

Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 142

bast

Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

von

Wolfgang Baltzer
Werner Riepe
Uwe Zimmermann
Christiana Meyer
Torsten Brungsberg
BUNG Ingenieure AG
Heidelberg

Georg Mayer
Sven Brennerberger
Christian Jung
PTV Transport Consult GmbH
Stuttgart

Markus Oeser
André Meyer
Institut für Straßenwesen
RWTH Aachen

Dipl.-Phys. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Mario Koch
Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke
Institut für Brand- und Katastrophenschutz
Heyrothsberge

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 142

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 15.0561/2012/ERB:
Einsatz von offenporigen Belägen
in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Fachbetreuung:
Christof Sistenich

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

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 0943-9293
ISBN 978-3-95606-366-4

Bergisch Gladbach, November 2017

Kurzfassung

Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Im Vorhaben wurde das Verhalten von offenporigen Fahrbahnbelägen in Bezug auf brennbare Flüssigkeiten im Vergleich zu dichten Fahrbahnoberflächen untersucht und analysiert inwieweit die speziellen Eigenschaften von offenporigen Asphalten Auswirkungen auf die Sicherheitsannahmen für risikobasierte quantitative Untersuchungen für Tunnel oder teilgeschlossene Bauwerke aufweisen. Hierzu wurden umfangreiche Versuche an großflächigen Versuchsplatten (80 x 80 cm) mit Deckschichten aus offenporigem Asphalt (PA) und Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) sowie ergänzende CFD-Berechnungen durchgeführt.

Die Ermittlung des Durchfluss- und Ausbreitverhaltens erfolgte bei konstanter Flüssigkeitsaufgabe auf die Versuchsplatten und Fassung der an den Plattenseiten austretenden Flüssigkeit in Messzylindern. Über diese wurde für die verschiedenen Deckschichten das zeitliche und räumliche Ausbreitungsverhalten analysiert. Die Ermittlung des Einflusses einer Oberflächenneigung erfolgte durch Variation der Ableitversuche mit zwei unterschiedlichen Plattenneigungen.

Die Ermittlung des Brandverhaltens erfolgte in zwei Schritten. In einer ersten Versuchsreihe wurden auf die Platten verschiedene zuvor definierte Kraftstoffmengen aufgegeben und anschließend gezündet, so dass bei Brandbeginn beim SMA ein übersättigter und beim PA, je nach Aufgabemenge ein übersättigter, gesättigter oder teilgesättigter Asphalt vorlag. In der zweiten Versuchsreihe erfolgte während des Abbrands ein kontinuierlicher Benzinzufluss.

Die Analyse der umfangreichen Daten aus den Versuchsreihen ermöglichte die Bereitstellung detaillierter Eingangsgrößen für die CFD-gestützte Modellierung und Validierung des zeitlichen und räumlichen Ausbreitungs- und Abbrandverhaltens für die betrachteten Fahrbahnoberflächen.

In der sich anschließenden Wirkungsanalyse wurden die sich aus der Modellierung ergebenden Auswirkungen der unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen (PA und SMA) ermittelt und unter Anwendung des Verfahrens für die Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln miteinander verglichen.

Der quantitative Sicherheitsvergleich zeigte, dass offenporige Asphaltbeläge in Einhausungs- und Tunnelbauwerken unter risikoorientierten Ge-

sichtspunkten nicht ungünstiger als dichte Fahrbahnbeläge einzustufen sind.

Abstract

Use of open-porous road surfaces in overhead noise barriers and tunnels

In the present research project the behaviour of open-porous road surfaces concerning combustible liquids in comparison with impermeable road surfaces was studied. It was analysed in how far the particular properties of open-porous asphalts have effects on the safety assumptions made in risk-based quantitative analyses for tunnels and semi-closed constructions. For that purpose comprehensive trials with large-scale test boards (80 x 80 cm) covered with open-porous asphalts (PA) and stone-mastic asphalt (SMA) were undertaken as well as complementary CFD calculations made.

The percolation and propagation behaviour was determined under constant pouring of liquid onto the test boards and collecting the liquid escaping on the sides of the boards in measuring cylinders. Based hereon, the spatial and temporal propagation behaviour was analysed for the different covers. Varying the draining tests by two different gradients of the boards allowed determining the influence of the road surface gradient.

The combustion behaviour was determined in two steps. In a first test series previously defined quantities of fuel were poured onto the boards and then set on fire, so that when the fire started, in case of SMA the asphalt over-saturated and in case of PA the asphalt was oversaturated, saturated or partially saturated, depending on the quantity fed. In a second test series fuel was continuously fed during combustion.

The analysis of the comprehensive data gained from the test series allowed providing detailed input parameters for the CFD-based modelling and validation of the spatial and temporal propagation and combustion behaviour for the road surfaces considered.

By means of the subsequent effects analysis the effects resulting from the modelling were determined the different road surfaces (PA and SMA) and compared with each other based on the method of safety assessment of road tunnels.

From a risk-oriented point of view the quantitative comparison regarding safety showed that open-porous asphalts in overhead noise barriers and tunnels are not considered more unfavourable than impermeable road surfaces.

Summary

Use of open-porous road surfaces in overhead noise barriers and tunnels

1 Scope of work

So far there has been no way of assessing the impacts of open-porous asphalt layers on the combustion behaviour of spilling combustible liquids and the related hazards for road users particularly in tunnels and overhead noise barriers.

Therefore, the objective of this research project was to determine the interdependencies between spilling liquids and open-porous asphalts (PA) and to generate suitable input parameters for the validation of a CFD fire simulation. Based on these calculations the risks resulting in case of liquid fires on an open-porous asphalt layer were to be quantified.

To generate the input parameters the propagation as well as the combustion behaviour of a combustible liquid were to be determined by means of percolation and draining tests as well as real fire tests.

Then, corresponding to the tests carried out CFD simulations were to be performed. The calculation model hereby developed was to be used as a basis for modelling a liquid fire in a reference tunnel with semi-permeable road surface.

Based on the findings gained the differences between impermeable and open-porous road surfaces at liquid fires were to be pointed out regarding the escape situation and conditions and the required safety installations.

2 Methodology applied

In a basic study the existing knowledge in particular regarding the composition and the properties of open-porous asphalt was gathered and compiled. Additionally, the combustion behaviour of pool fires on impermeable surfaces as well as the general properties of CFD models were considered.

Under realistic conditions large-scale test boards with different covers, 80 cm wide and 80 cm long, were produced.

To represent pollution of the pore texture the boards with open-porous asphalt featured two different degrees of porosity (approx. 29 vol. % and approx. 26 vol. %).

Boards covered with stone-mastic asphalt (SMA) were used to document the differences with regard to the conventional (impermeable) road surface.

In the laboratory the temporal and spatial propagation behaviour of combustible liquids on the various covers was determined with constant fuel feeding. The liquid escaping on the sides of the boards was collected by a measuring cylinders in a grid of approx. 5 cm. To take into account the influence of the surface gradient on the pool propagation, draining tests including two different gradients of the boards were performed. And to represent influence of the surface gradient on pool formation, the draining trials were carried out at a gradient of 2.5 % und 6.0 %.

To be able to estimate heat release and full flame formation of a fire on open-porous asphalt in comparison to impermeable surfaces, two types of real fire tests were carried through, measured and documented (measuring a. o. temperature, heat radiation and mass loss).

Within the framework of the first test series representing the behaviour of (semi-)saturated asphalts a quantity, which was specified beforehand, was poured on the test boards and then lit.

In the second test series a constant quantity of fuel of 2 l/min was continuously poured onto the middle of the board: The changing size of the pool was measured in regular intervals.

Then, based on the acquired parameters the flow and combustion behaviour of combustible liquids on or in open-porous asphalt was modelled by means of suitable simulation models (CFD code „OpenFOAM“). Using the developed models flow and fire simulations were carried out: They served the purpose of quantifying the differences in impact and, thus, the risks to be expected if impermeable or open-porous road surfaces are used.

3 Results

During the percolation and combustion trials with fuel open-porous asphalts differed significantly from the impermeable, non-porous SMA with regard to the resulting spatial propagation and draining as well as with regard to the time component.

In the draining tests on SMA almost 100 % of the poured quantity of fuel drained along the road surface via the lower front side of the board and the measuring cylinders filled within few seconds once the pouring had started. The distribution of the filling levels was similar to normal distribution,

whereby the different gradients of the boards had only minor effects on the distribution.

In case of the open-porous asphalts the fuel fed had the effect that some of the bitumen was washed out. Depending on the distribution of the aggregate in the board this led to a kind of “channelling”, and to a greater distribution of the gathered quantity. Compared to SMA, there was a much slower draining in direction of the gradient and a larger propagation of the fuel due to its permeation of the structure and the related filling of the grain structure. As a consequence, a significant part of the fuel-bitumen mixture escaped on all sides of the test board.

In the first test series the fires on the (partially) saturated open-porous asphalts lasted by far longer than those on SMA. For oversaturation of the boards the starting phase went the same way as for SMAs. Once the fuel on the surface was burnt, the fire, however, took a different course because then fuel was only available in the pore texture of the asphalt. Due to the gases rising through the pores flames continued to lick for a very long period. The longer duration of the fire went along with an attenuated heat release rate. Thus, setting partially saturated open-porous asphalt boards on fire resulted in a delayed development of the fire.

During the second test series with continuously fuel feeding the development of the pools on SMA and on PA were very different since the pores of the asphalt allow fuel propagation on the road surfaces as well as inside the pore texture. The fuel which was not burnt directly propagated inside the pore texture so that in the first minutes of the tests relatively constant pools could be observed on the surface. With increasing saturation of the pore texture the pools also were growing.

Based on the measured data obtained the test results were modelled by means of numerical simulation (CFD code „OpenFOAM“). Hereby, porosity was described using permeability and following Darcy’s Law and the approach developed by Forchheimer. Since it is not possible to mathematically transfer porosity into permeability, this relationship had to be determined empirically by variation of the parameters in the CFD simulation. On that basis an approach was developed which allows calculating the heat release rate in dependence of the release rate.

The risk analyses carried through revealed that as regards liquid fires, the extent of damage can be substantially reduced if open-porous asphalts are

used. However, taking into account the occurrence probabilities of liquid fires related to that of the totality all kinds of fires to be expected in tunnels and overhead noise barriers, risk reduction can be considered minor.

4 Conclusions for the practical application

From a risk-oriented point of view using open-porous asphalts in overhead noise barriers and tunnels has not turned out to be more unfavourable than impermeable road surfaces. It can be stated that it may have risk-mitigating effects depending on the effective porosity and the prevailing road surface gradients.

Though longer fire durations and partially higher temperatures are achieved, but depending on the absorbability of the asphalt and the quantity poured the development of fire is delayed. This delay provides road users with additional time for self-evacuation, provided that the fire is detected early.

Since a fuel pool propagating inside the pore texture cannot be seen on the surface, it may constitute a hazard difficult to recognize for the emergency services. Thus, there is the risk that on sections identified as apparently safe flames may suddenly lick.

The problem of non-recognisably propagating fuel pools can, for example, be thwarted by transverse bulkheads every 25 m in the road surface. Then propagation in longitudinal direction can be prevented so that depending from the site of the fuel release and the transverse bulkheads safe areas can be reached within acceptable distance from the fire site.

After an event with bitumen-solving liquids full and comprehensive refurbishment has to be undertaken. The whole area which was covered by the liquid has to be removed and replaced since the grain structure has no longer its load bearing capacity. Equally the whole drainage system has to be examined for bitumen deposits reducing the flow capacity, to be cleaned or replaced, if necessary.

Inhalt

1	Einleitung und Ausgangslage	9	4.2.2	Konzeption eines geeigneten Versuchsstands und Versuchsdurchführung	27
2	Zielsetzung und Abgrenzung	9	4.2.3	Messergebnisse	32
2.1	Forschungsziel	9	4.2.4	Zeitliches Ausbreitungsverhalten	42
2.2	Abgrenzung	9	4.2.5	Dichten des aufgefangenen Benzin-Bitumen-Gemischs	43
3	Grundlagenstudie und Definition von Einfluss- und Wirkgrößen	9	4.2.6	Verdunstung des aufgegebenen Benzins	44
3.1	Offenporiger Asphalt	9	4.2.7	Bitumenauswaschung	45
3.1.1	Definition und Charakteristik	10	4.2.8	Abschätzung der Schädigung des Asphalts	46
3.1.2	Einbindung des PA im Regelwerk	11	4.3	Brandversuche	46
3.1.3	Anforderungen an die zu verwendenden Materialien	11	4.3.1	Versuchskonzept	47
3.1.4	Anforderungen an den Einbau	12	4.3.2	Vorversuche für die Brandversuche	49
3.2	Einsatz von PA im Straßenbau	12	4.3.3	Versuchsdurchführung und Messergebnisse für die CFD-Simulation	50
3.2.1	Reifen-Fahrbahn-Geräusch	12	4.3.4	Prüfkörper nach Versuchsdurchführung	55
3.2.2	Durchlässigkeit	13	5	CFD Berechnung	56
3.3	Brandverhalten von Flüssigkeitsbränden	14	5.1	Validierung anhand des Ableit- und Durchflussverhaltens	56
3.3.1	Lachenbrände auf dichten Oberflächen	14	5.1.1	Validierung hinsichtlich des Ableitverhaltens bei SMA	56
3.3.2	Lachenbrände auf porösen Oberflächen	16	5.1.2	Validierung hinsichtlich des Ableit- und Durchflussverhaltens von PA	59
3.4	CFD-Modelle	17	5.2	Validierung des CFD-Modells anhand der Brandversuche	62
3.4.1	Mathematisches Modell	17	5.3	Modell zur Abbildung der Brandleistung bei PA	62
3.4.2	Algorithmus	18	5.3.1	Ermittlung der Freisetzungsrates als Funktion der Brandleistung	62
3.4.3	Abbildbare Eigenschaften	18	5.3.2	Bestimmung der Brandleistung in Abhängigkeit der brandwirksamen Fläche	63
3.4.4	Maßgebliche Submodelle	18	6	Wirkungsanalyse mit Modell aus FE 15.492/2010/FRB	67
3.5	Straßenoberflächen in CFD-Modellen	19	6.1	Eingangsparameter Bauwerke	67
4	Versuchsprogramm zur Ermittlung der Einfluss- und Wirkgrößen	20	6.2	Eingangsparameter Risikoanalyse	68
4.1	Herstellung der Versuchsplatten	20	6.2.1	Brandhäufigkeiten	68
4.1.1	Vorbemerkungen	20	6.2.2	Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf	68
4.1.2	Asphalteinbau auf der isac-Versuchsstrecke	20			
4.1.3	Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf die weiteren Fragestellungen	25			
4.2	Ableit- und Durchflussversuche	26			
4.2.1	Vorversuche zum Lösungsverhalten von Bitumen in Kraftstoff	27			

6.3	Einsatz von SMA und PA in Tunnel- und Galeriebauwerken	70
6.3.1	Vergleich SMA und PA bei einem Anteil der Flüssigkeitsbrände von 100 %	70
6.3.2	Vergleich SMA und PA bei einem Anteil der Flüssigkeitsbrände von 20 %	70
6.4	Risikowerte	70
6.5	Auswirkungen auf Sicherheitseinrichtungen	73
7	Zusammenfassung und Fazit	74
	Literatur	76

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter:
<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar

1 Einleitung und Ausgangslage

Zur Festlegung möglicher Beschränkung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel wird ein einheitliches Verfahren zur Kategorisierung nach ADR angewendet. Wesentlicher Anteil am Risiko haben Szenarien mit brennbaren Flüssigkeiten, die durch den Leitstoff Benzin abgebildet werden. Der Einfluss, der sich aus unterschiedlichen Eigenschaften möglicher Fahrbahnbeläge ergeben könnte, wird bisher nicht berücksichtigt.

Im Regelfall bestehen Fahrbahnbeläge in Tunneln aus semi-dichten bis dichten Materialien wie Splitt-Mastix-Asphalt (SMA), Beton oder Asphaltbeton (AC D). Da neben Tunneln auch offene oder geschlossene Einhausungen nach ADR zu kategorisieren sind, können hinsichtlich der Fahrbahnbeläge abweichende Randbedingungen vorliegen. Einhausungen werden häufig zur Reduzierung von Lärmimmissionen geplant und gebaut. Durch die in Abhängigkeit von der Ausbildung mögliche Begrenzung der technischen Ausstattung sind dabei teiloffene Bauwerke (Galerien bzw. teilabgedeckte Trogbauwerke) in Betrieb. Da durch Öffnungen jedoch die gewünschte Lärminderung nur zum Teil erreicht wird, können weitere Maßnahmen erforderlich werden. Dies können z. B. offenporige Asphalte (PA) sein, wobei z. B. in Österreich gemäß RVS 08.16.01 bzw. ÖNORM B 3586 offenporige Beläge in Straßentunneln einschließlich anschließender Galerien nicht erlaubt sind.

Kommt es im Bereich eines offenporigen Asphaltbelags zu einem Brand mit auslaufenden Flüssigkeiten, kann derzeit der Einfluss des Belags und sein Verhalten nicht abgeschätzt werden. Denkbar ist, dass die Brandlast erhöht wird, da das Bindemittel Bitumen Feuer fängt oder sogar durch die auslaufende Flüssigkeit, die durch den PA fließt, zum Teil ausgewaschen wird. Denkbar ist hingegen jedoch auch, dass durch die relativ kleinen Poren die Luftzufuhr begrenzt ist und bei geringen auslaufenden Kraftstoffmengen sogar eine Brandentfaltung behindert wird. Für diese These sprechen Laborversuche¹, die eine unvollständige Verbrennung von Kraftstoff in offenporigen Belägen zeigen. Dabei blieben bis zu 80 % Kraftstoff einer relativ geringen Gesamtmenge an der Verbrennung unbeteiligt.

Anhand durchgeführter Testversuche konnte gezeigt werden, dass bereits kleine Mengen Benzin genügen, um innerhalb kürzester Zeit nen-

nenswerte Auswaschungen von Bitumen bei offenporigen Asphalten hervorzurufen. Bei Verwendung von Diesel wurde ein ähnlicher Effekt festgestellt, wenngleich der Prozess hier deutlich langsamer von statten ging.

2 Zielsetzung und Abgrenzung

2.1 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Wechselwirkung zwischen auslaufenden brennbaren Flüssigkeiten und offenporigen Asphaltbelägen zu erfassen und geeignete Eingangsparameter für die Simulation mittels CFD-Berechnungen zu generieren. Mit diesen Berechnungen soll der Einfluss eines offenporigen Belags auf die Sicherheitsausstattung quantitativ beurteilt werden.

2.2 Abgrenzung

Der Inhalt des Forschungsprojektes ist ausschließlich auf das Brandverhalten von offenporigen Asphaltbelägen im Vergleich zu dichten Belägen fokussiert. Andere Kriterien (wie zum Beispiel die Griffigkeit, akustische Eigenschaften, Wechselwirkungen mit der Beleuchtung und Fragen zur Helligkeit) die für eine Eignung von PA in Tunnelbauwerken und Einhausungen zu betrachten sind, sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

3 Grundlagenstudie und Definition von Einfluss- und Wirkgrößen

Als Basis der Untersuchungen sind die asphalt-technologischen Grundlagen zum Einsatz von offenporigen Asphalten in Tunneln oder Einhausungen zu analysieren und im Hinblick auf das Forschungsziel zu bewerten.

3.1 Offenporiger Asphalt

Offenporige Asphaltdeckschichten werden in Deutschland vermehrt eingesetzt. Die Vorteile der Bauweise liegen in der Verkehrssicherheit bei Nässe durch Verhinderung von Aquaplaning und Verminderung der Sprühhahnen sowie der reduzierten Lärmemission. Mit offenporigem Asphalt wurden bereits in den 1950er Jahren in England erste Erfahrungen gemacht. Systematisch wurde diese Bauweise in den 60er und 70er Jahren erprobt. Hierbei sind zwei maßgebliche Entwicklungsperioden/-schritte zu unterscheiden. In der ersten Periode wurde verstärkt Augenmerk auf die

¹ [HU 2008]

verbesserten wasserabführenden Eigenschaften des Asphaltes, d. h. die Drainage, gelegt, die Verkehrstechnik stand hier im Mittelpunkt. In der zweiten Entwicklungsperiode rückte zunehmend die umwelttechnische Komponente, die Reduzierung der Lärmemissionen, in den Vordergrund. Dies wird durch eine ausgeprägte und verzweigte („interagierende“) Hohlraumstruktur erreicht, die den Schall absorbiert und eine Luftdrainage unter dem Reifen ermöglicht. Aerodynamische Effekte in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche (Luftkompression und –dekompression) werden vermindert. So können offenporige Beläge im Neuzustand Lärminderungen von bis zu 10 dB(A) erreichen. Aufgrund der Verschmutzungsanfälligkeit und der damit verbundenen Reduzierung der lärmindernden Wirkung wird einschichtigen offenporigen Asphaltdeckschichten mit einem Größtkorn von 8 mm und einer akustisch wirksamen Schichtdicke von 4 cm allerdings nur ein D_{STIO} -Korrekturwert von -5 dB(A) zugewiesen [UBA 2014].

