

Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 104

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

Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

von

Christian Thienert

STUVA – Studiengesellschaft für
Tunnel und Verkehrsanlagen e. V.
Köln

in Kooperation mit

Hartmut Johannes Beckedahl
Stefan Koppers
Tobias Paffrath
Christian Nafe

Bergische Universität Wuppertal
Fachgebiet Straßenentwurf und Straßenbau
Bergisches Straßenbaulabor (BESTLAB)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 104

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. 04.0268/2012/FRB:
Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Fachbetreuung

Oliver Ripke

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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-276-6

Bergisch Gladbach, August 2016

Kurzfassung – Abstract

Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Im vorliegenden Projekt wurden in der Praxis verbreitete Materialien zur Schlaglochanierung hinsichtlich ihrer Haltbarkeit untersucht. Zunächst erfolgte eine Online-Befragung von Straßenbaulastträgern, um sowohl die Art der zum Einsatz kommenden Materialien als auch deren Einbaubedingungen umfassend zu ermitteln. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass Kaltasphalte am weitesten verbreitet sind. Die Online-Befragungsergebnisse begründeten die Vorauswahl der Materialien, die sowohl im Labor als auch im Rahmen von Großversuchen (Rundlaufanlage) geprüft wurden. Dabei handelte es sich um diverse nicht-reaktive und reaktive Kaltasphalte, Heißasphalte sowie Sonderasphalte. Um entsprechende vergleichende Untersuchungen reproduzierbar durchführen zu können, musste zunächst ein Verfahren zur Erstellung von Musterschlaglöchern entwickelt werden. Diesbezüglich erwies sich ein Substitutionsverfahren als das am besten geeignete, bei dem ein Ersatzkörper in die Deckschicht eingebaut und gezogen wird. Die Großversuche zeigten auf, dass die Standfestigkeit der untersuchten Sanierungsmaterialien auf Grundlage des Kriteriums der Gesamtverformung stark voneinander abweichen. Während der Überrollung mit gleichzeitiger Beregnung wurden im Gegensatz zu Frost und Tauen erhebliche Schädigungen festgestellt. Ein Vergleich der Großversuche mit Laborversuchen zeigte, dass mittels modifizierten Spurbildungsversuchs die beste Korrelation verzeichnet werden kann. Ob mit einer Vergleichmäßigung der Versuchsrandbedingungen eine zufriedenstellende Übertragbarkeit möglich ist, müssen weitergehende Untersuchungen zeigen. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass sich Heißasphalte als Materialien mit besonders guter Haltbarkeit erwiesen haben und sich bei Kaltasphalten die generelle Tendenz gezeigt hat, dass reaktive Kaltasphalte haltbarer sind als nicht-reaktive. Jedoch ist zu betonen, dass es sowohl gut haltbare nicht-reaktive Materialien gibt als auch schlecht haltbare reaktive Materialien.

Sustainable and efficient repair of potholes

This project researched the durability of the materials commonly used to repair potholes in practice. To begin with, an online survey was conducted of the bodies responsible for building and maintaining roads with a view to gaining a full insight into the types of materials used and the conditions for their implementation. As expected, cold-mix asphalt turned out to be the most common material. Based on the results of the online survey, an initial selection was made of materials to undergo laboratory assessments and extensive practical tests on a circular test track. The chosen materials were various different reactive and non-reactive cold-mix, hot-mix and special asphalts. A process for producing potholes had to be developed before testing could begin, in order to ensure that the comparative tests could be reproduced. The most suitable means of creating potholes was a substitution process which involved incorporating a substitute material into the surface layer and then removing it. The extensive battery of practical tests revealed that the repair materials' resistance varied greatly in terms of overall deformation. Considerable damage was observed during the "excessive moisture" test cycle, as opposed to the "freezing and thawing" test cycle. Comparing the practical tests with the laboratory tests showed that the best correlation could be achieved by using a modified version of the wheel tracking test, though on the whole, the results of the laboratory and practical tests do not yet correspond to a satisfactory extent. In summary, hot-mix asphalts turned out to be especially durable. Where cold-mix asphalts are concerned, reactive asphalts tended to perform better than non-reactive ones. However, it is worth noting that highly durable non-reactive materials do exist, as do non-durable reactive materials.

Summary

Sustainable and efficient repair of potholes

1 Objective

Potholes are often formed by the freezing of water, which has penetrated the surfacing through cracks or capillary pores. In this case it is often only the surfacing that is damaged, with the bearing and binder layers beneath it initially remaining largely unaffected. Given the usual surfacing thickness of 4 cm of asphalt roads in Germany, potholes are often found with this depth.

The problem of repairing potholes is principally influenced by the winter period, when most such frost damage occurs. The usual hot mixes are not available to fill holes promptly during the winter, so alternative methods such as so-called cold asphalts have to be used. Until now, the following aspects have been most important:

- simple implementation, even in bad weather conditions,
- rapid availability of material,
- prompt compliance with the insurance duty.

Until now, there have been no more exact findings about the durability of these repair materials for potholes. The objective of the research project is thus to gain new knowledge about which materials and processes are best suitable for the repair of potholes, taking into account loading, laying process, ambient conditions (temperature, weather etc.), for the responsible body. The results should serve to maintain the road infrastructure longer in a condition that is usable and safe for road users. Considering the limited financial resources, the results should lead to more efficient application of finance in the repair and maintenance of roads.

2 Investigation methodology

In order to comprehensively determine both the type of materials that are used in practice and the conditions of their use, an online survey of bodies responsible for road building was first carried out. For this purpose a questionnaire was developed, which was laid out for a processing time of 15

minutes. Attention was paid that as many questions as possible could be answered on a multiple choice basis. The link to the online questionnaire was sent through the relevant email distributor to the members of the Association of German Cities and the German Association of Towns and Councils. Six weeks from the sending of the survey, 110 plausible datasets had been received, which were subjected to a detailed statistical analysis. The results of the online questionnaire were then used to make a preliminary selection of the repair materials and processes to be considered in more detail in the course of a laboratory report and large-scale tests. These include non-reactive cold asphalts (KN), reactive cold asphalts (KR), hot asphalts (HA) and special asphalts (SA).

The laboratory report on the selected materials and processes for the purpose of assessing their behaviour in use and durability was essentially produced using the following laboratory tests:

- Groove formation test according to TP Asphalt-StB, Part 22,
- Uniaxial cyclic compression test with restraint of transverse strain according to DIN EN 12697-25,
- Direct tension test according to DIN EN 12697-46.

Since these laboratory tests are tests for hot-rolled asphalts, several preliminary tests and some modifications had to be undertaken first to ensure their applicability for the repair materials to be tested (cold, poured and special asphalts). The groove formation test, for example, was performed on an asphalt sample panel, which had been provide with a central and filled pothole (diameter 10 cm, depth 4 cm) (see Figure 1). The cyclic compression test was used with two modifications, firstly on cores from pothole panels and then on Marshall samples. For the former, a side support of asphalt concrete could be provided in order to represent the most realistic possible loading states. For the latter, the side support was provided by a steel ring, giving complete restraint of side strain.

The large-scale tests were performed on the testing circuit at STUVA. This consists of a 10 m long horizontal axis with a truck wheel at each end (see Figure 2). The truck wheels roll over a test road surface about 31.4 m long formed of 16 individual trapezoidal elements. The loading on each wheel is

5.0 t, with which the most unfavourable case of heavy goods traffic can be represented. Regarding exposure due to weather, the fact that the main application times for materials and processes for pothole repair are late winter and early in the year was taken into account. Therefore temperature cycles were used, which were mostly in the region of +10 °C (partially with rain) with shorter frost periods. Altogether three cycles were run with the samples being rolled over a total of about 162,000 times, generally at a speed of 20 km/h. All the 25 investigated materials were each laid in two potholes, one in the system centreline (i.e. fully rolled over) and one with an eccentricity of about 10 cm (i.e. partially rolled over).

In order to be able to perform a reliable assessment of durability, both in the laboratory and in large-scale tests under practically the same constraints, a procedure also had to be developed first to make sample potholes. The best-possible reproducibility in the making of an artificially damaged road surfacing layer was achieved by a substitution procedure, in which a replacement body of timber-



Fig. 1: Test sample filled with repair material in groove formation test



Fig. 2: Testing circuit at STUVA

based material was first laid in the surfacing layer and then removed.

3 Test results

The online questionnaire delivered the result that 94% of the surveyed bodies responsible for roads use cold asphalt for the repair of potholes. Some reasons stated for the use of cold asphalt were "compliance with the duty of traffic safety", "rapid availability", application independent of weather" and "in-house application possible". The durability of cold asphalt was given as an average of 13 months, with isolated mentions of up to five years. In accordance with expectation, this method is preferably used in the cold period of the year (also with frost), by the end of the winter (March) at the latest.

The laboratory tests described above were of various suitability for the assessment of the durability of materials for pothole repair. Reproducible and plausible results were achieved in particular using the groove formation test and cyclic compression test on Marshall samples.

The assessment of the groove formation tests was based on the proportional lane groove depth (PRD), the absolute lane groove depth (RD) and the groove formation rate (WTS). The proportional lane groove depth is the percentage of total deformation of the lane groove depth related to an average laying thickness of the repair material of 40 mm. For the assessment of the materials and interpretation of the results, assessment groups were defined: the groups were defined on the basis of specified ranges in the PRD. Group A (PRD 0 to 3%) contains the materials with very good stability and Group D (PRD >10%) those with inadequate stability. Eleven of the 25 tested repair materials belonged to the latter group. Overall, the groove formation tests showed a clear tendency for better stability of the reactive cold asphalts (KR) compared to the non-reactive cold asphalts (KN). On the basis of the very small spot-check extent of the hot asphalts (HA), it can be deduced that these materials may generally show very good stability.

The assessment of the cyclic compression tests on Marshall samples was undertaken using the permanent deformation (strain) and the creep rate. Once again, the materials tested in this way were assigned into four groups. Group A contains materials with low permanent deformations (up

to 1.4%) and creep rates of less than $0.01 \mu\text{m}/\text{m}/\text{loading impulse}$ and Group D those with high deformations ($> 3\%$) and creep rates deviating greatly from each other. In contrast to the groove formation, the cyclic compression tests on Marshall samples did not show any recognisable tendency for higher stability of the reactive cold asphalts (KR) compared to non-reactive cold asphalts (KN).

The assessment of the large-scale tests was performed using transverse profile measurements with a laser displacement transducer through the centre point of the repaired potholes. Material loss $A(-)$ and material gain $A(+)$ were first determined as characteristic values (see Figure 3). Dividing by the width of the relevant area gives an average loss depth $I(-)$ or an average gain height $I(+)$, each for potholes, which were partially rolled over and completely rolled over. The actual assessment is then performed for the sum of the amounts, related to layer thickness, i.e. a proportional total deformation $p\Sigma v$. Once again, the materials tested in this way were assigned into groups. Group A contains materials with very little damage and small proportional total deformation ($p\Sigma v < 10\%$) and Group E those with very heavy damage ($p\Sigma v > 50\%$). Similarly to the groove formation tests, a tendency showed that reactive cold asphalts (KR) could demonstrate better stability than non-reactive (KN). The material behaviour on being rolled over when wet showed a considerable influence but frost and thawing did not.

Comparative consideration of laboratory and large-scale tests did however show that this tendency cannot be demonstrated for the individual materials, i.e. direct transferability of the test results from the groove formation test to the large-scale test (or vice-versa) is not possible. No final and unambiguous classification of the repair materials and specification of a certain testing procedure can therefore be undertaken.

4 Consequences for the practice

With the aid of an extensive test series in the laboratory and in large-scale tests, materials and processes for the repair of potholes were tested for their durability. It was shown that a large number of materials and processes that are common in practice do not show satisfactory durability. Hot asphalts (materials with the label HA) showed particularly good durability, although these cannot be laid with the hand tools that are generally available but demand special equipment (e.g. microwave oven with electricity generator or cooker). Cold asphalts were differentiated according to the product description of their manufacturers into non-reactive cold asphalts (materials with the label KN) and reactive cold asphalts (materials with the label KR). In this case, a general tendency showed that reactive cold asphalts are more durable than non-reactive. However, it should be clearly emphasised that there are both non-reactive materials with good durability

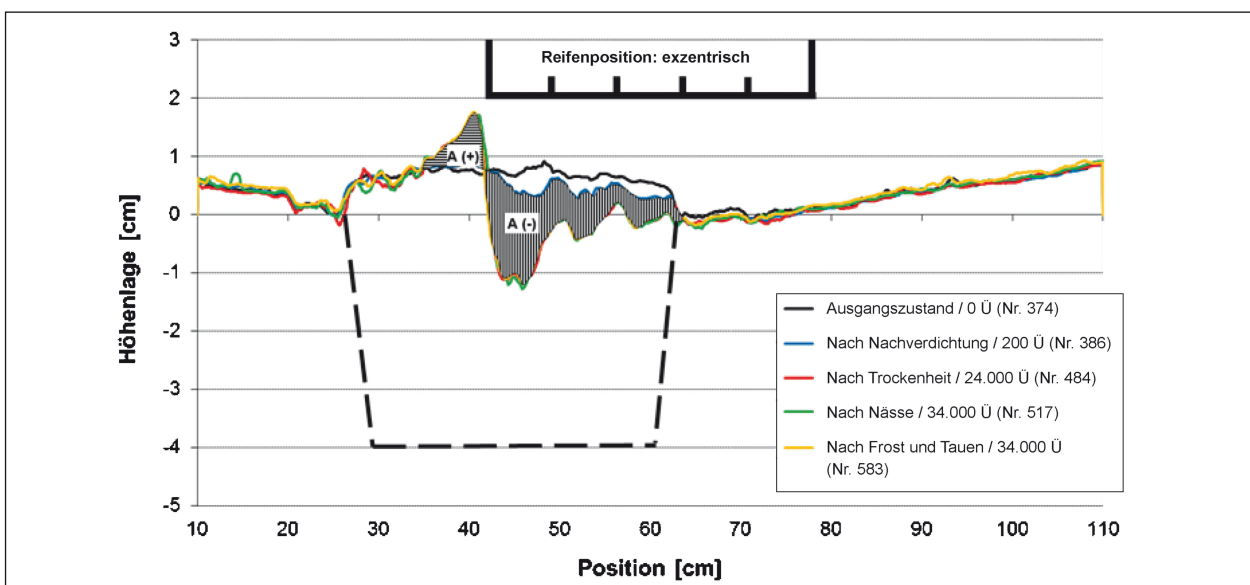


Fig. 3: Example of a profile measurement

and reactive materials with poor durability. In addition, two special asphalts (materials with the label SA) were investigated, which belong neither to the cold asphalts nor to the hot asphalts; both materials showed unsatisfactory durability in the test series.

As a result, based on the groove formation tests on a laboratory scale and on a large scale, hot asphalts should be preferred for use, although these have the already mentioned disadvantages regarding equipment for laying. Considering that until now no technical regulations such as technical supply conditions (TL) exist for cold asphalts – some of which showed good but also some bad results – it should be investigated whether and how an appropriate categorisation is possible in the future in order to give certain and unambiguous information about the durability and permanence of the repair materials. In the end, cold asphalts with prices up to about 1,000 EUR per tonne can be considered relatively expensive and the resulting costs plus the personnel costs for road maintenance and repair in the Federal Republic of Germany are not inconsiderable. The cost-effectiveness then suffers again whenever one and the same pothole has to be repaired many times due to poor durability.

Since the composition of these materials differs very greatly (type and content of binder and aggregate grain size), and they also contain unknown additives, a performance-oriented assessment of durability should be considered instead of fixed individual specifications.

Inhalt

1	Befragung von Baulasträgern	11	3	Labortechnische Begutachtung vorausgewählter Materialien und Verfahren	25
1.1	Online-Fragebogen	11	3.1	Spurbildungsversuch	25
1.2	Verwendete Sanierungsmaterialien und -verfahren	12	3.2	Druckschwellversuche	27
1.2.1	Verbreitung von Materialien und Verfahren	12	3.2.1	Druckschwellversuch an Bohrkernen aus Schlaglochplatten (DSV-BK)	27
1.2.2	Maximale Schlagloch-Geometrien	13	3.2.2	Druckschwellversuch an Marshall-Probekörpern (DSV-M)	32
1.2.3	Gründe für die Verwendung	14	3.3	Direkter Zugversuch	33
1.2.4	Erwartete Haltbarkeit	14	4	Großversuche	35
1.3	Einbau der Sanierungsmaterialien	15	4.1	Rundlaufanlage	35
1.3.1	Jahreszeitabhängiger Einsatz	15	4.2	Herstellung der Versuchsfelder	36
1.3.2	Einbautemperaturen	15	4.3	Einbau der Sanierungsmaterialien in die Versuchsfelder	38
1.3.3	Vorbehandlung	16	4.4	Durchführung der Großversuche	39
1.3.4	Verdichtung beim Einbau	17	4.5	Ergebnisse des Großversuchs	39
1.4	Zusammenfassende Auswertung	18	5	Vergleich der Ergebnisse von Labor- und Großversuchen	43
1.5	Vorauswahl von Materialien und Verfahren	19	6	Zusammenfassende Empfehlungen	46
2	Verfahren zur Erstellung von Musterschlaglöchern	19			
2.1	Anforderungen	19			
2.2	Methode I: Frost-Tau-Wechsel	20			
2.3	Methode II: Gesteinskörnung-Nest	21			
2.4	Methode III: Durchstanzkegel	21			
2.5	Methode IV: Kombination aus Durchstanzkegel und Gesteinskörnung-Nest	22			
2.6	Methode V: Substitution	24			

1 Befragung von Baulastträgern

1.1 Online-Fragebogen

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse im Hinblick auf die nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern zu erhalten, wurden in einem ersten Bearbeitungsschritt Informationen bei Straßenbaulastträgern abgefragt. Dazu wurde ein Online-Fragebogen entwickelt, der auf eine Bearbeitungszeit von 15 Minuten ausgelegt ist. Hierbei wurde darauf geachtet, dass möglichst viele Fragen im Auswahlverfahren beantwortet werden konnten. Erfahrungsgemäß erhöht sich auf diese Weise zum einen die Akzeptanz der Befragung, also auch die Rücklaufquote, zum anderen erleichtert die standardisierte Bearbeitung die Vergleichbarkeit von Antworten, ohne zu ausgedehnte Interpretationsspielräume zuzulassen.

Der Online-Fragebogen war so gegliedert, dass zuerst allgemeine Fragen nach den Sanierungsmaterialien und anschließend zu deren Einbau gestellt wurden. Abschließend wurden einige zusammenfassende Fragen gestellt, um überprüfen zu können, ob die gegebenen Antworten mit dem Gesamtbild des den Fragebogen Bearbeitenden kompatibel sind. Im Konkreten wurden Fragen zu folgenden Sanierungsmaterialien und -verfahren gestellt:

- Kaltasphalt,
- Gussasphalt,
- Blow-Patchen,
- Heißasphalt (AC).

Allgemeine Fragen zum Sanierungsmaterial waren jeweils:

- Welche Schlaglöcher werden bei Ihnen mit dem Material saniert?
 - Wird verwendet für Schlaglöcher mit Tiefen von bis zu cm,
 - wird verwendet für Schlaglöcher mit Durchmessern von bis zu cm,
 - wird nicht verwendet.
- Welche Produkte bzw. Mischgüter nach TL Asphalt StB kommen bei Ihnen am häufigsten zur Anwendung?

- Welche Gründe sind für Sie ausschlaggebend, das Material anzuwenden?
 - Kurzfristig erforderliche Verkehrssicherungspflicht,
 - schnelle Verfügbarkeit des Materials,
 - Witterungsunabhängiger Einbau,
 - geringe Kosten,
 - Dauerhaftigkeit,
 - Lagerfähigkeit,
 - gute Verarbeitbarkeit,
 - in Eigenleistung ohne Beauftragung eines Unternehmens ausfüllbar,
 - Sonstiges.
- Von welcher Haltbarkeit der Schlagloch-Sanierung mittels des Materials gehen Sie aus?

Fragen zum Einbau des Sanierungsmaterials waren jeweils:

- In welchen Monaten setzen Sie das Material zur Schlagloch-Sanierung ein?
- Bei welchen Außentemperaturen setzen Sie das Material zur Schlagloch-Sanierung ein?
- Welche Vorbehandlung des Schlaglochs führen Sie vor dem Einbau des Materials durch?
 - Keine,
 - Entfernen von stehendem Wasser,
 - Entfernen von geschädigtem Randmaterial,
 - Ausfegen,
 - Ausblasen mit Druckluft,
 - Vorheizen der Schlaglochränder,
 - Benetzen der Schlaglochränder mit Bitumenemulsion, Haftkleber, Primer.
- Wie wird das Material eingebaut?
 - Einfüllen mit der Schaufel,
 - manuelle Verdichtung (z. B. mittels Stampfer, Schaufel),
 - mechanische Verdichtung (z. B. mittels Walze oder Rüttelplatte),
 - andere Methode.

- Welche Sanierungsmethode nutzen Sie überwiegend?
 - Aufgesetzte Flickstelle,
 - eingelegte Flickstelle.

Zusammenfassende Fragen am Ende des Fragebogens waren:

- Bitte nennen Sie jene Verfahren zur Schlagloch-Sanierung, die aus Ihrer Sicht am ehesten den nachfolgend genannten Eigenschaften entsprechen:
 - preisgünstig,
 - dauerhaft,
 - einfache Verarbeitbarkeit,
 - sonstiger Vorteil.

Der Link zum Online-Fragebogen wurde über die jeweiligen E-Mail-Verteiler an die Mitglieder des Deutschen Städtetags sowie des Deutschen Städte- und Gemeindebunds versendet. In dem angehängten Anschreiben wurde um Rückantwort innerhalb von vier Wochen gebeten. Die Auswertung erfolgte ca. 6 Wochen nach Versand der Anfrage. In dieser Zeit wurde der Online-Fragebogen von insgesamt 510 Nutzern aufgerufen, die 119 vollständige bzw. 110 plausible Datensätze lieferten. Nur die letztgenannten 110 wurden einer weitergehenden statistischen Auswertung unterzogen.

Bei allen nachfolgenden Auswertungen ist zu bedenken, dass die Antworten aller Wahrscheinlichkeit nach von einem Mitarbeiter im Innendienst abgegeben wurden und nicht vom Arbeiter, der tatsächlich die Schlaglöcher saniert. Im Ergebnis ist es daher nicht auszuschließen, dass es sich teilweise eher um Soll- als um Ist-Angaben handelt.

1.2 Verwendete Sanierungsmaterialien und -verfahren

1.2.1 Verbreitung von Materialien und Verfahren

Ausgehend von der Frage „Welche Schlaglöcher werden bei Ihnen mit dem Material saniert?“ wurde über die Ja-Nein-Abfrage „Wird nicht verwendet.“ zunächst die Verbreitung der vier betrachteten Materialien quantifiziert. Gemäß Bild 1 kommt mit 94 % in nahezu allen befragten Städten, Gemeinden und Kommunen Kaltasphalt zur Sanierung von Schlag-

löchern zum Einsatz. Bei etwa jedem fünften Bausträger (21 %) wird Blow-Patchen angewendet und bei immerhin 12 % Gussasphalt. Andere Materialien/Verfahren, wie Heißasphalt (AC) und DSK – Dünne Schichten im Kalteinbau (in Summe 5 %), kommen nur untergeordnet zum Einsatz. Die weiteren Auswertungen werden nur für jene Materialien/Verfahren durchgeführt, die ausreichend oft genannt wurden, also Kaltasphalt, Gussasphalt und Blow-Patchen.

