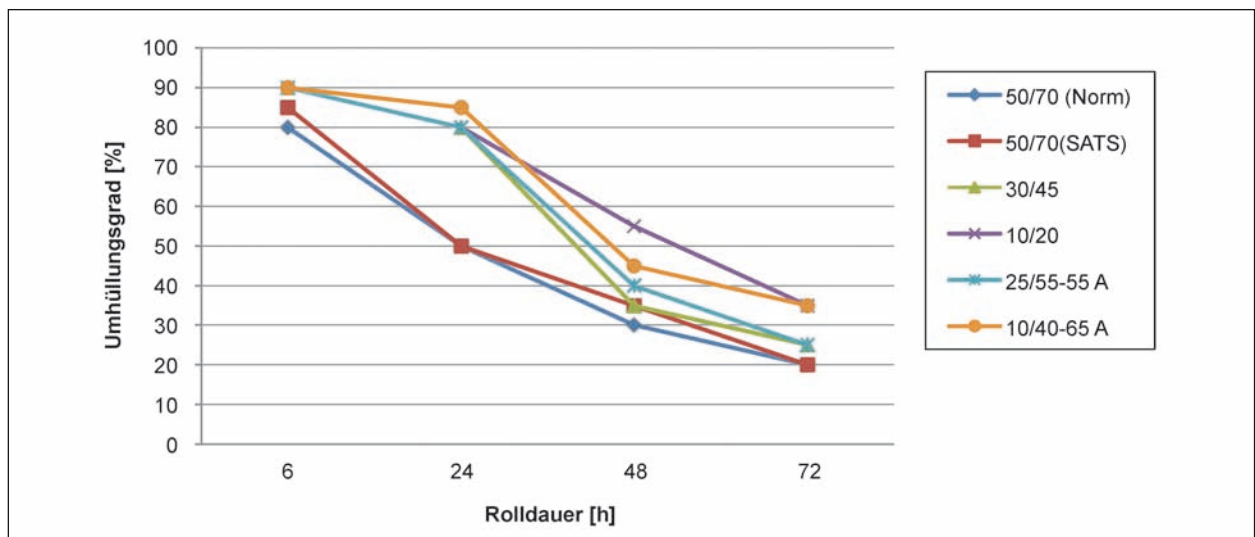


Bild 54: Flaschen-Rollverfahren – Grauwacke

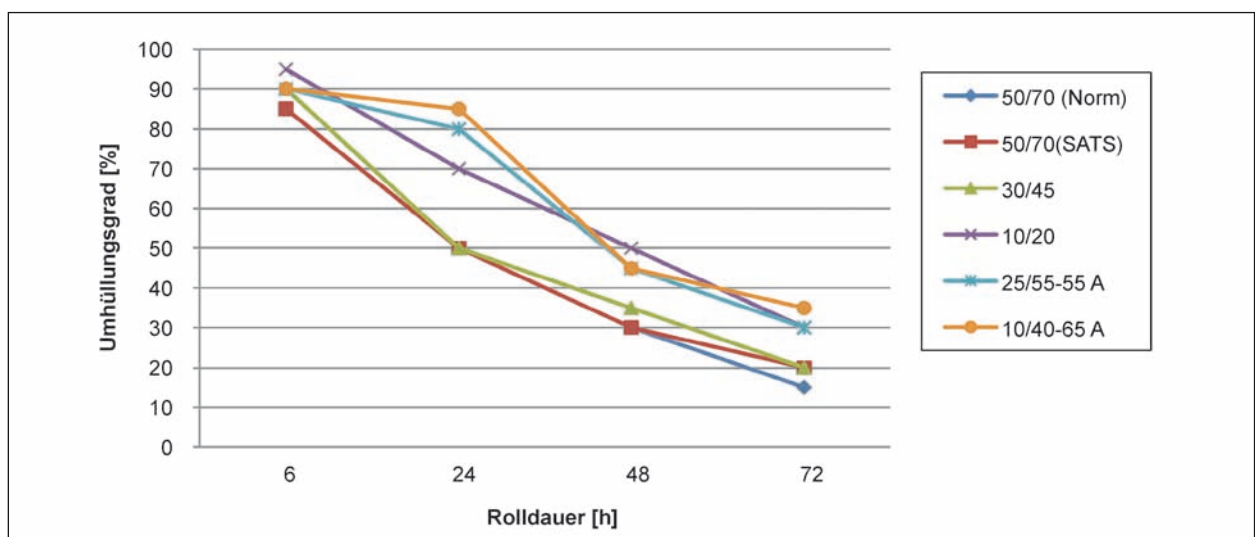


Bild 55: Flaschen-Rollverfahren – Mikrodiorit



- Nach 72 Stunden zeigte sich eine größere Ergebnisspanne, die Umhüllungsgrad-Werte liegen zwischen 15 % (Mikrodiorit) und 60 % (Basalt).

Nach der visuellen Bestimmung der Bitumenablösungen können die Basalt-Kombinationen eindeutig von der Grauwacke und von Mikrodiorit unterschieden werden. Der Basaltstein besitzt bei fast allen untersuchten Kombinationen das günstigste Haftverhalten, charakterisiert durch die höchsten Umhüllungsgrade. Es konnte aus visueller Betrachtung festgestellt werden, dass das restliche Bitumen auf der Basalt-Gesteinsoberfläche, unabhängig von der Bitumensorte, einen dicken Bitumenfilm aufweist, sodass eine gute Haftung trotz dieser unvollständigen Umhüllung zu vermuten ist (Bild 56).

Die Kurvenverläufe in Bild 54 bei den Grauwacke-Kombinationen deuten auf ein haftkritisches Gestein hin. Hierbei liegen die Werte nach 72 Stunden zwischen 15 % (Normbitumen 50/70) und 35 % (10/40-65 A). Durch eine visuelle Beurteilung konnte festgestellt werden, dass die Bitumenablösung von der Gesteinsoberfläche, unabhängig von dem Bindemitteln, sehr großflächig ist. Es ist eine klare Ablösung zwischen Gestein und Bitumen zu sehen. Die Gesteinskörner wirken „ausgespült“ (Bild 57).

Die ungünstigsten Werte sind bei den Mikrodiorit-Kombinationen zu erkennen. Hier liegen die Werte nach 72 Stunden zwischen 15 % (mit Normbitumen 50/70) und 35 % (10/40-65 A). Es ist zu erwähnen, dass die Gesteine nach jeder Versuchsreihe stark zermahlen und sehr „bröselig“ waren. Dies ist in Bild 58 eindeutig zu erkennen.

Zusammenfassend lässt sich aus den dargestellten Ergebnissen ableiten, dass die Basalt-Kombinationen bei allen untersuchten Kombinationen die höchsten Umhüllungswerte erreicht haben und damit ein günstigeres Haftverhalten gegenüber den anderen zwei Gesteinsarten aufweisen. Die Ergebnisse der Grauwacke- und Mikrodiorit-Kombinationen liegen eng beieinander.



**Bild 56:** Basalt + Normbitumen 50/70



**Bild 57:** Grauwacke + Normbitumen 50/70



**Bild 58:** Mikrodiorit + Normbitumen 50/70

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die SATS-Prüfung, die für die Untersuchungen von hohlraumreichen und bindemittelarmen Asphaltmischungen im Vereinigten Königreich angewendet wird, überprüft. Die Entwickler dieses Prüfverfahrens geben an, anhand dieser Prüfung die Asphaltmischungen bezüglich des Haftverhaltens zwischen den Gesteinen und Bitumen bewerten und somit eine aussagekräftige Abschätzung der Nutzungsdauer mit dem gewonnenen SATS-Dauerhaftigkeitsindex ableiten zu können.

Um diese Aussage zu überprüfen, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes Untersuchungen an einem AC 16 B und einem AC 32 T mit drei unterschiedlichen Gesteinsarten, fünf unterschiedlichen Bindemitteln und unterschiedlichen Hohlraumgehalten durchgeführt. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Unterstützung und zur weiteren Gestaltung des europäischen Normungsprozesses dienen, sodass eine deutsche Anwendung des Prüfverfahrens zielgerichtet erfolgen kann.

Das durchgeführte Versuchsprogramm zielte im Wesentlichen darauf ab, erste Erfahrungen mit der SATS-Prüfung zu erhalten. Das erste Ziel bestand darin, den Einfluss des Konditionierungsvorganges auf die Asphaltprobekörper zu bestimmen und die Ergebnisse auf Plausibilität zu prüfen, sowie mit den bisherigen Erkenntnissen aus der Literatur und Praxis bezüglich des Haftverhaltens zu vergleichen. Zudem sollten die Ergebnisse aus der SATS-Prüfung mit den Ergebnissen des Flaschen-Rollverfahrens verglichen werden.