In den letzten Jahren standen neben der Verbesserung der Lärminderung zunehmend auch die bautechnischen Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit, im Vordergrund.

3.1.1 Definition und Charakteristik

Unter dem Begriff „offenporiger Asphalt“ werden bituminöse Schichten verstanden, die im verdichteten Zustand einen hohen Anteil an Hohlräumen besitzen. Während bei üblichen Asphaltdeckschichten der Hohlraumgehalt in einer Größenordnung von ca. 3 bis 8 Vol.-% liegt, müssen offenporige Asphaltdeckschichten einen Hohlraumanteil von > 22 Vol.-% besitzen. Im „Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten“ [M OPA 2013], das im weiteren Verlauf als „Merkblatt OPA“ bezeichnet wird, wird ein Hohlraumgehalt am Marshallkörper von 24 bis 28 Vol.-% gefordert. Diese Anforderung wird ebenfalls in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt [ZTV-Asphalt 2013] gestellt.

Um diesen Hohlraumgehalt zu erzielen wird eine Sieblinie mit Ausfallkörnung verwendet (siehe Bild 1). Es kommt nahezu nur eine Splittfraktion zum Einsatz, Sand darf nur in geringen Mengen bis gar nicht verwendet werden und der zulässige Fülleranteil ist ebenfalls sehr begrenzt [VEL 2008], [M OPA 2013].

Dieses speziell konzipierte Monokorngerüst wirkt sich auch positiv auf die Spurrinnenbildung aus, da die Splittkörner wegen der fehlenden Sandkomponente nicht im Asphaltmörtel eingebettet sind,

sondern sich direkt aufeinander abstützen können (siehe Bild 2).

Die maximale Korngröße des „Einkorn-Gemischs“ beschränkt sich auf die beiden Durchmesser 11 mm bzw. 8 mm, woraus sich auch die Beschreibung PA 11 und PA 8 des offenporigen Asphaltes ergibt. Größtkörner von 16 mm Durchmesser werden nur bei zweischichtigen offenporigen Asphalten in der unteren Schicht verwendet. Für kleinere Körnungen als 8 mm würden sich zu geringe Hohlraumgehalte ergeben, so dass sie nicht Bestandteil geltender deutscher Normen sind. (In den Niederlanden kommen allerdings auch offenporige Beläge mit einem Größtkorn von nur 5 mm zum Einsatz.)

Das aus der spezifischen Kornzusammensetzung resultierende Korngerüst ist auf der einen Seite Voraussetzung für die guten akustischen Eigen-

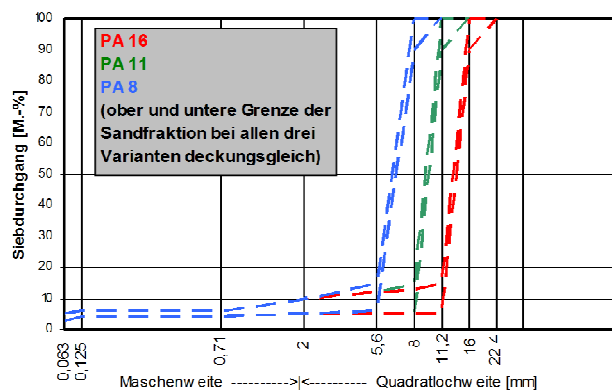


Bild 1: Typische Sieblinien von offenporigen Asphalten mit unterschiedlichem Größtkorn

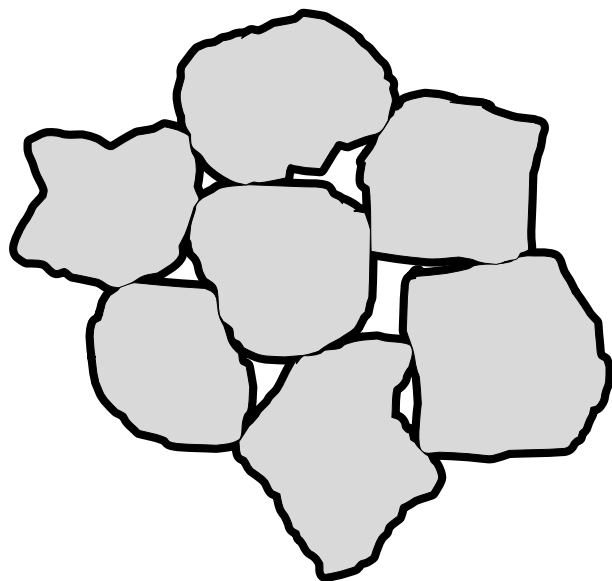


Bild 2: Korngerüst bei einem offenporigen Asphalt (schematische Darstellung)

schaften, weist auf der anderen Seite aber Defizite hinsichtlich des Widerstandes gegenüber Schub- und Scherkräften auf, wie sie beispielsweise bei Abbiege- und Verzögerungsvorgängen auftreten. Durch derartige Beanspruchungen kann es zu Kornausbrüchen kommen, welche die Wirksamkeit und die Lebensdauer des Belages mindern. In Innenstädten ist PA daher nur vereinzelt zu finden.

Wie bereits erwähnt, nimmt insbesondere die lärmreduzierende Wirkung des PA infolge einer über die Liegezeit fortschreitenden Verschmutzung durch Staub, Reifenabrieb und organischen Substanzen sukzessive ab.

3.1.2 Einbindung des PA im Regelwerk

Offenporige Deckschichten sind seit 1991 im entsprechenden Merkblatt enthalten. Bei den hier beschriebenen offenporigen Asphaltbelägen handelte es sich um die sogenannte 2. Generation dieser Bauweise. Vor dem Erscheinen des Merkblatts OPA wurden offenporige Asphaltbeläge noch als Drainasphaltpflaster bezeichnet. Im Jahre 1998 folgte die überarbeitete Version des Merkblattes, welche sich mit der sogenannten 3. Generation der offenporigen Asphaltbeläge befasste. Mit der Einführung weiterer Regelwerke wie den TL Asphalt-StB 07, den ZTV Asphalt-StB 07 und den TP Asphalt-StB 07, wurde die einschichtige offenporige Asphaltbauweise in den Stand einer Regelbauweise erhoben. Damit gilt für offenporige Asphaltbeläge wie auch für die anderen Regelbauweisen die Erstellung der Erstprüfung nach [TL-Asphalt 2013], die Ausführung, Prüfung und Abnahme der Schicht nach [ZTV-Asphalt 2013] (siehe Tab. 1) sowie alle anzusetzenden Prüfverfahren nach [TP-Asphalt 2007a]. Die zu verwendenden Gesteinskörnungen sind in den [TL-Gestein 2007] geregelt, das anzuwendende Bitumen in den [TL-Bitumen 2013]. In der aktuellen Fassung von 2013 wurde das „Merkblatt OPA“ [M OPA 2013] fortgeschrieben und enthält neben der einschichtigen auch die zweischichtige Bauweise.

Schichteneigenschaften		PA 11	PA 8
Einbaudicke einschließlich Abdichtung	cm	5,0 bis 6,0	4,5 bis 5,0
Verdichtungsgrad	%	≥ 97,0	≥ 97,0
Hohlraumgehalt (fertige Schicht)	Vol.-%	22,0 bis 28,0	22,0 bis 28,0

Tab. 1: Deckschichten aus offenporigem Asphalt nach [ZTV-Asphalt 2013]

3.1.3 Anforderungen an die zu verwendenden Materialien

Die Zusammensetzung des offenporigen Asphalts muss einerseits einen hohen Anteil an zusammenhängenden Hohlräumen zulassen, andererseits muss aber auch eine ausreichende Standfestigkeit sowie Verklebung der Gesteine gewährleistet werden. Diese beiden Forderungen müssen durch die zielgerichtete Auswahl der Gesteine, des Bindemittels und der Mischgutzusammensetzung erreicht werden.

Gesteinskörnungen

Für die Erzielung eines hohen Hohlraumgehaltes war die Verwendung eines sogenannten „Einkorn-Gemisches“ erforderlich. Durch die fast ausschließliche Verwendung einer einzelnen Korngröße bzw. Kornklasse (vgl. Sieblinie in Bild 1) ergeben sich zwischen den Körnern nur wenige Kontaktstellen. Da die kleineren Kornfraktionen fehlen, bleiben die Zwischenräume frei und bilden das Porensystem.

Nach dem aktuellen Merkblatt [M OPA 2013] kann zwischen einer einschichtigen Ausführung als PA 8 oder PA 11 und einer zweischichtigen Ausführung, bestehend aus einer oberen Schicht aus PA 8 und einer unteren Schicht aus PA 11 oder PA 16 unterschieden werden. Die Verwendung einer feineren Zusammensetzung läuft der Forderung nach einem hohen Hohlraumanteil entgegen. Der Einsatz von gröberen Körnungen wirkt sich ungünstig auf die Schallemission aus, da mit zunehmender Korngröße auch die Rollgeräusche zunehmen.

Aufgrund der besonderen Korngrößenverteilung bestehen besondere Anforderungen an die Gesteine in Bezug auf:

- Kornform
- Schlag- und Kantenfestigkeit
- Bruchflächigkeit und
- Polierresistenz (PSV)

Für die **Kornform** wird dementsprechend im Merkblatt [M OPA 2013] gefordert, dass zum Erreichen des gewünschten Hohlraumgehalts die Kornformkennzahl (SI) den Wert von 10 nicht überschreitet und der Unterkornanteil nicht mehr als 8 M.-% betragen darf. Die Prüfung ist nach der Norm zur Prüfung der Gesteinsform durchzuführen.

Die Schlagfestigkeit der Gesteine ist, wie bei allen anderen Asphaltbauweisen, vor allem hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung während des Einbaus der Schicht wichtig. Durch eine hohe

Schlagfestigkeit soll einer möglichen Kornzertrümmerung schon während des Einbaus entgegengewirkt werden. Der Schlagzertrümmerungswert $SZ_{8/12}$ soll höchstens 18 M.-% betragen (Bezeichnung nach [TL-Gestein 2007]: SZ_{18}).

Die **Bruchflächigkeit** der Gesteine ist unter anderem auch für den Einbau entscheidend, da hierdurch eine ausreichende Verzahnung der Gesteine gewährleistet wird. Es dürfen nur Gesteinskörnungen mit einer vollständig gebrochenen Oberfläche verwendet werden.

Da die groben Gesteinskörnungen aufgrund der fehlenden Sandkomponente einer starken Polierbeanspruchung ausgesetzt sind, werden erhöhte Anforderungen an die **Polierresistenz** gestellt. Es wird ein PSV-Wert von 54 (Bezeichnung nach [TL-Gestein 2007]: PSV_{54}) gefordert.

Bindemittel

Auch an das eingesetzte Bindemittel werden erhöhte Anforderungen gestellt, denn aufgrund der hohen Hohlraumgehalte ist es einem sehr starken Alterungsangriff durch den Luftsauerstoff ausgesetzt. Des Weiteren kommt der Verklebung der Steine auf Grund der direkten Korn-auf-Korn Abstützung ein besonderer Stellenwert zu. Um eine Rissbildung bei Tieftemperaturen zu vermeiden werden Bindemittel empfohlen, deren Brechpunkt nach Fraaß kleiner als -15°C ist. Das Bindemittel muss also folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Alterungsbeständigkeit
- gute Kälteflexibilität
- gute Affinität zum Gestein
- hohe Klebkraft

Das derzeit in offenporigen Asphalten nach Norm eingesetzte Bitumen [TL-Asphalt 2013] ist ein hochmodifiziertes Polymerbitumen der Sorte PmB 40/100 – 65 A. Der Bindemittelanteil in offenporigem Asphalt beträgt ca. 5,3 M.-% bis 6,5 M.-%. Um das Abfließen des Bindemittels von den Gesteinskörnern zu verhindern, sind gemäß [M OPA 2013] stabilisierende Zusätze wie Zellulosefasern in einer Größenordnung von ca. 0,5 M.-% hinzuzufügen.

3.1.4 Anforderungen an den Einbau

Vor dem Aufbringen einer offenporigen Deckschicht ist die Unterlage wasserundurchlässig auszuführen, damit die darunterliegenden Schichten nicht in ihrer Haltbarkeit gefährdet werden. Die Schichten unter der offenporigen Deckschicht müssen statischen und dynamischen Wasserdruck infolge rollender Reifen standhalten. Die Abdich-

tung kann entweder durch eine bitumenhaltige Bindemittelschicht inklusive Abstreuerung, eine SAMI-Schicht (Stress Absorbing Membrane Interlayer) oder auch nach positiven Erfahrungen in Nordrhein-Westfalen durch eine dünne Gussasphaltschicht hergestellt werden. Die Herstellung einer offenporigen Deckschicht sollte nach dem Regelwerk ([M OPA 2013], [ZTV-Asphalt 2013]) unbedingt maschinell und in voller Breite erfolgen. Quer- und Längsnähte sind zu vermeiden, da sie die Entwässerung innerhalb der offenporigen Schicht behindern können. Des Weiteren gilt für offenporige Asphaltdeckschichten, dass das eindringende Wasser stets nach außen abgeleitet und dort stauungsfrei abgeführt werden muss.

3.2 Einsatz von PA im Straßenbau

Die Wirkungsweise offenporiger Asphalte besteht zunächst in der Ableitung von Wasser aus der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Darüber hinaus werden durch die Hohlraumstruktur die Reifen-Fahrbahn-Geräusche reduziert.

3.2.1 Reifen-Fahrbahn-Geräusch

Die Entstehung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen hängt maßgeblich vom Hohlraumgehalt der Asphaltdeckschicht ab. Die Oberflächenstruktur und die vorhandene Rautiefe des Belags haben ebenfalls einen Einfluss. Durch eine offenporige Gestaltung der Deckschicht, wie es beim PA der Fall ist, können Reifen-Fahrbahn-Geräusche verringert werden. Zudem wird die Frequenz der Rollgeräusche in einen tieferen Frequenzbereich verschoben, wodurch die Geräusche nicht mehr so stark wahrgenommen werden.

Eine weitere Wirkung des hohen Hohlraumanteiles ist, dass der in die Schicht eindringende Schall durch Absorption gemindert wird. Die Schallabsorption der Schicht ist frequenzabhängig und hängt zudem stark von der Dicke der Schicht ab. Verschiedene Untersuchungen haben ergeben, dass eine gute Absorption bei einer Dicke von 3 bis 6 cm vorhanden ist. Die einzubauende Sichtstärke ist abhängig von der Verkehrsstärke, der Verkehrszusammensetzung und der gefahrenen Geschwindigkeit. Im Rahmen der Konzeption sollte neben der bautechnischen auch eine schalltechnische Betrachtung durchgeführt werden.

In Bild 3 ist der Einfluss von Schichtdicke, Hohlraumgehalt und Strömungswiderstand auf den Frequenzgang des Schallabsorptionsgrades zu sehen. Während der Hohlraumgehalt das Maximum des Schallabsorptionsgrades bestimmt, werden die Lage und die Breite des Maximums

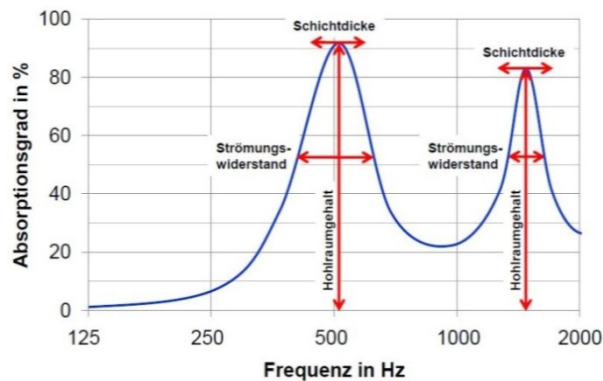


Bild 3: Absorptionsfrequenzgang und Anpassung eines „idealen“ offenporigen Asphalts [RES 2010]

von der Schichtdicke bzw. dem Strömungswiderstand determiniert. Durch geeignete Wahl der genannten drei Parameter kann die akustische Wirkung eines PA gezielt beeinflusst werden.

3.2.2 Durchlässigkeit

Bei der Wasserdurchlässigkeit von Asphalt spielen mehrere Kenngrößen eine Rolle. Die Wesentlichste ist der Hohlraumgehalt des Asphaltgemisches. Ab einem Hohlraumgehalt von ca. 15 Vol.-% gilt ein Asphalt als wasserdurchlässig. Mit zunehmendem Hohlraumgehalt steigt die Wasserdurchlässigkeit stetig an. Der Hohlraumgehalt ist vor allem von der Zusammensetzung des Gesteinsgemisches und der Kornform abhängig. Steigende Sand- und Fülleranteile reduzieren den Hohlraumgehalt, wobei eine günstige Kornform zu tendenziell höheren Hohlraumgehalten führt. Bei ungünstiger Kornform (Verhältnis Länge zu Dicke > 3) kann es bei der Verdichtung zu Kornzertrümmerungen kommen, so dass der erforderliche Hohlraumgehalt möglicherweise unterschritten wird [ALB 2013].

Allerdings gibt es derzeit für offenporige Asphalte keine Grenzwerte bezüglich der Wasserdurchlässigkeit. Das Merkblatt OPA schreibt dazu lediglich: „Das Oberflächenwasser muss auf der Unterlage der offenporigen Asphaltdeckschicht zum Rand abgeführt werden; ein Aufstauen des Wassers ist unbedingt zu verhindern“. Auch eine Prüfung der Wasserdurchlässigkeit im Labor oder nach dem Einbau wird nicht vorgeschrieben.

Eine weitere wesentliche Beobachtung bei Wasserdurchlässigkeitsversuchen an Asphaltprobekörpern ist, dass mit gleicher Mischgutzusammensetzung und gleichem Hohlraumgehalt hergestellte Probekörper wesentliche Unterschiede in der Wasserdurchlässigkeit aufweisen können. Diese signifikanten Unterschiede sind mit unterschiedlichen Hohlraumstrukturen zu erklären. Als Hohl-

raumstruktur ist die Größe, Form und Verteilung der Hohlräume zu verstehen. So kann der Hohlraumgehalt zweier Probekörper nahezu identisch sein, jedoch die Art der Hohlräume sich grundlegend unterscheiden. In [LIN 1993] werden drei verschiedene Hohlraumarten an offenporigen Asphalten differenziert, die in Bild 4 dargestellt sind:

- Typ A: Hohlräume, die in Verbindung stehen, ergeben ein miteinander kommunizierendes Hohlräumensystem
- Typ B: oberflächlich zugängliche Hohlräume, jedoch ohne Bindung zu anderen Hohlräumen
- Typ C: eingeschlossene Hohlräume, die nicht in Verbindung zu Typ A oder B stehen

Für das Dränvermögen wesentliche Hohlräume sind Typ A und B. Auch wenn Typ B kein „Abfließen“ des Wassers aus der offenporigen Schicht ermöglicht, nehmen diese Hohlräume Wasser auf. Hohlräume vom Typ A ermöglichen dem Wasser, durch die offenporige Asphaltsschicht abzufließen – vertikal wie horizontal. Daher wird die Summe aus den Hohlräumen A und B effektiver Hohlraum genannt, die Summe aller drei Hohlraumarten Gesamthohlraumgehalt. In [LIN 1993] wird jedoch darauf verwiesen, dass hinsichtlich der Wirksamkeit der Wasserdurchlässigkeit der effektive Hohlraum und der Gesamthohlraumgehalt als gleichwertig zu betrachten sind. Daher wird im Folgenden der Arbeit weiterhin der Gesamthohlraumgehalt als Parameter zur Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit verwendet. Der Gesamthohlraumgehalt wird vereinfacht als Hohlraumgehalt bezeichnet.

Ist der Hohlraumgehalt noch recht einfach zu steuern, wird eine gezielte Beeinflussung der Hohlraumstruktur wesentlich schwieriger.

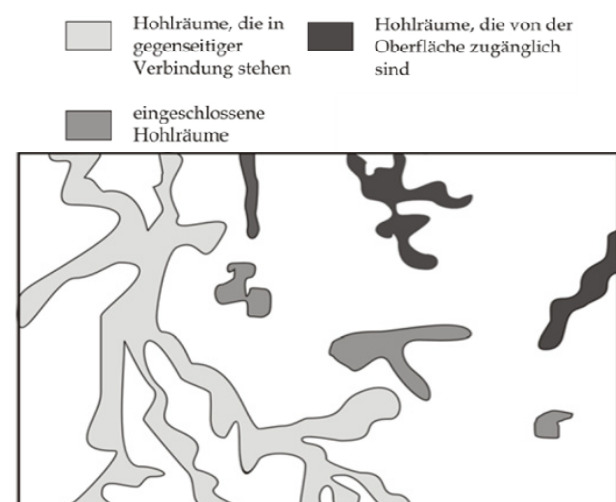


Bild 4: Offenporige Asphalt-Deckschicht; Hohlraum- bzw. Porenstruktur [LIN 1993]

Diese Vielzahl der Einflussgrößen macht eine gezielte Beeinflussung auf einen bestimmten Hohlraumtyp schwierig.