Bezüglich der Sanierung von Schlaglöchern in Deutschland ist weiterhin bemerkenswert, dass 74 % der Befragten lediglich ein Material/Verfahren (siehe Bild 2) (zumeist Kaltasphalt oder Blow-

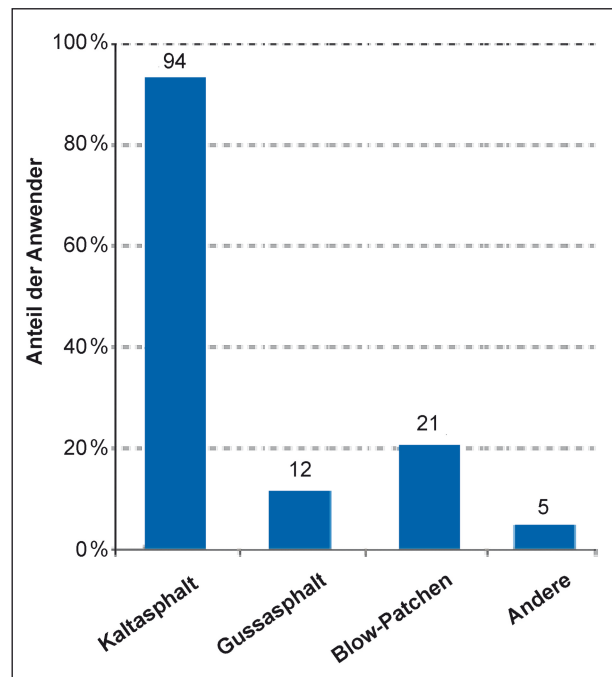


Bild 1: Verbreitung von Materialien und Verfahren

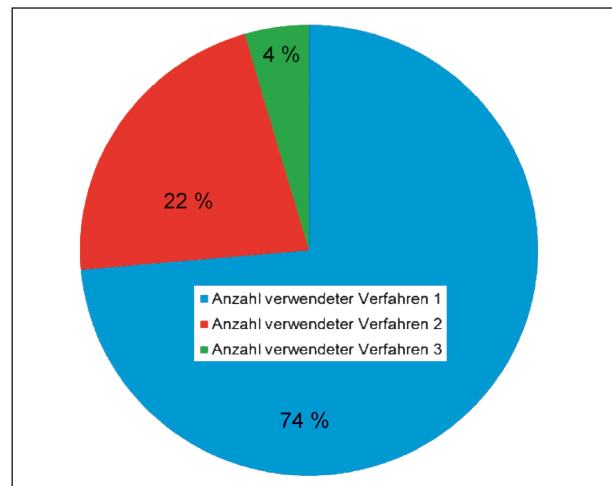


Bild 2: Anzahl verwendeter Verfahren

Patchen) anwenden. Bei 22 % sind es zwei Materialien/Verfahren. Die häufigste Kombination ist Kaltasphalt und Blow-Patchen, wobei praktisch alle, die Blow-Patchen einsetzen, auch Kaltasphalt einsetzen. Nur bei 4 % kommen drei Materialien/Verfahren zur Anwendung.

Die Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass in der Praxis stark ausgeprägte Präferenzen zugunsten von Kaltasphalt vorhanden sind, ohne dass individuelle Vor- und Nachteile bei der Abwägung relevanter Randbedingungen (z. B. Einbautemperaturen und Dauerhaftigkeit) Berücksichtigung finden.

Die Nennungen haben darüber hinaus Einfluss darauf, wie Antworten bezüglich „Zusammenfassende Fragen“ zu bewerten sind. Während praktisch alle Befragten auch Anwender von Kaltasphalt sind, können viele bezüglich Gussasphalt und Blow-Patchen lediglich eine Einschätzung auf Grundlage von Erwartungen (ohne eigene Anwendung) abgeben.

1.2.2 Maximale Schlagloch-Geometrien

Wie aus Bild 3 hervorgeht, kommt Kaltasphalt im Vergleich zu Gussasphalt und Blow-Patchen eher bei kleineren Schlaglochdurchmessern zur Anwendung. Jedoch ist der Mittelwert des maximalen Durchmessers von ca. 60 cm bei Kaltasphalt überraschend groß, nicht nur vereinzelt wurden Werte

von bis zu 100 cm genannt. Indirekt kann daraus geschlossen werden, dass zunächst eigentlich nur begrenzt vorhandene Schädigungen recht lange herausgezögert werden, bis ausgedehntere Schädstellen vorliegen. Die Verwendung von Gussasphalt und Blow-Patchen erfolgt in der Praxis im Vergleich zu Kaltasphalt bis zu größeren Mittelwerten des maximalen Durchmessers in der Größenordnung von ca. 100 cm. Es ist davon auszugehen, dass bei dieser Einstufung auch der Einbau des Sanierungsmaterials und nicht nur das Material selbst eine Rolle spielt, da ein großflächiger, relativ arbeitsintensiver Einbau von Kaltasphalt nicht gegenüber der einfacheren Verarbeitung (Verdichtung) von Gussasphalt bzw. dem überwiegend maschinellen Einbau beim Blow-Patchen vorgezogen wird.

Bezüglich der Mittelwerte der maximalen Tiefen werden sowohl Kaltasphalt als auch Gussasphalt bis zu ca. 10 cm eingesetzt, Blow-Patchen hingegen nur bis zu Tiefen von ca. 7 cm. Auch hier können Verfahrenseigenschaften als beeinflussende Größen für die Auswahl ins Kalkül gezogen werden, da die Vorteile des Blow-Patchens am besten bei großen Flächen mit geringer Schichtdicke, entsprechend einer geringen Schlaglochtiefe ausgespielt werden können. Ein erforderliches Einbringen des Materials in mehreren Einzelschichten bis zum vollständigen Auffüllen des Schlaglochs ist bei tieferen Geometrien eher von Nachteil für den Fertigungsprozess.

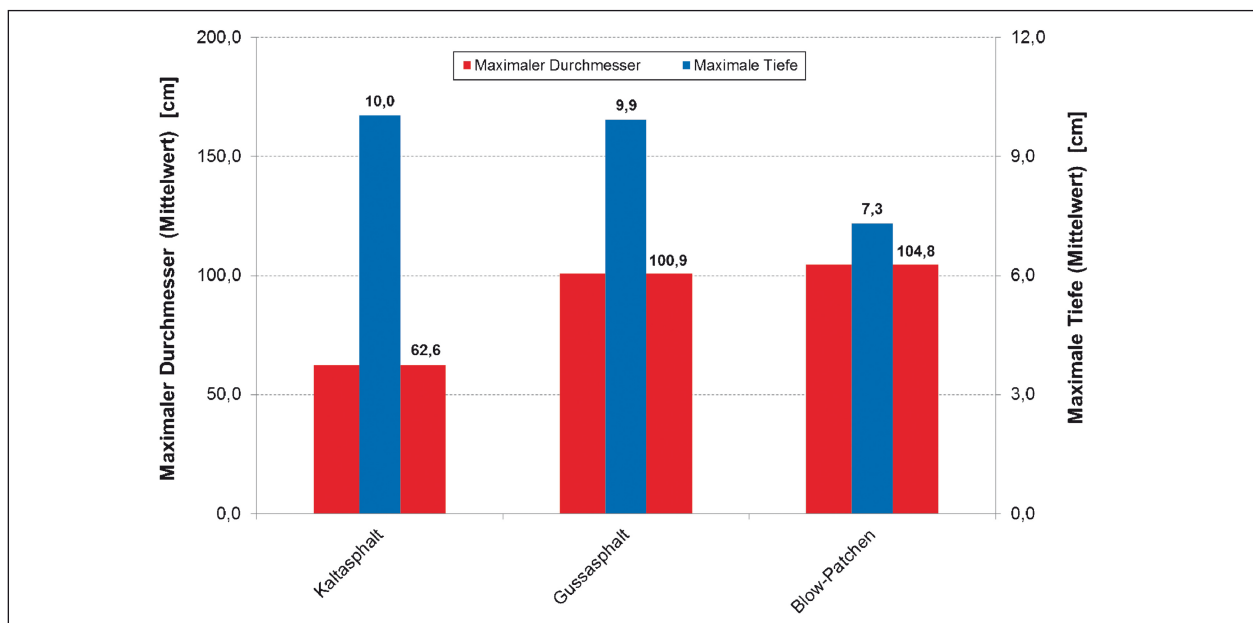


Bild 3: Maximale Schlagloch-Geometrien

1.2.3 Gründe für die Verwendung

Bereits ein erster Blick auf die Bild 4 zeigt auf, warum nahezu alle Baulastträger auf Kaltasphalt zur Sanierung von Schlaglöchern zurückgreifen: bei insgesamt fünf Kriterien weist Kaltasphalt nach Auffassung der Befragten deutliche Vorteile auf. Dies sind kurzfristiges Nachkommen der Verkehrssicherungspflicht, schnelle Verfügbarkeit, witterungsunabhängiger Einbau, Lagerfähigkeit und die Möglichkeit des Einbaus in Eigenleistung ohne Beauftragung eines Unternehmens. Dabei scheinen die Nachteile in Form von potenziell geringer Dauerhaftigkeit und hohen Kosten durchaus bekannt zu sein. Eine gute Verarbeitbarkeit von Kaltasphalt wird nur von etwa jedem zweiten genannt.

Die Vorteile des Gussasphalts gegenüber Kaltasphalt, aber auch Blow-Patches, sind offenbar bessere Dauerhaftigkeit und bessere Verarbeitbarkeit. Außerordentlich schlechte Ergebnisse (Nennungen < 20 %) sind für den Gussasphalt hingegen bezüglich Kosten und Lagerfähigkeit festzustellen.

Beim Blow-Patchen ist interessant, dass dieses Material/Verfahren sowohl hinsichtlich geringer Kosten als auch Dauerhaftigkeit beachtliche Werte von ca. 60 % erzielt, insgesamt also ein recht gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis unterstellt wird. Da viele Baulastträger jedoch zumeist nur auf ein

Material/Verfahren zur Schlaglochanierung setzen (siehe Kapitel 1.2.1) ist eine weitergehende Differenzierung schwierig.

1.2.4 Erwartete Haltbarkeit

Wie bereits die Frage nach den Vorteilen der einzelnen Materialien bezüglich der Dauerhaftigkeit (siehe Kapitel 1.2.3) aufzeigte, sind prinzipiell ähnliche Tendenzen bei der Frage nach der konkret erwarteten Haltbarkeit zu verzeichnen (siehe Bild 5). Im Mittel sind es beim Kaltasphalt ca. 13 Monate sowie beim Gussasphalt und dem Blow-Patchen ca. 32 Monate. Extremnennungen gab es bei allen Materialien in beide Richtungen, d. h. mitunter wurde auch Gussasphalt lediglich eine Haltbarkeit von 4 Monaten unterstellt bzw. Kaltasphalt eine Haltbarkeit von 5 Jahren. Bei der Betrachtung der Variationskoeffizienten – also einer relativen Standardabweichung – (siehe Tabelle in Bild 5) fällt auf, dass dieser für Kaltasphalt deutlich größer ist als für Gussasphalt oder Blow-Patchen. Dies zeigt, dass die Erwartung an die Haltbarkeit von Kaltasphalt deutlich unterschiedlicher ist, also nicht nur vereinzelt Extremwerte nach unten (wenige Monate) und oben (mehrere Jahre) genannt wurden. Insgesamt ist die Erwartungshaltung bezüglich Haltbarkeit von Kaltasphalt damit recht unscharf.

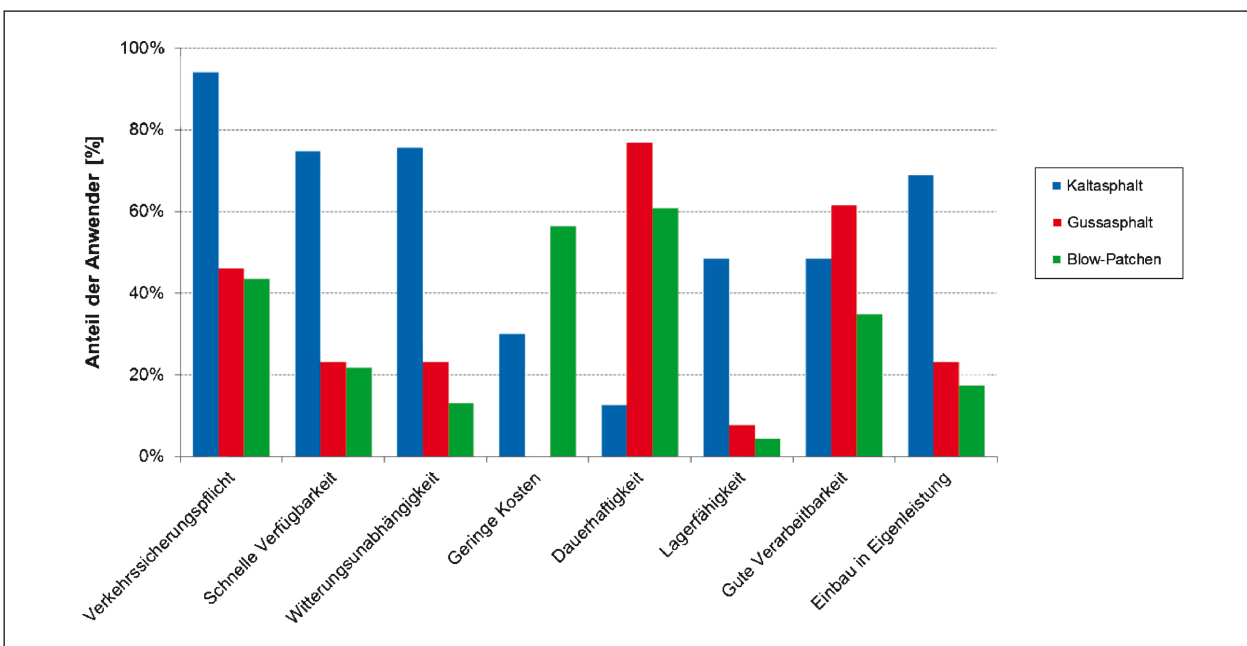


Bild 4: Gründe für die Verwendung

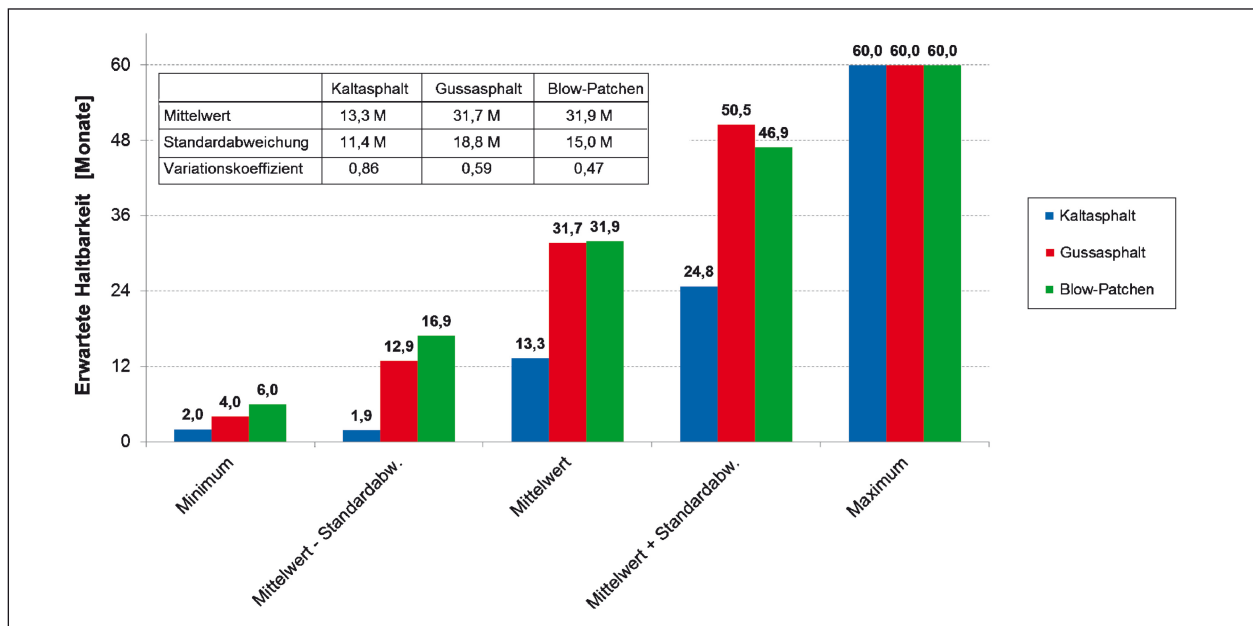


Bild 5: Erwartete Haltbarkeit

1.3 Einbau der Sanierungsmaterialien

1.3.1 Jahreszeitabhängiger Einsatz

Kaltasphalt kommt praktisch ganzjährig zur Anwendung, wobei zum Ende des Winters (März) fast 90 % der Baulastträger, die Kaltasphalt verwenden, darauf zurückgreifen (siehe Bild 6). Dies deckt sich mit der Erkenntnis, dass zu dieser Zeit die meisten Straßenschäden zu beobachten sind. In den Sommermonaten ist prinzipiell ein deutlicher Rückgang in der Anwendung von Kaltasphalt zu verzeichnen, wobei immerhin selbst im August noch über 40 % der Befragten eine entsprechende Verwendung bejahen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sanierung von Schlaglöchern zunehmend zu einem Thema wird, das Bauhöfe und Straßenmeistereien ganzjährig beschäftigt, also offenbar häufig neuerliches bzw. mehrmaliges Flicken von Schadstellen erforderlich wird.

Beim Gussasphalt ist eine gegenläufige Tendenz erkennbar, d. h. Gussasphalt wird im Früh- und Spätsommer (ca. 70 % der Anwender) häufiger eingesetzt als im Winter (ca. 40 % der Anwender). Auffällig sind bei diesem Material zwei Hochpunkte im Kurvenverlauf. Eine mögliche Ursache kann in der zeitverzögerten Sanierung nach Ausschreibung und Auftragsvergabe im Anschluss an den Winter gesehen werden, im Gegensatz dazu kann Kaltasphalt unmittelbar in Eigenarbeit zur Schlaglochsanierung verwendet werden.

Bezüglich Blow-Patchen sind die Einsatzgrenzen offenbar klar in der Praxis geregelt. In den Frostmonaten November bis März ist der Einsatz dieses Verfahrens praktisch nicht möglich und wird auch nahezu nicht angewendet (lediglich ca. 5 % der Anwender). Diejenigen Baulastträger, die Blow-Patchen, tun dies in überwiegendem Maße in den Sommermonaten Mai bis September (80 bis 100 %). Aus diesem Verwendungsprofil kann zugleich auf die bereits in Kapitel 1.1.3 behandelten Nachteile in Form von relativ schlechter Verfügbarkeit und Witterungsabhängigkeit geschlossen werden.

1.3.2 Einbautemperaturen

Der in Kapitel 1.1.5 dargestellte jahreszeitabhängige Einsatz der Materialien zur Schlaglochsanierung kann praktisch unmittelbar auf die Einbautemperaturen zurückgeführt werden (siehe Bild 7). 50 % der befragten Baulastträger geben folgende Mindest- bzw. Höchstwerte der Einbau-Temperatur an:

- Kaltasphalt: $-8\text{ °C} < T < +16\text{ °C}$,
- Gussasphalt: $0\text{ °C} < T < +24\text{ °C}$,
- Blow-Patchen: $+7\text{ °C} < T < +29\text{ °C}$.

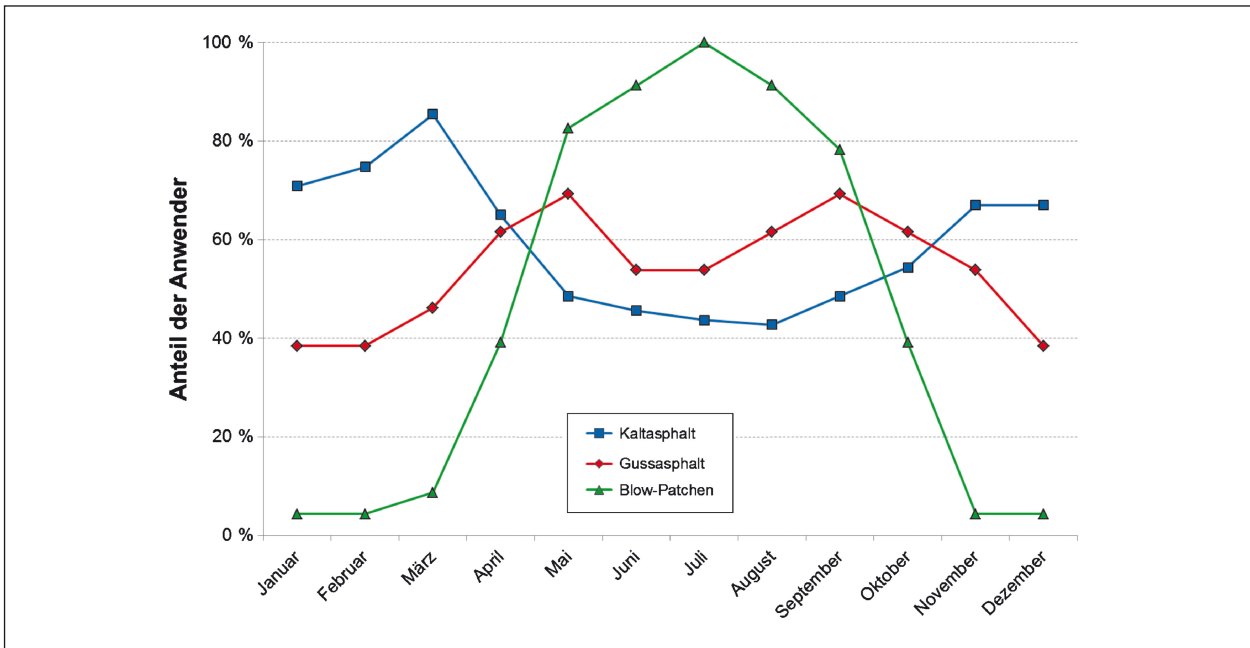


Bild 6: Jahreszeitabhängiger Einsatz

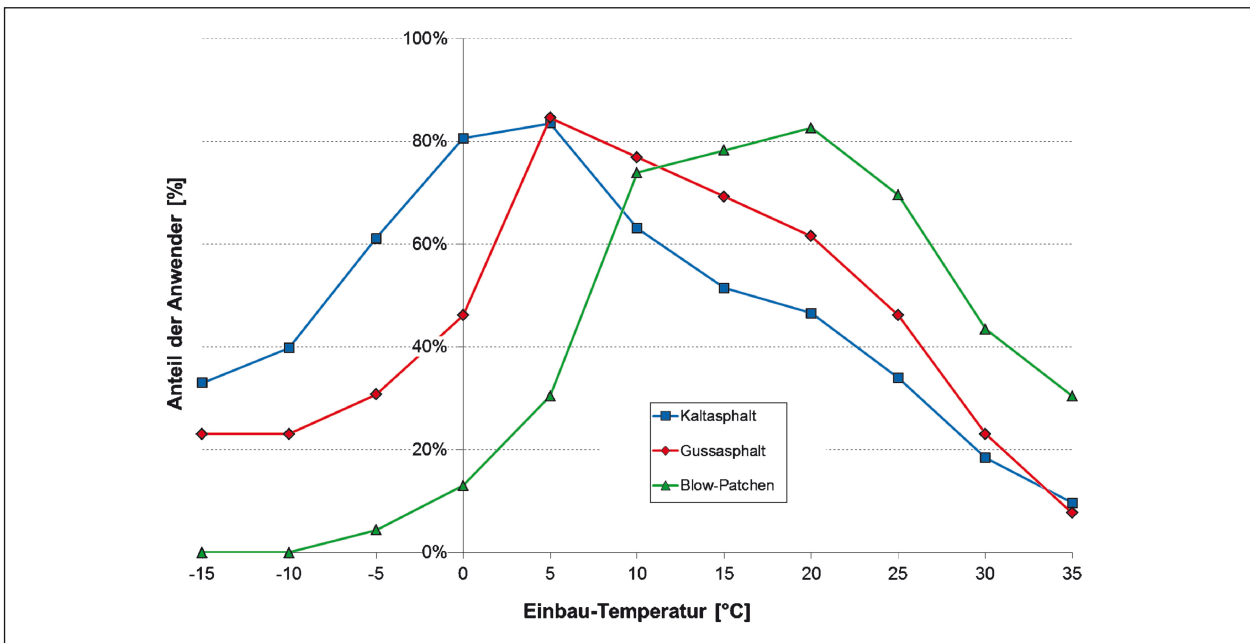


Bild 7: Einbautemperaturen

1.3.3 Vorbehandlung

Wie aus Bild 8 hervorgeht, werden die Schlaglöcher unabhängig vom Sanierungsmaterial/-verfahren in aller Regel vorbehandelt, d. h. die Antwort „Keine Vorbehandlung“ wurde lediglich von 1 % der Befragten beim Kaltasphalt und zu 4 % beim Blow-Patchen genannt. Beim Blow-Patchen ist jedoch zu beachten, dass das Ausblasen mit Druckluft und das Benetzen mit Bitumenemulsion auch als Arbeitsschritte des eigentlichen Verfahrens aufgefasst werden kön-

nen, daher ggf. nicht (noch einmal) als Arbeitsschritt im Zuge der Vorbehandlung genannt wurden.