Im Folgenden sind die Ergebnisse im Einzelnen aufgeführt:

### Bitumen

1. Anhand der ermittelten Werte kann festgestellt werden, dass die untersuchten Asphaltmischungen erwartungsgemäß mit dem Bitumen 10/20 die höchsten SATS-Dauerhaftigkeitsindexe aufweisen. Nach der Anforderung des englischen Regelwerks soll der SATS-Dauerhaftigkeitsindex mindestens 80 % aufweisen, um ein Asphaltmischgut als langlebig und geeignet für starke Beanspruchungen einzustufen zu können. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde

dieser Wert bei den untersuchten Asphaltmischungen nicht erreicht.

2. Der SATS-Dauerhaftigkeitsindex befindet sich bei den weiteren vier verwendeten Bindemitteln (30/45, 50/70, 10/40-65 A und 25/55-55 A), unabhängig von der Gesteinsart auf einem vergleichbaren Niveau. Grundsätzlich war eine stärkere Differenzierung zwischen den Ergebnissen erwartet worden.

### Gesteinsart

3. Die Idee der SATS-Prüfung ist unter anderem, dass die Asphaltmischungen mit haftkritischen Gesteinen einen niedrigeren SATS-Dauerhaftigkeitsindex aufweisen als die Asphaltmischungen mit einem haftunkritischen Gestein. Dies hat sich hier nicht bestätigt. Die günstigeren Ergebnisse sind bei den Grauwacke- und Mikrodiorit-Kombinationen zu erkennen, wobei diese Gesteinsarten als haftkritisch zu bezeichnen sind. Der hier verwendete Mikrodiorit ist für seine Quellfähigkeit bekannt. Es ist zu vermuten, dass die höheren Steifigkeits-Werte, ausgedrückt durch den SATS-Dauerhaftigkeitsindex, aus dem versteiften Bindemittel (aufgrund der quellfähigen Mineralanteile im Mikrodiorit) resultieren.

### Asphaltmischung

4. Bei den Asphalttragschicht-Varianten zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei den Asphaltbinderschichten. Jedoch sind insgesamt bei den Asphalttragschicht-Varianten höhere SATS-Dauerhaftigkeitsindexe zu entnehmen. Die Untersuchungen der Asphalttragschicht-Varianten wurden mit zwei verschiedenen Kräfteinstellungen durchgeführt. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde zunächst die gleiche Kräfteinstellung für Asphaltbinder- und Asphalttragschichten gewählt. Dies erwies sich jedoch für einige Asphalttragschichten-Varianten als unzureichend. Erkennbar ist dies an SATS-Dauerhaftigkeitsindexe mit einem Wert von über 100 %. Aufgrund dieser Werte wurden die Untersuchungen mit einer höheren Kraft erneut durchgeführt. Aus den ermittelten Ergebnissen konnte dennoch kein systematisches Verhalten der untersuchten Varianten, sowohl nach der Gesteinsart als auch nach dem Bindemittel, abgeleitet werden.

### Klimatisierungsvorgang

5. Allgemein ist festzustellen, dass der Klimatisierungsvorgang im Druckalterungsbehälter, d. h. der simulierte Alterungsprozess, eine starke Wirkung auf die Proben hat. Diese ist durch die stark abfallenden Steifigkeits-Werte nach der Klimatisierung erkennbar. Um diese zu überprüfen wurde das Bindemittel aus den konditionierten Marshall-Probekörpern, die auf der vierten Position im Druckalterungsbehälter lagen, rückgewonnen und daraus der Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt. Hierbei war eine Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel im Vergleich zu den Bitumen im Anlieferungszustand von über 10 K festzustellen. Ausnahme hier war das Bindemittel 10/40-65 A, das sich mit einer Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 2,9 K (Basalt) und 5,9 K (Grauwacke) als unempfindlichsten gegenüber dem Alterungsprozess zeigte.

### Dynamischer Spaltzugversuch

6. Der SATS-Dauerhaftigkeitsindex resultiert aus den Steifigkeits-Werten, die mittels dynamischem Spaltzugversuch nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) vor und nach der Klimatisierung ermittelt wurden.

Bei der Betrachtung der Steifigkeits-Werte vor der Klimatisierung, ist zuerst eine plausible Reihenfolge bezüglich der Bitumenart/-sorte aber auch des Hohlraumgehaltes zu erkennen. Nachdem Klimatisierungsvorgang gleichen sich die Ergebnisse an. Es ist kaum eine Differenzierung der Steifigkeits-Werte zu erkennen. Eine plausible Reihenfolge kann nicht identifiziert werden. Die Ergebnisse nach der Klimatisierung führen zu einem höheren SATS-Dauerhaftigkeitsindex und somit zu einem verfälschten Ergebnis, sodass die Proben mit zuerst niedrigeren Steifigkeiten als günstigere Varianten bewertet werden.

### Lage des Probekörpers

7. Hinsichtlich der Positionierung der Probekörper im Druckalterungsbehälter waren unterschiedliche verbleibende Steifigkeits- und verbleibende Sättigungs-Werte je Probekörper zu erwarten. Die Entwickler dieses Prüfverfahrens geben an, dass die oben positionierten Probekörper einen geringeren  $CTR_R$ -Wert (verblei-

bende Steifigkeit) aufweisen als die unten positionierten Probekörper. Dies soll mit einem höheren Sättigungs-Wert belegt werden. Hierbei sollen oben positionierte Probekörper nach dem sogenannten „Kaskadeneffekt“ (siehe Kapitel 5.2.3) mehr Wasser aufnehmen als die unten positionierten Probekörper. Der günstigste  $CTR_R$ -Wert ist bei dem Probekörper vier zu erwarten, da dieser am wenigsten Wasser bekommen soll. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit hat sich dies nicht bestätigt. Die ersten vier positionierten Probekörper weisen ein ähnliches Verhalten auf und die Werte der ersten vier Probekörper liegen sowohl bei den verbleibenden Steifigkeits-Werten als auch bei den verbleibenden Sättigungs-Werten überwiegend auf einem vergleichbaren Niveau. Die Lage des Probekörpers im Druckalterungsbehälter während des Klimatisierungsvorgangs war anhand der gewonnenen Ergebnisse nicht zu identifizieren.

8. Eine weitere Erkenntnis die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen gewonnen wurde, bezieht sich auf den jeweiligen Probekörper Nummer fünf der Prüfung. Diese Probekörper liegen bei der SATS-Prüfung während der gesamten Prüfdauer im Wasser. Hierbei zeigten sich in Abhängigkeit von der Gesteinsart unterschiedliche Sättigungs-Werte. Die unterschiedliche Wasseraufnahme war hier deutlich zu erkennen. Es ist festzustellen, dass die Basalt-Probekörper die günstigsten Sättigungs-Werte aufweisen, wobei die Grauwacke- und Mikrodiorit Kombinationen auf einem vergleichbaren Niveau liegen mit leichten Schwankungen in Abhängigkeit von der Bitumensorte. Nach pr DIN EN 12697-45 sind keine weiteren Untersuchungen an den Proben Nummer fünf durchzuführen. Eine getrennte Bewertung ist hier nicht vorgesehen.

### SATS-Prüfung

9. Mittels SATS-Prüfung wurde auch die Frage geklärt bzw. untersucht, ob und gegebenenfalls in welchem Maße der Dauerhaftigkeitsindex als Merkmalgröße zur quantitativen Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Asphaltmischungen von den gezielt variierten Einflussgrößen – nämlich der Gesteinsart, der Bindemittelart/-sorte, dem Hohlraumgehalt und der Asphaltart/-sorte – systematisch abhängt. Dabei erwies sich bei allen untersuchten Kombinationen die Bindemittelart/



-sorte mit deutlichem Abstand, als die signifikante Variationsursache. Bedauerlicherweise war dieser Unterschied nur zwischen den Bindemitteln 10/20 und den andern vier Bindemitteln deutlich zu sehen. Eine klare Differenzierung der Ergebnisse zwischen den anderen vier verwendeten Bindemitteln (30/45, 50/70, 10/40-65 A und 25/55-55 A) war kaum zu identifizieren.