Die Messung des Hohlraumgehaltes gestaltet sich ebenfalls nicht einfach. Dieser wird nach den [TP-Asphalt 2007a] über die Messung der Raumdichte bestimmt. Für die Bestimmung der Raumdichte von offenporigem Asphalt wird das Verfahren D „Raumdichte durch Ausmessen“ verwendet. Dabei wird das Volumen des Probekörpers bestimmt („ausgemessen“) und mit Hilfe seiner Trockenmasse die Raumdichte berechnet. Vor allem bei ungleichmäßigen Probekörpern ist dieses Verfahren ungenau.

3.3 Brandverhalten von Flüssigkeitsbränden

Charakteristisch für Flüssigkeitsbrände ist die Ausbildung von Lachen nach einer Freisetzung von brennbaren Flüssigkeiten. Die räumliche Ausdehnung einer Lache ist hierbei abhängig von der Freisetzungsrates, der Abbrandrate sowie den hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds wie der Rauheit, der Porosität und der Neigung der Oberfläche. Die daraus resultierende Brandleistung wird maßgeblich durch die für die Verbrennung zur Verfügung stehende Fläche einer Lache bestimmt. Im Folgenden werden grundlegende Ansätze und Verfahren zur Ermittlung der Brandleistung aufgrund von flüssigen Brennstofffreisetzungen auf unterschiedlichen Oberflächen vorgestellt.

3.3.1 Lachenbrände auf dichten Oberflächen

Im Fall von dichten Oberflächen existieren zur Abschätzung der Brandleistung in Abhängigkeit von der Brandfläche verschiedene analytische Ansätze. Diese können als wertvolle Orientierungshilfen dienen, sind jedoch auf bestimmte Anwendungsfälle beschränkt. Grundvoraussetzung hierbei ist, dass sich eine Lache unbehindert auf einer ebenen Fläche ausbilden und sich ein Brand uneingeschränkt entwickeln kann.

3.3.1.1 Ansatz Massenbilanz

Die Ermittlung der infolge einer Freisetzung entstehenden Brandfläche sowie die daraus resultierende Brandleistung erfolgt bei diesem Ansatz über die Bilanzierung der in einem Untersuchungsraum auftretenden Massenströme. Sämtliche zu- und abgehende Massenströme müssen sich im Gleichgewicht befinden. Den zugehenden Massenstrom (Quelle) bildet hierbei die Freisetzungsrates \dot{m} [kg/s]. Abgehende Massenströme (Sen-

ken) sind die Brandrate \dot{m}_F [kg/s] sowie der Abfluss über Entwässerungseinrichtungen \dot{m}_D [kg/s]. Daraus resultiert folgende Bilanzierungsgleichung:

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \dot{m}_F + \dot{m}_D \\ &= \dot{m}'' \cdot A_F + \dot{m}_D\end{aligned}\quad (1)$$

Mit:

\dot{m} : Freisetzungsrates [kg/s]

\dot{m}_F : Brandrate [kg/s]

\dot{m}_D : Massenstrom für Drainage [kg/s]

A_F : Brandfläche [m²]

\dot{m}'' : Flächenbezogene Brandrate [kg/(m²/s)]

Durch Umformen der Gleichung für die Bilanzierung der Massenströme erhält man für die Brandfläche folgenden Zusammenhang:

$$A_F = \frac{\dot{m} - \dot{m}_D}{\dot{m}''}\quad (2)$$

3.3.1.2 Ansatz Ausbreitung

Auf Basis von empirischen Untersuchungen zur Lachenbildung lassen sich für Brände auf nicht porösen Untergründen mit flüssigen Kohlenwasserstoffen in Abhängigkeit der Freisetzungsrates, der Freisetzungsdauer und der Freisetzungsdauer Lachendurchmesser bestimmen. Die Berechnungen unterscheiden im Hinblick auf die Freisetzungsrates zwischen einer kontinuierlichen und spontanen Freisetzung.

Kontinuierliche Freisetzung

Erfolgt die Freisetzung einer brennbaren Flüssigkeit kontinuierlich, so stellt sich nach [MUD 1995] zwischen dem Zustrom und der stoffspezifischen Abbrandrate folgender stationäre Durchmesser D_{eq} ein:

$$D_{eq} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}_L}{\pi \cdot \dot{y}}}\quad (3)$$

Die Zeit bis zum Erreichen des stationären Durchmessers kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$t_{eq} = 0,564 \cdot \frac{D_{eq}}{\left[g' \cdot \dot{y} \cdot D_{eq}\right]^{\frac{1}{3}}}\quad (4)$$

Spontane Freisetzung

Im Fall einer spontanen Freisetzung lässt sich nach [MUD 1995] auf einer glatten, horizontalen Fläche der Durchmesser einer Lache in Abhängigkeit der Zeit über folgende Beziehung abschätzen:

$$D_e = \quad (5)$$

$$D_m \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{t}{t_m} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{t_m} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

Der maximale Lachendurchmesser D_m bestimmt sich hierbei über nachfolgenden Zusammenhang:

$$D_m = 2 \cdot \left[\frac{V_L^3 \cdot g'}{y^2} \right]^{\frac{1}{8}} \quad (6)$$

Die Zeit t_m bis zum Erreichen des maximalen Lachendurchmessers kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$t_m = 0,6743 \cdot \left[\frac{V_L}{g' \cdot y^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Über die Branddauer betrachtet stellt sich gem. nachfolgendem Zusammenhang ein mittlerer Lachendurchmesser ein.

$$D_a = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot D_m \approx 0,683 \cdot D_m \quad (8)$$

Mit:

D_{eq} : Stationärer Lachendurchmesser [m]

t_{eq} : Zeit bis zum Erreichen des stat. Lachendurchmessers [s]

\dot{V}_L : Freisetzungsrate [m³/s]

D_e : Lachendurchmesser zur Zeit t [m]

D_m : Maximaler Lachendurchmesser [m]

t_m : Zeit bis zum Erreichen des max. Lachendurchmessers [s]

D_a : Zeitlich gemittelter Lachendurchmesser [m]

t : Zeit ab Freisetzungsbeginn [s]

V_L : Gesamtvolumen der freigesetzten brennbaren Flüssigkeit [m³]

y : Vertikale Abbrandrate [m/s]

g' : Effektive Erdbeschleunigung [m/s²]

g : Erdbeschleunigung [m/s²]

$g' = g$ auf festem Untergrund

$g' = g \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_W} \right)$ auf Wasser

ρ_L : Dichte brennbarer Flüssigkeit [kg/m³]

ρ_W : Dichte von Wasser [kg/m³]

Tab. 1 enthält im Rahmen von Versuchen bei Lachenbränden mit flüssigen Kohlenwasserstoffen ermittelte vertikale Abbrandraten.

Mit Hilfe der berechneten Lachendurchmesser ergibt sich unter der Annahme einer kreisrunden Lachenausbildung die Brandfläche wie folgt:

$$A_F = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (9)$$

3.3.1.3 Brandleistung

Die Brandleistung bestimmt sich über die Brandrate und den effektiven Heizwert eines Stoffes. Für zahlreiche flüssige Brennstoffe sind flächenbezogene Brandraten ermittelt worden. So ergibt sich unter Berücksichtigung eines Umsetzungsgrades folgender Zusammenhang zur Bestimmung der Brandleistung:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_F \cdot \Delta H_{eff} \\ &= A_F \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c \end{aligned} \quad (10)$$

Mit:

\dot{Q} : Brandleistung [MW]

A_F : Brandfläche [m²]

\dot{m}'' : Flächenbezogene Brandrate [kg/(m²/s)]

χ : Umsetzungsgrad [-]

ΔH_c : Heizwert [MJ/kg]

Quelle	Brennstoffe	Lachendurchmesser	Vertikale Abbrandrate
[BLI 1957]	Benzin, Kerosin, Diesel	0,004 – 22,9 m	0,67 * 10 ⁻⁴ m/s
[NWC]	Benzin	~ 36 m	~ 0,82 * 10 ⁻⁴ m/s
[JSS 1982]	Benzin-Kerosin Gemisch	30 – 80 m	0,8 * 10 ⁻⁴ m/s

Tab. 1: Lachendurchmesser und vertikale Abbrandrate von Lachenbränden auf dichten Oberflächen

Der Umsetzungsgrad bzw. die Verbrennungseffektivität berücksichtigt das Verhältnis von im Brand freigesetzter Wärme zur max. möglichen Wärme resultierend aus dem Heizwert H_c und der Pyrolyserate.

In Tab. 2 sind beispielhaft für verschiedene Benzinfreisetzungen und unterschiedliche Berechnungsmethoden die sich ergebende Brandfläche und Brandleistung unter Berücksichtigung der hierzu erforderlichen Parameter aufgeführt.

Aus Tab. 2 geht hervor, dass bei gleicher Freisetzungsrates die unterschiedlichen Rechenansätze zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Bei einer kontinuierlichen Freisetzung von 20,6 kg/s sind Brandleistungen von ca. 600 MW zu erwarten. Im Fall einer großen kontinuierlichen Freisetzung mit 300 kg/s, die in ihrer Ausbreitung mit einer spontanen Freisetzung vergleichbar ist, wird eine Brandleistung von 8.762 MW bestimmt. Diese entspricht in ihrer Größenordnung der Brandleistung von 7.597 MW, die sich über den Ansatz einer spontanen Freisetzung und einem über die Branddauer gemittelten Lachendurchmesser ergibt. Im Vergleich zu einer kontinuierlichen Freisetzung erge-

ben sich bei einer spontanen Freisetzung bis zu 15-fach höhere Brandleistungen. Zu beachten ist, dass diese Ergebnisse nur im Freifeld Gültigkeit besitzen und nicht ohne die Berücksichtigung von weiteren Einflüssen auf die Verhältnisse in Tunneln übertragbar sind. Aufgrund der Ventilationsbedingungen in Tunneln, können Brände in Tunneln infolge einer reduzierten Sauerstoffzufuhr deutlich langsamer und damit mit deutlich geringerer Brandleistung ablaufen als im Freifeld.

3.3.2 Lachenbrände auf porösen Oberflächen

Hinsichtlich der Ausbildung von Lachenbränden auf porösen Oberflächen sind bisher nur wenige Kenntnisse vorhanden. Erste Untersuchungen aus China zeigen, dass sich der Hohlraumgehalt brandhemmend auswirken kann. Sowohl die Energiefreisetzung als auch die Flammausbildung sind im Vergleich zu oberflächendichten Belägen geringer. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Brandversuche lediglich an sehr kleinen Versuchskörpern (Marschall-Probekörper) durchgeführt wurden. [YAN 2004], [DING 2009], [YAN 2005], [HU 2008]

Parameter	Symbol	Einheit	Ansatz Massenbilanz	Ansatz Ausbreitung		
				Kont. Freisetzung	Spont. Freisetzung	
Freisetzungsrates (Massenstrom)	\dot{m}	[kg/s]	20,6	20,6 / 300	300	
Freisetzungsmasse	m	[kg]			28.000	
Freisetzungsvolumen	V_L	[m ³]			39	
Massenstrom für Drainage	\dot{m}_D	[kg/s]	0,0			
Dichte Benzin	ρ	[kg/m ³]		720	720	
Freisetzungsrates (Volumenstrom)	\dot{V}_L	[m ³ /s]		0,0286 / 0,4167		
Vertikale Abbrandrate	\dot{y}	[m/s]		0,00008	0,00008	
Stationärer Lachendurchmesser	D_{eq}	[m]		21,34 / 81,43	81,43	
Maximaler Lachendurchmesser	D_m	[m]			111,02	
Zeitlich gemittelter Lachendurchmesser	D_a	[m]			75,83	
Zeit bis zum stat. Lachendurchmesser	T_{eq}	[s]		47,04 / 114,87		
Zeit bis max. Lachendurchmesser	t_m	[s]			106,38	
Flächenbezogene Brandrate für Benzin	\dot{m}''	[kg/(m ² ·s)]	0,055			
Verbrennungsgrad	χ	[-]	0,7			
Heizwert	ΔH_c	[MJ/kg]	43,7			
Resultierende Brandfläche	AF	[m ²]	374	357 / 5.208	D_{eq}	D_m
					4.515	9.680
Resultierende Brandleistung	\dot{Q}	[MW]	630	600 / 8.762	7.597	16.286

Tab. 2: Beispielrechnungen für unterschiedliche Benzinfreisetzungen und Berechnungsmethoden

3.4 CFD-Modelle

Zur detaillierten Abbildung der Ausbreitungs- und Verbrennungsvorgänge auf unterschiedlichen Oberflächen werden Modelle erforderlich, die eine instationäre Berechnung dieser Prozesse im 3-dimensionalen Raum ermöglichen. Hierbei sind strömungsmechanische, thermodynamische und reaktionskinetische Gesetzmäßigkeiten zu berücksichtigen. Geeignete CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics) verfügen über Submodelle zur Abbildung von Mehrkomponenten- und Mehrphasenströmungen, Bränden, Turbulenzen (LES, $k\epsilon$ -Modell), Wärmeübertragung sowie chemischen Reaktionen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte zur Durchführung der Ausbreitungs- und Brandberechnungen der vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelte CFD-Code „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) verwendet werden. Dieser Code ist auf die Durchführung von Brandsimulation spezialisiert und wurde in zahlreichen Versuchsreihen, u. a. im Rahmen des im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung durchgeführten Forschungsprojektes „Brandversuche in Tunneln“ [BAST 2007], validiert und es konnten sehr gute Übereinstimmungen zwischen Messwerten und Simulationen nachgewiesen werden. Während der Bearbeitung zeigte sich jedoch, dass mit FDS das Ableit- und Durchflussverhalten auf offenporigen geneigten Flächen nicht realitätsnah abgebildet werden konnte. Im Weiteren wurde daher auf die Simulationssoftware „OpenFOAM“² zurückgegriffen. Diese CFD-Umgebung verfügt über zahlreiche Gleichungslöser und Modelle zur Abbildung von komplexen Strömungs- und Verbrennungsprozessen und erlaubt durch ihren modularen Aufbau das Schreiben eigener und die Erweiterung bestehender Löser. Dadurch ist OpenFOAM äußerst flexibel einsetzbar und wird sowohl in Forschungs- als auch Industrieanwendungen zunehmend genutzt.

Die Berechnungen zur Abbildung des Ableit- und Durchflussverhaltens auf den unterschiedlichen Fahrbahnbelägen erfolgte mit Hilfe eines Lagrange'schen Partikelmodells, da sich nur dadurch die Massen- und Volumenströme an den Rändern zuverlässig ermitteln lassen. Zur Minimierung des Rechenaufwandes wird die Lachenausbreitung mittels eines Dünnfilmmodells abgebildet. Die

Berücksichtigung der Druckverluste beim Durchströmen offenporiger Asphaltes erfolgt durch die Verwendung der Gleichungen nach Darcy und Forchheimer in einem entsprechenden Submodell.

Das zugrunde liegende Brandmodell erlaubt die Abbildung der während eines Verbrennungsprozesses freigesetzten Produkte. Durch die Kopplung mit dem Dünnfilmmodell lassen sich damit auch die hochdynamischen Vorgänge zwischen einer Lachenausbreitung und dem Abbrand von brennbaren Flüssigkeiten berücksichtigen.

3.4.1 Mathematisches Modell

Grundlage der Berechnungen zur Bestimmung der Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum bilden die nachfolgend aufgeführten zeitabhängigen Erhaltungsgleichungen für Masse-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung.

Massenerhaltung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot u = 0 \quad (11)$$

Stoffhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad (12)$$

Impulserhaltung

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \cdot u \right) + \nabla p = \rho \cdot g + f + \nabla \cdot \tau \quad (13)$$

Energieerhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_l \nabla \cdot h_l \rho D_l \nabla Y_l \quad (14)$$

Die hierbei benutzten Variablen sind in Tab. 3 zusammenfassend beschrieben.

Aufgrund ihrer Komplexität sind diese kontinuierlich formulierten Gleichungen nicht mehr analytisch lösbar und können nur näherungsweise mit Hilfe von numerischen Methoden gelöst werden. Hierzu müssen diese partiellen Differentialgleichungen zunächst diskretisiert werden, d. h., die in Raum und Zeit kontinuierlichen Differentialgleichungen werden nur noch an einer endlichen Anzahl von Punkten im Raum zu bestimmten Zeitpunkten betrachtet.

² OpenFOAM: Open Source Field Operation and Manipulation

3.4.2 Algorithmus

Der dem Modell zugrunde liegende Algorithmus zählt zu den sog. Druckkorrekturverfahren. Dabei wird ein nicht divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld mit Hilfe des Druckes durch Lösen einer Poissongleichung in ein divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld überführt. Im Einzelnen werden folgende Schritte bis zum Erreichen der vorgegebenen physikalischen Endzeit durchlaufen:

1. Festlegung des Endes der Berechnung t_{end}
2. Bestimmung der Zeitschrittweite δt
3. Berechnung eines nicht divergenzfreien Geschwindigkeitsfeldes $u^{(n)*}$
4. Lösung einer Poissongleichung für den Druck $p^{(n+1)}$ mit Hilfe des nichtdivergenzfreien Geschwindigkeitsfeldes $u^{(n)*}$
5. Berechnung der Geschwindigkeiten $u^{(n+1)}$ durch Korrektur des vorläufigen Geschwindigkeitsfeldes mit Hilfe des Druckes $p^{(n+1)}$
6. Berechnung von $T^{(n+1)}$, $c^{(n+1)}$, ...
7. Erhöhung der Zeit t um die Zeitschrittweite δt
8. Wiederholung der Schritte 1-7 bis t_{end} erreicht

Die Zeitschrittweite bestimmt sich aus den folgenden nach Courant-Friedrichs-Lewy (1928) benannten Stabilitätsbedingungen.

$$\alpha < \frac{\delta x}{|u_{\text{max}}|} \quad \alpha < \frac{\delta y}{|v_{\text{max}}|} \quad \alpha < \frac{\delta z}{|w_{\text{max}}|} \quad (15)$$

Danach darf sich ein Fluidteilchen innerhalb der Zeitschrittweite δt um nicht mehr als eine Gitterweite δx bewegen. Der Zeitaufwand zur Durchführung der Simulationsrechnungen resultiert somit aus der Zeitschrittweite δt und den zur Lösung der Gleichungen benötigten Rechenschritten.

3.4.3 Abbildbare Eigenschaften

Bei dem im Rahmen dieser Untersuchung zum Einsatz kommenden „Open-FOAM“ handelt es sich um ein CFD-Modell mit folgenden Eigenschaften:

- Instationäre Berechnung von Strömungsvorgängen im 3-dim. Raum
- Berücksichtigung versch. Aggregatzustände
- Abbildung mehrphasiger Strömungen
- Abbildung chemischer Reaktionen
- Abbildung von Verbrennungsprozessen und Bränden
- Berücksichtigung von Materialeigenschaften
- Berücksichtigung atmosphärischer Randbedingungen

Variable	Beschreibung
D_i	Diffusionskoeffizient des Stoffes i
f	Externer Kraftvektor (ohne Schwerkraft)
g	Schwerkraft
h	Enthalpie
h_i	Enthalpie des Stoffes i
\dot{m}_i'''	Produktionsrate des Stoffes i pro Volumeneinheit
p	Druck
q_r	Strahlungswärmeflussvektor
t	Zeit
$u = (u, v, w)$	Geschwindigkeitsvektor
Y_i	Massenanteil des Stoffes i
ρ	Dichte
τ	Viskoser Spannungstensor

Tab. 3: Nomenklatur der in den Formeln verwendeten Variablen

- Berücksichtigung geometrischer Randbedingungen (bauliche Ausbildung, Oberflächeneigenschaften etc.)

3.4.4 Maßgebliche Submodelle

Die zur Abbildung des Ableit- und Durchflussverhaltens auf unterschiedlichen Fahrbahnbelägen erforderlichen Submodelle werden nachfolgend kurz beschrieben.

3.4.4.1 Darcy-Forchheimer Modell

Im Fall von laminaren Strömungen in porösen Medien kann die Beschreibung von Druckverlusten bei der Durchströmung von porösen Medien über nachfolgenden Ansatz nach Darcy erfolgen. Hierbei werden lediglich Druckverluste aus der dynamischen Viskosität berücksichtigt.

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\eta}{k_1} u \quad (16)$$

Mit:

dp : Druckverlust [N/m²]

dx : Strecke [m]

η : dynamische Viskosität des Fluids [kg/(ms)]

k_1 : Permeabilität des porösen Mediums [m²]

u : Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Zur Berücksichtigung von Druckverlusten infolge von Turbulenzen wurde dieser Ansatz von Forchheimer um einen turbulenten Term erweitert:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\eta}{k_1} u + \frac{\rho}{k_2} u^2 \quad (17)$$

Mit:

dp: Druckverlust [N/m²]

dx: Strecke [m]

η : dynamische Viskosität des Fluids [kg/(ms)]

k_1 : Permeabilität des porösen Mediums [m²]

u: Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

ρ : Dichte [kg/m³]

k_2 : Permeabilitätskoeffizient 2 des porösen Mediums [m]

Mit Hilfe dieses Modellansatzes lassen sich somit Druckverluste beim Durchströmen von porösen Medien in Abhängigkeit der Strömungsausprägung (laminar, turbulent) berücksichtigen.