Die am häufigsten genannten Formen der Vorbehandlung sind „Entfernen von stehendem Wasser“ „Entfernen von geschädigtem Material“ und „Ausfegen“ mit jeweils 75 bis 100 % bei Kaltasphalt und Gussasphalt. Geringere Werte beim Blow-Patchen lassen sich wiederum verfahrensbedingt erklären, d. h. Ausblasen mit Druckluft (70 %) ersetzt hierbei andere Formen des Säubers. Umgekehrt argu-

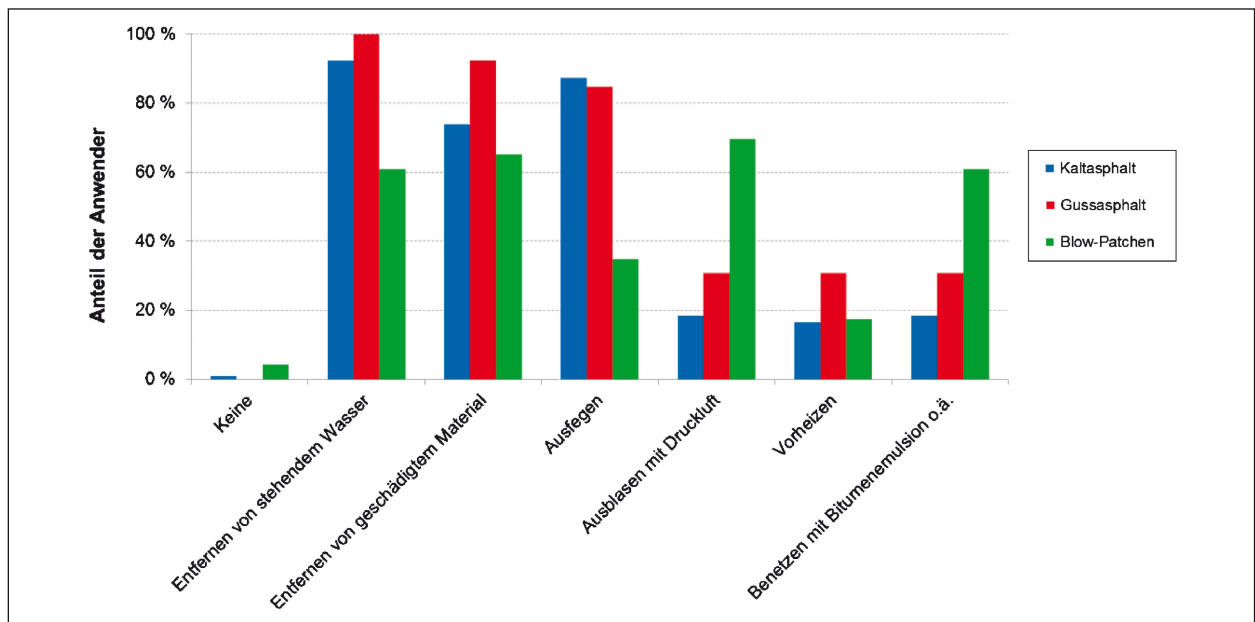


Bild 8: Vorbehandlung

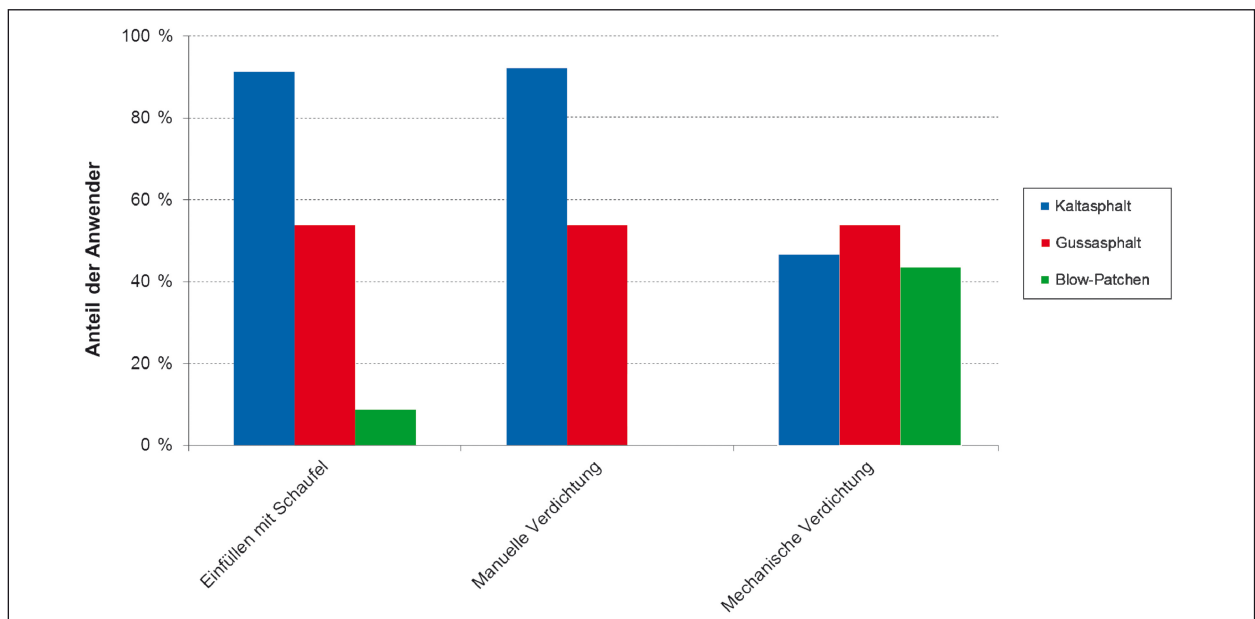


Bild 9: Verdichtung beim Einbau

mentiert, wird das „Ausblasen mit Druckluft“ bei der Verwendung von Kaltasphalt (18 %) und Gussasphalt (31 %) eher selten angewendet. „Vorheizen“ wird ebenfalls nur in 17 bis 31 % aller Fälle praktiziert. Entsprechendes gilt für das „Benetzen mit Bitumenemulsion o. Ä.“ mit 18 % bei Kaltasphalt und 31 % bei Gussasphalt. Die 61 % beim Blow-Patchen können wie beim „Ausblasen mit Druckluft“ als verfahrensbedingt angesehen werden und daher im Ergebnis noch höher liegen.

1.3.4 Verdichtung beim Einbau

Beim Einbau kommen prinzipiell drei Formen der Verdichtung des Sanierungsmaterials zur Anwendung: „Einfüllen mit der Schaufel“, „Manuelle Verdichtung“ mittels Stampfer etc. und „Mechanische Verdichtung“ mittels Walze oder Rüttelplatte (siehe Bild 9). 92 % der Kaltasphalt-Anwender geben an, das Material manuell zu verdichten und immerhin 47 % sogar mechanisch. Beim Gussasphalt wird nach Angaben der Befragten in 47 % der Fälle die „Manuelle Verdichtung“ und in 54 % der Fälle die

„Mechanische Verdichtung“ betrieben; beim Blow-Patchen in 43 % der Fälle. Die relativ geringen Werte von jeweils ca. 50 % beim Gussasphalt lassen sich dadurch erklären, dass es ja gerade ein Vorteil des Gussasphaltes ist, dass dieser keiner oder nur geringer Verdichtung bedarf.

1.4 Zusammenfassende Auswertung

Im Rahmen zusammenfassender Fragen konnten die Befragten frei angeben (d. h. nicht nur vorgegebene Antworten auswählen), welche Materialien und Verfahren zur Schlagloch-Sanierung ihrer Auffassung nach am besten den Kriterien „Preisgünstig“, „Dauerhaft“ und „Einfach verarbeitbar“ entsprechen.

Wie aus Bild 10 ersichtlich ist, konnte hier der Kaltasphalt die meisten Nennungen bezüglich „Preisgünstig“ auf sich vereinen, obwohl in Kapitel 1.2.3 (Gründe für die Verwendung) „Geringe Kosten“ nur zu 30 % beim Kaltasphalt genannt wurden. Im Ergebnis wird Kaltasphalt also nicht prinzipiell als preisgünstig bewertet, im Vergleich zu anderen Verfahren jedoch schon. Bezüglich des Blow-Patchens ist ebenfalls eine Diskrepanz zwischen den Antworten auf die zwei verschiedentlich gestellten Fragen zu verzeichnen. In Kapitel 1.2.3 gaben 57 % der Anwender des Blow-Patchens an, dass dieses Material/Verfahren „Geringe Kosten“ aufweist, wohingegen lediglich 13 % der Befragten Blow-Patchen in der Zusammenfas-

sung ihrer Antworten als „Preisgünstig“ bewerten. Entsprechende Unterschiede können hier vermeintlich auf die stark unterschiedlichen Erfahrungswerte – lediglich Anwender von Blow-Patchen bzw. alle Befragten – zurückgeführt werden. Die Befragten, die bereits Blow-Patchen anwenden, sehen dieses Verfahren also eher als preisgünstig an als jene, die (bislang) lediglich auf Kaltasphalt zurückgreifen. Im Ergebnis scheint das Blow-Patchen also schwerpunktmäßig auf Akzeptanz zu stoßen, wo es auch schon angewendet wird.

Bezüglich „Dauerhaft“ bestätigt sich das Ergebnis aus Kapitel 1.2.3 (Gründe für die Verwendung), wonach Heißasphalte, zu denen auch Gussasphalt zählt, am besten angesehen sind und Kaltasphalt eher weniger. Die Dauerhaftigkeit des Blow-Patchens wird von Seiten der Anwender offenbar ähnlich und aus denselben Gründen eingeschätzt wie der oben behandelte Punkt „Preisgünstig“.

„Einfach verarbeitbar“ wird mit großem Abstand Kaltasphalt (80 %) vor Heißasphalten (u. a. Gussasphalt) und Blow-Patchen (je 8 %) angesehen. Im Vergleich zu Kapitel 1.2.3 werden unter dem Überbegriff „Einfach verarbeitbar“ offenbar mehrere Einzelkriterien bzw. die Summe der Vorteile gemäß Bild 4 hinsichtlich „Schnelle Verfügbarkeit“, „Witterungsunabhängigkeit“, „Lagerfähigkeit“ und „Einbau in Eigenleistung“ zusammengefasst“.

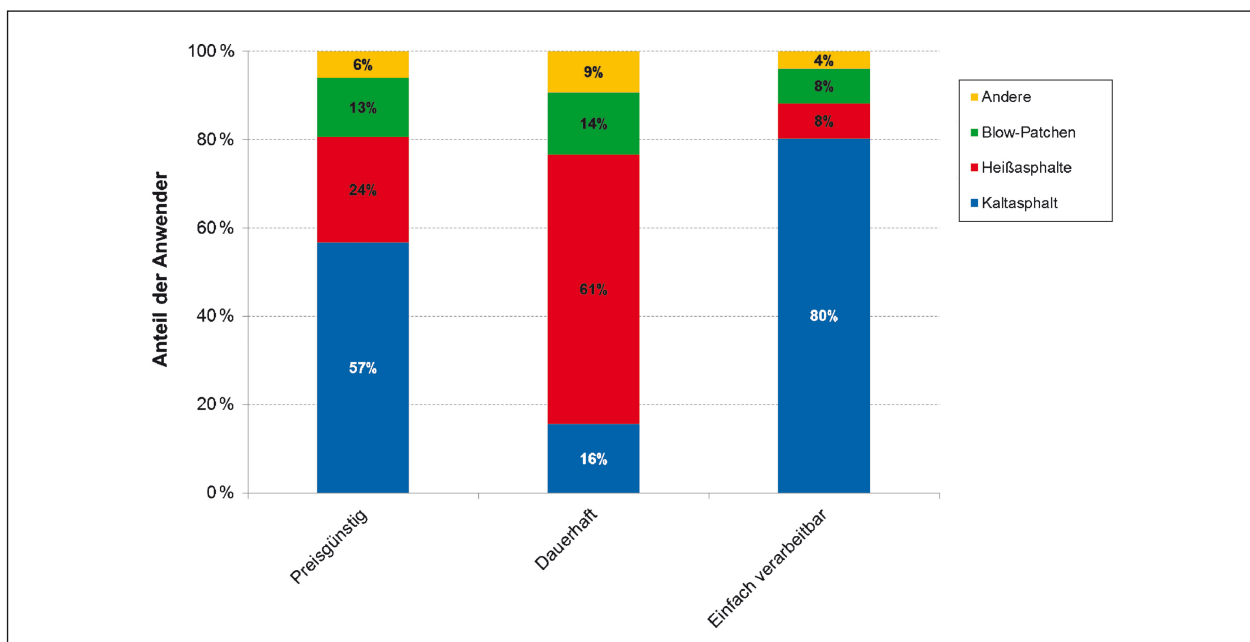


Bild 10: Zusammenfassende Auswertung

1.5 Vorauswahl von Materialien und Verfahren

Die Auswertung des Online-Fragebogens zeigt offenkundig auf, dass Kaltasphalt das am häufigsten eingesetzte Material für die Schlagloch-Sanierung ist. Dies wird vor allem durch einfache Verarbeitbarkeit und vermeintlich preisgünstige Ausführung begründet. Die Erwartungshaltung hinsichtlich Haltbarkeit variiert in starkem Maße, sodass teilweise sogar von einer endgültigen Sanierungsmöglichkeit mittels Kaltasphalt ausgegangen wird.

Gussasphalte werden prinzipiell als haltbarste und damit qualitativ hochwertigste Variante empfunden, jedoch verhindern Aspekte der jahreszeitlichen Verfügbarkeit und relativ hohe Kosten offenbar eine intensivere Verwendung. Blow-Patches überzeugt vor allem den Kreis derjenigen, welcher dies auch tatsächlich anwendet. Hier werden insbesondere Vorteile hinsichtlich geringer Kosten und Dauerhaftigkeit angeführt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Online-Befragung erfolgte auch die Vorauswahl im Rahmen einer labortechnischen Begutachtung (siehe Kapitel 3) und in Großversuchen (siehe Kapitel 4) näher zu betrachtenden Sanierungsmaterialien und -verfahren. Dabei handelte es sich um insgesamt sieben Materialien, die in der Online-Befragung mit 110 plausiblen Datensätzen mindestens vier Mal genannt wurden. Zu Vergleichszwecken wurden darüber hinaus 12 andere Produkte dieser Hersteller sowie 13 von anderen Herstellern (mit jeweils mindestens einer Nennung in der erwähnten Umfrage) vorausgewählt, in Summe also insgesamt 32 Sanierungsmaterialien.

Aufgrund der teils geringen Anzahl von Nennungen bzw. erforderlichen Verfeinerung wurden jedoch folgende, gegenüber der Online-Befragung abweichende Materialgruppen festgelegt:

- Heißasphalt (HA),
- nicht-reaktiver Kaltasphalt (KN),
- reaktiver Kaltasphalt (KR),
- Sonderasphalt (SA).

Eine Übersicht über die vorausgewählten Materialien ist Tabelle 1 zu entnehmen, wobei für die Variantenbeschreibung folgende anonymisierende Nomenklatur verwendet wurde: [Materialgruppe] [Lfd. Nr.]-[Korngröße].

Variante	Anzahl Nennungen	Variante	Anzahl Nennungen
HA01-0/5	0	KN15-0/5	2
HA02-0/8	0	KN16-0/5	0
KN01-0/4	4	KR01-0/5	0
KN02-0/5	1	KR02-0/4	0
KN03-2/5	2	KR03-0/4	2
KN04-0/5	2	KR04-0/5	0
KN05-0/5	2	KR05-0/5	2
KN06-0/5	13	KR06-0/4	4
KN07-0/3	3	KR07-0/4	12
KN08-0/5	4	KR08-0/8	
KN09-0/5	0	KR09-0/4	
KN10-0/5	9	KR10-0/8	2
KN11-0/8		KR11-0/5	
KN12-0/11		SA01-0/5	0
KN13-0/5	4	SA02-0/8	0
KN14-2/5	1	SA03-0/5	0

Tab. 1: Materialvarianten – Anzahl Nennung in der Befragung

2 Verfahren zur Erstellung von Musterschlaglöchern

2.1 Anforderungen

Zur zuverlässigen Beurteilung der Haltbarkeit von Materialien und Verfahren zur Sanierung von Schlaglöchern sowohl in Labor- als auch in Großversuchen, ist es zwingend erforderlich, diese Versuche unter praktisch gleichen Randbedingungen durchzuführen. Dazu zählt insbesondere auch, dass die künstliche Schädigung der Fahrbahn-Deckschicht in Bezug auf Geometrie und Oberflächeneigenschaften des Schlaglochs in allen Einzelversuchen reproduzierbar erfolgen muss. Hierzu wurde im Rahmen von Arbeitspaket 2 und unterstützend durch zwei Diplomarbeiten am Bergischen Straßenbaulabor (Entwicklung eines Laborverfahrens zur Herstellung von Schlaglöchern in Asphalt, WERNKE 2013; Bewertung verschiedener Materialien und Verfahren zur Schlaglochsanieuerung im Laboratorium, KOPPERS 2013) sukzessive ein mögliches Verfahren zur Erzeugung von Musterschlaglöchern entwickelt.

Zur Gewinnung eines umfassenden Eindrucks bezüglich der in der Realität anzutreffenden Schlaglochgeometrie wurden zunächst in situ Beobachtungen im Straßenraum der Stadt Wuppertal durchgeführt. Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass bei örtlich begrenzten Schlaglöchern mit einem Verhältnis von Länge zu Breite von $< 1,5$:1 eine kreisrunde Grundform unterstellt werden kann.

Sofern stark progressive Schädigungsformen vorliegen, sind keine eindeutigen Tendenzen mehr feststellbar. Die Flankenneigung ist durchweg steil mit Winkeln (gegen die Horizontale gemessen) zwischen 45° und 70° . Entsprechende Werte werden daher auch für das Verfahren zur Erstellung von Musterschlaglöchern angestrebt.

Für das künstliche Erstellen von Musterschlaglöchern unter Laborbedingungen wurden insgesamt fünf verschiedene Methoden kryogener und mechanischer Natur erprobt. Bei allen erfolgt eine Schädigung des Asphaltes entweder nach dem Herstellen der Probeplatten im Walzsegmentverdichter oder bereits während des Verdichtens. Bei allen kommen einheitlich Asphaltprobeplatten nach TP Asphalt-StB Teil 33 zur Anwendung. Im Folgenden werden die nachfolgend benannten einzelnen Methoden beschrieben:

- Frost-Tau-Wechsel (Methode I),
- Gesteinskörnung-Nest (Methode II),
- Durchstanzkegel (Methode III),
- Kombination aus Gesteinskörnung-Nest und Durchstanzkegel (Methode IV),
- Substitution (Methode V).

2.2 Methode I: Frost-Tau-Wechsel

Analog zur häufig in der Realität anzutreffenden Schlaglochbildung durch Frostsprengung wird mithilfe der Methode I versucht, ein Schlagloch durch Frost-Tau-Wechsel zu erzeugen. Zunächst wird die Asphaltplatte unter Atmosphärendruck in Wasser gelagert, um eine Wassersättigung des Porenraums zu erzielen. Es wird erwartet, dass es durch den Gefriervorgang zu einer Aufwölbung der Oberfläche durch das sich ausdehnende Eis in den Hohlräumen kommt, was schließlich ein Ausbrechen von Kornpaketen zur Folge hat. Das Asphaltmischgut wird dabei bezüglich Kornverteilung und Bindemittelanteil so eingestellt, dass der nach TL Asphalt-StB maximale Hohlraumgehalt erreicht wird; zusätzlich wird ein Verdichtungsgrad von 97 % angestrebt.

Versuchsbeschreibung

Die Asphaltprobeplatte wird zunächst zwecks Wassersättigung des Porenraums für 60 Minuten vollständig unter Wasser gelagert. Anschließend wird die wassergesättigte Platte in eine Schale gelegt,

die größer ist als die Asphaltprobeplatte selbst. Die Platte wird mit Wasser übergossen, bis sie zur Hälfte ihrer Höhe unter Wasser liegt (siehe Bild 11). Für die erste Frostperiode wird die mit Wasser gefüllte Schale inklusive der Platte über 24 Stunden in einer Kältekammer bei -20°C gelagert. Anschließend wird die Platte außerhalb der Kältekammer an der Oberfläche erwärmt und so einer Tauperiode unterzogen. Hierzu werden zwei Stahlplatten (mit Abmessungen entsprechend der Asphaltprobeplatte von $320 \times 260 \text{ mm}$) im Trockenschrank auf 50°C erwärmt und für 60 Minuten auf die Oberfläche der gefrorenen Asphaltprobeplatte gelegt. Die so angetaute Oberfläche wird danach mit Wasser übergossen und in einer zweiten Frostperiode in der Kältekammer ebenfalls über 24 Stunden bei -20°C gelagert. Nach dieser zweiten Frostperiode wird die Schale mit der Asphaltprobeplatte zum vollständigen Auftauen bei Raumtemperatur gelagert.

Versuchsergebnis

Der erhoffte Effekt, dass sich die Oberfläche der Asphaltprobeplatte durch den Druck des Eises nach oben aufwölbt, bleibt aus (siehe Bild 12). Ob

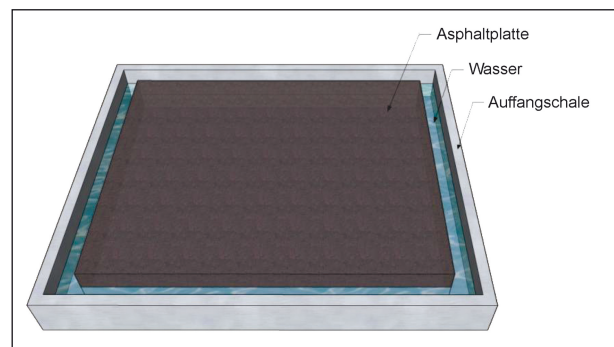


Bild 11: Schematischer Aufbau Methode I



Bild 12: Schlagloch nach Methode I

nach weiteren Frost-Tau-Wechseln gegebenenfalls eine Veränderung auftritt, wurde nicht weiter untersucht. Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwands sowie des Umstands, dass die genaue Stelle einer Schädigung wahrscheinlich nur schwer definiert werden kann, ist diese Methode zu verwerfen.

2.3 Methode II: Gesteinskörnung-Nest

Um die genannte Unwägbarkeit aus Methode I, an welcher Stelle das Schlagloch auftreten wird, auszuschließen, wird mit Methode II die Schädigungsstelle vorab festgelegt. Dieser Methode liegt die Idee zugrunde, dass das Auftreten von Schlaglöchern durch schlechte Verarbeitung beim Einbau der Deckschicht (z. B. entmischtes Mischgut, Kältenest etc.) begünstigt wird. Hierzu wird an definierter Stelle ein Nest mit Gesteinskörnung ohne Bindemittel in die Asphaltplatte eingebaut.

Versuchsbeschreibung

In den Formkasten des Walzsektor-Verdichters für das Herstellen der Asphaltprobeplatte wird vor dem Einfüllen des Mischguts ein kreisrunder Hohlzylinder mit einem Durchmesser von 10 cm mittig positioniert und das Asphaltmischgut um den Hohlzylinder herum eingefüllt. Der Hohlzylinder wird anschließend auf die Höhe des eingefüllten Mischguts mit der Gesteinskörnung aufgefüllt und anschließend durch vertikales Ziehen entfernt. Das so eingebaute Gesteinskörnung-Nest wird nach dem Verdichtungsvorgang und Ausformen der Asphaltplatte ausgeschüttet (siehe Bild 13). Als Gesteinskörnungen für das Nest wurden sowohl die Kornfraktion 2 bis 5 mm als auch 5 bis 8 mm untersucht.

Versuchsergebnis

Das Ziel, die Schadstelle an immer der gleichen Stelle zu erzeugen, konnte durch die definierte Position des Gesteinskörnung-Nestes klar erreicht werden. Zudem ist die Geometrie nahezu rund, was für das Erstellen von identischen Randbedingungen wichtig ist.

Durch den Walzvorgang des Walzsektor-Verdichters schiebt sich jedoch Asphaltmischgut über das Nest, sodass das Schlagloch erst nach dem Wenden der Asphaltprobeplatte in etwa realen Randbedingungen bezüglich Geometrie entspricht und mit Sanierungsmaterial verfüllt werden kann. Dies er-

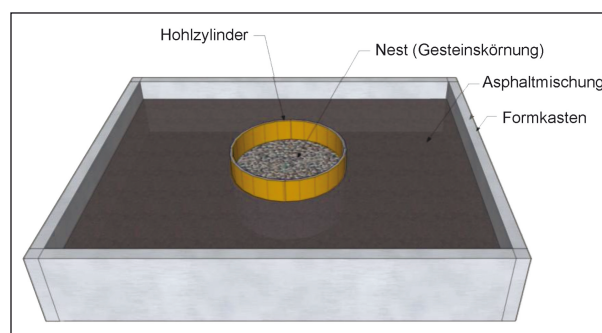


Bild 13: Schematischer Aufbau Methode II



Bild 14: Schlagloch nach Methode II

weist sich vor allem in Bezug auf das Herstellen von geschädigten Fahrbahnplatten für die Großversuche als problematisch, da hier ein einfaches Wenden der Platten vor Versuchsbeginn nicht möglich ist. Zudem führt die Verwendung von Einkornmaterial als Füllung des Nests zu Oberflächeneigenschaften der geneigten Schlaglochflanken, die nicht den in situ anzutreffenden entsprechen (siehe Bild 14). Im Ergebnis ist die Methode II daher ebenfalls zu verwerfen.