### Direkter Zugversuch

10. Die Untersuchungen an verschiedenen Asphaltmischungen haben gezeigt, dass die Anwendung der SATS-Prüfung nicht zu plausiblen Ergebnissen führt. Dies mag unter anderem damit begründet sein, dass die Vergleichsprüfung mittels dynamischem Spaltzugversuch durchgeführt wurde. Obwohl diese Vergleichsprüfung nach DIN EN 12697-45 (SATS-Prüfung) bevorzugt wird, können auch andere Vergleichsprüfungen durchgeführt werden. Es ist hier wichtig zu erwähnen, dass dann das Endergebnis nicht als SATS-Dauerhaftigkeitsindex sondern als SATS-Verhältnis des Gemisches zu bezeichnen ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde als zweite Vergleichsprüfung der direkte Zugversuch nach DIN EN 12697-46 herangezogen. Anhand der ermittelten Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass die Asphaltmischungen sowohl mit dem Bindemittel 10/20 als auch mit dem Bindemittel 30/45 ein ähnliches Verhalten aufweisen und die Ergebnisse sich nicht so stark unterscheiden, wie dies bei der Ermittlung der Steifigkeit festzustellen war. Mittels direkten Zugversuchen konnte weiterhin gezeigt werden, dass die Zugfestigkeiten sowohl an unkonditionierten als auch an konditionierten Probekörpern, ausgedrückt durch das SATS-Verhältnis, bei allen drei Prüftemperaturen nicht nur von dem Bindemittel als dominante Einflussgröße sondern auch von der Gesteinsart beeinflusst werden. Die günstigen Eigenschaften von Basalt waren hier deutlich zu sehen.

### Flaschen-Rollverfahren

11. Beim Flaschen-Rollverfahren hat sich eindeutig gezeigt, dass die Basalt-Kombinationen die günstigsten Umhüllungswerte aufweisen. Bei den anderen zwei Gesteinsarten (Grauwacke und Mikrodiorit) war die Reihen-

folge nicht deutlich zu identifizieren. Es hat sich bestätigt, dass die Kombinationen mit den Polymermodifizierten Bitumensorten ein günstigeres Haftverhalten aufweisen als die Straßenbaubitumensorten. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der SATS-Prüfung im Vergleich zum Flaschen-Rollverfahren ist kein Zusammenhang erkennbar. Bei allen Untersuchungen ergeben sich allerdings bei Verwendung von Bitumen 10/20 die günstigsten Werte. Bei der Grauwacke zeigen sich die höchsten Umhüllungswerte mit der Bitumensorte 10/40 -65 A.

In neuen Forschungsstudien aus Irland wird über die Erfahrungen mit der SATS-Prüfung berichtet. Hierbei zeigten sich einige Ergebnisse der SATS-Prüfung als unplausibel und nicht praxiskonform. Bei den Kombinationen mit dem Eigen- und Fremdfüller zeigte sich kaum ein Unterschied der Ergebnisse. Asphaltmischungen mit einem höheren Bindemittelgehalt haben niedrigere Anfangs-Steifigkeit-Werte aufgezeigt. Allerdings zeigten die untersuchten Asphaltmischungen durchweg einen SATS-Dauerhaftigkeitsindex von über 80 %, wodurch die Anforderung nach dem britischen Normenwerk erfüllt ist. Da aber keine aussagekräftigen Unterschiede zwischen den in der irischen Untersuchung verwendeten Gesteinen bzw. Asphaltmischungen feststellbar sind, wird seitens der Autoren kein Bedarf gesehen, dieses Prüfverfahren in das irische Normenwerk einzuführen [NICHOLLS et al., 2010].

Gleiches gilt aufgrund der im Rahmen dieses Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse für das deutsche Regelnormwerk.

Die direkte Übertragung der SATS-Prüfung zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt ist aufgrund der erläuterten Ergebnisse nicht möglich.

## 7 Ausblick

Mit den hier ermittelten Untersuchungsergebnissen und der angewendeten Untersuchungssystematik lässt sich keine Umsetzung der SATS-Prüfung bzw. daraus resultierenden SATS-Dauerhaftigkeitsindexen auf das deutsche Regelwerk ableiten. Gleichwohl ist der Forschungsnehmer der Auffassung, dass das Verfahren nach Optimierung der Prüfbedingungen Potenzial zur Ansprache der Alterungsbeständigkeit von Asphalt hat.

Es besteht die Notwendigkeit zum einen darin, ein geeignetes Prüfverfahren zu finden, bei dem die zuvor entwickelten Prüfbedingungen optimiert werden, zum anderen darin, ein Verfahren zu finden (wie z. B. den direkten Zugversuch), das an den Probekörpern vor und nach dem Klimatisierungsvorgang durchzuführen ist, bei dem die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen (Druck, Wärme, Wasser) erfasst werden, sodass die Ergebnisse mehr differenzieren.

Aufgrund des begrenzten Untersuchungsumfangs und der geringen Belegungszahl der direkten Zugversuche sind die erläuterten Erkenntnisse als erster Hinweis zu verstehen. Es sollten weitere Untersuchungen an Asphaltproben aus dem Labor mithilfe der Zugversuche durchgeführt werden, um die bisher gewonnenen Ergebnisse und neuen Erkenntnisse noch aussagekräftiger bewerten zu können.

Dieses Potenzial sollte im Rahmen einer weiteren Forschungsarbeit ausgelotet werden.

## 8 Literatur

- [1] ARAND, W.: Bewertungshintergrund zur Beurteilung des Haftverhaltens von Asphalten, (Teil 1), Straße + Autobahn, 10/2000
- [2] ARAND, W.: Bewertungshintergrund zur Beurteilung des Haftverhaltens von Asphalten, (Teil 2), Straße + Autobahn, 11/2000
- [3] BEARA, L.: Einfluss des Füllers auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltbinder. Diplomarbeit, Darmstadt, 2009
- [4] Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Bestimmung des adhäsiven Potenzials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mithilfe der Kontakt-Winkelmessmethode. Heft S 59, Bergisch Gladbach, September 2009
- [5] BOREK, J.; MÜLLER, F.: Prüfung des Verhaltens von Asphalt bei tiefen Temperaturen mithilfe des modifizierten Spaltzugversuchs unter besonderer Beachtung der Querdehnung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 885/2004
- [6] COLLOP et al.: Development of the saturation ageing tensile stiffness (SATS) test. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 157(p. 163-171), August 2004
- [7] COLLOP et al.: Effects of Pressure and Aging in SATS Test. Journal of Transportation Engineering, S. 618-624, November 2007
- [8] COLLOP et al. 2007: The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. Construction and Building Materials 22 (2008) 2015-2024/ ELSEVIER
- [9] DIN EN 12697-11: Prüfverfahren für Heißasphalt – Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen (Teil A: Flaschen-Rollverfahren), Dezember 2005
- [10] DIN EN 12697-26: Prüfverfahren für Heißasphalt – Steifigkeit (Anhang C), Oktober 2004
- [11] DIN EN 12697-45 (Entwurf): Alterungsprüfung an gesättigten Asphalt-Probekörpern (SATS-Prüfung), Juni 2009  
  
prEN 12697-45: Test methods for hot mix asphalt-Part 45: Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS) Conditioning Test, March 2008
- [12] DÜREN, A. N.: Lösungsansatz: Einsatz von Haftvermittlern, Asphalt 4/2009
- [13] EULITZ, H. J.: Kälteverhalten von Walzasphalten, Prüftechnische Ansprache und Einfluss kompositioneller Merkmale. Braunschweig, 1987
- [14] HADLEY, W.; HUDSON, W.; KENNEDY, T. W.: A Method of Estimating Tensile Properties of Materials Tested in Indirect Tension. Center for Highway Research, Texas, Report Number 41, pp. 7-98
- [15] HERBST, G.: Die Quellfähigkeit von technischen Asphalten für den Straßenbau als Beurteilungskriterium für die Haltbarkeit. Wien, August 2003
- [16] HEUKELOM, W.: Eine verbesserte Methode der Charakterisierung von Bitumen mithilfe ihrer mechanischen Eigenschaften. Bitumen, Heft 2, 1974
- [17] LEUTNER, R.; WELLNER, F.: Prognose der Lebensdauer von Asphaltbefestigungen auf der Grundlage struktureller Eigenschaften. Straße und Autobahn, Heft 7, 2007