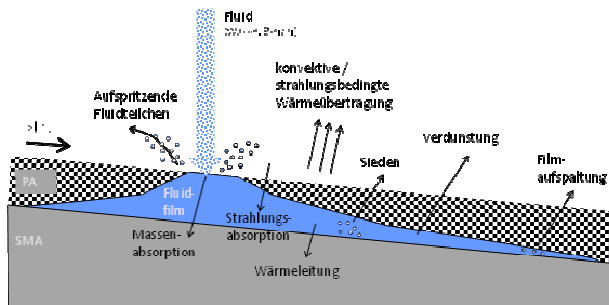


Bild 5: Abbildbare physikalische Eigenschaften im Dünnfilmmodell

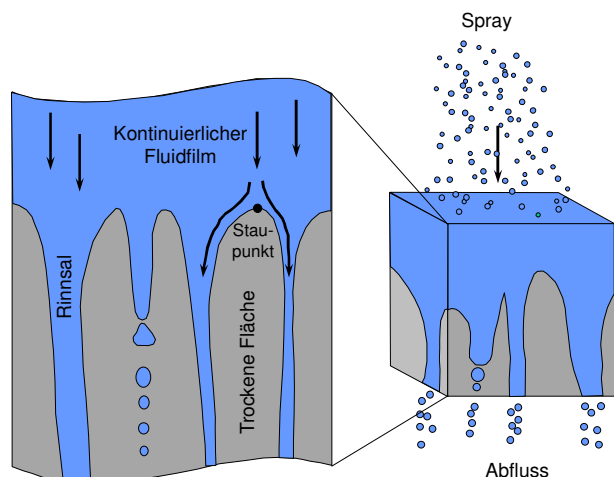


Bild 6: Filmaufspaltung [MER 2011]

3.4.4.2 Dünnfilmmodell

Charakteristisch für die Ausbildung von Lachen ist ihre geringe Schichtdicke sowie das Aufspalten der benetzten Fläche an den Lachenrändern. In Abhängigkeit von der Längsneigung vollzieht sich die Ausbreitung zunehmend stärker in Richtung des Gefälles. Im Fall von brennenden Flüssigkeiten erfolgt die Ausbreitung bis sich Zustrom und Abbrand der Flüssigkeit in einem Gleichgewicht befinden. Zur Berücksichtigung dieser Effekte wird ein Dünnfilmmodell verwendet. Dieses ermöglicht die Berücksichtigung von Gefälleinflüssen, das Aufspritzen von Flüssigkeitsteilchen beim Auftreffen auf Oberflächen, Effekte aus Wärmeleitung, Sieden und Verdunstung sowie die Aufspaltung des Flüssigkeitsfilms an den Lachenrändern. Der Abbrand von brennbaren Flüssigkeiten wird über ein chemisches Reaktionsmodell berücksichtigt. Eine ausführliche Beschreibung des Grundmodells ist in [MER 2011] enthalten. Bild 5 verdeutlicht die komplexen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Phasen. Der mit zunehmender Längsneigung verstärkte Effekt der Filmaufspaltung an den Lachenrändern, ist in Bild 6 dargestellt.

3.5 Straßenoberflächen in CFD-Modellen

Die Ausbildung einer Lache wird durch die Neigung sowie den Oberflächeneigenschaften einer Fahrbahn beeinflusst, da diese sich sowohl auf die Ausbreitungsrichtung als auch auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten auswirken. Im Fall von brennbaren Flüssigkeiten können sich daraus unterschiedliche Brandverläufe und Brandleistungen ergeben. Zu einer Erhöhung der Brandlast der Fahrbahn beitragen. Mit dem gewählten CFD-Modell lassen sich folgende Eigenschaften von Straßenoberflächen abbilden:

- Rauheit der Fahrbahnoberfläche
- Längsneigung der Fahrbahn
- Querneigung der Fahrbahn
- Brandlast der Fahrbahn
- Porosität der Fahrbahn

4 Versuchsprogramm zur Ermittlung der Einfluss- und Wirkgrößen

4.1 Herstellung der Versuchsplatten

4.1.1 Vorbemerkungen

Eine wesentliche Voraussetzung bestand in der Bereitstellung von großformatigen Versuchsplatten, da sowohl für die Durchflussversuche als auch für die Brandversuche die Abmessungen von laborgefertigten Walzsektor-Platten (26 x 32 cm) nicht ausreichen. Die Platten wurden deshalb auf der Einbaustrecke am Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen (isac) unter praxisnahen Bedingungen angefertigt (siehe Kapitel 4.1.2).

Aus bisherigen Erfahrungen, insbesondere bei Brandversuchen, können Versuchsergebnisse relativ stark streuen. Um zuverlässige Messdaten zu erhalten, war daher die Durchführung von drei Einzelversuchen je Versuchsaufbau erforderlich. Aufgrund der starken zu erwartenden Lösemittel-eigenschaft von Kraftstoff gegenüber Bitumen, konnten die Platten für die Ableit- und Durchflussversuche nicht anschließend auch für die Brandversuche verwendet werden. Es wurden demnach je Variante mindestens 15 Platten bereitgestellt, 6 Platten für die Ableit- und Durchflussversuche (2 Neigungen mit mindestens 3-facher Belegung), und 9 Platten für die Brandversuche³. Für die offenporigen Asphalte wurden zwei Varianten mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten untersucht. Diese Hohlraumgehalte sollten mit ca. 28 bzw. 22 Vol.-% den nach den ZTV Asphalt-StB 07/13 [ZTV-Asphalt 2013] zulässigen Bereich abdecken. Der geringere Hohlraumgehalt lässt sich hierbei auch als „planmäßige“ Verschmutzung gegenüber dem Ausgangswert interpretieren.

Als Referenzoberfläche für dichte Deckschichten diente ein Splitt-Mastix-Asphalt. Eine Betondeckschicht wurde nicht explizit betrachtet, da diese eine vergleichbar dichte Oberfläche aufweist. Die Unterschiede zu Betonoberflächen beschränken sich im Hinblick auf die zu untersuchende Fragestellung im Wesentlichen auf die Rauigkeit, die auf Basis von Literaturdaten und Erfahrungswerten abgeleitet werden kann. Unterschiede im Brand-

Kennwert	Wert
Gesamtbindemittelgehalt [M.-%]	6,3
Splittgehalt [M.-%]	94,1
Sandgehalt [M.-%]	1,2
Füllergehalt [M.-%]	4,7
Rohdichte Asphaltmischgut [g/cm ³]	2,586
Raumdichte MPK [g/cm ³]	1,937
Hohlraumgehalt MPK [Vol.-%]	25,1

Tab. 4: Wesentliche Kennwerte des auf der A4n eingebauten PA 8 (Angaben aus Erstprüfung)

verhalten infolge des Bitumens im SMA sind nicht zu erwarten.

4.1.2 Asphalteinbau auf der isac-Versuchsstrecke

Eine große Herausforderung innerhalb des Projekts bestand in der Beschaffung des vorgesehenen offenporigen Mischguts PA 8. Laut den Technischen Lieferbedingungen [TL-Asphalt 2013] darf in diesem Mischgut nur hochmodifiziertes Bitumen der Sorte 40/100-65 A verwendet werden. Da die Mischanlagen i. A. nur über eine begrenzte Anzahl an Bitumentanks verfügen, wird dieses spezielle Bitumen nur vorgehalten, wenn eine entsprechende PA-Baumaßnahme beliefert wird. Somit entfiel in diesem Falle auch die Option, das Mischgut speziell für diesen projektbezogenen Einbau separat herzustellen. Abgesehen von der Nichtverfügbarkeit des spezifischen Bitumens besteht bei einer „Einzelfertigung“ auch immer die Gefahr von Defiziten in der Homogenität des Asphaltmischgutes, bedingt durch den geringen Durchsatz an der Mischanlage. Somit ist die Alternative, Mischgut aus einer laufenden Baumaßnahme zu beziehen, immer zu bevorzugen.

Anfragen beim Landesbetrieb für Straßenbau NRW als ausschreibende Stelle und bei mehreren potenziellen Mischwerken im regionalen Umfeld ergaben, dass für Anfang Juni 2014 eine geeignete Baumaßnahme auf der A4n zwischen Kerpen und Buir (7. Bauabschnitt) geplant war. Das Mischgut PA 8 (ca. 8.000 t) für diese Maßnahme wurde von den Mischanlagen Ellen und Groß-Vernich der Rheinischen Asphalt-Mischwerke GmbH (RAM) produziert. Als Gesteinskörnung kam Diabas von den Westerwälder Hartsteinwerken zum Einsatz.

Die wesentlichen Kennwerte des Asphaltmischguts sind aus Tab. 4 ersichtlich. Die Erstprüfungsunterlagen des PA-Mischguts sind im Anhang enthalten.

³ Eine Zuordnung der einzelnen Versuchsplatten hinsichtlich der durchgeführten Versuche kann dem Anhang entnommen werden.

Da die Wahrscheinlichkeit für eine zweite Baumaßnahme mit PA 8 Mischgut in absehbarer Zeit relativ gering erschien, mussten beide Hohlraumvarianten (28 und 22 Vol.-%) während der aktuellen, vier Tage andauernden Baumaßnahme, realisiert werden.

Da der Hohlraumgehalt bei einem offenporigen Asphalt über das sich ausbildende Stützgerüst der Körner bestimmt wird, kann dieser, wie bei dichten Asphalten, nur sehr eingeschränkt über den Verdichtungsgrad, d. h. durch eine schwächere oder stärkere Verdichtung, signifikant beeinflusst werden. Bei einer zu intensiven Verdichtung besteht vielmehr die Gefahr der Kornzertrümmerung, die hinsichtlich der Auswirkungen auf den Hohlraumgehalt nur sehr schwer quantifizierbar ist. Die Erreichung des gewünschten geringeren Hohlraumgehaltes wäre rein zufälliger Natur. Die Verwirklichung von zwei deutlich voneinander abweichenden Hohlraumgehalten mit ein und demselben Mischgut erschien insofern fraglich.

Um dennoch eine ausreichend große Spreizung im Hohlraumgehalt erreichen zu können, wurde in Abstimmung mit dem Mischwerk Ellen vereinbart, den Füllergehalt um 1,0 M.-% auf 5,7 M.-% (bei gleichzeitiger Reduzierung des Splittgehaltes um den gleichen Anteil) und den Bindemittelgehalt um 0,2 M.-% auf 6,5 M.-% anzuheben. Für diese modifizierte Rezeptur sollte laut Aussage der RAM ein Hohlraumgehalt am MPK von ca. 20 Vol.-% erwartet werden können und damit ein um 5 Vol.-% geringerer Wert gegenüber der Rezeptur aus Tab. 4.⁴ Es konnte demzufolge davon ausgegangen werden, dass sich diese Spreizung zwischen den beiden PA-Varianten auch in den fertigen Platten wiederfindet.

Für den Transport des Mischguts vom Mischwerk Ellen bis zur Einbaustrecke am Institut für Straßenwesen Aachen wurde ein Lkw mit Ladekran eingesetzt, um vor Ort den Spezialfertiger von oben beschicken zu können. Während der etwa 45-minütigen Fahrt wurde das Mischgut mit einer Plane vor Auskühlung geschützt. Die Mischguttemperatur bei Anlieferung schwankte bei beiden PA-Lieferungen je nach Messstelle zwischen 140 und 160°C und lag damit im zulässigen Bereich (140-170°C nach ZTV Asphalt 07/13, Tabelle 5).

Der erste Einbau mit Zielhohlraumgehalt von 28 Vol.-% fand am 4. Juni 2014 und der zweite

Einbau ($V_{\text{Soll}} = 22 \text{ Vol.-%}$) zwei Tage später am 6. Juni 2014 statt. An beiden Tagen herrschten Temperaturen von über 20°C bei trockener Witterung.

Um die großformatigen Versuchsplatten nach erfolgtem Einbau entnehmen zu können, wurde auf der Strecke eine Holzunterlage vorgesehen, auf der zusätzlich eine Bitumenbahn aufgebracht wurde. Die Bitumenbahn übernahm in erster Linie die Funktion der Abdichtung innerhalb des PA-Konzeptes (ZTV Asphalt-StB 07/13, Abschn. 3.10). Darüber hinaus sorgte sie aufgrund der erhöhten Gleitreibung für ein vermindertes Schieben des Asphaltmischgutes während des Einbauprozesses.

Der gesamte Einbauprozess ist in Bild 7 bis Bild 11 in seinen einzelnen Arbeitsschritten dokumentiert.

Nach Herstellung der Unterlage erfolgte der Einbau mittels Fertiger über eine Breite von ca. 1 m und eine Länge von ca. 25 m. Während des Einbaus wurde die Schichtdicke kontrolliert, um die angestrebte Dicke nach Verdichtung von 5 cm zu erreichen.⁵

Die abschließende Walzverdichtung erfolgte gemäß dem „Merkblatt OPA“ [M OPA 2013] ausschließlich statisch in vier Übergängen.

Nach einer Liegedauer von ca. 24 Stunden wurden am Folgetag insgesamt 17 großformatige Asphaltplatten und mehrere Bohrkerne bzw. Ausbaustücke gemäß dem im Bild 12 dargestellten Schema entnommen. Aufgrund von Unstetigkeiten im Anfangs- und Endbereich sowie im Randbereich der Strecke sind nur die grün eingefärbten Bereiche nutzbar.

Bei einer durch die Fertigerbohle vorgegebenen Einbaubreite von 1 m reduziert sich die nutzbare Breite auf ca. 80 cm bei einer Nutzlänge von ca. 15 m. Unter diesen Randbedingungen wurden quadratische Platten mit Seitenlängen von 80 cm aus der Strecke entnommen (siehe Bild 13).⁶

Bei der Entnahme der Bohrkerne zur Überprüfung des Hohlraumgehaltes trat allerdings die Schwierigkeit auf, mit der Bohrkronen die Holzplatten zu durchbohren. Anstelle von Bohrkernen wurden daher bei beiden PA-Varianten quadratische Ausbaustücke mit einer Seitenlänge von ca. 20 cm durch Sägen entnommen (siehe Bild 14) und

⁴ Eine noch stärkere Umstellung in der Rezeptur konnte aufgrund der laufenden Produktion für die A4n nicht realisiert werden.

⁵ Anforderung nach ZTV Asphalt-StB 07/13: 4,5 - 5 cm

⁶ Vorversuche zum Durchflussverhalten von PA-Asphalten deuteten darauf hin, dass diese Abmessungen für die hier verfolgten Fragestellungen hinreichend sind.

hieran der Hohlraumgehalt gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6 (Verfahren D) durch Ausmessen bestimmt. Die Bitumenbahn an der Plattenunterseite wurde zuvor entfernt.



Bild 7: Aufbringen der Holzunterlage auf einer bestehenden Asphalt-schicht

Die Hohlraumgehalte für die jeweils neun untersuchten Stellen sind für die PA-Variante 1 ($V_{Soll} = 28$ Vol.-%) in Tab. 5 und für die PA-Variante 2 ($V_{Soll} = 22$ Vol.-%) in Tab. 6 zusammengestellt.



Bild 8: Verlegung der Bitumenbahn auf der Holzunterlage



Bild 9: Einbau des Mischguts PA 8 mittels Spezialfertiger



Bild 10: Kontrolle der Schichtdicke während des Einbauprozesses



Bild 11: Abschließende Walzverdichtung (statisch)

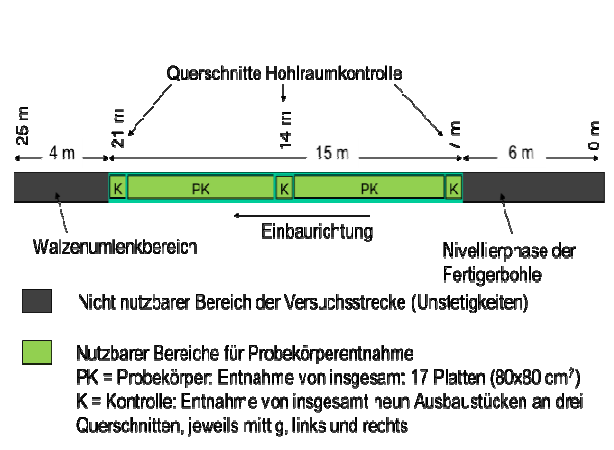


Bild 12: Entnahmefelder für Asphaltplatten und Bohrkern- bzw. Ausbaustücke



Bild 13: Entnahme der großformatigen Asphaltplatten mitsamt Holzunterlage



Bild 14: Ausbaustück (exemplarisch) zur Bestimmung des Hohlraumgehalts

Querschnitt	Seitliche Lage in Einbaurichtung	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	
		Einzelwert	Mittelwert
bei 7 m	Links	28,8	29,6
	Mitte	29,3	
	Rechts	30,6	
bei 14 m	Links	29,2	29,5
	Mitte	29,6	
	Rechts	29,8	
bei 21 m	Links	28,4	28,9
	Mitte	29,1	
	Rechts	29,1	

Tab. 5: Hohlraumgehalte PA-Variante 1 ($V_{\text{Soll}} = 28 \text{ Vol.-%}$)

Querschnitt	Seitliche Lage in Einbaurichtung	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	
		Einzelwert	Mittelwert
bei 7 m	Links	25,2	25,3
	Mitte	24,6	
	Rechts	26,2	
bei 14 m	Links	26,8	26,0
	Mitte	25,9	
	Rechts	25,5	
bei 21 m	Links	25,9	26,1
	Mitte	25,6	
	Rechts	26,7	

Tab. 6: Hohlraumgehalte PA-Variante 2 ($V_{\text{Soll}} = 22 \text{ Vol.-%}$)

Betrachtet man die Ergebnisse für den Hohlraumgehalt und beurteilt diese im Hinblick auf die Soll-Vorgaben, so lässt sich Folgendes feststellen:

Für die PA-Variante 1 ($V_{\text{Soll}} = 28 \text{ Vol.-%}$)

- Die Hohlraumgehalte liegen mit Werten zwischen 28,4 und 30,6 Vol.-% im Mittel um ca. 1,3 Vol.-% oberhalb des Zielwertes von 28 Vol.-%.
- Die Streuung der Einzelwerte für jeden Querschnitt unterscheidet sich nicht von der Gesamtstreuung, so dass insgesamt von homogenen Verhältnissen über den gesamten genutzten Bereich ausgegangen werden kann.
- Legt man die Werte aus der Erstprüfung für die Raumdichte am MPK und die Rohdichte zugrunde, so ergibt sich für den mittleren Hohlraumgehalt von 29,3 Vol.-% ein Verdichtungsgrad von 94,4 %. Dieser Wert liegt zwar unterhalb des Anforderungswertes von 97 %, ist aber für die hier verfolgte Fragestellung nur von untergeordneter Bedeutung, da Aspekte der Verformungsstabilität sowie weitere mechanische Beanspruchungen (z. B. aus Schubbelastung) nicht Gegenstand der Untersuchungen sind.

Für die PA-Variante 2 ($V_{\text{Soll}} = 22 \text{ Vol.-%}$)

- Die Hohlraumgehalte liegen im Mittel bei 25,8 Vol.-% und damit oberhalb des angestrebten Wertes von 22 Vol.-%, der die untere Grenze nach [ZTV-Asphalt 2013] darstellt.
- Die Streuung der Einzelwerte über die Breite ist vergleichbar mit der Streuung über die Länge, was auf homogene Verhältnisse innerhalb des gesamten beprobten Bereiches hinweist.
- Zum Verdichtungsgrad kann keine Aussage getroffen werden, da für die am Mischwerk – speziell für dieses Projekt – modifizierte Rezep-

tur kein separater MPK hergestellt wurde und demnach keine Referenzraumdichte zur Verfügung steht. Aus bereits genannten Gründen ist dies jedoch nicht von Belang.

Neben dem Hohlraumgehalt wirkt sich auch die Schichtdicke unmittelbar auf das Durchflussverhalten aus. An allen 34 PA-Platten wurden daher jeweils an den vier Seiten die Schichtdicken bestimmt (siehe Bild 15) und hieraus der Mittelwert für jede Platte (Plattendicke) berechnet.

In Bild 16 und Bild 17 sind die Plattendicken als mittlere Schichtdicke jeder Platte mit Angabe der Standardabweichung als Streumaß für die gemessenen Einzeldicken dargestellt.

Die Platten aus den nicht nutzbaren Bereichen (siehe Bild 12) wurden je nach Bedarf für Vorversuche genutzt. Die Zuordnung der Versuchsplatten wurde so festgelegt, dass die Platten der Brandversuche bezüglich der Schichtdicken möglichst homogen waren.

Bei der PA-Variante 1 streuen die Plattendicken zwischen 5,3 und 5,8 cm. Für die PA-Variante 2 wurden Werte zwischen 4,8 und 5,6 cm ermittelt. Der mittlere Dickenunterschied zwischen den beiden Varianten von 0,32 cm hat sich im Rahmen eines statistischen Mittelwertvergleichs als nicht signifikant herausgestellt. Die Schichtdicken der beiden Varianten sind somit statistisch miteinander vergleichbar. Die geringfügig größere Schichtdicke gegenüber der angestrebten Soll-Dicke von 5,0 cm ist vor dem Hintergrund der praxisnahen (lastgeregelten) Walzverdichtung vertretbar. Auch die Streuung der Mittelwerte über alle 17 Platten eines Einbaus hinweg ist bei beiden Varianten mit einer Standardabweichung von 0,13 bzw. 0,22 cm akzeptabel.