2.4 Methode III: Durchstanzkegel

Die Methode „Durchstanzkegel“ basiert auf der Idee, dass die in der Realität bei Schlaglöchern anzutreffende Flankenneigung näherungsweise durch einen Durchstanzkegel abgebildet werden kann. Dazu soll eine Stahlplatte überasphaltiert und anschließend vertikal gezogen werden (siehe Bild 15).

Um den Aushub des Asphaltmischgutes zu stabilisieren und eine gleichmäßigere Form von Grundriss und Flanken zu erzielen, wurde während der Versuchserprobung je eine zusätzliche Aushubplatte in halber Höhe des Asphaltmischgutes und an der Oberfläche installiert. Auf Grundlage der in situ beobachteten Flankenneigungen von mindes-

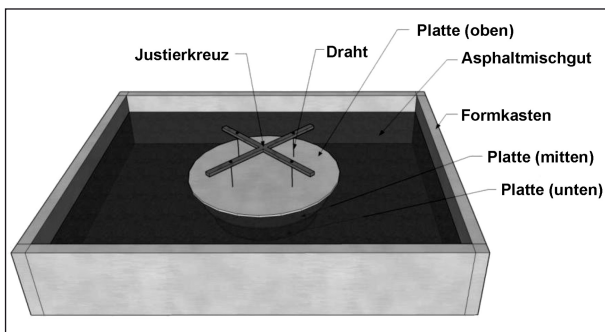


Bild 15: Schematischer Aufbau Methode III

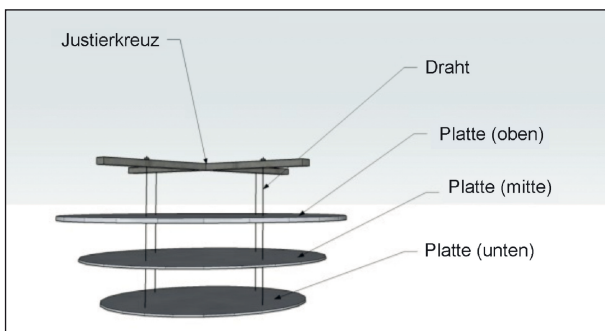


Bild 16: Aushubwerkzeug für Methode III

tens ca. 45° wurden die Durchmesser von mittlerer und oberer Platte entsprechend gewählt (siehe Bild 16). Das Anheben der Aushubplatte erfolgt mithilfe von vier über Kreuz angeordneten Drähten und einem Justierkreuz. Im Ergebnis liegt also ein Werkzeug vor, mit dem eine Durchstanzkegelneigung von ca. 45° gegen die Horizontale vorgegeben wird.

Versuchsergebnis

Durch das Anordnen eines Justierkreuzes ist das Anheben der Aushubplatte erwartungsgemäß exakter kontrollierbar. Im Ergebnis kann ein recht gleichmäßiger Austrag des Asphalt-Mischgutes erreicht werden. Allerdings treten im Bereich der Ausbruchkante unregelmäßige Schädigungen der Asphalt-Oberfläche auf. Zudem kann ein zeitlich verzögertes Nachrutschen des Mischguts in das so entstandene Schlagloch beobachtet werden.

Daher wird in Kapitel 2.5 eine Kombination der Methoden II und III betrachtet, um möglichst die jeweiligen Vorteile herauszustellen.

2.5 Methode IV: Kombination aus Durchstanzkegel und Gesteinskörnung-Nest

Im Rahmen von Methode IV wird geprüft, inwieweit sich bei einer Kombination von Methode III (Durchstanzkegel) und Methode II (Gesteinskörnung-Nest) die jeweiligen Vorteile in Form von gut reproduzierbarer Flankenneigung bzw. runder Geometrie nutzen lassen.

Versuchsbeschreibung

Es wird zunächst die Methode III angewendet, d. h. Mischgut mithilfe einer Aushubplatte entfernt, sodass ein Durchstanzkegel mit geneigten Flanken vorliegt. Die so entstandene Schadstelle wird von losem Mischgut gesäubert und mit erwärmter Gesteinskörnung aufgefüllt. Die Oberfläche dieses Gesteinskörnung-Nests wird glattgestrichen und die Asphaltprobekplatte einschließlich Nest erneut mittels Walzsektor-Verdichters verdichtet (siehe Bild 17). Danach kann das Gesteinskörnung-Nest einfach ausgeschüttet werden.

Versuchsergebnis

Die Erstellung von Schlaglöchern im Labormaßstab mittels „Kombination aus Durchstanzkegel und Gesteinskörnungsnest“ erwies sich nach anfänglich guten Erfahrungen (siehe Bild 18) in der weiteren Versuchsanwendung als problematisch.

Trotz sorgfältigen Arbeitens war es unterschiedlichem Laborpersonal nicht möglich, die Präzision, die ein solches kleinmaßstäbliches Verfahren erfordert, einzuhalten (mangelnde Vergleichspräzision). Dieser Umstand kann an der recht komplizierten Handhabung des Aushubwerkzeugs liegen. Das Aushubwerkzeug, welches aus an Drähten aufgehängten Metallplatten unterschiedlicher Durchmesser besteht, musste bei der Herstellung der Asphaltplatten in mehreren Arbeitsgängen eingebaut werden (Grundplatte, nach erfolgter Mischgutverteilung der ersten Lage, Einbau der mittleren Platte mittels Einfädeln in Drähte, Einfädeln der oberen Platte). Die Drähte, an denen die Platten aufgehängt waren, wurden zwischenzeitlich immer wieder beim Verdichtungsprozess in den Asphalt eingewalzt und mussten folglich beim nächsten Arbeitsschritt wieder aus dem Asphalt geborgen werden. Eine Beschädigung der Oberfläche konnte dabei nicht immer gänzlich verhindert werden. Außerdem gab es



Bild 17: Eingefüllte Gesteinskörnung für Methode IV

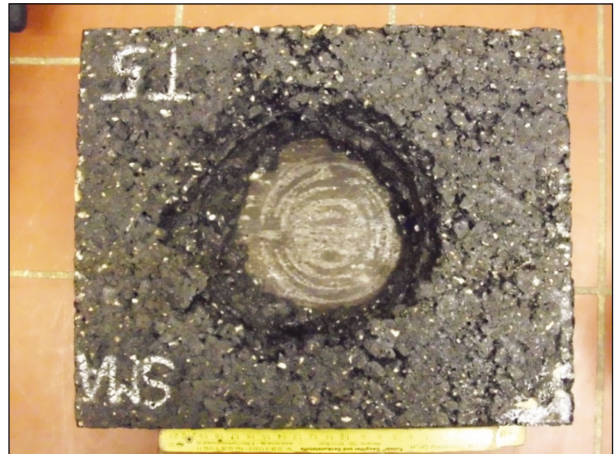


Bild 19: Schräge Bruchmuster nach Methode IV

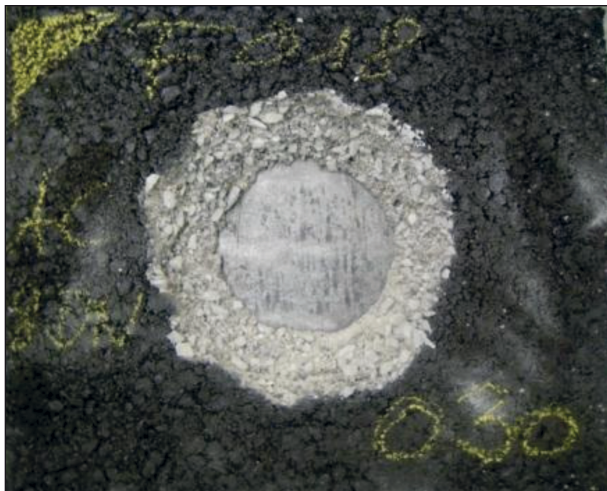


Bild 18: Schlagloch nach Methode IV

immer wieder Fälle, in denen der Draht aufgrund der Zugbeanspruchung beim Hub der Konstruktion riss. Je nach Homogenität des Mischgutes und der Gleichmäßigkeit beim Auskühlen trat ebenfalls eine Schiefstellung des Aushubwerkzeugs auf, die durch das Justierkreuz nur bedingt kompensiert werden konnte. Dadurch waren unterschiedliche Bruchmuster zu verzeichnen (siehe Bild 19).

Weitere Probleme waren die weitere Handhabung der so gefertigten Schlaglochplatten. Beim Durchführen der ersten Versuche mit Kaltasphalt fiel das Verfüllmaterial beim Transportieren der Platten nach unten aus der Trägerplatte heraus. Insbesondere beim Einbau in den Versuchsstand des Spurbildungsversuchs, bei dem eine durchgehende Stützung des Verfüllmaterials von unten nicht möglich ist, scheiterte die Anwendung in der Praxis. Auch der Einbau eines Gesteinskörnungsnestes offenbarte in der Praxis Probleme. Der dem

Gestein anhaftende Eigenfüller hinderte die zu testenden Kaltasphalte daran, einen guten Verbund mit der Trägerplatte einzugehen. Eine Reinigung mit Wasser und eine anschließende Trocknung wären für den weiteren Laborablauf hinderlich gewesen.

Daher stand bei der Planung der Herstellung der Versuchsfelder bzw. der anschließenden Einbringung der Schlaglöcher die Praktikabilität des Aushubwerkzeugs im Fokus der weiteren Überlegungen. Anders als im Labor konnten hier weder Vorversuche erfolgen, noch wäre eine Wiederholung etwaig fehlgeschlagener Schlaglochherstellungen möglich gewesen. Deshalb fiel die Entscheidung, das Risiko eines in den großen Maßstab skalierten Aushubwerkzeugs und dessen Anwendung nicht einzugehen. Zu ungewiss erschien die Handhabung mehrerer Platten, die durch Drähte hätten miteinander verbunden werden müssen (Gefahr der Beschädigung der Maschinenteknik) sowie die Tatsache, dass die Deckschicht, in der das Schlagloch erstellt werden sollte, aus technischen Gründen nur in einer Lage hergestellt werden konnte und die Anwendung dreier Metallplatten wie im Labormaßstab somit nicht möglich gewesen wäre.

Die zuvor benannten Mängel der Methode IV „Kombination aus Durchstanzkegel und Gesteinskörnungsnest“, die erst durch die Herstellung weiterer Schlaglochplatten und deren anschließende Handhabung zu Tage traten, resultierten in einer notwendigen weiteren Anpassung des Verfahrens.

2.6 Methode V: Substitution

Die Methode V basiert im Wesentlichen auf Überlegungen zur Herstellung der Schlaglöcher in den Versuchsfeldern für den Großversuch, da sich keine andere Methode, insbesondere für den Größenmaßstab des Großversuchs, als praktikabel erwiesen hat.

Versuchsbeschreibung

Beim Substitutionsverfahren wird zunächst eine 2 cm dicke Basisplatte im Walzsektorverdichter gemäß TP Asphalt-StB Teil 33 hergestellt. Als Mischgut wird ein AC 5 D L verwendet, um die geringe Schichtdicke von 2 cm zu realisieren. Anschließend erfolgt das zentrische Positionieren eines Ersatzkörpers (speziell gefertigter Holzkörper mit Fixierzähnen, siehe Bild 20) auf der Asphaltoberfläche, welcher die Form und Größe des gewünschten Schlagloches besitzt (Unterseite 100 mm Durchmesser, Oberseite 132,4 mm Durchmesser, Dicke 28 mm, Flankenneigung 60°).

Danach wird das Mischgut für die Deckschicht um den Ersatzkörper verteilt und die obere Lage Asphalt inkl. des Ersatzkörpers im Walzsektorverdichter verdichtet. Überschüssiges Mischgut, welches während des Verdichtungsvorgangs auf die Oberfläche des Ersatzkörpers gelangt, wird im Nachgang vorsichtig entfernt. Die Dicke des Ersatzkörpers wurde aus diesem Grunde zu 28 mm gewählt, um den Ersatzkörper durch überdeckendes Mischgut nicht zu beschädigen. Die resultierende Schlaglochtiefe beträgt nach der Entnahme des Ersatzkörpers 40 mm.

Wenn die Temperatur der Asphaltplatte zwischen 90 und 110 °C beträgt, werden Schrauben mit Ösen in die Fassungen des Ersatzkörpers geschraubt und der Körper herausgezogen (siehe Bild 21). Gegebenenfalls vorhandene lose Asphaltbestandteile können im erkalteten Zustand entfernt werden.

Versuchsergebnis

Die so gebildeten Musterschlaglöcher zeichnen sich durch ihre gute Reproduzierbarkeit (definierte Abmessungen des Ersatzkörpers) und ihre Realitätsnähe (passende Flankenneigung, Vorhandensein von bitumenumhüllter Gesteinskörnung an den Flanken und am Untergrund des Schlaglochs, Rauigkeit durch Nut im Ersatzkörper) aus. Ein Beispiel eines so erzeugten Musterschlaglochs ist in Bild 22 dargestellt.



Bild 20: Substitutionskörper für Methode V



Bild 21: Aushubwerkzeug für Methode V

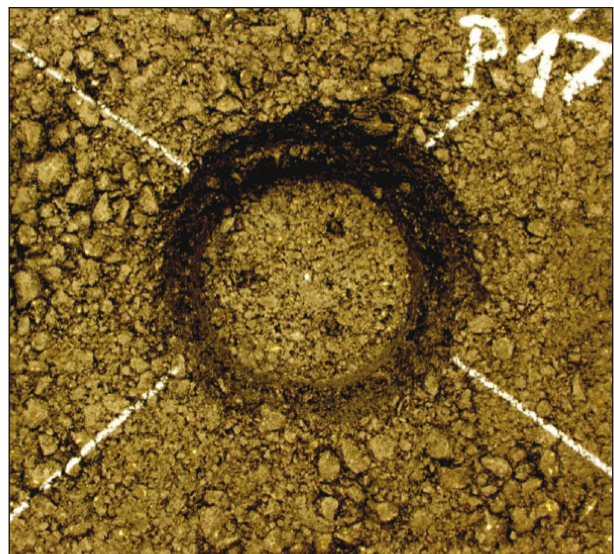


Bild 22: Schlagloch nach Methode V

Da das Substitutionsverfahren reproduzierbare Ergebnisse in Bezug auf die angestrebte runde Form sowie Flankenneigung und -rauigkeit liefert, wird es

nachfolgend als das am besten geeignete Verfahren zur Erstellung von Musterschlaglöchern – sowohl im Labor als auch für die Großversuche – verwendet.

3 Labortechnische Begutachtung vorausgewählter Materialien und Verfahren

Die labortechnische Begutachtung dient dazu, die zuvor in Kapitel 1.5 vorausgewählten Materialien hinsichtlich ihres Gebrauchsverhaltens und der Dauerhaftigkeit zu beurteilen. Dazu sollen im Wesentlichen drei Laborversuche durchgeführt werden:

- Spurbildungsversuch gem. TP Asphalt-StB, Teil 22,
- einaxialer Druckschwellversuch mit Behinderung der Querdehnung gem. DIN EN 12697-25 und
- direkter Zugversuch gem. DIN EN 12697-46.

Da es sich bei diesen Laborversuchen um Versuche für Walzasphalte handelt, bedurfte es vor der Anwendung der Versuchsverfahren einiger Voruntersuchungen, um die Anwendbarkeit auf die zu untersuchenden Sanierungsmaterialien (Kaltasphalte, Gussasphalte, Sonderasphalte) zu gewährleisten. Im Folgenden werden die einzelnen Versuche einschließlich der Herstellung der Prüfkörper und die zugehörigen Versuchsergebnisse dargestellt.

3.1 Spurbildungsversuch

Versuchsbeschreibung

Beim Spurbildungsversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 22 bewegt sich eine rollende Last (ein vollgummibereiftes Edelstahlrad) bei einer Temperatur von 60 °C 20.000 Mal (entsprechend 10.000 Zyklen) über die Asphaltoberfläche. Das Profil der dabei entstehenden Spurrinne wird elektronisch gemessen und ausgewertet. Der Spurbildungsversuch wird prinzipiell an Asphaltplatten, welche im Walzsektorverdichter nach TP Asphalt-StB, Teil 33 hergestellt wurden, durchgeführt. Zur Beurteilung des Spurbildungsverhaltens von Materialien zur Schlaglochsanie rung wurde jedoch ein modifizierter Prüfkörper verwendet, der nachfolgend beschrieben ist.

Herstellung der Prüfkörper

Als Prüfkörper kamen Asphaltplatten nach TP Asphalt-StB, Teil 33 zum Einsatz, an denen das in Kapitel 2.6 entwickelte Verfahren zur Erstellung von Musterschlaglöchern (Substitutionsverfahren) angewendet wurde. Nach dem so erfolgten Herstellen einer Asphaltplatte mit einem zentrischen Schlagloch (Durchmesser 10 cm, Tiefe 4 cm) wird das Volumen des Schlagloches mittels Flüssigkeitsersatz-Verfahren bestimmt. Für die Vorversuche ergibt sich die Einbaumasse unter Berücksichtigung der Herstellerangaben. Aufgrund der teilweise zu beobachtenden Überverdichtung einzelner Materialien wurde für die nachfolgende Versuchsreihe die Marshall-Raumdichte als Bezugsgröße für die Einbaumasse herangezogen.

Alle Materialien wurden zunächst lose in das Schlagloch gefüllt und in Abhängigkeit der Ziel-Einbaudichte gemäß Marshall-Raumdichte unterschiedlich stark vorverdichtet. Während für das Erzielen einer geringen Soll-Einbaudichte von ca. 1,8 g/cm³ für die Vorverdichtung lediglich ein Andrücken des Materials mittels Kelle oder Schaufel erforderlich ist, muss für eine Soll-Einbaudichte von ca. 2,3 g/cm³ ein sog. Proctor-Hammer nach DIN 18127 verwendet werden. Bei allen Materialien wurde unabhängig von der späteren Soll-Einbaudichte eine leichte Überhöhung des Materials über die Oberkante der Deckschicht hinaus eingestellt, welche in der Praxis häufig beobachtet werden kann und auch so erwünscht ist.

Nach dem Einbau der Sanierungsmaterialien wurde in einer Erprobungsphase versucht, die Hauptverdichtung, wie sie in der Realität aufgrund von Verkehrsbeanspruchung vorliegt, zu simulieren. Dazu wurde der Prüfkörper in das Spurbildungsgerät eingebaut und unter Variation der Parameter Temperatur, Überrollungsanzahl und Überrollungslasten belastet. Um eine realistischere Belastung, ähnlich eines gewöhnlichen Reifens zu simulieren, wurde eine Aluminiumplatte auf die Asphaltplatte mit dem verfüllten Schlagloch gelegt, damit hohe Spitzenspannungen des Belastungsrades durch die lastverteilende Wirkung der Aluminiumplatte reduziert werden. Trotz der Erprobung diverser Belastungsbedingungen und Temperaturen sowie lastverteilender Zustände wurde dieses Verfahren der Hauptverdichtung verworfen, da sich bereits deutliche Verformungen der Prüfkörperoberfläche (Spurrinnen und Verdrängung von Material an den Seiten) einstellten. Die daraus resultie-

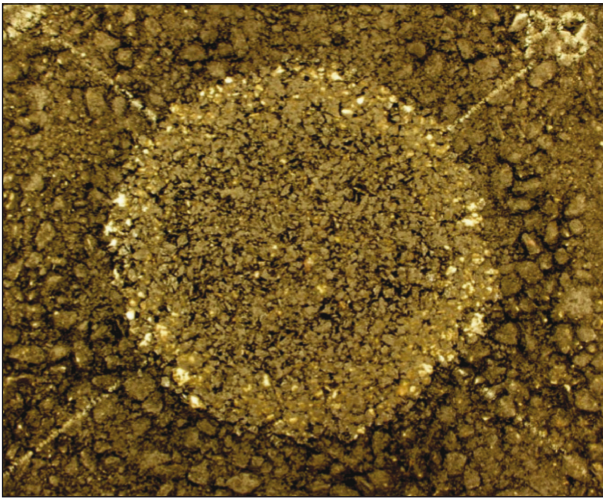


Bild 23: Verfülltes und verdichtetes Musterschlagloch

renden ungleichmäßigen Oberflächen beeinflussen die spätere Versuchsdurchführung und -auswertung mit dem Spurbildungsgerät deutlich.

Aus diesem Grund wurde die Hauptverdichtung nachfolgend mit dem Walzsektorverdichter durchgeführt. Hierzu wurde ebenfalls eine lastverteilende Aluminiumplatte auf die verfüllte Asphaltplatte gelegt und anschließend die Verdichtung gem. TP Asphalt-StB, Teil 33 durchgeführt. Dadurch konnten sehr ebene Oberflächen erzielt werden, die für die anschließenden Versuchsdurchführungen unabhängig sind (siehe Bild 23).

Versuchsdurchführung

Die gemäß den obigen Beschreibungen hergestellten Prüfkörper wurden in Vorversuchen mit schrittweise steigender Beanspruchung getestet. Ziel war die normgerechte Beanspruchung der Prüfkörper mit 10.000 Überrollungszyklen unter Vollast und einer Temperatur von 60 °C. Aus gerätetechnischen Gründen (ausschließlich Heizelement vorhanden) betrug die geringste zu testende Temperatur 30 °C. Diese wurde sukzessive bis auf 60 °C gesteigert. Insbesondere bei einer Temperatur von 60 °C zeigte sich jedoch bei allen Vorversuchen ein vollständiges Versagen. Keines der so getesteten Materialien konnte den normgerechten Prüfbedingungen standhalten. Die Prüfkörper versagten bereits nach wenigen Tausend Überrollungen (< 3.000) mit Spurrinntiefen von über 8 mm. Ein Beispiel eines solchen Prüfkörpers nach Belastung im Spurbildungsversuch ist Bild 24 zu entnehmen.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen wurde für die nachfolgende Versuchsreihe eine



Bild 24: Prüfkörperversagen nach Spurbildungsversuch

Prüftemperatur von 30 °C festgelegt. Die Prüftemperatur von 30 °C wurde wegen der stark schwankenden Raumtemperatur (ca. 20-25 °C) im Laboratorium gewählt. Durch die Reduzierung der Prüftemperatur von 60 °C auf 30 °C konnten bis auf eine Ausnahme alle Materialien unter Vollast mit 10.000 Überrollungszyklen beansprucht werden. Das Abbruchkriterium (PRD > 20 % bzw. RD > 8 mm) wurde aus den Vorversuchen übernommen.

Auswertung

Die Auswertung der Spurbildungsversuche erfolgte auf Grundlage der proportionalen Spurrinntiefe (PRD), der absoluten Spurrinntiefe (RD) und der Spurbildungsrate (WTS). Die proportionale Spurrinntiefe ist dabei die prozentuale Gesamtverformung der Spurrinntiefe bezogen auf eine mittlere Einbaudicke des Sanierungsmaterials von 40 mm.

Zur Bewertung der Materialien und Interpretation der Ergebnisse wurden Bewertungsgruppen gebildet; die Gruppenbildung erfolgte auf Grundlage festgelegter Spannweiten innerhalb der PRD:

- Gruppe A (PRD 0 bis 3 %) umfasst die Materialien mit sehr guter Standfestigkeit. In dieser Gruppe sind insgesamt sieben Materialien vertreten, davon fünf reaktive Kaltasphalte und beide Heißasphalte. Die Spannweite der Ergebnisse liegt hier zwischen 2,15 und 2,96 %.
- Gruppe B (PRD > 3 bis 5 %) umfasst die Materialien mit guter Standfestigkeit. In dieser Gruppe sind fünf Materialien vertreten: drei reaktive Kaltasphalte, ein nicht-reaktiver Kaltasphalt und ein Sonderasphalt. Die Spannweite der Ergebnisse dieser Gruppe liegt zwischen 3,30 und 4,95 %.

- Gruppe C (PRD > 5 bis 10 %) umfasst die Materialien mit geringer Standfestigkeit. In dieser Gruppe sind zwei Materialien (nicht-reaktive Kaltasphalte) vertreten. Die Ergebnisse liegen mit 8,49 und 9,41 % am oberen Gruppengrenzwert dicht bei einander und weisen somit beide eine erhebliche Differenz zu den Ergebnissen der Gruppe B auf.
- Gruppe D (PRD > 10 %) umfasst alle Materialien mit nicht ausreichender Standfestigkeit. In dieser Gruppe sind elf der insgesamt 25 Sanierungsmaterialien vertreten: 9 nicht-reaktive Kaltasphalte, ein reaktiver Kaltasphalt und ein Sonderasphalt. Der Sonderasphalt SA02-0/8 ist hierbei das einzige Material, bei dem der Spurbildungsversuch nach 950 Belastungszyklen aufgrund des Abbruchkriteriums abgebrochen werden musste. Die Bandbreite der Ergebnisse verteilt sich gleichmäßig über die Spannweite der Gruppe.