- [18] LYTTON: Comprehensive Overview of the Stiffness Characterization of Asphalt Concrete. In: KIM, R. (ed.), American Society of Civil Engineers, Modeling of Asphalt Concrete. Reston, 2009
- [19] MCHW: Manual of Contract Documents for Highway Works, Volume I Specification for Highway Works, Series 900 Road Pavement – Bituminous Bound Material. Amendment November 2008. Verfügbar: [www.standardsforhighways.co.uk/mchw](http://www.standardsforhighways.co.uk/mchw).
- [20] NICHOLLS, J. et al.: Review of Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS) test for use in Ireland. Transport Research Laboratory, Februar 2011
- [21] NÖSLER, I.; HARDERS, O.: Einfluss der Oberflächenaktivität von Mineralstoffen auf das Gebrauchsverhalten von Walzasphalt. Bitumen, Heft 1, 2003
- [22] NÖSLER, I.: Prüfung des Haftverhaltens zwischen Mineralstoff und Bitumen. Straße + Autobahn, Heft 7, 2000
- [23] PEFFEKOVEN, W.: „Steifigkeit“ – ein Kriterium zur Beurteilung bituminöser Beläge? Bitumen, Heft 3, 1971
- [24] PROVETI et al.: The Brazilian test: a tool for measuring the toughness of a material and its brittle to ductile transition. International Journal of Fracture, 2006
- [25] RENKEN, P.: Haftung zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen – ein Statusbericht. Bitumen, Heft 1, 2003
- [26] SANDER, S.: Haftung zwischen Gestein und Bitumen. Asphalt, Heft 8, 2007
- [27] SCHELLENBERG, K.: Die Wasserempfindlichkeit von Füller im bituminösen Straßenbau. Straße + Autobahn, 1979
- [28] SCHELLENBERG, K.: Die Wirkung von Kalksteinmehl in Asphalt. Straße + Autobahn, Heft 5, 2003
- [29] SCHELLENBERG, K.: Verbesserung von Asphalteeigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat. Bitumen, 1, 1999
- [30] SCHLAME, K.: Entwicklung einer Methode zur Langzeitalterung von Straßenbaubindemitteln. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 843, Bonn, 2002
- [31] SÖRENSEN, A.: Zugviskosität von Asphalten mittels Retardationsversuchen unter Zugrundelegung rheologischer Modelle. Dissertation, Braunschweig, 2000
- [32] TL Asphalt-StB: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007
- [33] TP Asphalt-StB – Teil 30: Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 30 – Herstellung von Asphalt-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007
- [34] TP Asphalt-StB – Teil 33: Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 33 – Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät WSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007
- [35] WISTUBA, P.; RENKEN, P.: Adhäsion von Bitumen am Gestein. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1043, Bonn, 2010
- [36] XIAOSONG, H. M. E.: Analyse der bleibenden Verformungen des Asphalts unter statischer und dynamischer Belastung zur Vorhersage von Spurrinnen. Darmstadt, 1996

## Anhang

## Anhang 1: Untersuchungsprogramm

- SATS-Prüfung**

| <b>SATS-Prüfung</b><br>Vergleichsprüfung mit dem dynamischen Spaltzugversuch nach DIN EN 12697-26 (Anhang C) |              |  |           |            |           |           |            |           |             |            |
|--|--------------|--|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------|------------|
| Probekörper  |              | MPK - Marshall-Probekörper (○)<br>PPK - aus Asphalt-Probepplatten gebohrte Probekörper (●) |           |            |           |           |            |           |             |            |
| Hohlraumgehalt [Vol.-%]  |              | (6 ± 0,5)  | (8 ± 0,5) | (10 ± 0,5) | (6 ± 0,5) | (8 ± 0,5) | (10 ± 0,5) | (6 ± 0,5) | (8 ± 0,5)   | (10 ± 0,5) |
| Asphaltvariante  | Gestein      |  | Basalt    |            |           | Grauwacke |            |           | Mikrodiorit |            |
|  | Bindemittel  |  |           |            |           |           |            |           |             |            |
| AC 16 B  | 10/20        | ○ ●  | ○         | ○          | ○ ●       | ○         | ○          | ○ ●       | ○ ●         | ○          |
|  | 30/45        | ○ ●  |           | ○          | ○ ●       | ○         | ○          | ○ ●       | ○ ●         | ○          |
|  | 50/70 (SATS) | ○ ●  | ○         | ○          | ○ ●       |           | ○          | ○ ●       | ○ ●         | ○          |
|  | 10/40-65 A   | ○ ●  |           | ○          | ○ ●       |           | ○          | ○ ●       |             | ○          |
|  | 25/55-55 A   | ○ ●  | ○         | ○          | ○ ●       | ○         | ○          | ○ ●       |             | ○          |
| AC 32 T  | 10/20        | ○  |           | ○          | ○         |           | ○          | ○         |             | ○          |
|  | 50/70 (SATS) | ○  |           | ○          | ○         |           | ○          | ○         |             | ○          |

| <b>SATS-Prüfung</b><br>Vergleichsprüfung mit dem direkten Zugversuch nach DIN EN 12697- 46 |             |                              |        |      |   |           |      |  |
|--|-------------|------------------------------|--------|------|---|-----------|------|--|
| Probekörper  |             | prismatische Probekörper (▮) |        |      |   |           |      |  |
| Hohlraumgehalt [Vol.-%]  |             | (6 ± 0,5)                    |        |      |   |           |      |  |
| Temperatur [°C]  |             | 0                            | + 5    | + 20 | 0 | + 5       | + 20 |  |
| Asphaltvariante  | Gestein     |                              | Basalt |      |   | Grauwacke |      |  |
|  | Bindemittel |                              |        |      |   |           |      |  |
| AC 16 B  | 10/20       | ▮                            | ▮      | ▮    | ▮ | ▮         | ▮    |  |
|  | 30/45       | ▮                            | ▮      | ▮    | ▮ | ▮         | ▮    |  |

- Flaschen-Rollverfahren**

| <b>Flaschen-Rollverfahren</b><br>nach DIN EN 12697-11 (Teil A) |         |           |             |
|--|---------|-----------|-------------|
| Bindemittel  | Gestein |           |             |
|  | Basalt  | Grauwacke | Mikrodiorit |
| 50/70 (Norm)   | x       | x         | x           |
| 50/70 (SATS)   | x       | x         | x           |
| 10/20  | x       | x         | x           |
| 30/45  | x       | x         | x           |
| 10/40-65 A   | x       | x         | x           |
| 25/55-55 A   | x       | x         | x           |

## Anhang 2: Bitumenkenndaten

| Bitumenkenndaten |                  |                       |                         |        |            |                    |     |
|------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|--------|------------|--------------------|-----|
| Prüfverfahren    | Nadelpenetration | Brechpunkt nach Fraaß | Elastische Rückstellung | EP RuK | RTFOT      |                    |     |
|                  |                  |                       |                         |        | EP RuK     | Zunahme des EP RuK |     |
| Einheit          | [0,1 mm]         | [°C]                  | [%]                     | [°C]   | [°C]       |                    |     |
| Bindemittel      | 10/20            | 15,2                  | -2,5                    | x      | 77 (81,2*) | 88,6*              | 7,4 |
|                  | 30/45            | 34,0                  | -10                     | x      | 54,2       | 60                 | 5,8 |
|                  | 50/70 (SATS)     | 54,4                  | -13                     | x      | 51,5       | 57                 | 5,5 |
|                  | 50/70 (Norm)     | 55,1                  | -13,5                   | x      | 51,6       | 56,3               | 4,7 |
|                  | 10/40-65 A       | 20,2                  | -8                      | 94     | 71,1       | 72,5               | 1,4 |
|                  | 25/55-55 A       | 26,6                  | -13,5                   | 92     | 62,3       | 65,8               | 3,5 |