Jede Platte für sich weist eine homogene Dicke auf. Die Variationskoeffizienten der Schichtdicken innerhalb einer Platte liegen mit maximal 2,7 % für die erste und 3,9 % für die zweite PA-Variante auf einem sehr niedrigen Niveau. Eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch unterschiedliche Schichtdicken der beiden PA-Varianten kann somit ausgeschlossen werden. Die einzelnen Plattendicken können im Detail dem Anhang entnommen werden.

Als Referenzasphalt kam ein SMA 8 S mit PmB 25/55-55 A zum Einsatz, der in diesem Fall speziell für das Projekt von der Fa. Willy Dohmen GmbH in Übach-Palenberg hergestellt und angeliefert wurde.

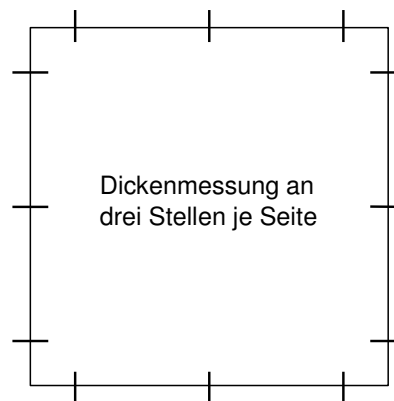


Bild 15: Dickenbestimmung an insgesamt 12 Messstellen je Platte

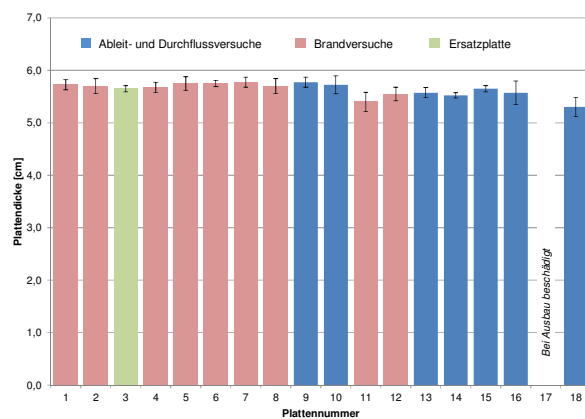


Bild 16: Streuung der Plattendicken (PA-Variante 1 mit 29 Vol.-% Hohlraumgehalt) und Verwendung der Platten

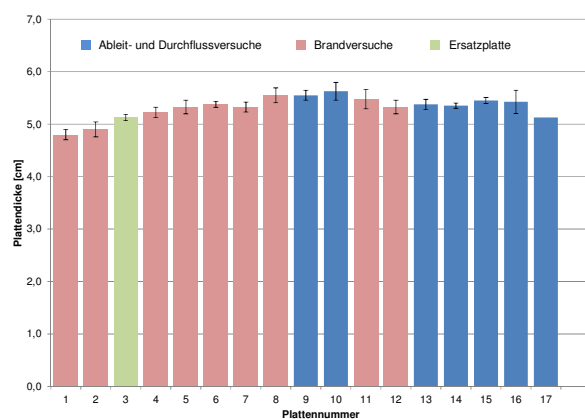


Bild 17: Streuung der Plattendicken (PA-Variante 2 mit 26 Vol.-% Hohlraumgehalt) und Verwendung der Platten



Bild 18: Lagerung der Platten bis zu deren Verwendung

Auch für diese Variante wurde analog zu den PA-Einbauten eine Bitumenbahn auf der Holzunterlage verlegt, die hier allerdings keine abdichtende Funktion übernahm, sondern ausschließlich dazu diente, während des Einbauprozesses ein übermäßiges Schieben des Mischgutes auf der glatten Holzunterlage zu vermeiden.

Die Verdichtung erfolgte anders als bei den PA-Varianten nach folgendem Walzschema:

- 2 Übergänge statisch
- 4 Übergänge dynamisch
- 2 Übergänge statisch

Da SMA grundsätzlich dicht ist, wurde der Hohlraumgehalt nur exemplarisch an zwei Stellen (Querschnitte 7 m und 14 m, jeweils mittig, siehe Bild 12) überprüft. An Querschnitt 7 wurde ein Hohlraumgehalt von 2,3 Vol.-% ermittelt, an Querschnitt 14 ein Wert von 2,5 Vol.-%. Beide Werte lagen unterhalb des maximal zulässigen Wertes von 5,0 Vol.-% (ZTV Asphalt-StB, Tabelle 13), so dass der Belag als (dichter) Referenzbelag nutzbar war. Auf die Bestimmung der Schichtdicken wurde verzichtet, da diese aufgrund des ausschließlich oberflächlichen Abflusses irrelevant sind.

Nach Abschluss des Einbaus am isac standen von jeder der drei Asphaltvarianten (2 x PA 8, 1 x SMA 8 S) mindestens 17 großformatige quadratische Platten mit Seitenlängen von $80 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$ zur Verfügung. Bis zu deren Verwendung im Rahmen der Ableit- und Durchflussversuche sowie Brandversuche wurden die Platten, wie in Bild 18 dargestellt, frostfrei und trocken gelagert.

4.1.3 Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf die weiteren Fragestellungen

Die nach [ZTV-Asphalt 2013] für PA zulässigen Grenz-Hohlraumgehalte wurden nicht ganz er-

reicht. Dieses Ergebnis ist allerdings aus zweierlei Gründen zu relativieren.

Die Methode des Ausmessverfahrens (Verfahren D) zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes von offenporigen Asphalten ist, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, mit einiger Unsicherheit behaftet. Die hier festgestellten absoluten Werte sind somit nur eingeschränkt zuverlässig. Durch die gleiche Geometrie ist jedoch das relative Verhältnis zwischen den Proben als Maßstab zur Bewertung geeignet.

Für die weiteren Versuche ist eine ausreichende Spreizung zwischen den beiden PA-Varianten entscheidend, da hiervon maßgeblich abhängig ist, ob bezüglich des Durchfluss- und Brandverhaltens eine Differenzierung in den Ergebnissen auftritt.

Die gem. Vorschrift maximal mögliche Spreizung von 6 Vol.-% wurde hier wegen der ähnlichen Rezeptur erwartungsgemäß unterschritten. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten beträgt im Mittel etwa 3,5 Vol.-%. Der Hohlraumgehalt der Variante 1 liegt damit ca. 14 % über dem der Variante 2. Es wurde davon ausgegangen, dass dieser Unterschied genügt, um den Einfluss auf das Durchfluss- und Brandverhalten herauszuarbeiten.

Der Verdichtungsgrad spielt für die vorliegenden Fragestellungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes, wie bereits zuvor ausgeführt, keine Rolle.

Verschmutzung

Auf die Schwierigkeit, mit zwei vergleichbaren PA-Rezepturen deutlich unterschiedliche Hohlraumgehalte zu realisieren, wurde bereits hingewiesen. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde daher auch die Alternative diskutiert, den geringeren Hohlraumgehalt nachträglich durch eine gezielte Verschmutzung zu erreichen. Betrachtet man jedoch die Art der Verschmutzung von unter Verkehr liegenden PA-Strecken, wie z. B. dem zweilagigen offenporigen Asphalt auf der Westlichen Ringstraße in Ingolstadt (siehe Bild 19), so erschien es wenig wahrscheinlich, eine derartige Verschmutzung im Labor künstlich und vor allem gleichmäßig definiert über alle Versuchsplatten nachbilden zu können. Dies wurde auch im Rahmen des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ [LEISTRA 2012] im Teilprojekt „Strukturanalyse von offenporigen Asphalten“ festgestellt. Hiernach konnte nachgewiesen werden, dass die Verschmutzung des Porensystems eine ausgeprägte Konzentration in den oberflächennahen Hohlräumen aufweist, was in der Konsequenz bedeutet,

dass das System von oben aus „verschlossen“ wird. Darüber hinaus müsste diese Verschmutzung für alle Platten reproduzierbar sein, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Damit schied aus Sicht der Forschungsnehmer eine nachträgliche Verschmutzung als geeignete Maßnahme zur Reduzierung des Hohlraumgehaltes aus.

Um den Einfluss des Hohlraumgehaltes dennoch sicher beurteilen zu können, wurde exemplarisch eine dritte PA-Variante (PA 3) mit einem Zielhohlraumgehalt von 20 - 22 Vol.-% hergestellt. Um diesen niedrigen Hohlraumgehalt zu erreichen wurde wie folgt vorgegangen:

- Konzeption eines sandreichen PA-Mischgutes im Labor (Hohlraumgehalt am Marshallprüfkörper = 21,2 Vol.-%)
- Chargenweise Herstellung des PA-Mischguts im Labormischer
- Einbringung einer abgewogenen Mischgutmenge in eine Holzschalung und Walzverdichtung auf die Zielhöhe von 5 cm in Anlehnung an einen bereits erfolgreich praktizierten Einbau im Rahmen des FE-Projektes 07.0240/2010/LRB [MEY 2014]

Da die laborseitig realisierbaren Mischgutmengen begrenzt waren, wurden in Absprache mit dem Forschungsgeber lediglich 2 Platten hergestellt, die für jeweils einen Durchflussversuch mit 6 bzw. 2,5 % Neigung vorgesehen waren. Nach Herstellung der etwa 1 x 2 m großen Asphaltfläche wurde zunächst der Hohlraumgehalt an drei repräsentativen Bohrkernen bestimmt. Bild 20 zeigt die Situation nach Entnahme der Bohrkernbohrer und vor dem Schneiden der Platten.

Die Hohlraumgehalte der drei Bohrkernbohrer wurden zu 21,9 Vol.-%, 21,3 Vol.-% und 21,5 Vol.-% bestimmt, so dass sich im Mittel ein Wert von 21,5 Vol.-% ergab. Damit wurde der angestrebte Zielbereich getroffen.

Einschränkend muss jedoch gesagt werden, dass die Oberflächenstruktur der Platten, bedingt durch die händische Verteilung des Mischguts innerhalb des Holzrahmens, Defizite gegenüber den beiden anderen mittels Fertiger eingebauten PA-Varianten aufwies. Ein Einfluss auf die Porenstruktur innerhalb der Platte kann von daher nicht ausgeschlossen werden. Vor dem Hintergrund, dass mit der Realisierung des geringen Hohlraumgehaltes eine Verschmutzung simuliert werden sollte, die ebenfalls nicht zwingend systematisch und homogen wäre, ist dieses vermeintliche Defizit allerdings hinnehmbar.



Bild 19: Beispiel für einen stark verschmutzten PA (zweilagiger offenerporiger Asphalt auf der Westlichen Ringstraße in Ingolstadt)

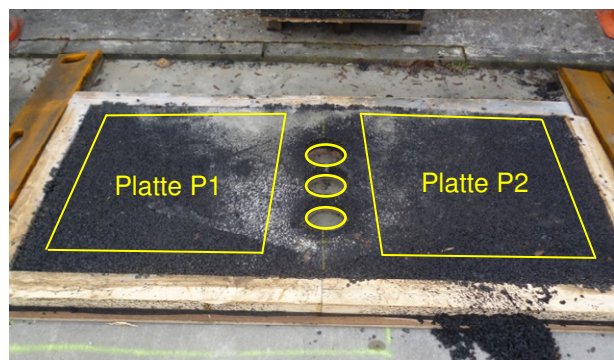


Bild 20: Herstellung der Zusatzplatten mit Zielhohlraumgehalt 20 - 22 Vol.-% (PA 3)

Nach Herstellung der PA 3-Platten standen somit neben der Referenzvariante (SMA) drei unterschiedliche offenerporige Asphalte mit guter Spreizung im Hohlraumgehalt für die Durchflussversuche zur Verfügung.⁷

4.2 Ableit- und Durchflussversuche

Die Versuche dienten der Bestimmung von Durchflusszeiten und Ausbreitungsverhalten brennbarer Flüssigkeiten in offenerporigen Asphaltschichten. Dazu wurden die Neigungen von 2,5 % (Mindestquerneigung auf gerader Strecke) und 6,0 % (maximale Querneigung im Kurvenbereich) be-

⁷ Die nachfolgenden Brandversuche erfolgten ausschließlich mit den Asphalt-Varianten PA 1, PA 2 und SMA.

trachtet. Im Wesentlichen waren die zeitliche und räumliche Ausbreitung sowie die Auswaschung des Bitumens zu erfassen.

Die Versuche wurden mit Benzin durchgeführt. Hintergrund dafür ist, dass die häufigsten Produkte der Gefahrgutklasse 3 in Deutschland Mineralölprodukte sind und diese folglich maßgeblich zu einem Risiko von Bränden im Tunnel beitragen. Daher wurde im Forschungsprojekt zur Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR [BAST 2009a] Benzin als Leitstoff für leicht entzündliche, brennbare Gefahrstoffe gewählt und ist entsprechend für die Schadenausmaßberechnungen mit Hilfe von CFD-Modellen zu verwenden.

4.2.1 Vorversuche zum Lösungsverhalten von Bitumen in Kraftstoff

Im Vorfeld wurden zunächst einige Testversuche an vorhandenen Walzsektorplatten aus offenporigem Asphalt durchgeführt. Wenngleich Aussagen zum Durchflussverhalten aufgrund der kleinen Abmessungen kaum möglich waren, ließen sich hiermit erste Tests zur Auswaschung von Bitumen



Bild 21: Zerfall des PA-Probekörpers nach kurzer Lagerung in Benzin

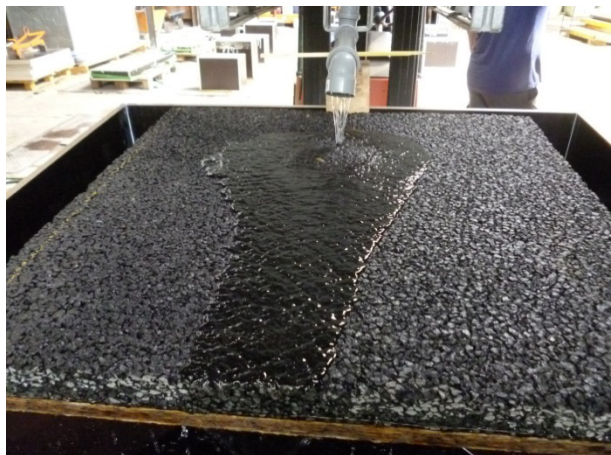


Bild 22: Durchflussversuch bei einer Wasseraufgabemenge von 3 l/min (Neigung 6,0 %)

durch Kraftstoff durchführen.

Um das Lösungsverhalten von PA abschätzen zu können wurden Asphaltstücke sowohl in Benzin als auch in Dieselkraftstoff gelagert und anschließend die Schädigung des Materials beurteilt. Hierbei zeigte sich bereits nach wenigen Sekunden eine dunkle Verfärbung des Kraftstoffs. Dieser Prozess lief für Benzin etwas schneller ab als für Diesel. Nach einigen Minuten Lagerung in Benzin war das Asphaltstück vollkommen zerfallen (siehe Bild 21).

4.2.2 Konzeption eines geeigneten Versuchsstands und Versuchsdurchführung

Die Ergebnisse der Testversuche deuteten darauf hin, dass die Beaufschlagung der Asphaltplatten mit Benzin zu einer starken Auswaschung des Bitumens und demzufolge einer erheblichen Schädigung des inneren Asphaltgefüges führt. Aus diesem Grund wurden die Versuche zunächst mit Wasser durchgeführt, bis sich der Versuchsaufbau hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Konstanz der Messgrößen bewährte. Erst danach wurde in einem zweiten Schritt das Durchflussverhalten mit Benzin untersucht.

Die Ergebnisse mit Wasser sind somit nicht auf Benzin übertragbar. Abgesehen von der um etwa ein Drittel geringeren Viskosität von Benzin gegenüber Wasser, liegen bei Verwendung von Benzin aufgrund des sich ständig ändernden Porensystems instationäre Verhältnisse vor. Bei Wasser ist hingegen davon auszugehen, dass sich nach einer gewissen Zeit ein stationärer Durchfluss einstellt.

Vorversuche mit vereinfachtem Versuchsaufbau

Zur Abschätzung der aufzugebenden Mengen wurden zunächst Vorversuche mit einer vereinfachten Versuchsanordnung durchgeführt. Der Versuchsaufbau bestand aus einem wasserdichten Holzkorpus, auf dem die Asphaltplatte mit der entsprechenden Neigung aufgelagert wurde (siehe Bild 22). Der Holzkorpus besaß drei Kammern zur getrennten Ableitung des seitlich (links und rechts) und an der Vorderseite austretenden Wassers. An den Tiefpunkten der drei Kammern wurden Bohrungen vorgesehen, durch die das Wasser in entsprechende Auffangbehälter abfließen konnte. Die Wasseraufgabe erfolgte über einen Wassertank mit einem Fassungsvermögen von 1.000 l. Das Wasser wurde über ein angeschlossenes Rohr, etwa 15 cm entfernt von der Plattenhinterseite, drucklos auf die Probe aufgegeben.

Aus diesen qualitativen Vorversuchen ergaben sich bereits wichtige Erkenntnisse, die bei der Optimierung des Versuchsstandes berücksichtigt wurden:

- Bei einer Neigung von 2,5 % trat auch Wasser an der Hinterseite der Platte aus. Dieser Anteil musste ebenfalls erfasst werden. Ein Wasser-austritt an dieser Stelle ließe sich nur durch Abdichtung der Plattenhinterseite und/oder durch eine Verlagerung der Aufgabestelle nach vorne vermeiden. Beide Maßnahmen erschienen jedoch nicht zielführend, da durch eine Abdichtung die realen Verhältnisse auf der Straße nicht wiedergespiegelt würden bzw. sich die Fließwege zu stark verkürzen. Speziell im Hinblick auf die Simulationsrechnungen war die Erfassung der austretenden Mengen zur Kalibrierung des Modells notwendig.
- Schon eine Aufgabemenge von ca. 1,5 l/min führte bei einer Neigung von 2,5 % zu einer teilweisen Überstauung des Hohlraums und damit zum oberflächlichen Abfluss. Bei einer vollkommen trockenen Platte trat dieser Effekt aufgrund der wirksamen Oberflächenspannung des Wassers verstärkt auf. In diesem Zusammenhang sind auch Beobachtungen aus dem Projekt [LEISTRA 2012] interessant. Hier wurde festgestellt, dass es nach einiger Zeit zu einer Luftblasenbildung an der Oberfläche mit gleichzeitiger Abnahme des Durchflusses (ca. 50 %) kommt, verursacht durch einen erhöhten Strömungswiderstand. Darüber hinaus sank der die offenporige Schicht durchdringende Volumenstrom deutlich ab, wenn es zu einem oberflächlichen Abfluss infolge Überstauung kam.
- Bei einer Neigung von 6,0 % trat seitlich nur sehr wenig Wasser aus. 90 % des aufgegebenen Wassers floss über die Vorderseite ab.

Für die anstehenden Hauptversuche wurden auch auf Basis der Ergebnisse aus den Vorversuchen, folgende Vorgaben und Randbedingungen festgelegt:

- Die Aufgabemenge ist so einzustellen, dass bei der kleineren Neigung von 2,5 % kein ausgeprägter oberflächlicher Abfluss auftritt. Aus den Vorversuchen deutet sich an, dass diese Menge bei etwa 2 l/min liegt.⁸ Diese Menge wird

anschließend auch für die Neigung von 6,0 % verwendet. Die Sicherstellung einer konstanten Aufgabemenge während des Versuches wird durch eine definierte Stellung des Kugelhahns bei einer geringen Änderung der Druckhöhe im Vorratsbehälter gewährleistet. Die ausfließende Menge wird vor Versuchsstart und nach Versuchsende durch Wägung erfasst.

- Die hier verwendeten Platten sind herstellungsbedingt an der Oberfläche mit Bitumen überzogen, was zu einer erhöhten Oberflächenspannung führt und damit einen oberflächlichen Abfluss begünstigt. Dieser Effekt ist beim ersten Kontakt mit Wasser besonders ausgeprägt. Eine Möglichkeit, die Oberflächenspannung herabzusetzen, besteht in der dosierten Zugabe von Detergentien. Damit wäre allerdings eine Änderung der Viskosität bzw. der Fließeigenschaften verbunden, die im Modell entsprechend berücksichtigt werden müsste. Außerdem ist zu erwarten, dass dieser Effekt bei Verwendung von Benzin aufgrund der geringeren Viskosität und der lösenden Eigenschaften keine nennenswerte Rolle spielt.
- Die an den Seiten austretende Flüssigkeit wird im Raster von ca. 5 cm erfasst und über angeschlossene PVC-Schläuche in skalierte Standzylinder abgeführt. Durch das gewählte Raster ergibt sich ein Gesamtbedarf von 64 Standzylindern. Durch Wägung und Bestimmung des Volumens liegt am Ende des Versuchs somit ein sehr detailliertes Bild vom Ausbreitungsverhalten vor.
- Um auch eine Aussage zur zeitlichen Entwicklung treffen zu können, werden die sich füllenden Standzylinder per Videotechnik aufgezeichnet. Aufwandsbedingt bleibt die Auswertung allerdings auf einzelne ausgewählte Stellen beschränkt.
- Die Versuchsdauer sollte so lang wie nötig, aber so kurz wie möglich gewählt werden. Eine Begrenzung der Versuchsdauer ist aus zweierlei Gründen notwendig. Zum einen muss der Arbeitsschutz beim Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten gewährleistet sein. Zum anderen erhöhen zu große Mengen den Aufwand bei der späteren Rückgewinnung des Bitumens aus dem Benzin-Bitumen-Gemisch. Nach den Erkenntnissen aus den Vorversuchen erscheint eine Versuchsdauer von etwa 5 Minuten geeignet zu sein. Bei der Aufgabemenge von 2 l/min würde damit je Versuch etwa 10 Liter Benzin benötigt.