Die so an insgesamt 25 Sanierungsmaterialien ermittelten Ergebnisse des Spurbildungsversuches sind in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Ergebnisdiagramme der Einzelversuche sind in

Ergebnisse SBV				
Variante	Raum-dichte	WTS	PRD [%]	RD [%]
KR08-0/8	1,997	0,019	2,150	0,860
HA01-0/5	1,975	0,020	2,250	0,900
KR07-0/4	2,008	0,022	2,538	1,015
KR09-0/4	1,997	0,026	2,775	1,110
KR05-0/5	2,303	0,017	2,863	1,145
HA02-0/8	2,401	0,021	2,900	1,160
KR06-0/4	2,205	0,032	2,963	1,185
KR02-0/4	2,303	0,027	3,300	1,320
KR01-0/5	2,226	0,031	3,988	1,595
SA01-0/5	2,040	0,063	4,163	1,665
KR03-0/4	2,046	0,050	4,238	1,695
KN11-0/8	2,226	0,057	4,950	1,980
KN16-0/5	2,073	0,211	8,488	3,395
KN10-0/5	2,197	0,156	9,413	3,765
KN13-0/5	2,024	0,224	11,163	4,465
KN06-0/5	1,981	0,203	11,375	4,550
KR11-0/5	1,921	0,208	11,988	4,795
KN03-2/5	1,928	0,170	13,463	5,385
KN08-0/5	2,025	0,268	14,440	5,760
KN09-0/5	2,000	0,216	14,513	5,805
KN01-0/4	1,870	0,154	15,900	6,360
KN04-0/5	1,794	0,153	16,888	6,755
KN05-0/5	2,265	0,175	17,850	7,140
KN02-0/5	1,831	0,168	18,050	7,220
SA02-0/8	-	-	>20,000	>8,000

Tab. 2: Versuchsergebnisse SBV

Anhang A wiederzufinden. Sie liefern eine deutliche Tendenz für eine höhere Standfestigkeit der reaktiven Kaltasphalte (KR) gegenüber den nicht-reaktiven Kaltasphalten (KN). Auf Grundlage des geringen Stichprobenumfangs der Heißasphalte (HA) lässt sich ableiten, dass diese Materialien ggf. generell sehr gute Standfestigkeiten aufweisen.

3.2 Druckschwellversuche

Im Zuge der labortechnischen Begutachtung wurden zwei verschiedene modifizierte Druckschwellversuche durchgeführt. Die Modifikation der ersten Versuchsreihe betrifft ausschließlich die Prüfkörper. Hierbei wurde der Druckschwellversuch nach DIN EN 12697-25 an Bohrkernen aus Schlaglochplatten durchgeführt (DSV-BK). Bei der zweiten Versuchsreihe wurden mehrere Prüfparameter modifiziert, hierzu wurden Marshall-Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm in einem Stahlring mit der Belastungsfrequenz und -intensität der TP Asphalt-StB Teil 25 B1 geprüft (DSV-M). Im Folgenden werden beide Verfahren ausführlich beschrieben.

3.2.1 Druckschwellversuch an Bohrkernen aus Schlaglochplatten (DSV-BK)

Versuchsbeschreibung

Der „Einaxiale Druckschwellversuch mit Behinderung der Querdehnung“ gem. DIN EN 12697-25 ist ein Versuch, bei dem zylindrische Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser von 150 mm in axialer Richtung, unter homogener Temperaturbeanspruchung, mit zyklischen Druck-Blockimpulsen beansprucht werden. Im Gegensatz zum Druck-Schwellversuch gem. TP Asphalt, Teil 25 B1 (Einaxiale Druckschwellversuch zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme), bei dem Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und eine Lastplatte von ebenfalls 100 mm verwendet werden, bewirkt die unbeanspruchte Kreisringfläche in der Belastungsebene, die sich aus der Differenz zwischen dem Probekörperdurchmesser von 150 mm und dem Durchmesser der Lastplatte von 100 mm ergibt, eine seitliche Stützung. Diese seitliche Stützung stellt einen realistischeren Beanspruchungszustand dar und kommt insbesondere den zu testenden Schlaglochanierungsmaterialien zu Gute, da diese tendenziell eine geringe Steifigkeit aufweisen. In Anlehnung an die TP Asphalt, Teil 25 B1 wurde die Temperatur für den Druckschwellversuch nach DIN EN 12697-25 auf 50 °C festgelegt.

Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt in den ersten Schritten analog zu der in Kapitel 2.6 beschriebenen Vorgehensweise für den Spurbildungsversuch und ist im Folgenden daher nur stichpunktartig nochmals aufgeführt:

1. Erstellung des Musterschlaglochs gemäß Methode V (siehe Kapitel 2.6),
2. Volumenbestimmung des Schlagloches,
3. Berechnung der erforderlichen Einbaumasse des Sanierungsmaterials gemäß Herstellerangaben,
4. Einbau des Sanierungsmaterials mit leichter Überhöhung,
5. Hauptverdichtung mit Walzsektorverdichter.

Die weitergehenden Schritte der Prüfkörperherstellung unterscheiden sich folgendermaßen: Die Asphaltplatte wird ca. 4 Stunden nach der Hauptverdichtung in einer Klimakammer für 2 Stunden bei ca. -20 °C eingefroren, um die Steifigkeit und Festigkeit des Materials für das Entnehmen eines Bohrkerns von 150 mm Durchmesser mittels Bohrkronen zu erhöhen. Der so gewonnene Bohrkern wird oberflächlich abgetrocknet und für die Nachbearbeitung wieder eingefroren. Diese Nachbearbeitung umfasst das planparallele Sägen der Stirnflächen und eine Lufttrocknung über 48 Stunden bis zur Massenkonstanz. Ein so aufbereiteter Prüfkörper ist in Bild 25 dargestellt.

Versuchsdurchführung

Der Prüfkörper wird zur Minimierung der Scherkräfte zwischen Lastplatte und Prüfkörper auf der Oberfläche mit Silikonfett bestrichen. Es folgt das Vortemperieren des Prüfkörpers auf 50 °C für eine Dauer von 4 Stunden. Die eigentliche Versuchsdauer beträgt 2 Stunden, in welcher der Prüfkörper mit 3.600 Belastungsimpulsen von jeweils einer Sekunde Dauer und einer Sekunde Pause belastet wird (entsprechend einer Belastungsfrequenz von 0,5 Hz). Die axialen Verformungen während des Versuchs werden durch zwei Wegmesssysteme (LVDT-Linear Variable Differential Transformer) erfasst. Dieser Versuchsaufbau ist in Bild 26 dargestellt.

Auswertung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse soll entsprechend dem Versuchsaufbau nach der DIN EN

12697-25 erfolgen. Durch die seitliche Stützung wurde erwartet, dass vorwiegend Impuls-Kriechkurven ohne Wendepunkte aufgezeichnet werden. Im Laufe der Versuchsdurchführung zeigte sich allerdings, dass die Ergebnisse stark von der erwarteten Ergebnisstruktur abweichen. Es treten sowohl Kriechkurven ohne Wendepunkt als auch Kriechkurven mit Wendepunkt in etwa gleicher Häufigkeit auf. Daher ist es nicht möglich, die eine oder andere Gruppe als Ausreißer, wie es bei den regulären Versuchsdurchläufen nach der TP und der DIN EN möglich wäre, zu definieren. Problematisch ist ebenfalls, dass diese stark unterschiedlichen Kriechkurvenverläufe nicht ausschließlich bei unterschiedlichen Materialien, sondern oftmals auch bei Prüfkörpern gleicher Materialien auftreten.



Bild 25: Aufbereiteter Prüfkörper für DSV-BK



Bild 26: Versuchsaufbau DSV-BK

Aufgrund dieser großen Bandbreite der Ergebnisse wurde eine umfassende Datenanalyse, die der Herleitung einer Bewertungssystematik und der Ursachenforschung für die differenten Ergebnisse dienen soll, durchgeführt. Ein wesentlicher Grund sind unterschiedlich starke Probekörperschädigungen, die bereits während der Versuchsdurchführung erkennbar waren. Analog zu den Kriechkurvenverläufen zeigte sich auch hier eine große Bandbreite von keiner Schädigung bis zur vollständigen Zerstörung des Prüfkörpers. Zur Herstellung einer geordneten Ergebnisstruktur wurden daher die Kriechkurvenverläufe in Gruppen und die Probekörperschäden in Klassen eingeteilt. Das Einteilen der Kriechkurvenverläufe in Gruppen erfolgte zunächst nach folgenden Kriterien:

1. Vorhandensein eines Wendepunktes,
2. Intensität der Krümmung im Wendepunkt,
3. Prozentualer Anteil der ertragenen Lastwechsel.

Anhand dieser Kriterien lassen sich fünf Gruppen definieren:

- Gruppe A1: Kein Wendepunkt im Kriechkurvenverlauf, geringe Kriechrate und 100 % der Belastungszyklen erreicht.
- Gruppe A2: Wie A1, nur mit höherer Kriechrate.
- Gruppe B: Wendepunkt mit geringer Krümmung im Kriechkurvenverlauf und 100 % der Belastungszyklen erreicht.

- Gruppe C: Wendepunkt mit starker Krümmung im Kriechkurvenverlauf und 100 % der Belastungszyklen erreicht.
- Gruppe D: Prüfkörper, die weniger als 100 % der Belastungszyklen erreicht haben (vorzeitiger Versuchsabbruch).

In Tabelle 3 sind Anzahl der Prüfkörper sowie die Spannweiten der Dehnungen und Kriechraten den jeweiligen Gruppen zugeordnet. Hieraus wird die ungefähre Gleichverteilung der Versuchsergebnisse hinsichtlich des Auftretens oder Ausbleibens eines Wendepunktes in den Kriechkurvenverläufen deutlich. Ohne die Betrachtung der Gruppe D (vorzeitiger Versuchsabbruch) weisen 20 der insgesamt 43 Versuchsergebnisse einen Wendepunkt auf.

Wie bereits erwähnt, zeigen sich diese stark unterschiedlichen Kriechkurvenverläufe nicht nur bei verschiedenen Materialien, sondern auch bei Prüfkörperserien aus einem Material. Exemplarisch können hierfür die Kriechkurven der Variante KN04-0/5 angeführt werden (Bild 27). Als Ursache sind hierfür unterschiedlich starke Schädigungen der Prüfkörper während des Versuches zu nennen. Zur Verifizierung eines Zusammenhanges zwischen Standfestigkeit und Schädigung wurden die Prüfkörper einer visuellen Begutachtung unterzogen und dabei das Ausmaß der Schädigung festgestellt. Zur Einteilung der Prüfkörper in Schadensklassen (SK) wurden alle Rissweiten je Prüfkörper gemessen und die Summe Σ_{Riss} gebildet. Diese

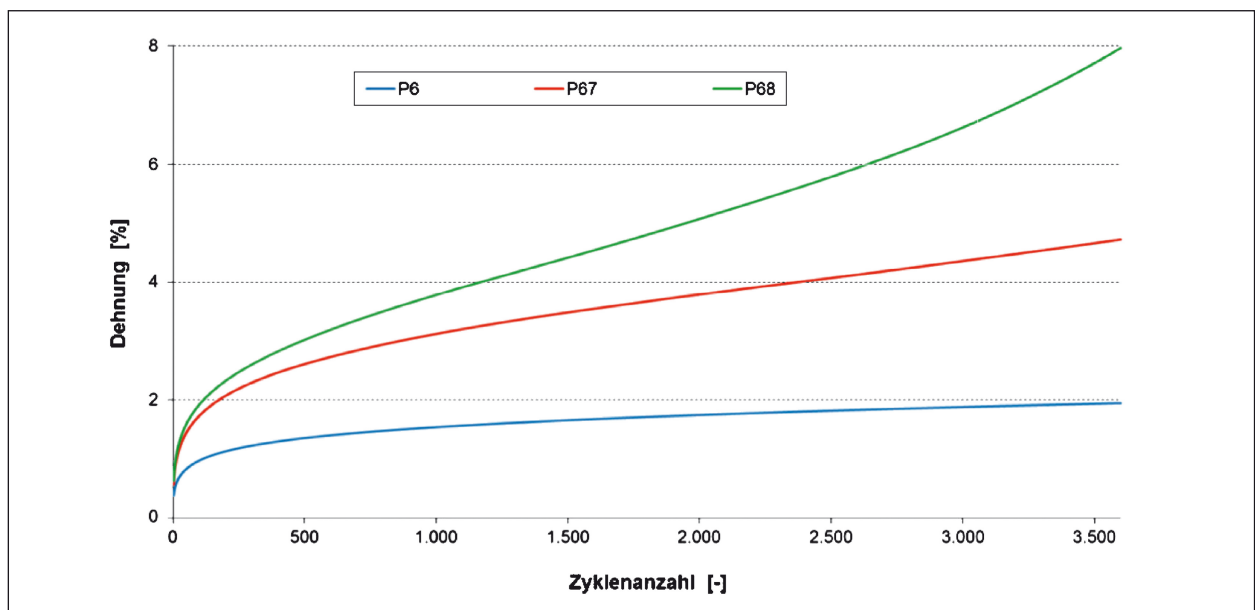


Bild 27: Unterschiedliche Kriechkurvenverläufe einer Materialvariante (KN04-0/5)

Definitionen der Schadensklassen ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Ein weiteres Kriterium zur Feststellung brauchbarer und belastbarer Ergebnisse ergibt sich aus den Präzisionsanforderungen der DIN EN 12697-25. Da diese in der vorliegenden gültigen Fassung nur als Schätzwerte angegeben sind, wurden die Präzisionswerte aus der E DIN EN 12697-25: 2013-11, die durch einen Ringversuch ermittelt wurden, herangezogen. Auf Grundlage dieses Kriteriums lassen sich die Ergebnisse der Materialprüfserien in zulässige und nicht zulässige Ergebnisse einteilen.

Gruppe	Anzahl	Dehnungen		Kriechraten	
		ϵ_{min} [-]	ϵ_{max} [-]	$f_{c,min}$ [$\mu\text{m}/\text{Zyklus}$]	$f_{c,max}$ [$\mu\text{m}/\text{Zyklus}$]
Gruppe A1	14	1,95	3,19	0,08	0,31
Gruppe A2	9	4,03	5,66	0,29	0,74
Gruppe B	8	4,68	6,46	0,31	0,9
Gruppe C	12	6,61	11,75	0,75	1,32
Gruppe D	8	12,19	18,15	1,12	5,65

Tab. 3: Grenzwerte der Kriechkurvengruppen

Klasse	Σ_{Riss} [mm]	Beschreibung
SK 0	0	keine Schäden erkennbar
SK 1	1-5	überwiegend mehrere kleine Risse
SK 2	5-10	kleine und mittlere Risse
SK 3	10-20	mehrere kleine und/oder mittlere Risse und teilweise große Risse
SK 4	20-30	überwiegend große Risse und teilweise mittlere Risse
SK 5	>30	komplett zerstört durch mehrere große Risse

kleine Risse: bis 5 mm, mittlere Risse: 5 bis 10 mm, große Risse: größer 10 mm

Tab. 4: Definitionen der Schadensklassen

Insgesamt wurden mit 21 verschiedenen Sanierungsmaterialien 26 Materialprüfserien mit jeweils zwei Prüfkörpern hergestellt. Die zulässigen Prüfergebnisse sind in Tabelle 5 und die nicht zulässigen Prüfergebnisse in Tabelle 6 dargestellt. Anhand der Tabelle 3 wird ersichtlich, dass die Versuchsergebnisse der Probekörper der einzelnen Varianten sich jeweils in der gleichen Kriechkurvengruppe befinden. Ebenfalls auffällig ist, dass hier überwiegend Kriechkurvenverläufe ohne Wendepunkte (Gruppe A1 und A2) vorzufinden sind. Eine Ausnahme stellt die Variante KR06-0/4 dar, deren Kriechkurvenverlauf der Gruppe B zugeordnet ist. Die Kriechkurvengruppen C und D sind nicht wiederzufinden.

Bezüglich der Schadensklassen lässt sich ein gleiches Verhalten der Versuchsergebnisse beobachten. Die Versuchsergebnisse der jeweiligen Varianten liegen (bis auf zwei Ausnahmen) in der gleichen Schadensklasse. Ausnahmen sind die Varianten KN06-0/5 und KN02-0/5(b), deren jeweiligen Ergebnisse um eine Klasse differieren. Überwiegend vertreten sind die Schadensklassen SK 0 bis SK 2.

Die Gruppe der nicht zulässigen Ergebnisse ist in Tabelle 6 wiedergegeben. Hieraus wird ersichtlich, dass die häufigsten Ursachen für ein nicht zulässiges Ergebnis die Einstufung beider Probekörper in

	Variante		PK	KG	SK	p_M	$n\%$	ϵ_{Ende}	$n_{WVP\%}$	ϵ_{WVP}	f_c
Zulässige Ergebnisse (nach E DIN EN 12697-2013)	KN02-0/5	(b)	P8	A1	0	2,500	100,0	1,99	0.0	0.	0,08
	KN02-0/5	(b)	P7	A1	1	2,500	100,0	2,28	0.0	0.	0,11
	SA01-0/5		P66	A1	0	2,000	100,0	2,64	0.0	0.	0,11
	HA01-0/5		P45	A1	0	2,017	100,0	2,67	0.0	0.	0,16
	HA01-0/5		P46	A1	0	2,017	100,0	2,78	0.0	0.	0,22
	SA01-0/5		P65	A1	0	2,000	100,0	3,02	0.0	0.	0,15
	KN06-0/5		P10	A1	2	2,409	100,0	3,06	0.0	0.	0,28
	KN06-0/5		P9	A1	1	2,409	100,0	3,09	0.0	0.	0,19
	KN02-0/5	(a)	P42	A2	3	2,500	100,0	4,03	0.0	0.	0,50
	KN02-0/5	(a)	P41	A2	3	2,500	100,0	4,21	0.0	0.	0,43
	KN01-0/4		P24	A2	3	2,500	100,0	4,86	0.0	0.	0,47
	HA02-0/8		P63	A2	0	2,410	100,0	5,00	0.0	0.	0,40
	KN01-0/4		P23	A2	3	2,500	100,0	5,04	0.0	0.	0,49
	KR06-0/4		P32	B	2	2,500	100,0	5,38	43,9	3,79	0,76
	HA02-0/8		P64	A2	0	2,410	100,0	5,66	0.0	0.	0,42
	KR06-0/4		P31	B	2	2,500	100,0	6,04	71,3	5,16	0,84

Tab. 5: Zulässige Ergebnisse des DSV-BK

eine hohe Schadensklasse (≥ 4) oder eine Differenz von mindestens zwei Schadensklassen zwischen den Prüfkörpern sind. Eine Ausnahme hiervon bilden die Varianten KR02-0/4 und KR11-0/5, bei denen jeweils eine Kriechkurve der Gruppe B und C zugeordnet ist. Die daraus resultierende Dif-

ferenz der bleibenden Verformung am Ende des Versuches führt zu einem nicht zulässigen Ergebnis. Eine weitere Ausnahme stellen die Varianten KN08-0/5 und KN10-0/5 dar. Die Kriechkurvenverläufe beider Varianten sind der Gruppe A1 zugeordnet und die Prüfkörper weisen nur geringe Schäd-

	Variante		PK	KG	SK	p_M	$n\%$	ϵ_{Ende}	$n_{\text{WP}\%}$	ϵ_{WP}	f_c
Zulässige Ergebnisse (nach E DIN EN 12697-2013)	KN03-2/5	(a)	P19	C	2	2,000	100,0	7,21	50,0	5,55	0,75
	KN03-2/5	(a)	P20	C	4	2,000	100,0	8,94	36,4	5,31	1,04
	KN03-2/5	(b)	P51	C	4	2,000	100,0	9,66	39,2	4,92	1,28
	KN03-2/5	(c)	P60	A1	1	2,500	100,0	3,19	0,0	0.	0,20
	KN03-2/5	(c)	P59	A2	3	2,500	100,0	4,44	0,0	0.	0,53
	KN03-2/5	(d)	P57	A2	2	2,500	100,0	4,62	0,0	0.	0,49
	KN04-0/5		P6	A1	0	2,250	100,0	1,95	0,0	0.	0,11
	KN04-0/5		P67	B	2	2,250	100,0	4,72	64,1	3,96	0,56
	KN04-0/5		P68	C	4	2,250	100,0	7,97	37,5	4,23	1,25
	KN07-0/3		P18	C	2	2,500	100,0	7,19	62,1	5,68	0,84
	KN07-0/3		P17	D	5	2,500	91,4	12,19	33,6	4,34	1,12
	KN08-0/5		P14	A1	0	2,000	100,0	2,42	0,0	0.	0,15
	KN08-0/5		P13	A1	1	2,000	100,0	3,18	0,0	0.	0,29
	KN09-0/5		P15	B	1	2,000	100,0	6,46	64,8	5,35	0,82
	KN09-0/5		P16	D	5	2,000	95,0	13,58	32,1	5,42	1,55
	KN10-0/5		P11	A1	1	2,500	100,0	2,18	0,0	0.	0,13
	KN10-0/5		P12	A1	0	2,500	100,0	2,66	0,0	0.	0,17
	KN11-0/8		P29	C	4	2,500	100,0	7,28	50,7	4,63	1,14
	KN11-0/8		P30	D	5	2,500	99,8	15,30	32,3	4,49	1,84
	KN15-0/5		P71	C	4	2,500	100,0	8,45	53,3	5,45	1,32
	KN15-0/5		P73	C	4	2,500	100,0	11,75	37,9	4,9	1,25
	KR01-0/5		P28	D	5	2,000	62,9	18,15	21,5	6,48	2,90
	KR01-0/5		P27	D	5	2,000	37,7	15,00	14,9	6,85	5,65
	KR02-0/4		P49	B	3	2,500	100,0	5,54	50,2	3,93	0,83
	KR02-0/4		P50	C	3	2,500	100,0	7,14	35,1	3,69	1,14
	KN03-0/4	(a)	P25	D	5	2,000	91,3	14,62	31,0	4,18	1,29
	KR03-0/4	(a)	P26	D	5	2,000	65,9	15,46	21,7	5,5	2,53
	KR03-0/4	(b)	P53	C	3	2,000	100,0	6,61	43,1	4,24	0,89
	KR03-0/4	(b)	P54	C	5	2,000	100,0	8,70	42,8	4,89	1,12
	KR04-0/5		P22	A2	0	2,000	100,0	4,82	0,0	0.	0,31
	KR04-0/5		P21	B	2	2,000	100,0	6,10	70,1	5,3	0,72
	KR05-0/5		P56	B	1	2,000	100,0	6,42	57,8	4,85	0,90
KR05-0/5		P55	D	5	2,000	72,1	15,33	27,3	5,98	2,32	
KR11-0/5		P62	B	3	2,500	100,0	5,62	66,1	4,65	0,74	
KR11-0/5		P61	C	4	2,500	100,0	8,21	51,9	5,49	1,31	

Tab. 6: Nicht zulässige Ergebnisse des DSV-BK

den (SK 0 und SK 1) auf. Trotzdem sind die Differenzen ausreichend groß, sodass das Präzisionskriterium nicht erfüllt werden kann.

Aufgrund der unterschiedlichen Schadensdifferenzen in den Gruppen der zulässigen Ergebnisse und nicht zulässigen Ergebnisse ist erkennbar, dass die Schädigung der Prüfkörper ein maßgebliches Problem hinsichtlich der Reproduzierbarkeit brauchbarer Versuchsergebnisse darstellt. Eine abschließende Bewertung der Sanierungsmaterialien ist mit diesem Verfahren daher nicht möglich.

3.2.2 Druckschwellversuch an Marshall-Probekörpern (DSV-M)

Aufgrund der Schwierigkeiten mit dem DSV-BK reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurde der nachfolgend beschriebene Druckschwellversuch an Marshall-Probekörpern mit vollständiger Behinderung der Querdehnung (DSV-M) entwickelt.

Versuchsbeschreibung

Der Versuchsaufbau entspricht weitgehend dem der DIN EN 12697-25. Die Prüfkörper haben einen Durchmesser von 150 mm, die Lasteinleitung erfolgt über den gefasten Laststempel nach DIN EN 12697-25. Die seitliche Stützung der homogenen Prüfkörper erfolgt durch einen Stahlring. Die Belastungsfunktion und -frequenz entspricht der Druckschwellprüfung nach der TP Asphalt-StB Teil 25 B1, hierbei wird der Prüfkörper bei isothermem Versuchsablauf einer haversine-impulsförmigen Belastung mit Lastpausen ausgesetzt. Zum Zweck einer stärkeren Differenzierung der Versuchsergebnisse wurden die Belastungsfunktion und -frequenz nach der TP Asphalt-StB gewählt.

Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper mit einem Durchmesser von 150 mm erfolgte im Marshall-Verdichter. Aus Vorversuchen ist bekannt, dass sich bei der Verdichtung von Kaltasphalten im Marshall-Verdichter eine Raumdichte von ungefähr $2,0 \text{ g/cm}^3$ einstellt. Für die Einwaage des Kaltasphaltes wurde daher die Raumdichte von $2,0 \text{ g/cm}^3$ als Ausgangswerte für die iterative Annäherung an die erforderliche Prüfkörperhöhe von (60 ± 2) mm festgelegt. Nach dem Verdichten wurden die Prüfkörper für ca. 24 Stunden in einem Wärmeschrank bei 30 °C gelagert und anschließend aus der Verdichtungsform entnommen. Der Druckschwellversuch erfolgt nach

weiteren 24 Stunden Lagerung bei 30 °C . Unmittelbar vor der Prüfung wird der Prüfkörper in einen Stahlring eingelegt, der die vollständige Behinderung der Querdehnung während der Versuchsdurchführung bewirkt.

Versuchsdurchführung

Vor dem Versuchsbeginn werden die Prüfkörper gemäß DIN EN 12697-25 für 4 Stunden auf die Prüftemperatur von 50 °C temperiert und anschließend in die Belastungseinrichtung (siehe Bild 28) eingebaut. Zur Vermeidung von Scherkräften wird die Prüfkörperunterseite mit Silikonfett bestrichen und zwischen Laststempel und Prüfkörperoberseite ein teflonbeschichtetes Papier eingelegt.

Der Druckschwellversuch beginnt mit dem Aufbringen der Vorbelastung ($0,025 \text{ MPa}$) über eine Dauer von 120 Sekunden. Im Anschluss an die Vorbelastung erfolgt die zyklische Impulsbelastung mit 10.000 Belastungszyklen entsprechend der TP Asphalt-StB Teil 25 B1. Die bleibende Verformung wird hierbei kontinuierlich durch LVDT (Linear Variable Differential Transformer) aufgezeichnet.

Auswertung

Die Ergebnisse des DSV-M liefern erwartungsgemäß eine einheitlichere Ergebnisstruktur hinsichtlich der Kriechkurvenverläufe, d. h. es treten ausschließlich Kriechkurven ohne Wendepunkte auf. Im Gegensatz zum Spurbildungsversuch (SBV) ist beim DSV-M keine tendenziell höhere Standfestigkeit der reaktiven Kaltasphalte (KR) gegenüber nicht-reaktiven Kaltasphalten (KN) zu erkennen. Tabelle 7 enthält eine Übersicht der Versuchsergebnisse. Diagramme der Einzelversuche sind in Anhang B enthalten.

Die Auswertung der Ergebnisse des DSV-M erfolgt anhand der bleibenden Verformung (Dehnung) und der Kriechrate. Hierzu wurden die Ergebnisse in vier Gruppen eingeteilt:

- Gruppe A umfasst Materialien mit geringen bleibenden Verformungen (bis $1,4 \%$) und Kriechraten unter $0,01 \text{ } \mu\text{m/m/Belastungsimpuls}$. In dieser Gruppe sind drei reaktive Kaltasphalte sowie ein normaler Kaltasphalt, ein Sonderasphalt und ein Heißmischgut vertreten. Der Sonderasphalt SA01-0/5 weist dabei mit einer Dehnung von $0,40 \%$ die beste Standfestigkeit auf.

- Gruppe B umfasst Materialien mit Dehnungen > 1,4 bis 2,3 % und Kriechraten > 0,01 bis 0,02 $\mu\text{m}/\text{m}$ / Belastungsimpuls. In diese Gruppe fallen insgesamt 14 Materialien, davon jeweils

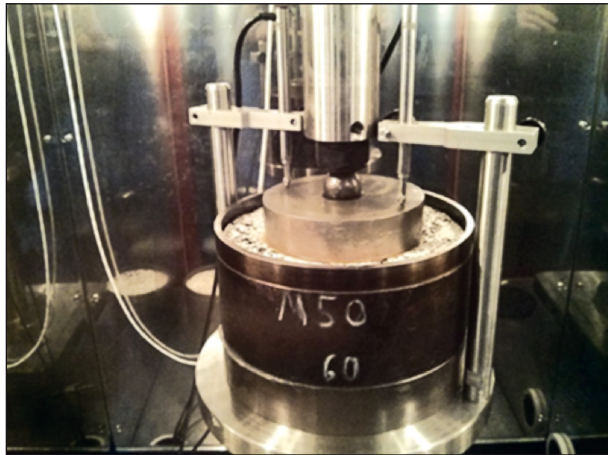


Bild 28: Versuchsaufbau DSV-M

Ergebnisse DSV-M			
Variante	Raumdichte [g/cm ³]	ϵ [%]	f_c [$\mu\text{m}/\text{Zyklus}$]
SA01-0/5	2,040	0,4025	0,0028
KN16-0/5	2,073	0,9730	0,0024
KR09-0/4	1,997	1,2246	0,0085
KR08-0/8	1,997	1,3097	0,0090
HA01-0/5	1,975	1,3994	0,0068
KR03-0/4	2,046	1,4322	0,0109
KR07-0/4	2,008	1,4375	0,0136
KR05-0/5	2,303	1,5851	0,0156
KN05-0/5	2,265	1,6473	0,0101
KN11-0/8	2,226	1,6771	0,0104
KN06-0/5	1,981	1,6945	0,0159
KR01-0/5	2,226	1,7394	0,0132
KN10-0/5	2,197	1,8005	0,0120
KN03-2/5	1,928	2,1032	0,0139
KN08-0/5	2,025	2,2012	0,0152
KR11-0/5	1,921	2,2492	0,0126
KR06-0/4	2,205	2,3271	0,0236
KN13-0/5	2,024	2,4006	0,0263
KN01-0/4	1,870	2,4101	0,0200
KN09-0/5	2,000	2,8600	0,0286
KN04-0/5	1,794	3,2986	0,0278
KN02-0/5	1,831	3,9705	0,0158
KR02-0/4	2,303	4,2009	0,1039
HA02-0/8	2,401	9,6828	0,4451
SA02-0/8	-	-	-

Tab. 7: Versuchsergebnisse DSV-M

sieben reaktive bzw. nicht-reaktive Kaltasphalte. Die Ergebnisse weisen eine Streuung der Materialart über die gesamte Gruppe auf. Die besten Ergebnisse der Gruppe werden von drei reaktiven Kaltasphalten gestellt, gefolgt von drei nicht-reaktiven Kaltasphalten.

- Gruppe C umfasst Materialien mit Dehnungen > 2,3 bis 3,0 % und Kriechraten > 0,2 bis 0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$ / Belastungsimpuls. Diese Gruppe beinhaltet vier Sanierungsmaterialien, davon ein reaktiver Kaltasphalt.
- Gruppe D weist Ergebnisse mit hohen Dehnungen > 3,0 % und stark voneinander abweichenden Kriechraten auf. Die Ergebnisse dieser Gruppe haben Spannweite der Dehnungen von 3,1 bis 9,7 %. Die Kriechraten liegen innerhalb einer Spannweite von 0,01 bis 0,45 $\mu\text{m}/\text{m}$ Belastungsimpuls. Die Variante HA02-0/8 weist mit einer Dehnung von 9,683 % und einer Kriechrate von 0,445 $\mu\text{m}/\text{m}$ Belastungsimpuls nicht nur das schlechteste Ergebnis der Gruppe D, sondern auch das schlechteste Ergebnis der gesamten Versuchsreihe.

3.3 Direkter Zugversuch

Versuchsbeschreibung

Der direkte Zugversuch dient der Ermittlung der Zugfestigkeit und der Ausfalldehnung in Abhängigkeit der Prüftemperatur. Dazu wird ein Prisma mit den Maßen 40 x 40 x 160 mm mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit (6,25 %/min) und konstanter Temperatur in jedem Einzelversuch gestreckt.

Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung des Vorversuchsprüfkörpers erfolgt zunächst analog zu Kapitel 3.1 mit den Arbeitsschritten 1 bis 5, d. h.:

1. Erstellung des Musterschlaglochs gemäß Methode V (siehe Kapitel 2.6),
2. Volumenbestimmung des Schlagloches,
3. Berechnung der erforderlichen Einbaumasse des Sanierungsmaterials gemäß Herstellerangaben,
4. Einbau des Sanierungsmaterials mit leichter Überhöhung,
5. Hauptverdichtung mit Walzsektorverdichter.

Anschließend wurde die Platte bei etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingefroren und ein planparalleles Prisma mit den oben genannten Maßen gesägt. Dabei ist darauf geachtet worden, dass die Basisplatte vollständig abgetrennt wird, das Prisma also im gesamten



Bild 29: Prüfkörper nach direktem Zugversuch

Querschnitt an den Enden aus Walzasphalt und in der Mitte aus Kaltasphalt besteht. Danach wird der so gewonnene Prüfkörper bis zur Massekonstanz luftgetrocknet und mittels eines Spezialklebstoffs an zwei Adapterplatten geklebt. Da das Prisma mit dem Kaltasphalt-Kern bei Raumtemperatur extrem empfindlich und instabil ist, musste das Ankleben der Adapterplatten entgegen den Herstellerangaben des Klebstoffs im tiefgefrorenen Zustand erfolgen. Ein zerstörter Prüfkörper nach der Durchführung des direkten Zugversuchs ist in Bild 29 dargestellt. Beim dem erkennbaren Wasser handelt es sich um Kondenswasser, welches erst nach Beendigung des Versuchs auftritt.

Versuchsergebnisse

Das Ergebnis des Vorversuchs mit Kaltasphalt der Variante KN01-0/4 kann dem Bild 30 entnommen werden. Die rote Kurve repräsentiert den von der Versuchszeit abhängigen Spannungsverlauf und die blaue Kurve den Verformungsverlauf.

Auswertung

Der im Rahmen von Vorversuchen durchgeführte direkte Zugversuch an einem nicht-reaktiven Kaltasphalt bei einer Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigte eine um den Faktor 30 geringere Zugfestigkeit als ein üblicher Walzasphalt, verbunden mit ca. 4 Mal höhere Bruchdehnung. Dies zeigt, dass bereits geringe Zugkräfte sehr große Verformungen hervorrufen können. Daraus resultieren Probleme nicht

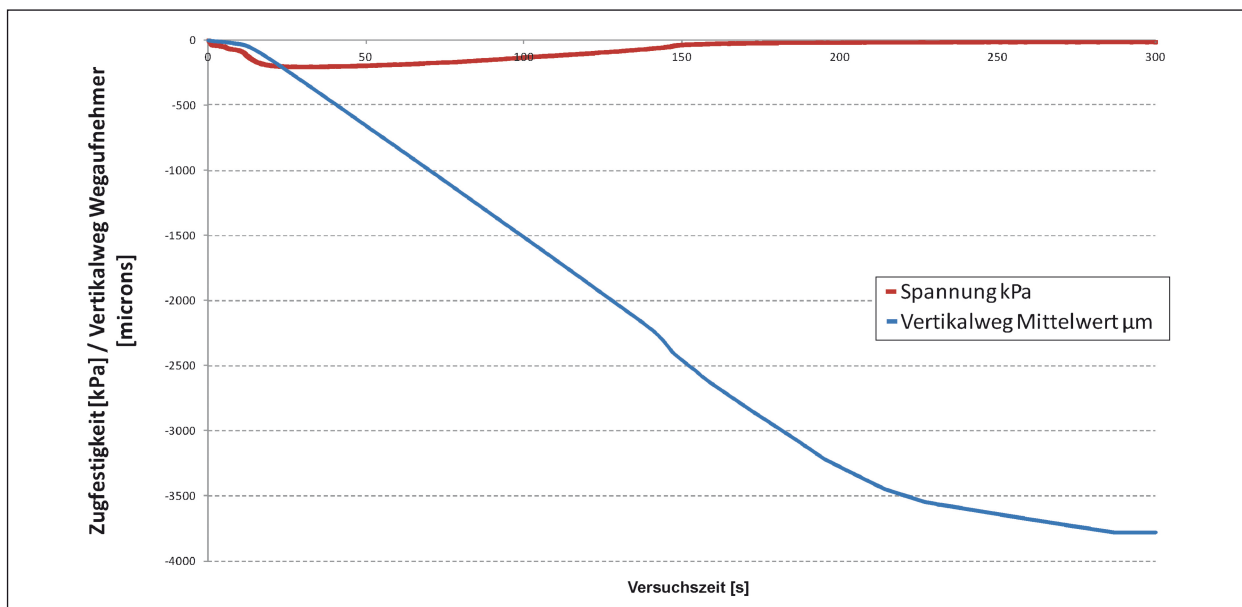


Bild 30: Direkter Zugversuch an einer Materialvariante

nur hinsichtlich der Prüfkörperherstellung (Handhabung und etwaige Schädigung der sehr empfindlichen Prüfkörper), sondern auch hinsichtlich der Versuchsgenauigkeit und der unzureichenden Differenzierungsmöglichkeit der Prüfergebnisse.

Aus diesem Grund wird das Versuchsverfahren des direkten Zugversuchs nur für diejenigen Schlaglochsaniierungsmaterialien empfohlen, welche auf dem Prinzip von Heißmischgütern basieren. Im Ergebnis erscheint es zur generellen Bewertung von Materialien zur Schlaglochsaniierung ungeeignet und wird daher nicht weiter verfolgt.

4 Großversuche

4.1 Rundlaufanlage

Die Durchführung von Großversuchen erfolgte mittels einer sogenannten Rundlaufanlage. Die Rundlaufanlage der STUVA besteht aus einer 10 m langen, horizontalen Achse mit je einem Lkw-Rad an beiden Enden (siehe Bild 31). Mittels dieser Lkw-Räder wird die ca. 31,4 m lange Testfahrbahn überrollt, die aus 16 einzelnen trapezförmigen Elementen zusammengesetzt ist. Die Achse wird in der Mitte nicht abgestützt, jedoch durch einen Drehturm geführt. Dieser Drehturm wird über einen Drehkranz durch einen Elektromotor mit Getriebe angetrieben, sodass die Radachse entsprechend rotiert. Dies bedeutet, dass die Lkw-Räder selbst nicht angetrieben werden, sondern frei mitlaufen. Unter der horizontalen Achse ist innerhalb des Drehturbereichs eine Hubhydraulik angeordnet, um u. a. die horizontale Achse zur Verringerung des Widerstands beim Anfahren anheben zu können.



Bild 31: Rundlaufanlage der STUVA

Die Belastung pro Rad beträgt durch mittig auf der Achse positionierte Totlast 50 kN (5,0 t). Die Geschwindigkeit der Räder kann bei Radlasten von 5 t (Lkw-Betrieb) etwa zwischen 15 und 100 km/h stufenlos vorgewählt werden. Die Räder sind mit Kontermuttern und Splinten sowie durch einen Radfangkorb gesichert. Der Radfangkorb soll im Falle einer Beschädigung des Reifens dabei helfen, sich lösende Teile festzuhalten, damit diese nicht andere Anlagenteile beschädigen. Im Falle eines geplatzten Reifens wird die Lastachse von den beiden Hydraulikzylindern am Drehturm aufgefangen, sodass die Felge nicht auf die Fahrbahn aufschlägt und diese beschädigt. Entsprechendes muss unbedingt vermieden werden, da der Zustand der sanierten Asphaltoberfläche das wesentliche Beurteilungskriterium für die Leistungsfähigkeit der Sanierungsmaterialien darstellt.

Die Räder an den Enden der horizontalen Achse sind mit Reifen unterschiedlicher Profile bestückt, um Aufwölbungen der Fahrbahn im Bereich der Längsrillen möglichst gering zu halten. Beide Reifentypen haben die Größe 445/65 R 22,5; die Räder sind starr an der Radnarbe befestigt (siehe Bild 32). Über Linearführungen kann sich das Rad in vertikaler Richtung verschieben, was ein Überfahren auch von unebenen Fahrbahnen mit Schlaglöchern gestattet. Zwischen Radaufhängung und Achse ist, wie bei einem Lkw, ein Luft-Feder-System (Balg) angeordnet, um die Rad- und Achsmasse schwingungstechnisch voneinander zu entkoppeln und so Resonanzschwingungen zu reduzieren. Ferner sind an jedem Rad zwei Öldruckstoßdämpfer angeordnet, um die Schwingungsenergie abzubauen, die in erster Linie durch Fahrbahnunebenheiten und das Reifenprofil hervorgerufen wird.



Bild 32: Radaufhängung der Rundlaufanlage

Die Testfahrbahn der Rundlaufanlage kann zur Simulation der an der Fahrbahn auftretenden thermischen Beanspruchung auf Temperaturen zwischen ca. -20 °C und $+50\text{ °C}$ eingeregelt werden. Das zur Verfügung stehende System ermöglicht zum einen die Temperierung der Luft im Versuchsraum und zum anderen die Temperierung der Fahrbahn von unten. Die Temperierung der Luft im Versuchsraum erfolgt mittels drei sogenannter Deckenverdampfer, die in etwa eine 60-fache Luftumwälzung pro Stunde erlauben. Durch diese hohe Luftumwälzungsrate wird sichergestellt, dass sich nur geringe Lufttemperaturunterschiede im Versuchsraum einstellen. Ferner können Temperaturänderungen, wie sie innerhalb der einzelnen Temperaturzyklen auftreten, in relativ kurzer Zeit realisiert werden.

Um den Asphalt auch von unten zu temperieren, können unter jedem einzelnen Fahrbahnfeld Wärmetauscherplatten angeordnet werden. Eine spezielle Soleflüssigkeit durchströmt diese mäanderförmig; die Temperatur der Sole kann wie bei der Temperierung der Luft zwischen ca. -20 °C und $+50\text{ °C}$ eingeregelt werden. Die Temperatur von Luft und Wärmetauscherplatten kann unabhängig voneinander festgelegt werden, sodass auch Temperaturgradienten innerhalb der Fahrbahn simuliert werden können. Aufgrund des gewählten Temperaturbereichs von lediglich -10 °C bis $+10\text{ °C}$ (siehe Kapitel 4.4) war keine Temperierung der Fahrbahn von unten erforderlich.

4.2 Herstellung der Versuchsfelder

Die Fahrbahnplatten für die Versuchsfelder wurden durch ein Straßenbauunternehmen und nicht in Eigenleistung hergestellt, um eine qualitativ hochwertige Ausführung sicherzustellen. Der Fahrbahnaufbau bestand aus folgenden Schichten:

- 12 cm Asphaltbinderschicht (AC 16 B S),
- 4 cm Asphaltdeckschicht (AC 11 D S).

Zunächst wurden trapezförmige Trägerplatten aus 15 mm dickem Stahlblech in zwei Bahnen auf den Betonstrich gelegt. Diese waren jeweils etwa 22 m lang, wobei sich den eigentlichen Fahrbahnplatten (acht Stück à ca. 2,0 m) Vor- und Nachlaufbereiche von etwa 3,0 m Länge anschlossen, in denen sich die Fertigerbohle zunächst in ihrer Höhe einregeln konnte. Um einen optimalen Verbund der Trägerplatten mit dem Asphalt zu erreichen, waren zum einen mehrere Vierkantprofile aufgeschweißt. Zum ande-

ren wurden die Platten mit Epoxidharz eingestrichen und mit Sand abgestreut. Des Weiteren wurden die besandeten Trägerplatten vor dem Asphaltieren mittels Bitumen-Haftkleber eingesprüht.

Um ein Verrutschen der Fahrbahnplatten beim Asphaltieren zu verhindern, wurden diese mittels zwei Lagen überlappender Kanthölzer (Querschnitt $76 \times 76\text{ mm}$) unter Verwendung von M16-Gewindestangen miteinander verbunden. Die Kanthölzer dienten zugleich als seitliche Schalung bei Einbau und Verdichtung des Mischgutes.

Der Einbau von Binder- und Deckschicht erfolgte mithilfe eines Straßen- bzw. Gehwegfertigers, dessen Breite auf ca. 120 cm eingestellt wurde. Innerhalb der Vor- und Nachlaufbereiche stellte sich die jeweils angestrebte Soll-Schichtdicke ein, sodass die Trägerplatten insgesamt gleichmäßig mit Asphalt überdeckt waren. Binder- und Deckschicht wurden mittels Vibrationswalze und Rüttelplatte verdichtet.



Bild 33: Seitliche Schalung



Bild 34: Vorbehandlung der Trägerplatten

Das Herstellen der Schlaglöcher erfolgte gemäß dem in Kapitel 2.6 entwickelten Verfahren unter Verwendung eines Substitutionskörpers mit 36 mm Stärke und 30 cm Durchmesser (bezogen auf die halbe Höhe des Holzkörpers bzw. halbe Tiefe des Schlaglochs). Diese Substitutionskörper wurden in die Binderschicht eingedübelt, wofür diese jedoch zunächst auf ca. 50 °C abkühlen musste, um eine ausreichende Festigkeit zu bieten. Sie waren so angeordnet, dass je Platte ein später verfülltes Schlagloch in der Systemachse der Rundlaufanlage liegt (d. h. mittig überrollt wird) und eines mit einer Exzentrizität von ca. 10 cm (entsprechend einem Drittel des Schlaglochdurchmessers) überrollt wird.

Anschließend wurde die Deckschicht über die Substitutionskörper aus Holz asphaltiert und ebenfalls wie die Binderschicht mittels Vibrationswalze und Rüttelplatte verdichtet. Nach dem Abkühlen der Deckschicht auf etwa 70 bis 80 °C wurden die Sub-

stitutionskörper von oben her freigelegt und drei Ösen eingeschraubt. Über diese konnte unter Verwendung eines Gurtes ein gleichmäßiges vertikales Ziehen erfolgen, sodass schließlich die gewünschten Musterschlaglöcher vorlagen.

Etwa zwei Wochen nach dem Asphaltieren wurden die durchgängig hergestellten Asphaltbahnen mittels Trennscheibe entsprechend der Geometrie der trapezförmigen Trägerplatten geschnitten. Anschließend wurden die einzelnen Fahrbahnfelder mittels Kranbahn und einer speziellen Traverse in den Versuchsraum verfahren und mit dem Hallenboden verschraubt. Auf diese Weise entsteht eine kreisringförmige Testfahrbahn mit ca. 2 bis 5 cm breiten Fugen zwischen den einzelnen Fahrbahnfeldern. Diese wurden bis zur Oberkante der Deckschicht mit Fugenvergussmasse verfüllt, um die Fahrbahn einerseits weiter zu fixieren und andererseits durch die Fugen bedingte Unebenheiten weitgehend auszugleichen.



Bild 35: Einbau der Binderschicht



Bild 37: Fahrbahnplatten mit Musterschlaglöchern



Bild 36: Schlagloch-Schablonen



Bild 38: Schneiden der Fahrbahnplatten

4.3 Einbau der Sanierungsmaterialien in die Versuchsfelder

Der Einbau der Sanierungsmaterialien in die Versuchsfelder in der Rundlaufanlage erfolgte weitgehend entsprechend dem Einbau in die Schlaglochplatten im Labormaßstab, wie in Kapitel 3.1 unter Herstellung der Prüfkörper beschrieben. Hierzu wurde in einem ersten Schritt das Volumen der Schlaglöcher nach dem Flüssigkeitsersatz-Verfahren bestimmt. Nach einer Sättigungsphase von ca. 30 Minuten wurde das Schlagloch geleert und anschließend der Wasserspiegel mittels Messbrücke auf die Schlaglochrandhöhe eingestellt. Die eingefüllte Wassermenge wurde über die Differenz mittels Wägungen ermittelt und entspricht hinreichend genau dem Volumen eines Schlaglochs.

Die erforderliche Einbaudichte der Sanierungsmaterialien wurde mittels Raumdichtebestimmung an Marshallprobekörpern ermittelt. Da eine Wasserlagerung der Marshallprobekörper aus normalen Kaltasphalten nicht möglich ist – diese sind nicht standfest und zerfallen –, wurde zur Raumdichtebestimmung das Verfahren D „Raumdichte durch Ausmessen“ der TP Asphalt-StB Teil 6 angewendet.

Die erforderliche Einbaumasse je Schlagloch ergibt sich aus der Multiplikation des Schlaglochvolumens mit der Einbaudichte des einzubauenden Sanierungsmaterials. Nach dem Abwiegen der Einbau-

masse wird das Sanierungsmaterial lose in das Schlagloch eingefüllt und mit einer Schaufel gleichmäßig verteilt und leicht angedrückt. Im Anschluss wird das so verfüllte Schlagloch mit einer vorbituminierten Gesteinskörnung der Korngröße 1 bis 3 mm abgestreut und mit einer Rüttelplatte 30 Sekunden verdichtet.

Auffällig ist, dass trotz mechanischer Verdichtung mittels Rüttelplatte keine vollständige Verdichtung bis auf die Höhe des Walzasphaltes, d. h. Oberkante der ungeschädigten Fahrbahn erreicht werden konnte. Im Allgemeinen wurde eine Überhöhung von 7 bis 10 mm gemessen, sodass die angestrebte Einbaudichte (Marshallraumdichte) des eingebauten Sanierungsmaterials nicht erreicht werden konnte.