\* Ermittlung der Erweichungspunktes Ring und Kugel erfolgte mit Glycerin

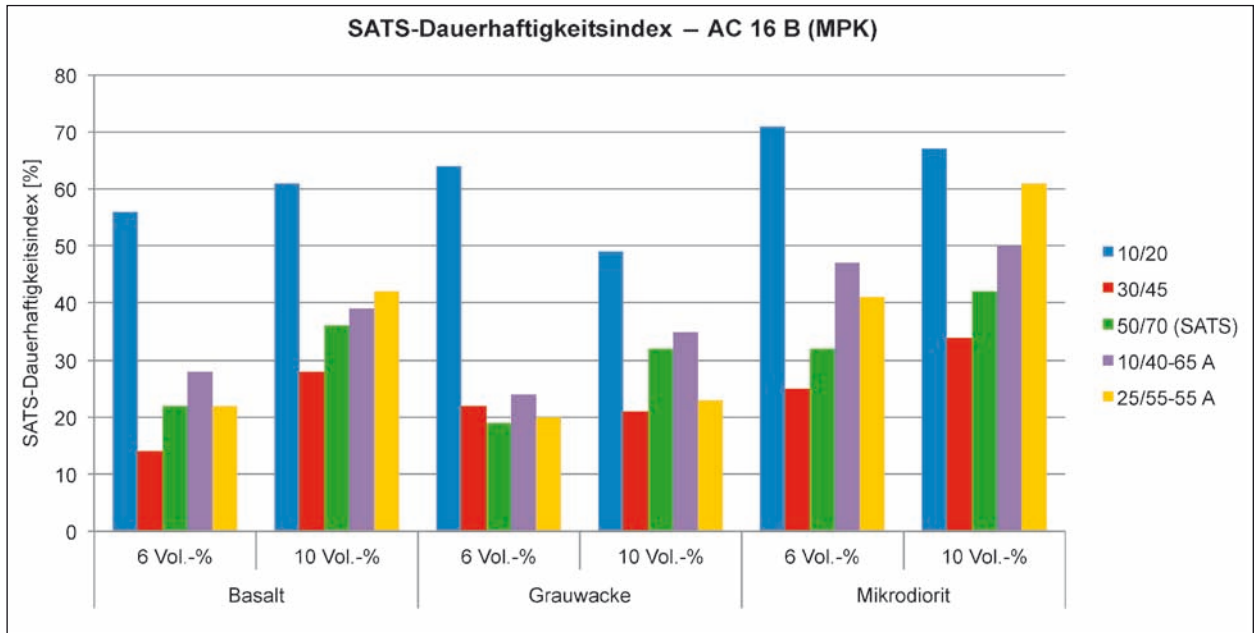
## Anhang 3: Zusammensetzung AC 16 B

| AC 16 B N mit Basalt        |                      |            | AC 16 B N mit Grauwacke     |                      |            | AC 16 B N mit Mikrodiorit   |                      |            |
|-----------------------------|----------------------|------------|-----------------------------|----------------------|------------|-----------------------------|----------------------|------------|
| Merkmal                     | Ist                  | Soll       | Merkmal                     | Ist                  | Soll       | Merkmal                     | Ist                  | Soll       |
| Gesteinskörnung             |                      |            | Gesteinskörnung             |                      |            | Gesteinskörnung             |                      |            |
| (Siebdurchgang in M.-%)     |                      |            | (Siebdurchgang in M.-%)     |                      |            | (Siebdurchgang in M.-%)     |                      |            |
| 22,4 mm                     | 100                  | 100        | 22,4 mm                     | 100                  | 100        | 22,4 mm                     | 100                  | 100        |
| 16 mm                       | 100                  | 90 bis 100 | 16 mm                       | 100                  | 90 bis 100 | 16 mm                       | 100                  | 90 bis 100 |
| 11,2 mm                     | 69                   | 60 bis 80  | 11,2 mm                     | 73                   | 60 bis 80  | 11,2 mm                     | 72                   | 60 bis 80  |
| 8 mm                        | 54                   |            | 8 mm                        | 58                   |            | 8 mm                        | 56                   |            |
| 5,6 mm                      | 39                   |            | 5,6 mm                      | 43                   |            | 5,6 mm                      | 40                   |            |
| 2 mm                        | 30                   | 25 bis 40  | 2 mm                        | 30                   | 25 bis 40  | 2 mm                        | 30                   | 25 bis 40  |
| 0,125 mm                    | 9                    | 5 bis 15   | 0,125 mm                    | 10                   | 5 bis 15   | 0,125 mm                    | 11                   | 5 bis 15   |
| 0,063 mm                    | 2,5 (EF)<br>2,5 (FF) | 3 bis 8    | 0,063 mm                    | 2,5 (EF)<br>2,5 (FF) | 3 bis 8    | 0,063 mm                    | 2,5 (EF)<br>2,5 (FF) | 3 bis 8    |
| Bindemittelgehalt (in M.-%) |                      |            | Bindemittelgehalt (in M.-%) |                      |            | Bindemittelgehalt (in M.-%) |                      |            |
| ist / min                   | 4,0 bis 4,4          | ≥ 3,9      | ist / min                   | 5,0 bis 5,3          | ≥ 4,3      | ist / min                   | 4,5 bis 4,8          | ≥ 4,3      |

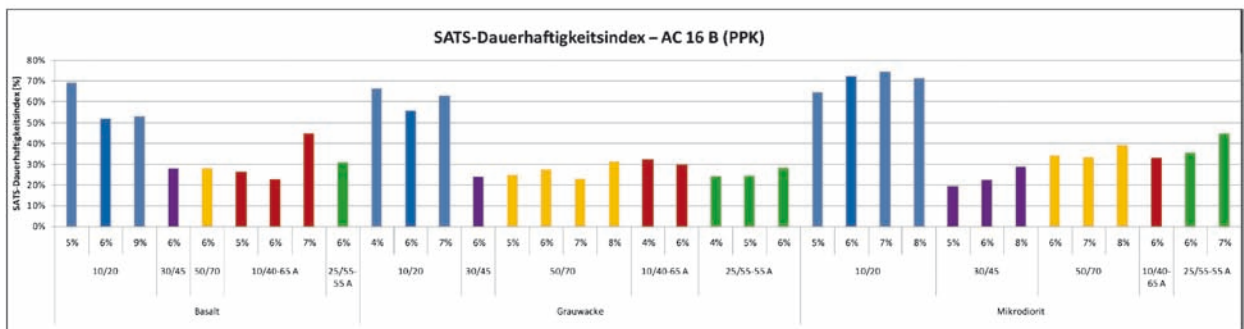
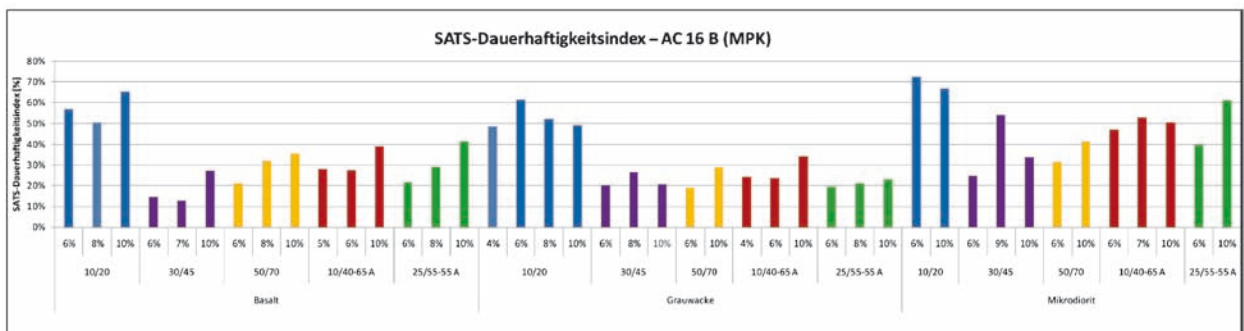
## Anhang 4: Zusammenhang AC 32 T

| AC 32 T N mit Basalt        |                  |            | AC 32 T N mit Grauwacke     |                  |            | AC 32 T N mit Mikrodiorit   |                  |            |
|-----------------------------|------------------|------------|-----------------------------|------------------|------------|-----------------------------|------------------|------------|
| Merkmal                     | Ist              | Soll       | Merkmal                     | Ist              | Soll       | Merkmal                     | Ist              | Soll       |
| Gesteinskörnung             |                  |            | Gesteinskörnung             |                  |            | Gesteinskörnung             |                  |            |
| (Siebdurchgang in M.-%)     |                  |            | (Siebdurchgang in M.-%)     |                  |            | (Siebdurchgang in M.-%)     |                  |            |
| 45 mm                       | 100              | 100        | 45 mm                       | 100              | 100        | 45 mm                       | 100              | 100        |
| 31,5 mm                     | 100              | 90 bis 100 | 31,5 mm                     | 100              | 90 bis 100 | 31,5 mm                     | 100              | 90 bis 100 |
| 22,4 mm                     | 88               | 75 bis 90  | 22,4 mm                     | 88               | 75 bis 90  | 22,4 mm                     | 88               | 75 bis 90  |
| 16 mm                       | 77               |            | 16 mm                       | 77               |            | 16 mm                       | 78               |            |
| 11,2 mm                     | 66               |            | 11,2 mm                     | 66               |            | 11,2 mm                     | 67               |            |
| 8 mm                        | 53               |            | 8 mm                        | 54               |            | 8 mm                        | 55               |            |
| 5,6 mm                      | 40               |            | 5,6 mm                      | 42               |            | 5,6 mm                      | 43               |            |
| 2 mm                        | 28               | 25 bis 40  | 2 mm                        | 30               | 25 bis 40  | 2 mm                        | 31               | 25 bis 40  |
| 0,125 mm                    | 11               | 4 bis 14   | 0,125 mm                    | 12               | 4 bis 14   | 0,125 mm                    | 12               | 4 bis 14   |
| 0,063 mm                    | 3 (EF)<br>3 (FF) | 3 bis 9    | 0,063 mm                    | 3 (EF)<br>3 (FF) | 3 bis 9    | 0,063 mm                    | 3 (EF)<br>3 (FF) | 3 bis 9    |
| Bindemittelgehalt (in M.-%) |                  |            | Bindemittelgehalt (in M.-%) |                  |            | Bindemittelgehalt (in M.-%) |                  |            |
| ist / min                   | 3,9              | ≥ 3,5      | ist / min                   | 3,9              | ≥ 3,7      | ist / min                   | 3,9              | ≥ 3,7      |