⁸ Bei den Vorversuchen mit Wasser waren bereits bei einer Zuflussmenge von 1,5 l/min teilweise Überstauungen zu verzeichnen. Aufgrund der geringeren Oberflächenspannung und Viskosität von Benzin kann allerdings davon ausgegangen werden, dass bei einer Zuflussrate von 2 l/min noch keine nennenswerten Überstauungen auftreten.



Bild 23: Erster Versuchsaufbau mit seitlich angeordneten Flaschenbatterien, PVC-Schläuchen und Messzylindern

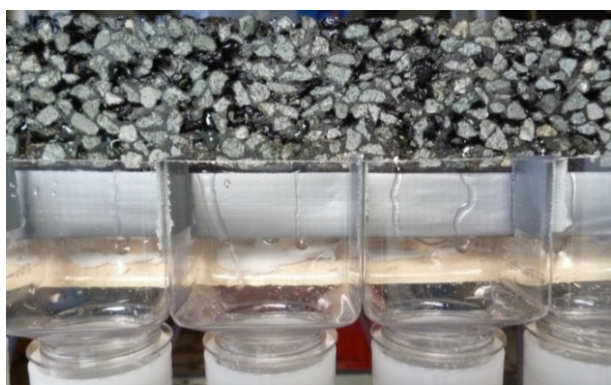


Bild 24: Detailaufnahme der seitlich angebrachten Kunststoffflaschen zum Auffangen der austretenden Flüssigkeit (hier: Wasser)



Bild 25: Ableitung der Flüssigkeit über PVC-Schläuche in skalierte Messzylinder

- Die Ermittlung des Anteils an ausgewaschenem Bitumen zur Beurteilung des Schädigungsgrades soll auf zweierlei Weise geschehen, einmal nach der Differenzenmethode und einmal durch Destillation des Benzin-Bitumen-Gemischs. Nach der Differenzenmethode wird die Platte vor und nach dem Versuch gewogen. Die Massendifferenz ergibt den Anteil des ausgewaschenen Bitumens. Hierbei ist sicherzustellen, dass die Platte vorher und nachher vollkommen trocken ist. Die Messung wird allerdings dadurch erschwert, dass der ausgewaschene Bitumenanteil in Relation zur Gesamtmasse der Platte recht gering ist und Messbereich und Auflösung der eingesetzten Waage voneinander abhängige Größen darstellen. Außerdem besteht eine gewisse Unsicherheit dahingehend, dass möglicherweise andere Komponenten als Bitumen (z. B. Füller) ausgewaschen werden. Um die Ergebnisse der Differenzenmethode abzusichern wird zusätzlich stichprobenhaft das in den Standzylindern aufgefangene Bitumen mittels destillativer Verfahren rückgewonnen. Durch die Kombination der beiden Verfahren sollte eine Aussage zum Auswaschungsgrad möglich sein.
- Als Benzin wird Super Benzin der Marke ARAL verwendet, das in einer Charge für alle Versuche beschafft wurde. Da bei den Brandversuchen ebenfalls Benzin der gleichen Marke zum Einsatz kommt, sind etwaige Unterschiede aus enthaltenen Additiven auf ein Minimum begrenzt. Die Verwendung einer einzigen Charge sowohl für die Durchfluss- als auch für die Brandversuche erschien vom Nutzen-Aufwand-Verhältnis unverhältnismäßig.

Erster Versuchsstand mit seitlich angeordneten Flaschenbatterien

Auf Basis der im Rahmen der Vorversuche gewonnenen Erkenntnisse wurde ein erster Versuchsstand konzipiert und umgesetzt (siehe Bild 23 bis Bild 25).

Die tragende Unterkonstruktion bestand aus zwei in der Höhe verstellbaren Montageböcken, auf denen eine dicke Holzplatte mit den Abmessungen 60 cm x 60 cm unverschieblich montiert war. Auf diese Holzplatte konnten die großformatigen Asphaltplatten durchbiegungsfrei aufgelegt werden. Die Grobeinstellung der gewünschten Neigung erfolgte zunächst über die unterschiedliche Höhe der beiden Montageböcke. Anschließend wurde das Gefälle unter Verwendung eines digitalen Neigungsmessers durch punktuelle Unterlegung mit Keilen exakt nachjustiert.

Danach wurden seitlich im Raster von ca. 5 cm umgedrehte Kunststoffflaschen angeordnet. Die Flaschen wurden hierfür zuvor ausgekragt, um die abtropfende Flüssigkeit sicher auffangen zu können. Zur einfacheren Montage wurden die einzelnen Flaschen zuvor mittels eines flexiblen Montageklebers an einer Holzlatte befestigt. Diese sog. „Flaschenbatterie“ wurde dann mit der 22 mm starken Holzunterlage verschraubt (siehe Bild 24).

Zur Ableitung der Flüssigkeit aus den Flaschen wurde in jeden Verschlussstopfen ein passgenaues Loch gebohrt, in das das obere Ende der PVC-Schläuche formschlüssig hineingesteckt werden konnte. Die Schläuche wurden abgelängt und in die Standzylinder eingeführt (siehe Bild 25).

Mit diesem Aufbau wurden exemplarisch an zwei Platten (2 Neigungen) zunächst Versuche mit Wasser durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere auf die Reproduzierbarkeit der Wasseraufgabe und die sichere Abführung der austretenden Flüssigkeit geachtet. Bei der Aufgabemenge von 2 l/min ergaben sich für beide Neigungen keinerlei Probleme. Das System war dicht und der Großteil der Flüssigkeit lief über die Vorderseite ab. Eine weitergehende Auswertung dieser Wasserversuche erfolgte nicht.

Nach dem erfolgreichen Test mit Wasser, wurde ein erster Benzinversuch an einer Dummy-Platte aus wasserdurchlässigem Asphalt bei einer Neigung von 2,5 % durchgeführt. Wenngleich die lösenden Eigenschaften und die geringere Viskosität von Benzin gegenüber Wasser vorher bekannt waren, fiel der Unterschied gegenüber den Ergebnissen mit Wasser doch unerwartet drastisch aus. Folgende Beobachtungen wurden während des Versuches gemacht:

- Der Versuchsstand bzw. das Auffang- und Ableitungssystem wiesen erhebliche Leckagen auf. Mit zunehmender Versuchsdauer trat eine immer größere Menge des Benzin-Bitumen-Gemischs aus und tropfte auf den Boden. Neben einem Unterlaufen der Holzunterlage stellte insbesondere die Verbindung zwischen Verschlussstopfen und Schlauch eine erhebliche Schwachstelle dar. Da diese Probleme nicht durch eine einfache Nachbesserung abgestellt werden konnten, musste das seitliche Auffangsystem vollkommen neu konzipiert werden. Wesentliche Kriterien stellten hierbei die Lösemittelbeständigkeit und die Dauerhaftigkeit dar.
- Als weiterer gravierender Unterschied zu den Wasserversuchen wurde festgestellt, dass erhebliche Mengen des Benzin-Bitumen-Gemischs an der höher liegenden Plattenhinterseite austraten. Da die kurze Strecke zur

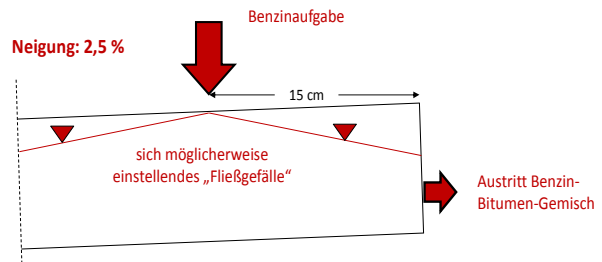


Bild 26: Prinzipskizze (nicht maßstäblich) des sich einstellenden Fließgefälles im offenen Probekörper

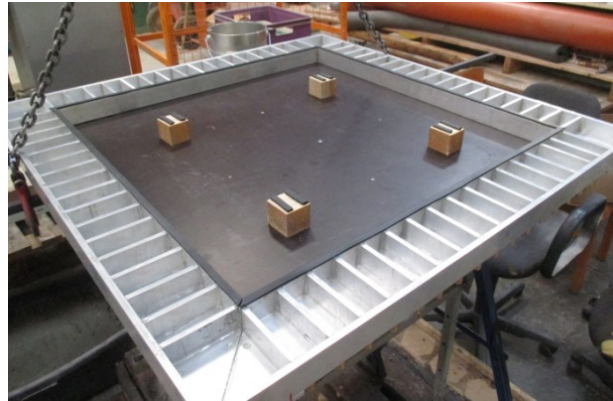


Bild 27: Tragendes Basiselement mit Einteilung des umlaufenden Alu-U-Profils in Kammern (5 cm-Raster)

Hinterseite schneller „freigespült“ wurde, lief das Benzin dort aufgrund des geringeren Fließwiderstandes verstärkt ab. Das Bild 26 verdeutlicht diese Situation. Da mit einem schwächeren aber vergleichbarem Effekt für die 6,0 %-Neigung zu rechnen war, wurde eine Verlegung der Aufgabestelle um 15 cm nach vorne als sinnvoll erachtet, so dass der neue Aufgabepunkt 30 cm von der Hinterkante entfernt war.

Optimierter Versuchsstand mit umlaufendem Alu-Kammer-System

Aus diesen Erkenntnissen und Überlegungen heraus wurde ein neuer Versuchsstand konzipiert, dessen Komponenten im Folgenden beschrieben werden:

- Anfertigung einer umlaufenden Rinne aus Alu-Profilen, die auch als tragende Konstruktion für die Platten diene.
- Einteilung der Rinne in ein 5 cm Raster (Kammern) durch Einkleben von Alu-Stegen unter Verwendung eines lösemittelbeständigen 2K-Epoxidklebers (siehe Bild 27).
- Einschrauben von Schlauchstutzen aus Messing in die Unterseite jeder Kammer (am Tiefpunkt, siehe Bild 28). Hierzu wurden entsprechende Gewinde in das Alu-Profil gebohrt. Die Gewinde der Schlauchstutzen wurden auf die

erforderliche Länge abgedreht, um diese bündig mit dem Kammerboden abschließen zu lassen. Zur Abdichtung wurde zusätzlich Teflonfolie verwendet.

- Aufkleben von Moosgummis auf die Innenseiten der U-Profile (Auflager der Platte) zur Verhinderung des Unterlaufens an den Plattenrändern. Die Moosgummis werden je nach Schädigung bei Versuchsende gewechselt.
- Minimierung der saugenden Eigenschaften der Holzchnittflächen durch Aufbringung eines benzinresistenten Lacks (siehe Bild 31). Das zuvor verwendete Panzerband konnte diese Funktion bei längerem Kontakt mit Benzin nicht erfüllen.
- Abführung der Flüssigkeit über die PVC-Schläuche in die Standzylinder – wie zuvor (siehe Bild 30).

Neben der Dichtigkeit und Lösemittelbeständigkeit hatte der neue Versuchstand gegenüber der alten Version den Vorteil, dass eine zeitaufwändige Montage und Demontage der Flaschenbatterien entfiel. Der Rahmen aus Alu-Profilen bildete eine stabile Unterlage, auf die die Platten jeweils aufgelegt werden konnten. Allerdings mussten die ca. 80 kg schweren Platten sehr genau auf den Innenseiten der U-Profile positioniert werden ohne die Moosgummis durch ein Verrutschen zu beschädigen. Zur Vermeidung von Durchbiegungen während des Versuchs wurde die Platte zusätzlich an vier Stellen unterlegt (siehe Bild 27).

Die Aufgabe des Benzins erfolgte über einen runden Vorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 40 l, in dessen Boden ein Auslauf eingeschraubt wurde (siehe Bild 29).



Bild 28: Kammer system mit Abläufen



Bild 29: Gesamtversuchsanordnung mit Aufgabesystem (hier: SMA-Variante mit 6,0 % Neigung)



Bild 30: Schlauchstutzen mit aufgestülpten PVC-Schläuchen



Bild 31: Benzinresistenter Lack auf saugenden Holzchnittflächen

Die Einstellung des Aufgabevolumenstroms konnte durch zwei hintereinander angeordnete Kugelhähne mit guter Genauigkeit erfolgen. Hierfür wurde vor jedem Versuch die auslaufende Menge durch Stellung des direkt am Benzinbehälter befestigten Hahns geregelt. Zu Versuchsstart wurde dann der vordere Kugelhahn geöffnet und nach Versuchsstart wieder geschlossen.

Die Pegelminderung im Behälter wurde durch Nachgießen minimiert, so dass die Druckhöhe und damit der Ausfluss während der 5-minütigen Versuchsdauer konstant blieben. Berechnungen ergaben, dass eine Verringerung der Druckhöhe um einen Zentimeter (bei gefülltem Behälter) einer Reduzierung des Ausflusses um weniger als 0,05 l/min entspricht.

Nach jedem Versuch wurde die Aufgabemenge erneut kontrolliert. Hierfür wurde die ausströmende Menge unter Verwendung eines Messbechers für 30 Sekunden aufgefangen und mit der Sollmenge von 1 Liter verglichen.

Bei der Auswertung der ersten Videoaufnahmen zur Nachzeichnung der Füllstandsentwicklung in den Standzylindern ergaben sich Probleme hinsichtlich der Ablesbarkeit. Aus diesem Grund wurde eine weiße Folie hinter den Standzylindern angeordnet (siehe Bild 32). Hierdurch konnte die Erkennbarkeit der Skalen zwar verbessert werden, eine sichere Ablesung zu jeder Zeit an jedem einzelnen Zylinder war jedoch auch hierdurch nicht sichergestellt. Diese Aspekt wird an anderer Stelle im Bericht wieder aufgegriffen.

4.2.3 Messergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Belegungen für jede Variante getrennt dargestellt und im Hinblick auf die Fragestellungen

- Wie unterscheiden sich die PA-Varianten von der Referenzvariante (SMA)?
- Wie wirkt sich der Hohlraumgehalt aus?
- Welchen Einfluss hat die Neigung?

ausgewertet.

Referenzvariante SMA

Bild 33 und Bild 34 zeigen zunächst die Referenzvariante SMA bei einer Neigung von 6,0 %. Es ist zu erkennen, dass der Abfluss hier oberflächlich in Gefällrichtung erfolgte. Die Ableitung geschieht unmittelbar, d. h. bereits wenige Sekunden nach Start der Benzinaufgabe füllten sich die vorderen Standzylinder mit Flüssigkeit. Nach Beendigung der 5-minütigen Benzinaufgabe betrug auch die Nachlaufzeit nur wenige Sekunden.

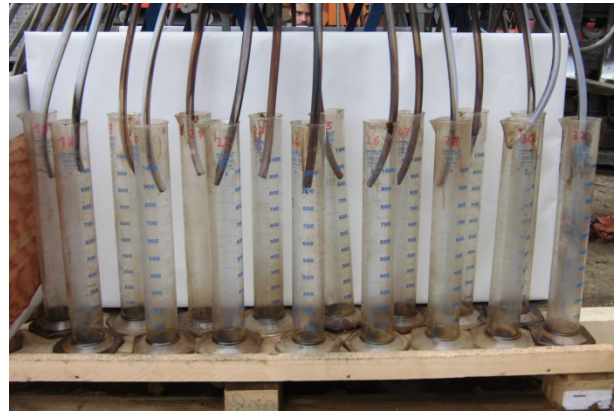


Bild 32: Standzylinder mit weißem Hintergrund



Bild 33: Schneller oberflächlicher Abfluss bei der SMA-Variante mit 6,0 % Neigung



Bild 34: Füllstand der Zylinder in der vorderen Reihe nach Versuchsende

In den nachfolgenden Bildern sind die Versuchsergebnisse für alle Standzylinder nach Wägung und Volumenabmessung dargestellt. Alle Belegungen einer Variante sind in einer Darstellung zusammengefasst, so dass die Streuungen ersichtlich werden. Der am Versuchsende erreichte Füllstand in den Zylindern ist für die Plattenneigung von 2,5 % in Bild 35 dargestellt. Die Verteilung in den vorderen Zylindern ähnelt erwartungsgemäß einer Normalverteilung.

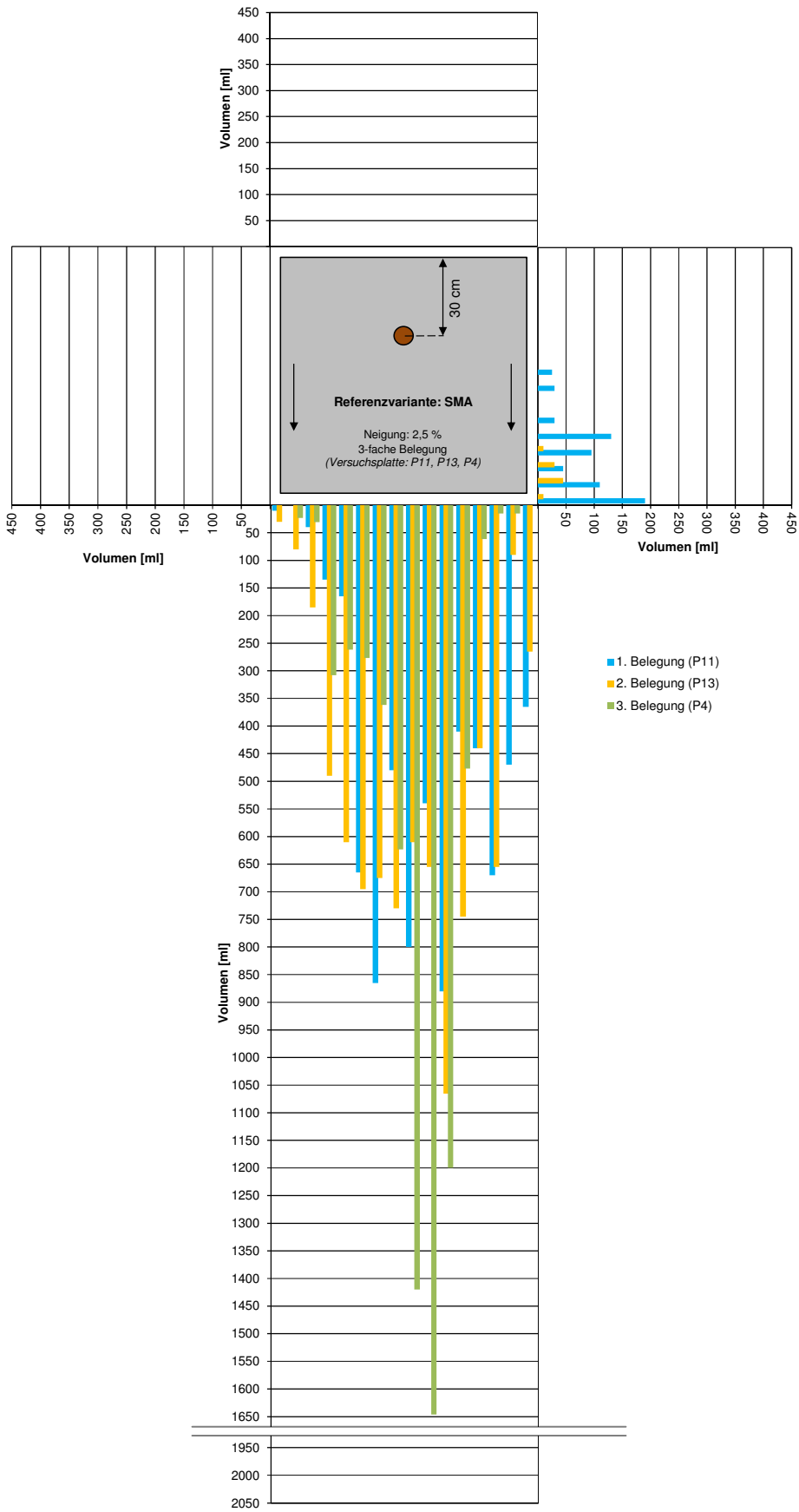


Bild 35: Ausbreitungsbild der Referenzvariante SMA über alle Belegungen (s = 2,5 %)