Bild 40: Einbau der Sanierungsmaterialien

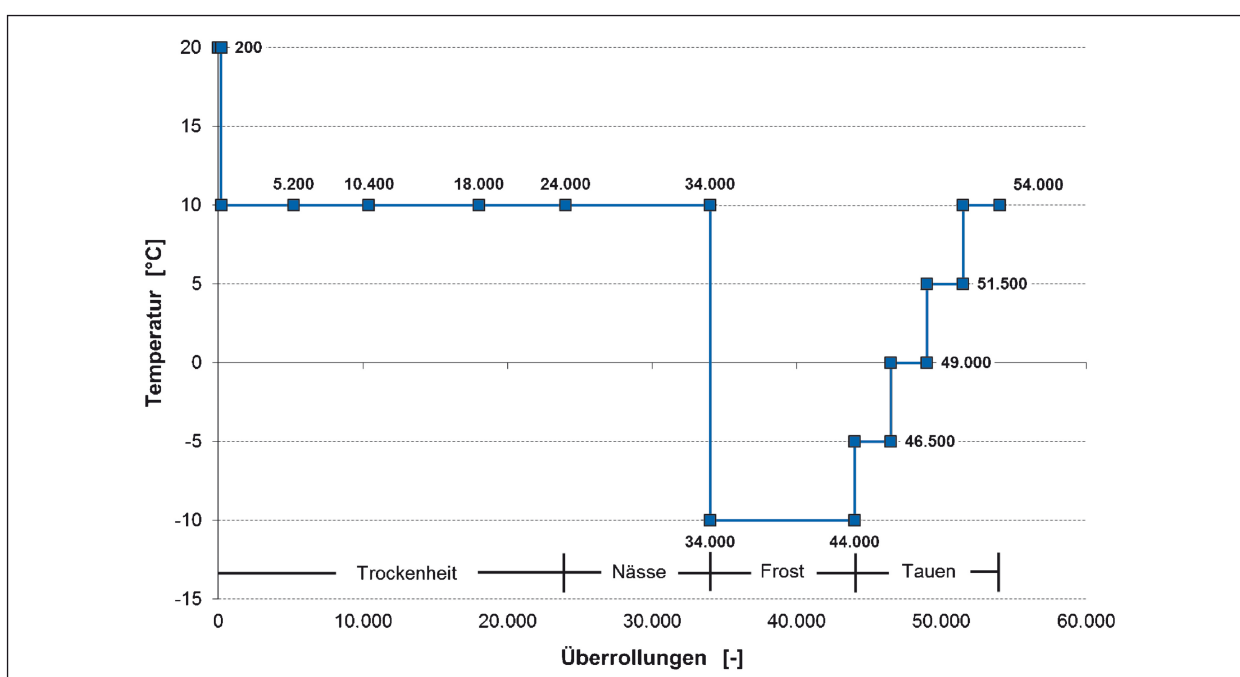


Bild 39: Temperaturzyklen im Großversuch

4.4 Durchführung der Großversuche

Grundgedanke der Überrollungsversuche mittels Rundlaufanlage ist es, die Belastungsverhältnisse aus der Realität bestmöglich abzubilden. Vor dem Hintergrund, dass im Rahmen des Projekts ein besonderer Fokus auf Schlaglöcher im städtischen Bereich gerichtet ist, sollten die Überrollungen bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h erfolgen. Des Weiteren wurde die Radlast auf 50 kN (5 t) festgelegt, um den ungünstigen Fall des Schwerlastverkehrs adäquat abzubilden. Bezüglich wetterbedingter Beanspruchungen wurde die Tatsache berücksichtigt, dass der Spätwinter und das Frühjahr die Hauptanwendungszeiten von Kaltasphalten darstellen (siehe Kapitel 1.2.1). Die genannte Jahreszeit ist geprägt von zumeist moderaten Temperaturen, gelegentlichen Frostperioden und nicht seltenen Niederschlägen. Bezüglich des Temperaturverlaufs wurde daher der in Bild 39 dargestellte Zyklus festgelegt, wobei eine Phase mit intensiver Nässe gefahren wurde; hierfür kam ein Beregnungsschlauch zum Einsatz. Insgesamt wurden drei Zyklen mit in Summe ca. 162.000 Überrollungen absolviert.

Ebenso mit dem Ziel, die Realität bestmöglich abzubilden, folgte im Anschluss an die Einbauverdichtung mittels Rüttelplatte (siehe Kapitel 4.2) zunächst eine Nachverdichtung mittels 200 Überrollungen bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Entsprechendes erfolgte eine Woche nach Einbau der Sanierungsmaterialien. An einer nicht unerheblichen Anzahl von sanierten Schlaglöchern konnte dabei jedoch bereits eine Schädigung beobachtet werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde wie Prüfungsgeschwindigkeit auf 20 km/h reduziert. Um Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse auszuschließen, wurden auch die anschließenden Zyklen mit 200 Radüberrollungen bei 50 km/h begonnen. Somit bestand jeder Zyklus aus folgenden acht Phasen:

- ca. 200 Überrollungen bei 50 km/h – Temperatur 20 °C, trocken,
- ca. 23.800 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur 10 °C, trocken,
- ca. 10.000 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur 10 °C, nass,
- ca. 10.000 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur -10 °C, trocken,
- ca. 2.500 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur -5 °C, trocken,

- ca. 2.500 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur 0 °C, trocken,
- ca. 2.500 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur 5 °C, trocken,
- ca. 2.500 Überrollungen bei 20 km/h – Temperatur 10 °C, trocken.

4.5 Ergebnisse des Großversuchs

Auswertemethode

In regelmäßigen Abständen wurde das Profil der sanierten Schlaglöcher durch den Mittelpunkt quer zur Überrollungsrichtung unter Verwendung eines Laser-Wegaufnehmers vermessen (siehe Bild 41) und fotografisch dokumentiert. An den 32 Schlaglöchern wurden über die drei gefahrenen Zyklen insgesamt 726 solcher Messungen mit einer Messdichte von ca. einer Messung pro Millimeter durchgeführt. Entsprechende Profilmessungen und Fotodokumentationen sind den Anhängen C und D zu entnehmen.

Als charakteristische Werte wurden der Materialabtrag A(-) und die Materialaufwölbung A(+) zwischen Nachverdichtung bzw. 200 Überrollungen und Zyklusende nach Forst und Tauen bzw. 54.000 Überrollungen ermittelt (siehe exemplarische Bild 42). Mittels Division durch die Breite des jeweiligen Bereichs ergibt sich eine mittlere Abtragtiefe I(-) bzw. mittlere Aufwölbungshöhe I(+). Bei der vorliegenden Deckschichthöhe bzw. Schichtdicke des Sanierungsmaterials von 40 mm ist somit maximal eine mittlere Abtragtiefe I(-) von 40 mm möglich, was einem vollständigen Materialaustrag (im Querprofil durch die Schlaglochmitte) entspricht.

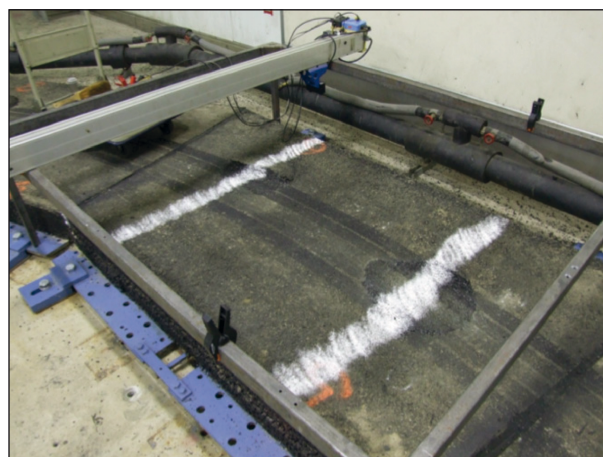


Bild 41: Apparatur zur Messung der Profile

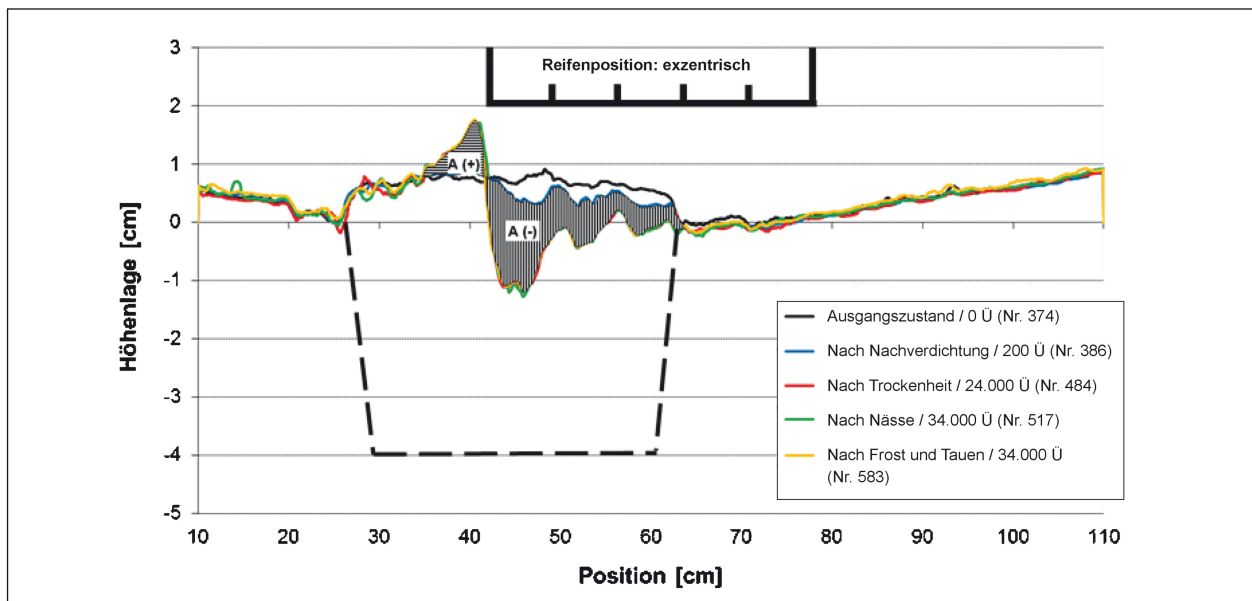


Bild 42: Exemplarische Profilmessungen (KN11-0/8)

Zu beachten ist, dass im überrollten Bereich vereinzelt auch Teilbereiche mit Materialaufwölbung vorliegen können (z. B. aufgrund der Profilirillen der Reifen) bzw. Materialabtrag im nicht-überrollten Bereich. Demnach ergeben sich für die vollüberrollten (zentrischen) Schlaglöcher die Werte $I(-)\ddot{U}$ und $I(+)\ddot{U}$ und für die teilüberrollten (exzentrischen) Schlaglöcher die Werte $I(-)\ddot{U}$, $I(+)\ddot{U}$, $I(-)n\ddot{U}$ und $I(+)\ddot{U}$, also zunächst sechs Einzelwerte. Hierbei steht \ddot{U} für „überrollter Bereich“ und $n\ddot{U}$ für „nicht-überrollter Bereich“. Durch Verrechnung der positiven und negativen Anteile $I(+)$ bzw. $I(-)$ und nachfolgender Ermittlung des Betrags ergibt sich zunächst eine Gesamtverformung bei Vollüberrollung $\Sigma\Delta_v$ bzw. Teilüberrollung $\Sigma\Delta_t$. Aus der Mittelwertbildung beider Beträge ergibt sich schließlich eine mittlere Gesamtverformung $\Sigma\Delta$. Mit der vorliegenden Deckschichthöhe bzw. Schichtdicke des Sanierungsmaterials von 40 mm ist somit theoretisch maximal ein Wert von $\Sigma\Delta = 40$ mm möglich. Bezogen auf diesen Wert kann ergänzend eine proportionale Gesamtverformung $p\Sigma\Delta$ definiert werden. Beide Ergebniswerte, mittlere Gesamtverformung $\Sigma\Delta$ und proportionale Gesamtverformung $p\Sigma\Delta$, werden nachfolgend für die Bewertung der Haltbarkeit der Sanierungsmaterialien herangezogen.

Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der 25 geprüften Materialien sind in Tabelle 8 dargestellt. Bei einem vollständigen Versagen einzelner Materialien wurden diese nach dem jeweiligen Zyklus durch andere Materialien

ausgetauscht, wodurch sich eine teilweise mehrfache Belegung einzelner Schlaglöcher ergibt. Die Auflistung erfolgt nach der Rangfolge der mittleren Gesamtverformung $\Sigma\Delta$. Davon ausgehend ist eine Unterteilung in fünf Gruppen möglich:

- Gruppe A umfasst die drei Sanierungsmaterialien mit sehr geringer Schädigung, deren proportionale Gesamtverformung $p\Sigma\Delta$ kleiner 10 % ist. Darunter fallen beide Heißasphalte und ein reaktives Kaltmischgut (KR06-0/4). Die mittlere Gesamtverformung $\Sigma\Delta$ dieser Gruppe beträgt 1,34 bis 3,20 mm. Sie weisen also eine sehr gute Haltbarkeit unter den Beanspruchungen in der Rundlaufanlage auf.
- Gruppe B umfasst drei Sanierungsmaterialien mit geringer Schädigung, deren proportionale Gesamtverformung $p\Sigma\Delta$ kleiner 15 % ist. Dies sind reaktive Kaltasphalte (KR05-0/5, KR01-0/5 und KR08-0/8). Die Gesamtverformungen $\Sigma\Delta$ erreichen Werte von 4,20 bis 5,41 mm und werden damit zu den Sanierungsmaterialien mit guter Haltbarkeit und Dauerhaftigkeit gezählt.
- Gruppe C umfasst Sanierungsmaterialien mit mittlerer Schädigung, deren proportionale Gesamtverformung $p\Sigma\Delta$ zwischen 15 und 25 % liegt. Die Ergebnisse $\Sigma\Delta$ erreichen in dieser Gruppe Werte von 7,24 bis 9,81 mm. Hier sind insgesamt neun Sanierungsmaterialien vertreten: vier normale Kaltasphalte und fünf reaktive Kaltasphalte. Dabei belegen die nicht-reaktiven Kaltasphalte vier der oberen fünf Ränge innerhalb dieser Gruppe.

Variante	SL		Zyklus	Ergebnis			Ergebnis (überrollt)				Ergebnis (teilüberrollt)					
				Rang $\Sigma\Delta$	$\Sigma\Delta$ [mm]	$p\Sigma\Delta$	Rang $\Sigma\Delta v$	$\Sigma\Delta v$ [mm]	I(-) [mm]	I(+) [mm]	Rang $\Sigma\Delta t$	$\Sigma\Delta t$ [mm]	I(-)Ü [mm]	I(+) [mm]	I(-)nÜ [mm]	I(+) [mm]
HA02-0/8	1	2	1	1	1,34	3,36	1	1,17	-1,2	0,03	1	1,52	-0,53	0,29	-0,07	0,63
HA01-0/5	9	10	1	2	2,61	6,52	2	1,48	-1,71	0,23	2	3,74	-2,23	0,16	-0,26	1,09
KR06-0/4	7	8	1	3	3,20	8,00	3	2,05	-2,16	0,11	3	4,34	-3,94	0,0	-0,36	0,04
KR05-0/5	11	12	1	4	4,20	10,51	6	3,35	-3,36	0,01	4	5,06	-4,06	0,02	-0,16	0,81
KR01-0/5	27	28	2	5	4,60	11,51	5	3,09	-3,1	0,01	5	6,12	-4,93	0,0	-0,5	0,68
KR08-0/8	21	22	2	6	5,41	13,53	7	4,32	-4,4	0,08	6	6,51	-5,24	0,0	-1,04	0,22
KN06-0/5	29	30	1	7	7,24	18,11	8	5,35	-5,35	0,0	8	9,13	-6,9	0,0	-0,08	2,16
KN11-0/8	13	14	2	9	7,39	18,47	9	5,37	-5,37	0,0	9	9,41	-7,24	0,01	-0,14	2,03
KN09-0/5	25	26	1	8	7,25	18,12	4	2,98	-3,18	0,2	13	11,52	-7,32	0,0	-0,03	4,17
KR09-0/4	15	16	1	10	7,73	19,31	14	7,28	-7,28	0,0	7	8,17	-7,33	0,0	-0,63	0,21
KN10-0/5	23	24	1	11	7,74	19,36	10	5,53	-5,53	0,0	10	9,95	-6,38	0,01	0,0	3,57
KR07-0/4	17	18	1	12	7,89	19,73	12	5,71	-5,75	0,04	11	10,08	-8,5	0,03	0,0	1,55
KR02-0/4	3	4	3	14	9,69	24,22	15	8,82	-8,85	0,03	12	10,56	-9,17	0,0	-0,37	1,02
KR11-0/5	5	6	1	13	9,68	24,19	13	7,19	-7,23	0,05	15	12,16	-10,99	0,0	-0,74	0,43
KR03-0/4	27	28	1	15	9,81	24,52	11	5,56	-5,57	0,01	17	14,05	-12,69	0,0	0,0	1,36
KN04-0/5	19	20	1	16	10,66	26,64	16	9,3	-9,32	0,01	14	12,01	-11,27	0,0	-0,13	0,61
KN03-2/5	19	20	2	17	12,58	31,46	17	9,58	-9,59	0,02	19	15,59	-14,94	0,0	-0,18	0,47
KN08-0/5	19	20	3	18	14,95	37,37	19	14,67	-14,91	0,25	18	15,23	-14,01	0,0	-1,14	0,08
KN01-0/4	3	4	2	19	16,68	41,69	23	19,32	-19,32	0,0	16	14,04	-9,83	0,0	-3,86	0,35
SA02-0/8	31	32	1	20	16,82	42,04	18	12,18	-12,23	0,05	22	21,45	-18,32	0,19	-0,01	2,92
KN16-0/5	31	32	3	21	16,92	42,29	20	14,83	-15,0	0,18	21	19,0	-17,26	0,0	-1,56	0,18
KN13-0/5	31	32	2	22	17,44	43,60	22	18,7	-18,7	0,0	20	16,17	-15,59	0,0	-0,47	0,11
KN02-0/5	3	4	1	23	19,63	49,07	21	17,42	-17,42	0,0	23	21,83	-20,89	0,01	-0,31	0,63
SA01-0/5	21	22	1	24	22,15	55,38	24	20,83	-20,83	0,0	24	23,47	-22,04	0,0	-0,08	1,34
KN05-0/5	13	14	1	25	28,22	70,54	25	31,48	-31,49	0,0	25	24,95	-23,52	0,01	-1,28	0,15

Tab. 8: Ergebnisse der Großversuche

- Gruppe D umfasst acht Sanierungsmaterialien mit starker Schädigung, verbunden mit proportionalen Gesamtverformungen $p\Sigma\Delta$ zwischen 25 und 50 %. Hier werden bei insgesamt acht Sanierungsmaterialien Gesamtverformungen $\Sigma\Delta$ von 10,66 bis 19,63 mm erreicht. Neben dem Sonderasphalt SA02-0/8 enthält diese Gruppe noch sieben nicht-reaktive Kaltasphalte.
- Gruppe E umfasst zwei Sanierungsmaterialien mit sehr starker Schädigung (SA01-0/5 und KN05-0/5), deren proportionale Gesamtverformung $p\Sigma\Delta$ größer 50 % ist. Die Ergebnisse $\Sigma\Delta$ sind mit 22,15 und 28,22 mm die höchsten der absolvierten Versuchsreihe.

Ein Vergleich der Gesamtverformung bei Vollüberrollung $\Sigma\Delta v$ und Teilüberrollung $\Sigma\Delta t$ zeigt auf, dass mit der letztgenannten offenbar die stärkere Beanspruchung und damit Schädigung einhergeht. Lediglich bei drei Kaltasphalten (KN01-0/4, KN13-0/5 und KN05-0/5) konnte eine stärkere Schädigung bei der Vollüberrollung ($\Sigma\Delta v$) im Gegensatz zur Teilüberrollung ($\Sigma\Delta t$) verzeichnet werden. Hierbei ist anzumerken, dass die drei Sanierungsmaterialien

den Gruppen D und E zugeordnet wurden, die eine starke und sehr starke Schädigung aufwiesen. Die Aussagekraft der absoluten Ergebnisse ist daher mitunter als begrenzt anzusehen.

Bei der Betrachtung der Rangfolgen $\Sigma\Delta v$ und $\Sigma\Delta t$ wird ersichtlich, dass die Rangdifferenzen von 19 Sanierungsmaterialien um lediglich maximal zwei Ränge variieren. Bei den sechs übrigen Materialien variieren die Rangfolgen um drei bis neun Ränge. Entsprechende Zusammenhänge sind in Bild 43 grafisch dargestellt, wobei auf der Ordinate der Rang bei Teilüberrollung und auf der Abzisse bei Vollüberrollung aufgetragen ist. Der ermittelte Korrelationskoeffizient $R = 0,80$ zeigt auf, dass eine Übertragbarkeit beider Teilergebnisse mit wenigen Ausnahmen weitgehend gegeben ist.

Ergänzend zur Auswertung über den gesamten Zyklus, d. h. zwischen Nachverdichtung bzw. 200 Überrollungen und nach Frost und Tauen bzw. 54.000 Überrollungen liefert die Betrachtung der mittleren Abtragtiefe I(-) innerhalb eines Zyklus zusätzliche Erkenntnisse. Wie aus Bild 44 für die mittleren Abtragstiefen I(-) bei zentrischer Überrollung