**Anhang 5: SATS-Dauerhaftigkeitsindex AC 16 B, MPK mit V = 6 Vol.-% und V = 10 Vol.-%**

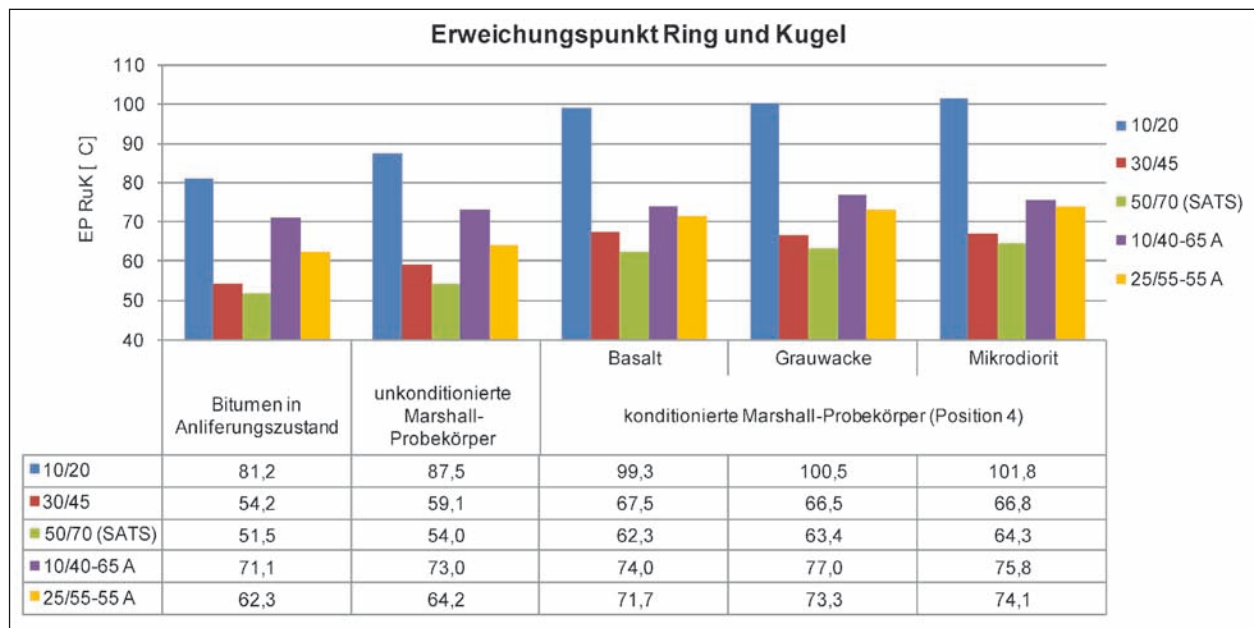


**Anhang 6: SATS-Dauerhaftigkeitsindex AC 16 B, unterschiedlicher Hohlraumgehalt, MPK und PPK**





## Anhang 7: Erweichungspunkt Ring und Kugel, MPK mit V = 6 Vol.-%



## Anhang 8: Basalt – SATS-Prüfergebnisse, unterschiedlicher Hohlraumgehalt

| Asphalt          |              |                     | AC 16 B                    |      |                                      |        |            |                                       |       |            |           |             |           |
|------------------|--------------|---------------------|----------------------------|------|--------------------------------------|--------|------------|---------------------------------------|-------|------------|-----------|-------------|-----------|
| Gestein          |              |                     | Basalt                     |      |                                      |        |            |                                       |       |            |           |             |           |
| Probe-<br>körper | Bindemittel  | Hohlraum-<br>gehalt | SATS-Dauerhaftigkeitsindex |      | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |        |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |       |            | Sättigung |             |           |
|                  |              |                     | DI <sub>SATS</sub>         |      | CTR <sub>U</sub>                     |        |            | CTR <sub>c</sub>                      |       |            | S         | Sa          |           |
|                  |              |                     | PK 1 bis 4                 | PK 5 | Min.                                 | Max.   | Mittelwert | Min.                                  | Max.  | Mittelwert | Anfang    | Ende PK 1-4 | Ende PK 5 |
|                  |              |                     | [Vol.-%]                   | [%]  | [MPa]                                |        |            | [MPa]                                 |       |            | [%]       |             |           |
| PPK              | 10/20        | 5                   | 65                         | 143  | 8.840                                | 11.850 | 10.910     | 7.000                                 | 8.830 | 7.750      | 41        | 28          | 82        |
|                  |              | 9                   | 51                         | 118  | 10.320                               | 12.830 | 11.660     | 5.550                                 | 6.690 | 5.980      | 34        | 21          | 90        |
|                  | 10/40-65 A   | 8                   | 45                         | 58   | 5.870                                | 7.660  | 6.000      | 2.390                                 | 2.750 | 2.590      | 62        | 27          | 71        |
|                  |              | 5                   | 28                         | 96   | 5.550                                | 7.520  | 6.370      | 1.530                                 | 2.270 | 1.790      | 45        | 32          | 78        |
|                  |              |                     | 24                         | 50   | 9.150                                | 10.360 | 9.840      | 1.590                                 | 1.950 | 1.760      | 44        | 31          | 98        |
|                  |              |                     |                            |      |                                      |        |            |                                       |       |            |           |             |           |
| MPK              | 10/20        | 8                   | 49                         | 57   | 9.080                                | 11.740 | 9.857      | 4.060                                 | 5.890 | 4.943      | 43        | 23          | 75        |
|                  | 30/45        | 7                   | 13                         | 30   | 7.720                                | 9.830  | 8.460      | 980                                   | 1.160 | 1.070      | 51        | 28          | 87        |
|                  | 50/70 (SATS) | 8                   | 33                         | 24   | 3.520                                | 4.240  | 3.851      | 790                                   | 1.830 | 1.167      | 61        | 21          | 72        |
|                  | 25/55-55 A   |                     | 29                         | 25   | 3.230                                | 4.350  | 3.800      | 1.040                                 | 1.120 | 1.100      | 53        | 25          | 66        |
|                  | 10/40-65 A   | 5                   | 28                         | 90   | 6.460                                | 7.700  | 6.770      | 1.540                                 | 2.160 | 1.910      | 38        | 18          | 72        |
|                  |              |                     | 28                         | 82   | 8.640                                | 10.230 | 9.090      | 2.230                                 | 2.990 | 2.770      | 32        | 17          | 65        |