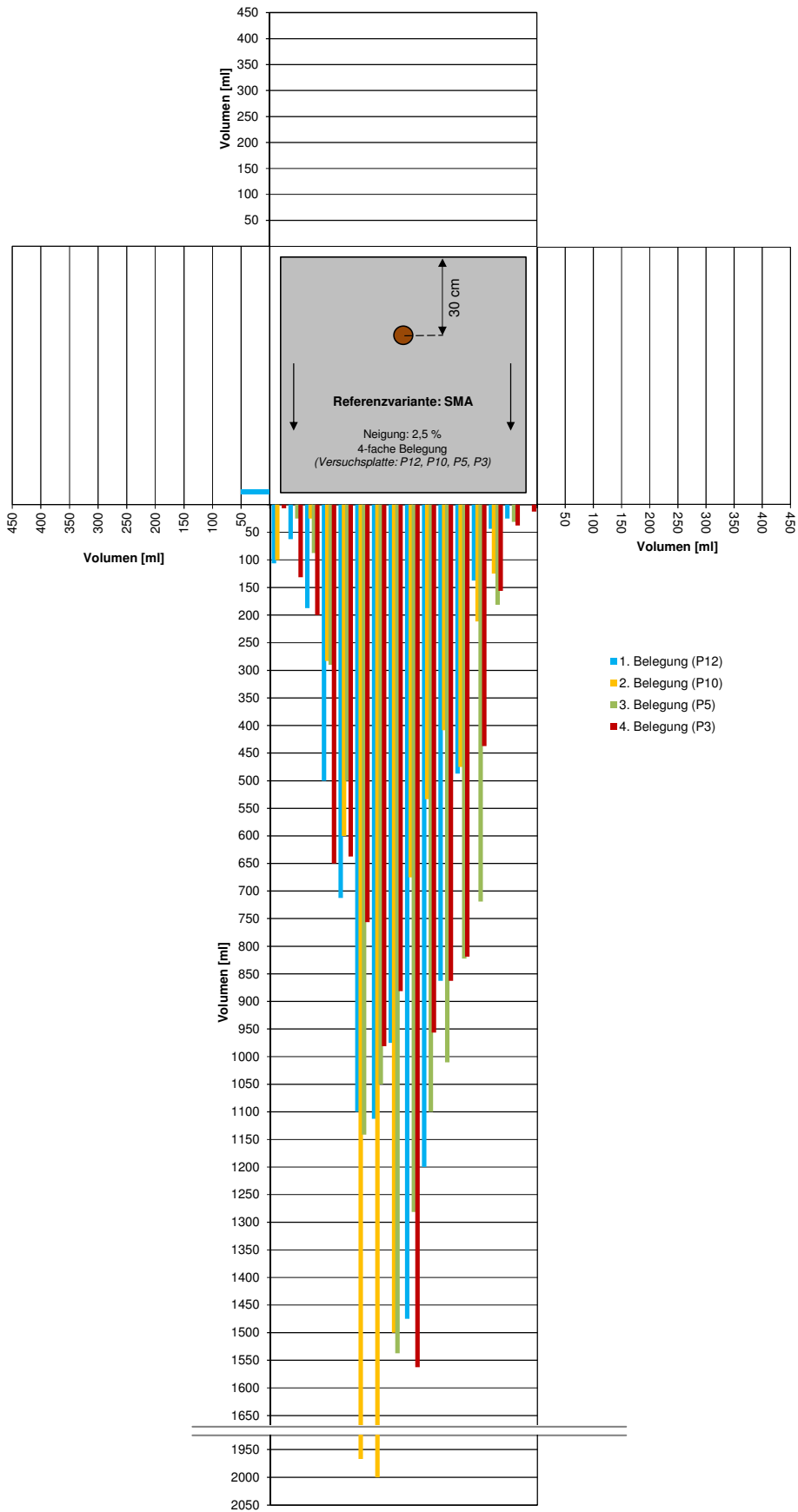


Bild 36: Ausbreitungsbild der Referenzvariante SMA über alle Belegungen (s = 6,0 %)

Bild 36 zeigt die Füllstände für die Neigung von 6,0 %.

Wesentliche Erkenntnis für die SMA-Varianten ist, dass die aufgegebene Benzinmenge fast vollständig über die in Neigungsrichtung liegende Plattenvorderseite abläuft. Bei der Längsneigung von 6,0 % erhöhte sich die Fließgeschwindigkeit gegenüber der Variante mit 2,5 %. Dies hat zur Folge, dass sich die Ausbreitungsverteilung in Plattenmitte verdichtet und die maximalen Füllstände ansteigen.

Auch wenn eine sichtbare Verfärbung des Benzins erkennbar war, so war der Bitumengehalt recht gering. Der Aspekt der Bitumenauswaschung bzw. -anlösung wird in Kapitel 4.2.7 noch genauer betrachtet.

PA-Varianten

Bei den PA-Varianten wurde erwartungsgemäß ein anderes Ausbreitungsverhalten als beim SMA festgestellt. Hier kam es zu keinem sichtbaren oberflächlichem Abfluss (siehe Bild 37). Das Benzin drang unmittelbar in die Struktur ein, durchströmte das Porensystem und floss auf der bituminösen Abdichtung zu den Plattenrändern hin ab.

Die Zeit, die zwischen Aufgabestart und Austritt an den Plattenrändern verging, war deutlich größer als beim Referenzasphalt (SMA) und lag an der Vorderseite in der Größenordnung von etwa einer Minute. Das mit Bitumen vermischte Benzin trat zunächst mittig an den Plattenseiten aus und breitete sich dann nach und nach zu den Eckbereichen hin aus.

Im Gegensatz zur Referenzvariante SMA trat auch Minuten nach Beendigung der Benzinaufgabe



Bild 37: Benzinaufgabe auf Variante PA 1 (V = 29 Vol.-%) bei 6,0 % Neigung

noch Flüssigkeit aus der Platte aus und tropfte in die Standzylinder. Das verzweigte Porensystem wirkt demnach wie eine Art „Durchflusdämpfer“ für das durchströmende Benzin.

Ein weiterer elementarer Unterschied bestand darin, dass anders als beim dichten Asphalt, nicht nur ein Abfluss über die Plattenvorderseite sondern auch über die anderen drei Seiten erfolgte. Ein Austritt an der (höher liegenden) Plattenhinterseite erfolgte demnach trotz der Anordnung des Aufgabepunktes in einem Abstand von 30 cm von der Hinterkante. In Bild 38 ist der Beginn des Austritts zu sehen.

Das Ausbreitungsverhalten wird nachfolgend in Bild 39 bis Bild 43, getrennt für die einzelnen Varianten, dargestellt. Mit Ausnahme der Variante PA 3, für die lediglich ein Einzelversuch durchgeführt wurde, werden alle Belegungen einer Variante je Neigung in einem Ausbreitungsbild zusammengefasst.



Bild 38: Beginnender Flüssigkeitsaustritt an der Plattenhinterseite (Variante PA 2; V = 26 Vol.-%; s = 6,0 %)

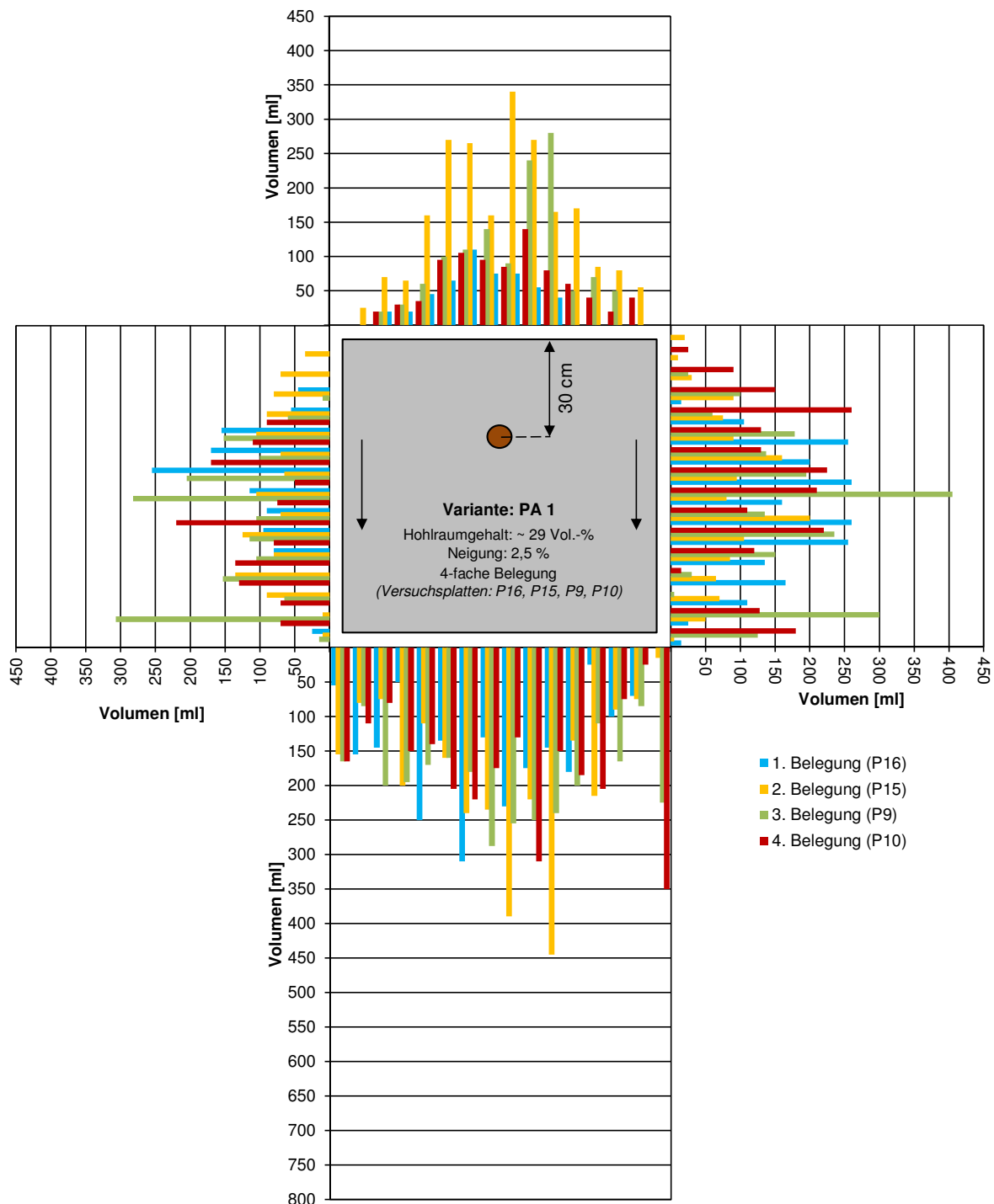


Bild 39: Ausbreitungsbild der Variante PA 1 ($V = 29 \text{ Vol.-%}$) über alle Belegungen ($s = 2,5 \%$)

Betrachtet man die Ergebnisse für die Variante PA 1 bei einer Neigung von 2,5 % (siehe Bild 39) so erkennt man, dass hier ein Abfluss über alle Plattenseiten erfolgte. Wenngleich die abfließenden Mengen über die Vorderseite am größten waren, floss auch ein nennenswerter Anteil über die Plattenrückseite, d. h. entgegen der Gefälledirection ab.

Die gemessenen Verteilungen der ausgetretenen Volumen ähneln vorne und hinten einer Normalverteilung. Seitlich ergeben sich bedingt durch die Neigung und den ausmittigen Aufgabepunkt etwas schiefe Verteilungen.

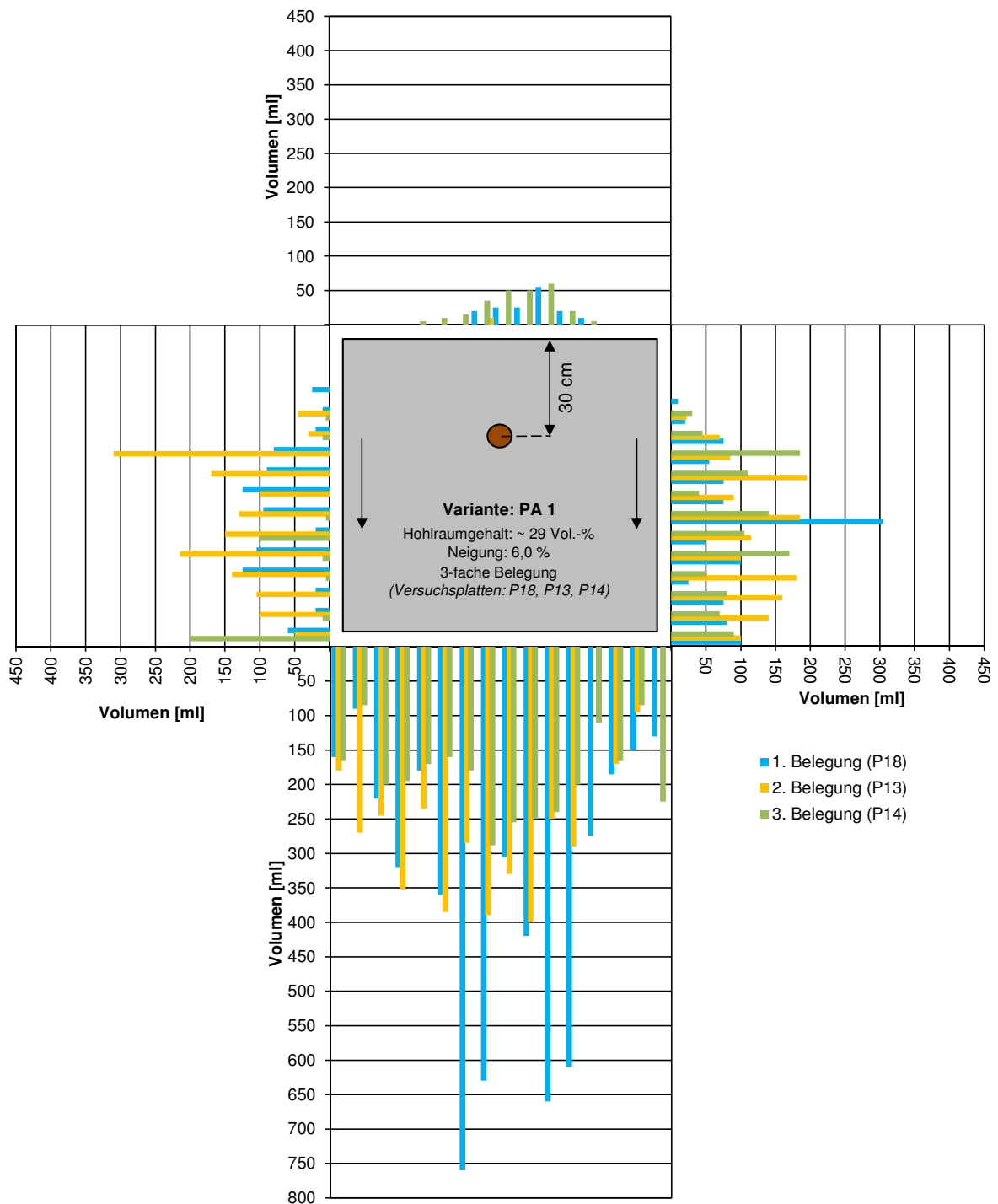


Bild 40: Ausbreitungsbild der Variante PA 1 (V = 29 Vol.-%) über alle Belegungen (s = 6,0 %)

In Bild 40 sind die Ergebnisse für die gleiche PA-Variante (PA 1) bei der stärkeren Neigung (6 %) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass hier nur sehr geringe Mengen über die Plattenrückseite abfließen. Auch die seitlich austretenden Mengen waren im Vergleich zur 2,5 %-Variante deutlich geringer. Demgegenüber stieg das in Gefällerrichtung über

die Vorderseite abfließende Volumen stark an. Die stärkere Neigung führt dazu, dass die Fließgeschwindigkeiten im Porensystem ansteigen und dadurch ein größeres Volumen in Neigungsrichtung abfließen kann. Der qualitative Einfluss der Neigung bei gleichbleibendem Hohlraumgehalt war in dieser Form zu erwarten gewesen.

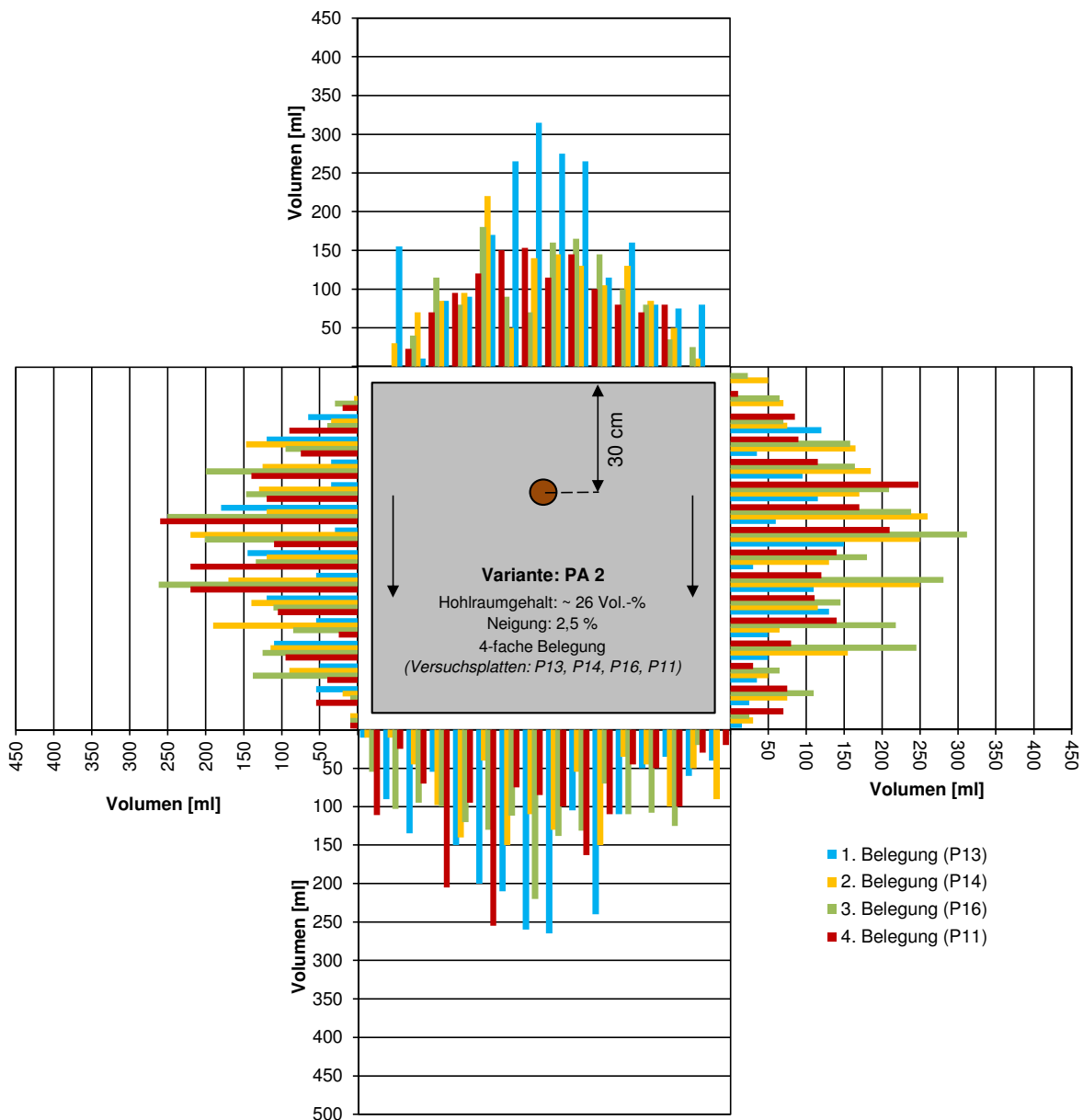


Bild 41: Ausbreitungsbild der Variante PA 2 ($V = 26$ Vol.-%) über alle Belegungen ($s = 2,5$ %)

Die Ergebnisse der Variante PA 2 mit einer Neigung von 2,5 % zeigen eine sehr gleichmäßige Verteilung zwischen den vier Austrittsseiten (siehe Bild 41). Der geringere Hohlraumgehalt führt in Verbindung mit der geringen Neigung zu einem vergleichsweise großen Fließwiderstand in Gefäl-

lerichtung. Hierdurch verringert sich der Abfluss über die Vorderseite, was bei einem vergleichbarem seitlichen Abfluss (wie bei Variante PA 1) zu einer erhöhten Abflussmenge über die Hinterseite führt.