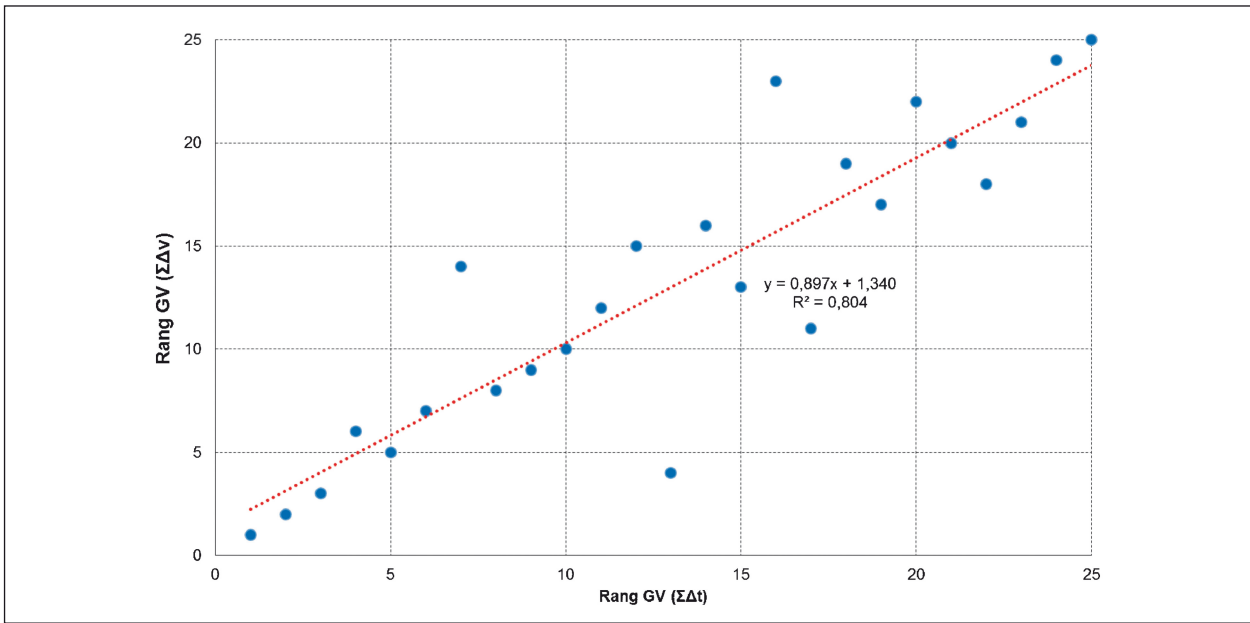


Bild 43: Korrelation der Ergebnisse bei Teilüberrollung und Vollüberrollung

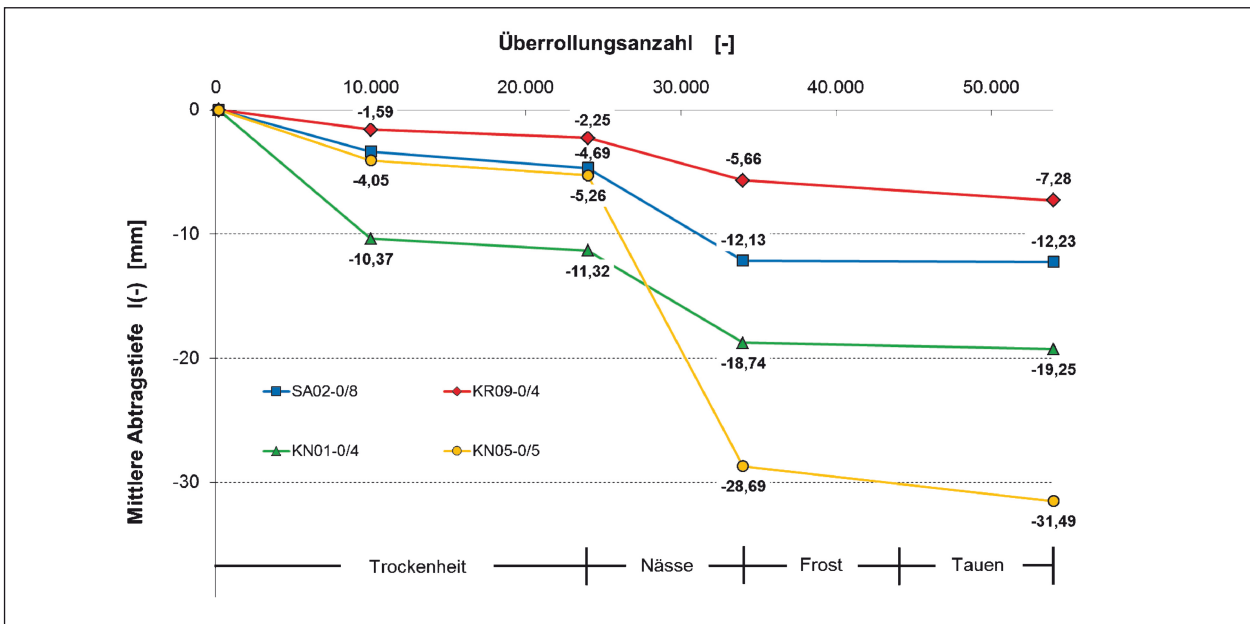
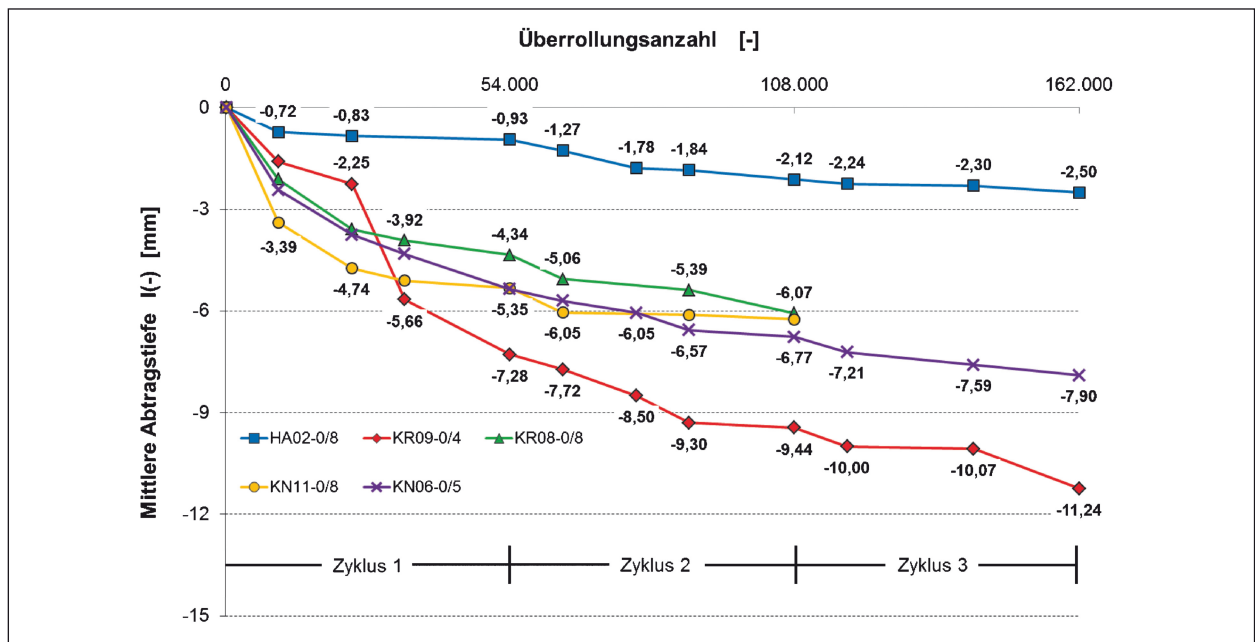


Bild 44: Mittlere Abtragstiefen über den Zyklusverlauf

ersichtlich ist, resultieren die größten Schädigungsanteile zumeist aus der Phase mit intensiver Nässe. Als mögliche Ursache hierfür können Porenwasserüberdrücke gesehen werden, die infolge impulsartiger Lastbeaufschlagung beim Überrollen mittels Lkw-Rad auftreten. Hierbei kommt es offenbar zu einer Art Sprengwirkung, wodurch die Gesteinskörnung an Zusammenhalt verliert und ausgetragen wird. Im Gegensatz dazu resultieren aus der anschließenden Frost- und Tauperiode nur unerhebliche Schädigungen, obwohl anzunehmen ist, dass der Porenraum im Sanierungsmaterial aufgrund der

vorhergehenden intensiven Nässe weitgehend wassergesättigt ist und somit prinzipiell mit Frostsprengungen zu rechnen ist. Die ausgedehnte Überrollungsphase bei Trockenheit (vor intensiver Nässe) ist dadurch gekennzeichnet, dass die Schädigung mit zunehmender Überrollungsanzahl offenbar nur degressiv voranschreitet.

Bei der Betrachtung von Schädigungsverläufen für zentrische Überrollung über mehrere Zyklen (siehe Bild 45) zeigt sich ebenfalls eine degressive Tendenz, d. h. die zusätzlichen Schädigungen klingen



Variante	Ergebnis GV			Ergebnis SBV			Ergebnis DSV-M		
	Rang $\Sigma\Delta$	$\Sigma\Delta$ [mm]	P $\Sigma\Delta$ [%]	Rang PRD	PRD [%]	RD [mm]	Rang ϵ	ϵ [%]	f_c [$\mu\text{m}/\text{Zyklus}$]
HA02-0/8	1	1,34	3,36	6	2,90	1,160	24	9,68	0,4451
HA01-0/5	2	2,61	6,52	2	2,25	0,900	5	1,40	0,0068
KR06-0/4	3	3,20	8,00	7	2,96	1,185	17	2,33	0,0236
KR05-0/5	4	4,20	10,51	5	2,86	1,145	8	1,59	0,0156
KR01-0/5	5	4,60	11,51	9	3,99	1,595	12	1,74	0,0132
KR08-0/8	6	5,41	13,53	1	2,15	0,860	4	1,31	0,0090
KN06-0/5	7	7,24	18,11	16	11,38	4,550	11	1,69	0,0159
KN11-0/8	9	7,39	18,47	12	4,95	1,980	10	1,68	0,0104
KN09-0/5	8	7,25	18,12	20	14,51	5,805	20	2,86	0,0286
KR09-0/4	10	7,73	19,31	4	2,78	1,110	3	1,22	0,0085
KN10-0/5	11	7,74	19,36	14	9,41	3,765	13	1,80	0,0120
KR07-0/4	12	7,89	19,73	3	2,54	1,015	7	1,44	0,0136
KR02-0/4	14	9,69	24,22	8	3,30	1,320	23	4,20	0,1039
KR11-0/5	13	9,68	24,19	17	11,99	4,795	16	2,25	0,0126
KR03-0/4	15	9,81	24,52	11	4,24	1,695	6	1,43	0,0109
KN04-0/5	16	10,66	26,64	22	16,89	6,755	21	3,30	0,0278
KN03-2/5	17	12,58	31,46	18	13,46	5,385	14	2,10	0,0139
KN08-0/5	18	14,95	37,37	19	14,40	5,760	15	2,20	0,0152
KN01-0/4	19	16,68	41,69	21	15,90	6,360	19	2,41	0,0200
SA02-0/8	20	16,82	42,04	25	20,00	8,000	25	-	-
KN16-0/5	21	16,92	42,29	13	8,49	3,395	2	0,97	0,0024
KN13-0/5	22	17,44	43,60	15	11,16	4,465	18	2,40	0,0263
KN02-0/5	23	19,63	49,07	24	18,05	7,220	22	3,97	0,0158
SA01-0/5	24	22,15	55,38	10	4,16	1,665	1	0,40	0,0028
KN05-0/5	25	28,22	70,54	23	17,85	7,140	9	1,65	0,0101

Tab. 10: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Großversuchs und der Laborversuche

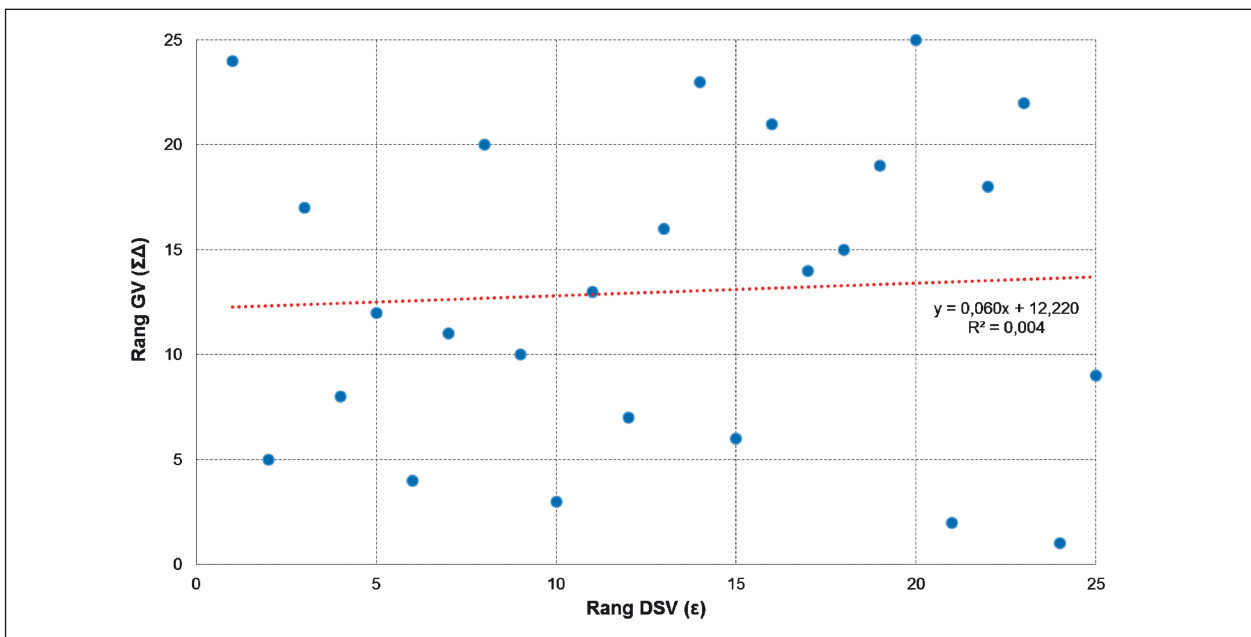


Bild 46: Streudiagramm Korrelation für GV und DSV-M

durch einen Korrelationskoeffizienten $r = 0,657$. Dieses Ergebnis entspricht tendenziell den Erwartungen, da es sich vom Prinzip her um ähnliche Versuchsaufbauten mit Radüberrollungen und Ausbildung eines räumlich begrenzten Schädigungsbereichs handelt. Insgesamt ist das Maß der Korrelation jedoch nicht zufriedenstellend, d. h. eine direkte Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse von Spurbildungsversuch auf Großversuch (oder umgekehrt) ist nicht nur in Einzelfällen unzutreffend.

Ursachen für diesen relativ geringen Korrelationskoeffizienten können möglicherweise in der unterschiedlichen Auswertesystematik und der unterschiedlichen Prüfparameter liegen. Beispielsweise erfolgt die Auswertung des Spurbildungsversuches standardmäßig anhand der mittleren Spurrinnen-tiefe über einen bestimmten Messbereich längs zur Rollrichtung. Dabei werden lediglich die Differenzen zwischen der Nullmessung und der Sohl-tiefe der Spurrinne erfasst; die im Allgemeinen auftretenden Aufwölbungen bleiben unberücksichtigt. Darüber

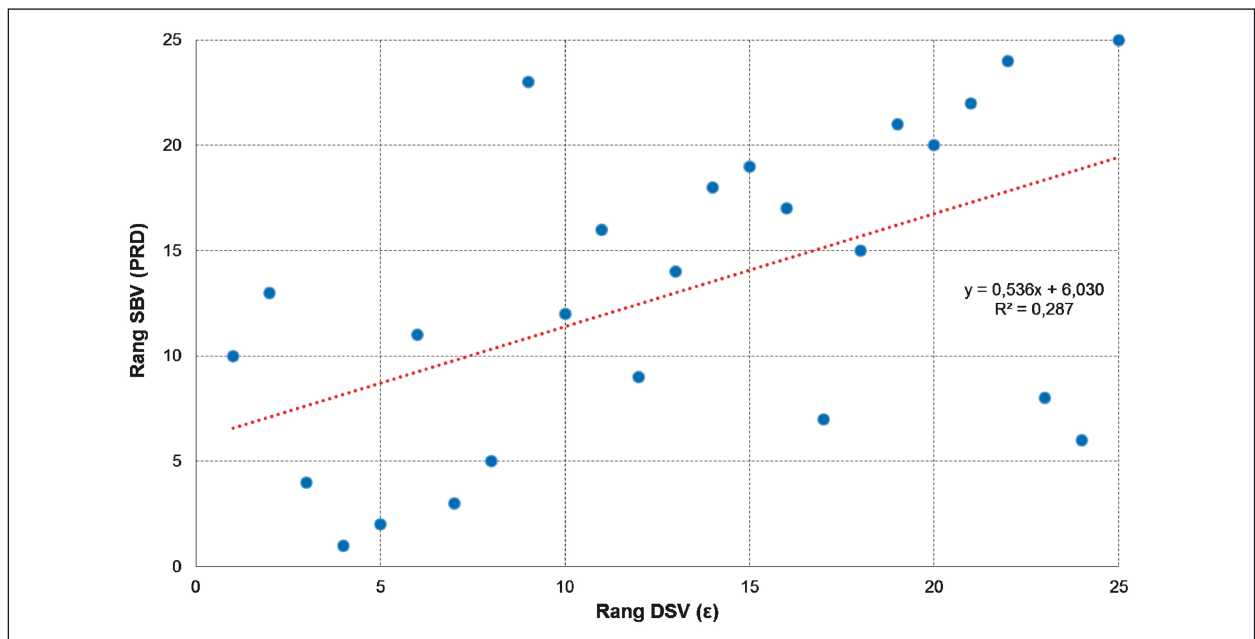


Bild 47: Streudiagramm Korrelation für DSV-M und SBV

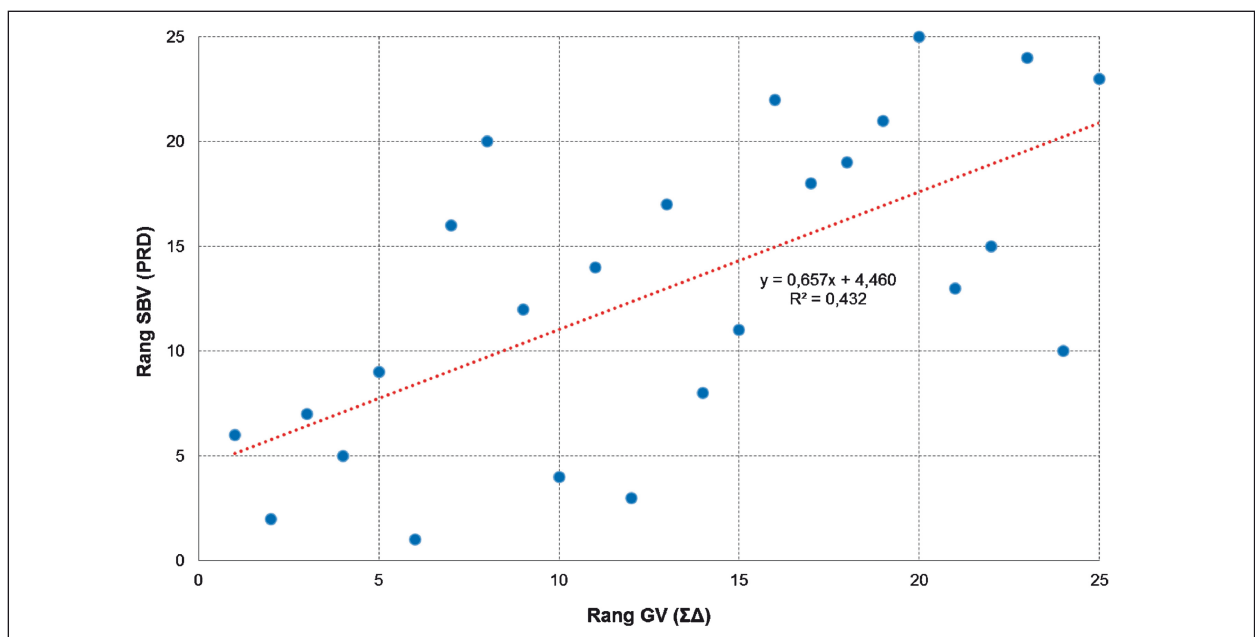


Bild 48: Streudiagramm Korrelation für GV und SBV

hinaus stand im Gegensatz zum Spurbildungsversuch für die Auswertung des Großversuchs keine standardisierte Methode zur Verfügung, diese wurde erst im Laufe des Projektes entwickelt. Die Auswertung des Großversuches erfolgte anhand von Laserprofilmessungen durch die Mitte des Schlagloches quer zur Überrollungsrichtung. Eine zum Spurbildungsversuch vergleichbare Messung längs zur Überrollungsrichtung wurde aufgrund der gekrümmten Rollstrecke als nicht zielführend eingestuft.

Weitere Gründe für die geringe Korrelation zwischen den Ergebnissen des Großversuches und des Spurbildungsversuches können sich aus den unterschiedlichen Prüfparametern ergeben. Während der Spurbildungsversuch bei konstanten 30 °C durchgeführt wurde, erfolgte beim Großversuch eine zyklische Temperierung, teilweise sogar mit intensiver Nässe. Des Weiteren erfolgten die Überrollungen der Sanierungsmaterialien in den Großversuchen mittels Rundlaufanlage in Kurvenfahrt, aus der sich andere Belastungen als beim Spurbildungsversuch ergeben. Weitere Parameter, welche die unterschiedlichen Ergebnisse begünstigen könnten, sind die unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen (Überrollung des Lastrades in einer Richtung beim Großversuch und in beide Richtungen beim Spurbildungsversuch) sowie die unterschiedlichen Bereifungen der Versuchsgeräte.

Aufgrund der Unterschiede zwischen den Prüfverfahren können die relativ großen Streuungen der Rangfolgen und der damit verbundenen geringen Korrelationen erklärt werden. Aus den Ergebnissen des Großversuches und des Spurbildungsversuches lassen sich allerdings Tendenzen über die Haltbarkeit und Dauerhaftigkeit ableiten. Eine abschließende und eindeutige Klassifizierung der Sanierungsmaterialien sowie die Festlegung auf ein bestimmtes Prüfverfahren kann aber noch nicht vorgenommen werden.

6 Zusammenfassende Empfehlungen

Mithilfe umfangreicher Versuchsreihen im Labor und im Großversuch wurden Materialien und Verfahren zur Sanierung von Schlaglöchern im Hinblick auf ihre Dauerhaftigkeit untersucht. Hierbei zeigte sich, dass eine große Anzahl in der Praxis

verbreiteter Materialien und Verfahren keine zufriedenstellende Haltbarkeit aufweist. Als Materialien mit beson-

ders guter Haltbarkeit haben sich Heißasphalte (Materialien mit der Kennzeichnung HA) erwiesen, die jedoch nicht mit üblicherweise zur Verfügung stehenden Handwerkzeugen eingebaut werden können, sondern zusätzliches Equipment (z. B. Mikrowelle/Ofen mit Stromerzeuger oder Kocher) erfordern. Kaltasphalte wurden in Abhängigkeit der Produktbeschreibung des Herstellers in nicht-reaktive Kaltasphalte (Materialien mit der Kennzeichnung KN) und reaktive Kaltasphalte (Materialien mit der Kennzeichnung KR) unterschieden. Hier zeigte sich die generelle Tendenz, dass reaktive Kaltasphalte haltbarer sind als nicht-reaktive. Jedoch ist deutlich zu betonen, dass es sowohl gut haltbare nicht-reaktive Materialien als auch schlecht haltbare reaktive Materialien gibt. Ebenfalls zu erwähnen ist, dass sich mit den gut haltbaren Kaltmischgütern bei entsprechend fachgerechter Vorbehandlung des Schlagloches und Verdichtung des Materials gute Ergebnisse hinsichtlich der Wiederherstellung von Fahrbahnoberflächen erzielen lassen. Darüber hinaus wurden zwei Sonderasphalte (Materialien mit der Kennzeichnung SA) untersucht, die weder zu den Kaltasphalten noch zu den Heißasphalten gehören. Beide Materialien wiesen in den Versuchsreihen keine zufriedenstellende Haltbarkeit auf.

Im Ergebnis sollten aufgrund der Spurbildungsversuche im Labormaßstab und der Großversuche bevorzugt Heißasphalte zur Anwendung kommen, wobei sich die bereits erwähnten Nachteile bzgl. des Equipments zum Einbau ergeben. Vor dem Hintergrund, dass bislang keine technischen Regelwerke wie Technische Lieferbedingungen (TL) für Kaltasphalt existieren – die teilweise ebenfalls gute, aber mitunter auch schlechte Haltbarkeiten gezeigt haben – sollte geprüft werden, ob und wie eine entsprechende Kategorisierung in Zukunft möglich ist, um einen sicheren und eindeutigen Aufschluss über die Haltbarkeit und Dauerhaftigkeit der Sanierungsmaterialien geben. Schließlich sind Kaltasphalte mit Preisen bis zu ca. 1.000 EUR pro Tonne als relativ teuer zu bewerten und dadurch resultierende Kosten zzgl. Personalkosten zum Einbau für die Straßenerhaltung bzw. Straßensanierung in der Bundesrepublik Deutschland nicht unerheblich.

Da die Zusammensetzungen dieser Materialien sehr stark voneinander abweichen (Art und Anteil

von Bindemittel und Gesteinskörnung), und darüberhinaus unbekannte Additive enthalten, sollte anstelle konkreter Einzelvorgaben eine performanceorientierte Bewertung der Haltbarkeit erwogen werden. Ähnliches ist bereits aus der Straßenausstattung, von Fahrbahnmarkierungen bekannt: Seit 1989 werden Markierungssysteme durch die BAST mittels einer Rundlaufanlage geprüft bzw. zertifiziert und positiv getestete in einer Freigabeliste geführt. Da sich im Rahmen der absolvierten Laborversuche an Sanierungsmaterialien zur Schlaglochanierung in Form von Spurbildungsversuchen, Druckschwellversuchen und direkten Zugversuchen keine zuverlässige Korrelation mit Großversuchen ergeben hat, erscheint es nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse angeraten, in jedem Fall auch Großversuche zur Beurteilung heranzuziehen. Inwiefern solche Großversuche durch Spurbildungsversuche ergänzt oder ersetzt werden können, müsste in weiteren Analysen zu den prinzipiellen Unterschieden (Versuchstemperatur, Rollgeschwindigkeit, Kurvenfahrt, Messsystematik etc.) ermittelt werden. Erst im Anschluss daran kann beurteilt werden, wie eine zuverlässige Einschätzung zukünftiger Prüfverfahren für Kaltasphalte erfolgen kann. Eine wichtige Einflussgröße ist der insbesondere auf der Rundlaufanlage häufig beobachtete starke Abtrag der Materialien bei Nässe – eine Randbedingung, die im Labor adäquat abzubilden wäre.

Nach Abschluss des Projekts sollten Folgeüberlegungen somit darauf ausgerichtet sein, konkrete Randbedingungen sowohl für die Großversuche als auch für die Spurbildungsversuche zwecks performanceorientierter Bewertung zu erarbeiten. Dazu zählen beispielsweise: Überrollungsanzahl, Geschwindigkeit, Radlasten, Temperatur- und Witterungszyklen sowie Alter des Sanierungsmaterials bei Erstbelastung. In diesem Zusammenhang wird sich zeigen, inwieweit weitere Anpassungen von Laborversuchen, insbesondere des Spurbildungsversuchs, eine Vergleichbarkeit zwischen Labor und Großversuch verbessern bzw. ermöglichen können. Gesamtziel eines solches Vorhabens wäre somit eine abschließende und eindeutige Methodik zur Klassifizierung der Sanierungsmaterialien sowie die Festlegung auf ein bestimmtes Prüfverfahren.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

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
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

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 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 zwangs-gemischten, 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 Hüniger, 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: Längsebenheitsmesssysteme – 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, Klapproth, 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 Stra-

ßenverkehrsinfrastruktur 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 in Vorbereitung

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt
Wüstuba, Alisov, Isailović

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks in Vorbereitung

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern
Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013
Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher in Vorbereitung

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern
Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

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