## Anhang 9: Grauwacke – SATS-Prüfergebnisse, unterschiedlicher Hohlraumgehalt

| Asphalt          |              |                     | AC 16 B                    |      |                                      |        |            |                                       |       |            |           |             |           |
|------------------|--------------|---------------------|----------------------------|------|--------------------------------------|--------|------------|---------------------------------------|-------|------------|-----------|-------------|-----------|
| Gestein          |              |                     | Grauwacke                  |      |                                      |        |            |                                       |       |            |           |             |           |
| Probe-<br>körper | Bindemittel  | Hohlraum-<br>gehalt | SATS-Dauerhaftigkeitsindex |      | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |        |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |       |            | Sättigung |             |           |
|                  |              |                     | DI <sub>SATS</sub>         |      | CTR <sub>U</sub>                     |        |            | CTR <sub>c</sub>                      |       |            | S         | Sa          |           |
|                  |              |                     | PK 1 bis 4                 | PK 5 | Min.                                 | Max.   | Mittelwert | Min.                                  | Max.  | Mittelwert | Anfang    | Ende PK 1-4 | Ende PK 5 |
|                  |              |                     | [Vol.-%]                   | [%]  | [MPa]                                |        |            | [MPa]                                 |       |            | [%]       |             |           |
| PPK              | 10/20        | 4                   | 66                         | 96   | 13.020                               | 16.670 | 15.200     | 6.610                                 | 9.010 | 7.560      | 30        | 18          | 101       |
|                  |              | 7                   | 54                         | 42   | 6.850                                | 9.880  | 7.880      | 3.810                                 | 6.740 | 4.260      | 43        | 18          | 92        |
|                  | 50/70 (SATS) | 5                   | 25                         | 70   | 2.930                                | 3.380  | 3.130      | 710                                   | 890   | 790        | 35        | 19          | 104       |
|                  |              |                     | 25                         | 42   | 2.800                                | 3.220  | 3.010      | 670                                   | 810   | 740        | 31        | 17          | 94        |
|                  |              | 8                   | 23                         | 55   | 2.520                                | 2.630  | 2.580      | 560                                   | 630   | 820        | 41        | 24          | 79        |
|                  |              |                     | 32                         | 48   | 2.430                                | 2.750  | 2.610      | 760                                   | 940   | 830        | 45        | 22          | 101       |
|                  | 10/40-65 A   | 4                   | 37                         | 59   | 6.230                                | 9.310  | 7.790      | 2.240                                 | 3.760 | 2.680      | 44        | 22          | 123       |
|                  |              |                     | 28                         | 52   | 5.920                                | 7.950  | 6.950      | 1.400                                 | 2.590 | 1.970      | 43        | 24          | 113       |
|                  | 25/55-55 A   | 4                   | 24                         | 51   | 3.020                                | 4.240  | 3.550      | 770                                   | 970   | 850        | 40        | 24          | 110       |
|                  |              |                     | 24                         | 50   | 3.490                                | 4.340  | 3.980      | 790                                   | 1.090 | 970        | 45        | 23          | 110       |
| MPK              | 10/20        | 8                   | 52                         | 31   | 7000                                 | 8.900  | 8.006      | 3.500                                 | 4.950 | 4.171      | 46        | 18          | 97        |
|                  | 30/45        |                     | 27                         | 32   | 4700                                 | 7.330  | 5.405      | 940                                   | 2.110 | 1.463      | 35        | 15          | 102       |
|                  | 25/55-55 A   |                     | 21                         | 15   | 3990                                 | 4.250  | 4.127      | 760                                   | 970   | 874        | 45        | 19          | 108       |
|                  | 10/40-65 A   |                     | 4                          | 24   | 49                                   | 6.670  | 7.960      | 7.570                                 | 1.710 | 2.050      | 1.840     | 36          | 13        |

## Anhang 10: Mikrodiorit – SATS-Prüfergebnisse, unterschiedlicher Hohlraumgehalt

| Asphalt          |                 |                     | AC 16 B                    |      |                                      |       |            |                                       |       |            |           |             |           |
|------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|------|--------------------------------------|-------|------------|---------------------------------------|-------|------------|-----------|-------------|-----------|
| Gestein          |                 |                     | Mikrodiorit                |      |                                      |       |            |                                       |       |            |           |             |           |
| Probe-<br>körper | Bindemittel     | Hohlraum-<br>gehalt | SATS-Dauerhaftigkeitsindex |      | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |       |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |       |            | Sättigung |             |           |
|                  |                 |                     | DI <sub>SATS</sub>         |      | CTR <sub>U</sub>                     |       |            | CTR <sub>C</sub>                      |       |            | S         | Sa          |           |
|                  |                 |                     | PK 1 bis 4                 | PK 5 | Min.                                 | Max.  | Mittelwert | Min.                                  | Max.  | Mittelwert | Anfang    | Ende PK 1-4 | Ende PK 5 |
|                  |                 |                     | [Vol.-%]                   | [%]  | [MPa]                                |       |            | [MPa]                                 |       |            | [%]       |             |           |
| PPK              | 10/20           | 7                   | 74                         | 65   | 6.740                                | 7.100 | 6.910      | 5.030                                 | 5.210 | 5.140      | 67        | 33          | 102       |
|                  |                 | 8                   | 65                         | 60   | 5.610                                | 6.340 | 6.130      | 3.410                                 | 4.220 | 3.990      | 61        | 16          | 115       |
|                  | 30/45           | 5                   | 19                         | 21   | 5.480                                | 6.200 | 5.670      | 1.010                                 | 1.250 | 1.120      | 50        | 38          | 139       |
|                  |                 | 8                   | 28                         | 33   | 5.000                                | 6.130 | 5.580      | 1.430                                 | 1.630 | 1.530      | 61        | 34          | 104       |
|                  |                 |                     | 30                         | 25   | 4.460                                | 5.060 | 4.880      | 1.310                                 | 1.580 | 1.470      | 55        | 28          | 95        |
|                  | 50/70<br>(SATS) | 7                   | 37                         | 29   | 3.230                                | 3.910 | 3.590      | 840                                   | 1.560 | 1.330      | 64        | 31          | 103       |
|                  |                 |                     | 32                         | 38   | 4.090                                | 4.590 | 4.350      | 1.270                                 | 1.450 | 1.370      | 54        | 33          | 120       |
|                  |                 | 8                   | 40                         | 11   | 3.270                                | 3.760 | 3.490      | 1.300                                 | 1.460 | 1.390      | 65        | 33          | 103       |
|                  |                 |                     | 39                         | 47   | 3.620                                | 3.830 | 3.730      | 1.300                                 | 1.620 | 1.450      | 60        | 35          | 118       |
|                  | 25/55-55 A      | 7                   | 42                         | 27   | 3.100                                | 3.730 | 3.440      | 1.400                                 | 1.500 | 1.440      | 68        | 36          | 115       |
| MPK              | 30/45           | 9                   | 54                         | 8    | 5.820                                | 6.700 | 6.380      | 1.430                                 | 5.180 | 3.500      | 54        | 23          | 96        |
|                  | 10/40-65 A      | 7                   | 49                         | 25   | 7.160                                | 8.540 | 7.860      | 3.570                                 | 4.200 | 1.440      | 50        | 29          | 105       |

## Anhang 11: Steifigkeitsmodul – AC 32 T (Kraft 1)

| Asphalt          |             |                 | AC 32 T                              |        |            |                                       |        |            |                    |
|------------------|-------------|-----------------|--------------------------------------|--------|------------|---------------------------------------|--------|------------|--------------------|
| Hohlraumgehalt   |             |                 | 6 ± 0,5 Vol.-%                       |        |            |                                       |        |            |                    |
| Probe-<br>körper | Gesteinsart | Bindemittel     | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |        |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |        |            | DI <sub>SATS</sub> |
|                  |             |                 | CTR <sub>U</sub>                     |        |            | CTR <sub>C</sub>                      |        |            |                    |
|                  |             |                 | Min.                                 | Max.   | Mittelwert | Min.                                  | Max.   | Mittelwert |                    |
|                  |             |                 | [MPa]                                |        |            | [MPa]                                 |        |            |                    |
| MPK              | Basalt      | 10/20           | 9.340                                | 14.980 | 12.658     | 5.695                                 | 9.050  | 7.399      | 61                 |
|                  | Mikrodiorit |                 | 12.680                               | 15.540 | 14.470     | 7.510                                 | 8.130  | 7.780      | 54                 |
|                  | Grauwacke   |                 | 7.950                                | 16.070 | 12.814     | 7.480                                 | 9.830  | 8.857      | 74                 |
|                  | Basalt      | 50/70<br>(SATS) | 3.560                                | 5.830  | 4.601      | 1.090                                 | 1.830  | 1.433      | 30                 |
|                  | Mikrodiorit |                 | 4.250                                | 5.400  | 4.924      | 3.840                                 | 5.610  | 4.382      | 90                 |
|                  | Grauwacke   |                 | 3.910                                | 6.970  | 5.528      | 2.670                                 | 5.220  | 3.956      | 75                 |
| Asphalt          |             |                 | AC 32 T                              |        |            |                                       |        |            |                    |
| Hohlraumgehalt   |             |                 | 10 ± 0,5 Vol.-%                      |        |            |                                       |        |            |                    |
| Probe-<br>körper | Gesteinsart | Bindemittel     | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |        |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |        |            | DI <sub>SATS</sub> |
|                  |             |                 | CTR <sub>U</sub>                     |        |            | CTR <sub>C</sub>                      |        |            |                    |
|                  |             |                 | Min.                                 | Max.   | Mittelwert | Min.                                  | Max.   | Mittelwert |                    |
|                  |             |                 | [MPa]                                |        |            | [MPa]                                 |        |            |                    |
| MPK              | Basalt      | 10/20           | 6.230                                | 8.760  | 7.466      | 6.340                                 | 13.190 | 9.184      | 128                |
|                  | Mikrodiorit |                 | 6.670                                | 10.060 | 8.596      | 5.990                                 | 9.260  | 7.063      | 77                 |
|                  | Grauwacke   |                 | 6.670                                | 10.060 | 8.523      | 5.990                                 | 9.260  | 6.985      | 89                 |
|                  | Basalt      | 50/70<br>(SATS) | 3.090                                | 6.840  | 4.661      | 940                                   | 1.350  | 1.193      | 27                 |
|                  | Mikrodiorit |                 | 3.270                                | 5.680  | 3.610      | 3.670                                 | 6.420  | 2.449      | 69                 |
|                  | Grauwacke   |                 | 3.270                                | 5.680  | 4.326      | 3.670                                 | 6.420  | 4.818      | 111                |

## Anhang 12: SATS-Prüfergebnisse – AC 32 T (Kraft 2)

### • Basalt

| Asphalt     |              |                | AC 32 T                    |      |                                      |       |            |                                       |       |            |            |    |      |
|-------------|--------------|----------------|----------------------------|------|--------------------------------------|-------|------------|---------------------------------------|-------|------------|------------|----|------|
| Gestein     |              |                | Basalt                     |      |                                      |       |            |                                       |       |            |            |    |      |
| Probekörper | Bindemittel  | Hohlraumgehalt | SATS-Dauerhaftigkeitsindex |      | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |       |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |       |            | Sättigung  |    |      |
|             |              |                | D <sub>SATS</sub>          |      | CTR <sub>U</sub>                     |       |            | CTR <sub>C</sub>                      |       |            | S          | Sa |      |
|             |              |                | PK 1 bis 4                 | PK 5 | Min.                                 | Max.  | Mittelwert | Min.                                  | Max.  | Mittelwert | PK 1 bis 4 |    | PK 5 |
| [Vol.-%]    | [%]          |                | [MPa]                      |      |                                      | [MPa] |            |                                       | [%]   |            |            |    |      |
| MPK         | 50/70 (SATS) | 6              | 16                         | 22   | 3.610                                | 6.570 | 4.620      | 647                                   | 886   | 730        | 43         | 15 | 75   |
|             |              |                | 18                         | 36   | 4.712                                | 5.640 | 5.220      | 670                                   | 1.277 | 897        | 42         | 26 | 69   |
|             |              |                | 22                         | 17   | 5.380                                | 7.150 | 5.930      | 775                                   | 2.018 | 1.335      | 34         | 16 | 53   |
|             |              | 10             | 19                         | 9    | 3.090                                | 3.630 | 3.510      | 622                                   | 684   | 651        | 34         | 16 | 61   |
|             |              |                | 19                         | 20   | 3.850                                | 4.730 | 4.505      | 735                                   | 909   | 836        | 52         | 22 | 65   |

### • Grauwacke

| Asphalt     |              |                | AC 32 T                    |       |                                      |        |            |                                       |       |            |            |     |      |
|-------------|--------------|----------------|----------------------------|-------|--------------------------------------|--------|------------|---------------------------------------|-------|------------|------------|-----|------|
| Gestein     |              |                | Grauwacke                  |       |                                      |        |            |                                       |       |            |            |     |      |
| Probekörper | Bindemittel  | Hohlraumgehalt | SATS-Dauerhaftigkeitsindex |       | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |        |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |       |            | Sättigung  |     |      |
|             |              |                | D <sub>SATS</sub>          |       | CTR <sub>U</sub>                     |        |            | CTR <sub>C</sub>                      |       |            | S          | Sa  |      |
|             |              |                | PK 1 bis 4                 | PK 5  | Min.                                 | Max.   | Mittelwert | Min.                                  | Max.  | Mittelwert | PK 1 bis 4 |     | PK 5 |
| [Vol.-%]    | [%]          |                | [MPa]                      |       |                                      | [MPa]  |            |                                       | [%]   |            |            |     |      |
| MPK         | 10/20        | 6              | 44                         | x *   | 8.655                                | 9.468  | 9.001      | 3.540                                 | 4.300 | 3.950      | 51         | 15  | 112  |
|             |              | 7              | 72                         | x *   | 7.806                                | 11.213 | 8.481      | 4.569                                 | 7.748 | 6.049      | 60         | 12  | 115  |
|             |              | 9              | 42                         | x *   | 6.542                                | 7.612  | 7.045      | 2.657                                 | 3.136 | 2.973      | 52         | 14  | 76   |
|             | 50/70 (SATS) | 7              | 40                         | x *   | 4.305                                | 6.045  | 5.093      | 1.595                                 | 2.486 | 2.060      | 60         | 10  | 110  |
|             |              | 58             | 2                          | 2.300 | 5.500                                | 4.884  | 1.723      | 3.200                                 | 2.389 | 62         | 7          | 110 |      |
|             |              | 10             | 41                         | x *   | 3.437                                | 4.670  | 3.980      | 1.491                                 | 2.208 | 1.629      | 59         | 12  | 88   |

\* PK ist kaputt gegangen

### • Mikrodiorit

| Asphalt     |              |                | AC 32 T                    |      |                                      |        |            |                                       |       |            |            |    |      |
|-------------|--------------|----------------|----------------------------|------|--------------------------------------|--------|------------|---------------------------------------|-------|------------|------------|----|------|
| Gestein     |              |                | Mikrodiorit                |      |                                      |        |            |                                       |       |            |            |    |      |
| Probekörper | Bindemittel  | Hohlraumgehalt | SATS-Dauerhaftigkeitsindex |      | Steifigkeit - vor der Klimatisierung |        |            | Steifigkeit - nach der Klimatisierung |       |            | Sättigung  |    |      |
|             |              |                | D <sub>SATS</sub>          |      | CTR <sub>U</sub>                     |        |            | CTR <sub>C</sub>                      |       |            | S          | Sa |      |
|             |              |                | PK 1 bis 4                 | PK 5 | Min.                                 | Max.   | Mittelwert | Min.                                  | Max.  | Mittelwert | PK 1 bis 4 |    | PK 5 |
| [Vol.-%]    | [%]          |                | [MPa]                      |      |                                      | [MPa]  |            |                                       | [%]   |            |            |    |      |
| MPK         | 10/20        | 6              | 58                         | 12   | 9.013                                | 10.335 | 9.788      | 5.425                                 | 6.111 | 5.697      | 54         | 25 | 120  |
|             |              | 7              | 88                         | x *  | 7.300                                | 8.850  | 7.658      | 5.918                                 | 8.510 | 7.030      | 62         | 20 | 123  |
|             |              | 10             | 51                         | 3    | 5.582                                | 7.421  | 6.221      | 2.879                                 | 3.510 | 3.131      | 33         | 15 | 71   |
|             | 50/70 (SATS) | 7              | 42                         | x *  | 4.954                                | 5.868  | 5.417      | 2.000                                 | 2.660 | 2.273      | 61         | 22 | 129  |
|             |              | 9              | 27                         | x *  | 3.625                                | 4.994  | 4.030      | 790                                   | 1.205 | 1.045      | 57         | 20 | 104  |
|             |              | 10             | 59                         | 10   | 3.700                                | 4.140  | 3.890      | 1.730                                 | 3.120 | 2.300      | 64         | 18 | 92   |

\* PK ist kaputt gegangen

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise  
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

## 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)  
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus  
Freudenstein, Birmann € 14,00

## 2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen  
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt  
Ripke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen  
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.  
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen  
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

## 2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen  
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung  
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren  
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50



## 2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung  
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts  
Durner € 15,00

## 2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn  
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen  
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht  
Radenberg, Miljković, Schäfer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung  
Müller, Seidel, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten  
Hünger, Börner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten  
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche  
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenenmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)  
Neubeck, Wiesebrock  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen  
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung  
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel  
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren  
Dudenhöfer, Rückert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel  
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt  
Böhm, Beara  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

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

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