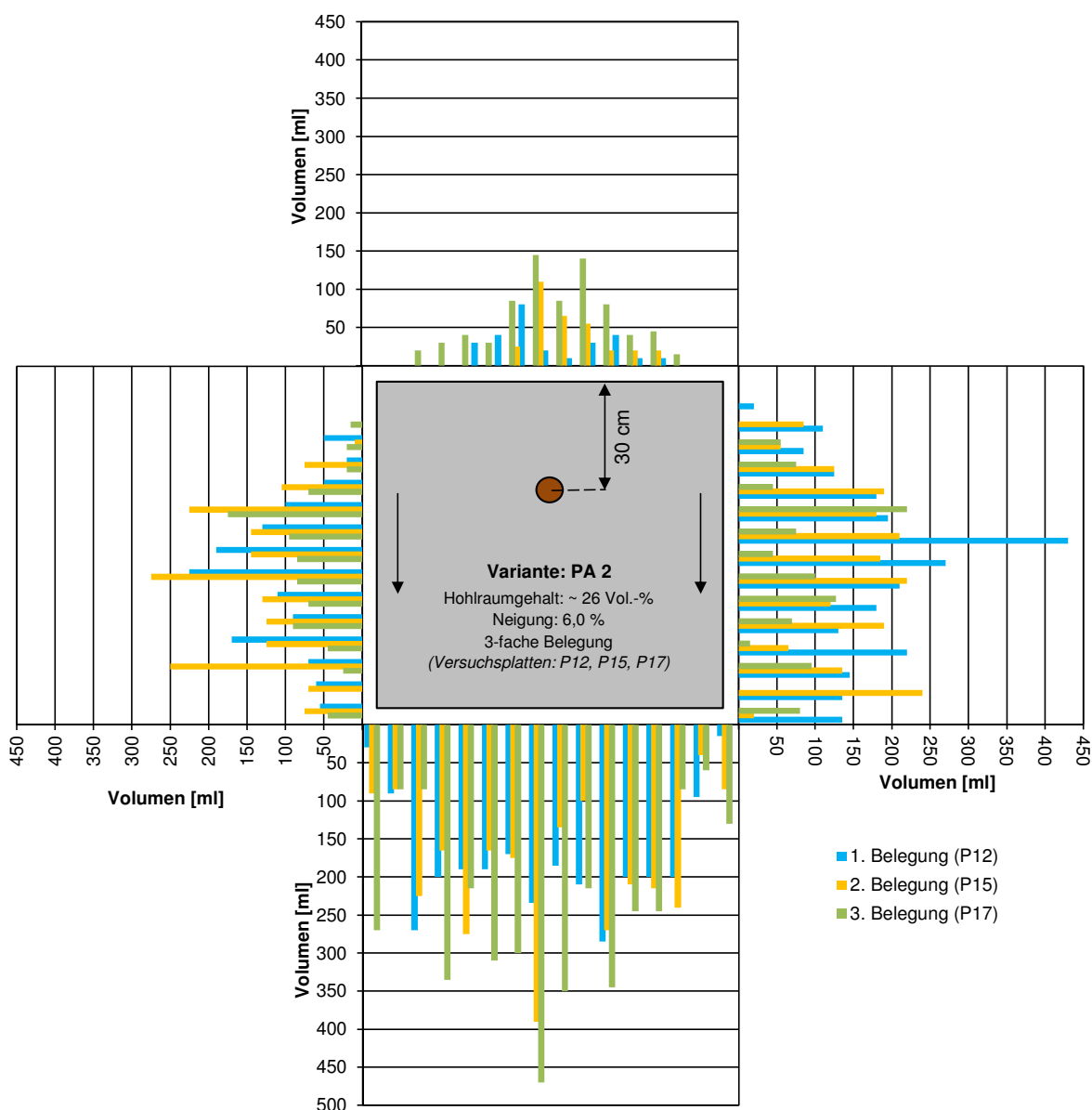


Bild 42: Ausbreitungsbild der Variante PA 2 ($V = 26 \text{ Vol.-%}$) über alle Belegungen ($s = 6,0 \%$)

Eine stärkere Neigung führte auch bei dieser Hohlraumvariante (PA 2) zu einem wesentlich höheren Volumenaustritt an der Vorderseite (siehe Bild 42). Der Anteil, der über die Hinterseite abließ, verringert sich dementsprechend deutlich. Aufgrund des stärker behinderten Abflusses war er jedoch größer als bei der hohlraumreicheren Variante (vgl. Bild 40).

Auch der seitliche Abfluss vergrößerte sich gegenüber der Variante PA 1 infolge des erhöhten Fließwiderstandes. Der Abfluss über die Vordersei-

te fiel dagegen geringer aus. Auch dieses Ergebnis lässt sich mit dem niedrigeren Hohlraumvolumen plausibel erklären.

Die zu diesem Zeitpunkt gewonnenen Ergebnisse waren somit hinsichtlich des Neigungs- und des Hohlraumeinflusses als plausibel zu werten und konnten daher als Input für die spätere Modellierung des Abflussverhaltens herangezogen werden.

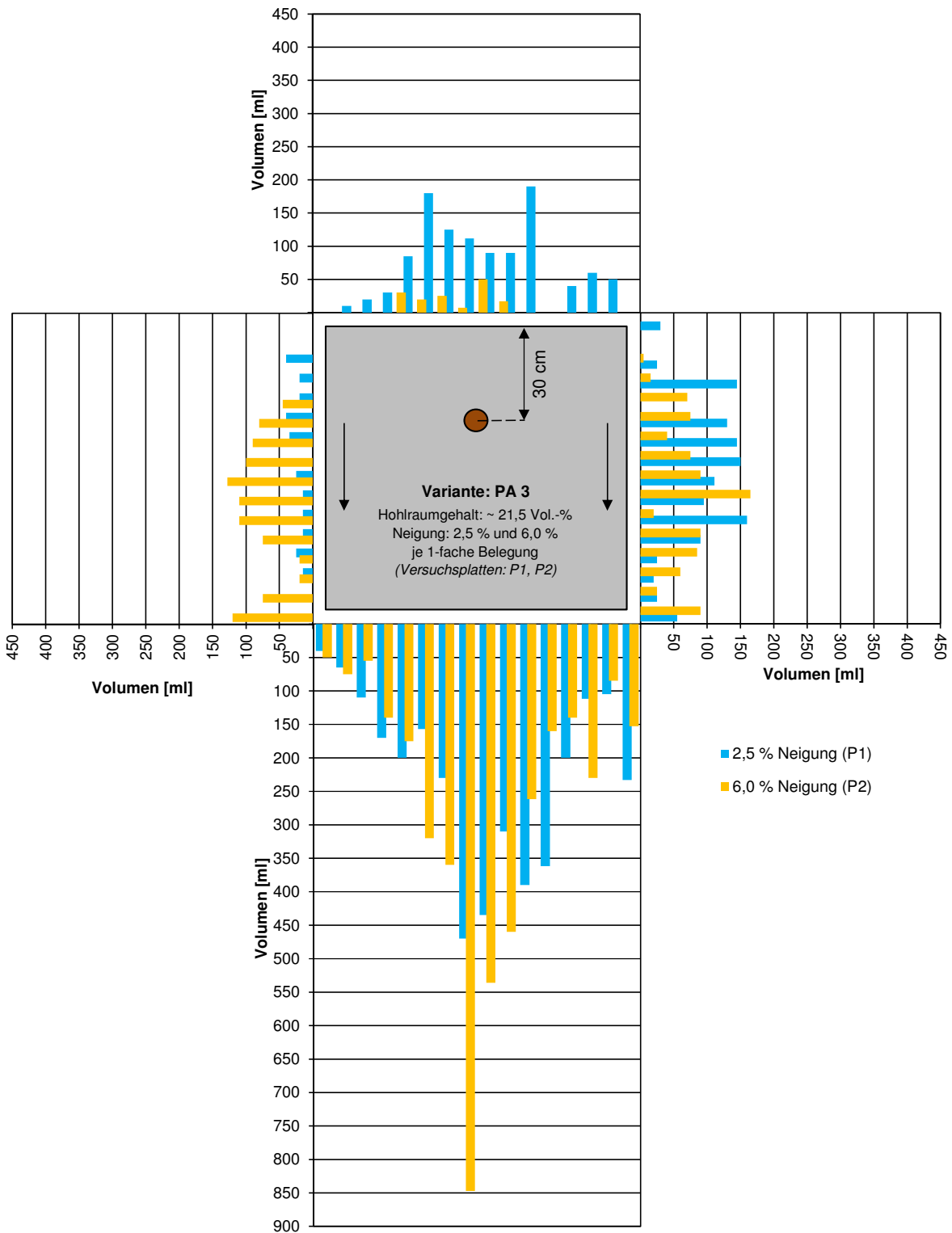


Bild 43: Ausbreitungsbild der Variante PA 3 (V = 21,5 Vol.-%)

Für die Variante PA 3 wurde nur eine Belegung je Neigung realisiert, so dass für diese Variante beide Neigungen in einem Diagramm dargestellt sind (siehe Bild 43). Grundsätzlich zeigte sich auch hier, dass eine höhere Neigung tendenziell zu einem stärkeren Abfluss in Gefällerrichtung, d. h. über die Vorderseite führt. Vergleicht man aller-

dings die Ergebnisse mit den Ausbreitungsbildern der beiden anderen Varianten, so fällt auf, dass die über die Rückseite abfließenden Mengen vergleichsweise gering ausfielen. Aufgrund des niedrigen Hohraumgehaltes hätte man eigentlich erwarten können, dass der hohe Fließwiderstand

zu einem stark verminderten Abfluss in Neigungsrichtung führt.

Wesentliche Ursache für diese Beobachtung ist die Tatsache, dass es insbesondere bei einer Neigung von 6 % zu einem sichtbaren Abfluss an der Oberfläche infolge einer Überstauung des Porensystems kam und die hohlraumärmere Variante PA 3 (21,5 Vol.-%) somit teilweise das Abflussverhalten eines dichten Asphaltes aufwies.

Bei aller Vorsicht im Hinblick auf die nur begrenzte Aussagekraft einer einfachen Versuchsbelegung ist dieses Ergebnis dennoch sehr bedeutsam, da es darauf hindeutet, dass sich ein niedriger Hohlraumgehalt, wie er beispielsweise bei lange unter Verkehr liegenden (verschmutzten) offenporigen Belägen vorliegen kann, die Tendenz zur Überstauung aufweist.

Zusammenfassende Erkenntnisse

Der Abfluss des Benzins erfolgte bei der Referenzvariante mit SMA oberflächlich in Gefällerrichtung. Nahezu 100 % der abfließenden Flüssigkeit wurden an der tieferliegenden Vorderseite der Versuchsplatte aufgefangen. Die Standzylinder füllten sich binnen weniger Sekunden nach Start der Benzinaufgabe. Nach Beendigung der Kraftstoffzufuhr betrug die Nachlaufzeit nur wenige Sekunden. Die räumliche Austrittsverteilung bei 6,0 % und 2,5 % Neigung waren vergleichbar. Die Verteilung der Füllstände in den Zylinder an der in Neigungsrichtung liegenden Plattenvorderseite ähnelte einer Normalverteilung.

Der offenporige Asphalt unterschied sich hinsichtlich des resultierenden Verteilungsmusters bei Flüssigkeitsaufgabe signifikant vom dichten SMA. Das Benzin führte dazu, dass ein Teil des Bitumens ausgewaschen wurde und es je nach Verteilung der Gesteinskörnung in der Platte zu einer Art „Kanalbildung“ kam, die zu stärkeren Streuungen in der Verteilung der aufgefangenen Mengen führte. Aufgrund des Eindringens in die Struktur und der damit verbundenen Aufstauung am Korngerüst infolge des behinderten Abfließens in Neigungsrichtung kam es im Vergleich zum SMA bei allen PA-Varianten zu einer großflächigeren Ausbreitung des Benzins. Die Konsequenz war, dass an allen Seiten der Probekörper ein bedeutsamer Anteil des Benzin-Bitumen-Gemischs austrat. Dieser Effekt war insbesondere für die Neigung von 2,5 % zu beobachten, wo stets ein signifikanter Abfluss über die Rückseite erfolgte.

Die Neigung von 6 % erhöhte zwar den Abfluss in Neigungsrichtung, jedoch kam es auch hier zum Austritt an der Rückseite und an den beiden seitli-

chen Rändern. Ebenso verlagerte sich die Benzin-ausbreitung mit steigender Neigung in Gefällerrichtung, erhöhte den Austritt an den Seiten und verringerte somit den Austritt an der Rückseite.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Verteilungsmuster wie eine Ellipse um die Aufgabestelle erscheinen, deren Parameter von der Neigung und vom Hohlraumgehalt abhängen.

Erfahrungen mit dem Versuchsablauf:

Während der ersten Versuchsdurchgänge im November 2014 fiel auf, dass eine Erfassung der zeitlichen Komponente erforderlich ist, um Aussagen über den Austrittszeitpunkt des Benzin-Bitumen-Gemisches aus den Versuchsplatten sowie über die zeitlichen Disparitäten der Austrittszeitpunkte, bezogen auf den Austrittsort, treffen zu können. Dabei stellte die zeitliche Erfassung eine Herausforderung dar. Wenngleich eine weiße Hintergrundfolie zur besseren Ablesung der Skala der Standzylinder beitrug, lies sich der Füllstand aufgrund der begrenzten Auflösung der Videokameras in Kombination mit dem Benzinschleier an den Gefäßwandungen bei Erfassung aller 16 Gefäße an der Vorderseite der Platte in einem Bild nicht erkennen. Deshalb wurde die zeitliche Füllstandsentwicklung nur an ausgewählten Stellen aufgezeichnet (siehe Kapitel 4.2.4).

Aus den Erfahrungen der ersten Durchgänge und aus Gründen der Symmetrie wurden im Verlauf der Versuchsdurchführung die folgenden Stellen (siehe Bild 44) erfasst:

- Kamera 1: Aufnahme von der Seite mittig (Erfassung von Zylinder 56 und 57)
- Kamera 2: Aufnahme im vorderen Eckbereich (Erfassung von Zylinder 64 und 1)
- Kamera 3: Aufnahme der Vorderseite mittig (Erfassung von Zylinder 8 und 9)

An dieser Stelle ist des Weiteren darauf hinzuweisen, dass es zwischen dem Austritt am Plattenrand und dem Abtropfen in den zugehörigen Standzylinder zu einer Verzögerung von einigen Sekunden kam. Da die Fließwege für alle Austrittsstellen jedoch sehr einheitlich waren, kann dies durch einen konstanten Zeitabschlag (ca. 5 s) berücksichtigt werden.

Die durch die Zylinder aufgefangene Flüssigkeit war jedoch kein reines Benzin sondern ein Benzin-Bitumen-Gemisch. Das Benzin löste beim Durchströmen des PA zum Teil Bitumen von den Versuchsplatten, wodurch eine Wägung nach abgeschlossenem Versuchsdurchgang nicht ausreichte, um den Anteil des sich noch im Porensystem befindlichen Benzins zu bestimmen. Die Menge

des sich nach Versuchsdurchgang noch in den Poren befindlichen Benzins ist vielmehr abhängig von der aufgegebenen, der verdunsteten und der aufgefangenen Benzinmenge sowie dem aufgefangenen ausgewaschenen Bitumen.

4.2.4 Zeitliches Ausbreitungsverhalten

Zur Erfassung der zeitlichen Komponente des Ausbreitungsverhaltens dienten Videobeobachtungen der Standzylinder während des Füllvorgangs. Die Auswertung der Videos bereitete jedoch einige Schwierigkeiten, da die Ablesung der momentanen Füllstände aufgrund von Benzinschleier und Bitumenanhaftungen an den Glaswandungen nicht immer eindeutig möglich war. Trotz Reinigung der Gefäße nach jedem Versuchsdurchgang war eine Anordnung einer weißen Hintergrundfolie notwendig.

Hinzu kam die Tatsache, dass in unmittelbar benachbarten Zylindern sehr unterschiedliche Füllstandsentwicklungen auftreten konnten, je nachdem, ob und wo sich im Porensystem ein Strömungskanal ausgebildet hatte.

Bild 45 zeigt exemplarisch für einen der mittig an der Vorderseite der Platte angeordneten Standzylinder (Nr. 8) den Füllungsverlauf in Abhängigkeit von der betrachteten Variante. Hierbei handelt es sich jeweils um einen einzelnen Versuch, d. h. es wurde keine Mittelung vorgenommen. Jeder Asphaltvariante ist eine Farbe zugeordnet. Die durchgezogenen Linien repräsentieren die 6% Neigung, die gestrichelten Linien die 2,5% Neigung.

Aus dem Diagramm lassen sich drei grundsätzliche Dinge ablesen:

- Für die Neigung von 6 % ergeben sich für alle Asphaltvarianten steilere Kurvenverläufe als bei 2,5 % Neigung. Die Zylinder füllen sich also schneller und die Endfüllstände sind höher. Dies ist in dieser Art plausibel und zeigte sich bereits in den Ausbreitungsbildern (siehe Kapitel 4.2.3).
- Bei den SMA-Platten beginnt die Füllung des Behälters bereits wenige Sekunden nach Beginn der Benzinaufgabe. Für die PA-Varianten dauert dies aufgrund des verlängerten und behinderten Fließweges durch das Porensystem deutlich länger.
- Die Reihung der PA-Variante erscheint auf den ersten Blick nicht plausibel, da sich für die hohlraumarme Variante PA 3 ein relativ steiler Verlauf einstellt, ähnlich wie beim SMA. Der Grund hierfür liegt möglicherweise darin, dass sich nach einiger Zeit tatsächlich Parallelen zum Ab-

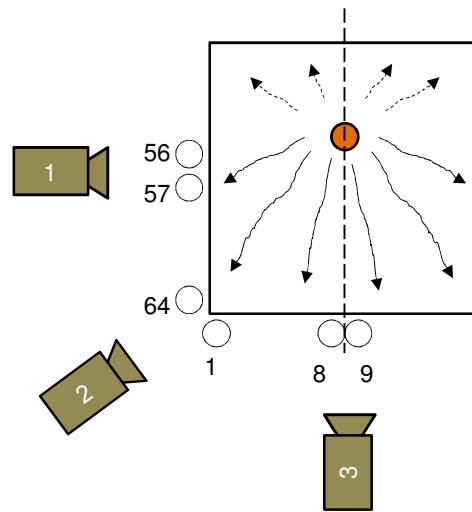


Bild 44: Aufzeichnung der Füllstandsentwicklung an ausgewählten Stellen

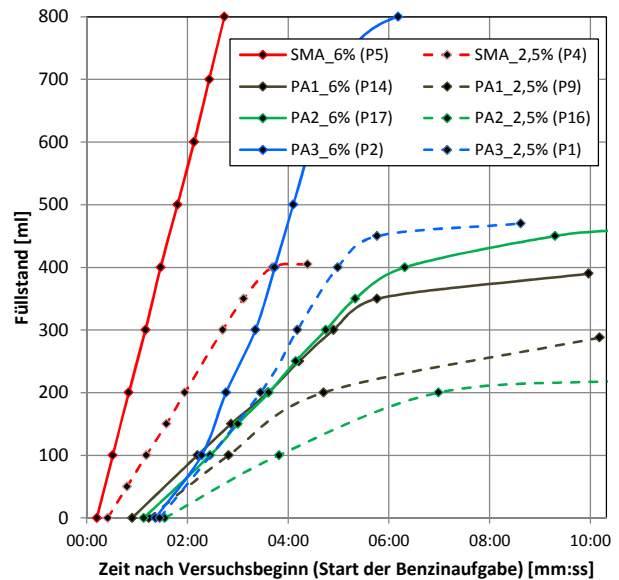


Bild 45: Exemplarische Darstellung der unterschiedlichen Füllstandsentwicklungen anhand von Standzylinder Nr. 8 (Vorderseite mittig)



Bild 46: Überströmung der Oberfläche bei der hohlraumarmen PA-Variante (PA 3)

flussverhalten beim dichten Asphalt ergeben. Der aufgegebene Volumenstrom kann aufgrund des relativ geringen Hohlraumvolumens nicht vollständig in die Struktur eindringen und muss oberflächlich ablaufen. Bild 46 zeigt diesen Effekt. Dies erklärt auch die sehr hohen Füllvolumina der mittleren Gefäße auf der Vorderseite (siehe Bild 43).

Die Auswertung der Füllstandsentwicklungen sämtlicher Standzylinder mit dem Ziel, valide gemittelte Kurvenverläufe zu erhalten, war nicht realisierbar. Um dennoch eine wichtige zeitliche Komponente für die Modellkalibrierung zur Verfügung stellen zu können, wurden die initialen Austrittszeiten an den Plattenrändern erfasst. Die Werte sind in Tab. 7 zusammengestellt. Es handelt sich hierbei, mit Ausnahme der Variante PA 3, um Mittelwerte aus mindestens drei Einzelwerten.

An welcher Seite das Benzin zuerst austritt, hängt vom Fließwiderstand ab, der wiederum vom Hohlraumgehalt, der Neigung und dem Fließweg bestimmt wird. Bei den flach geneigten Varianten ($\alpha = 2,5\%$) war der erste Austritt in der Regel an der Plattenhinterseite zu beobachten, d. h. entgegengesetzt zur Neigungsrichtung.

Betrachtet man die Austrittszeiten für die Plattenvorderseite, so sind die Ergebnisse für die 6 % Neigung systematisch und plausibel. Mit abnehmendem Hohlraumgehalt verlängerten sich die Zeiten bis zum Austritt von 46 Sekunden für den PA 1 ($V = 29$ Vol.-%) über 60 Sekunden für den PA 2 ($V = 26$ Vol.-%) bis hin zu 72 Sekunden für den PA 3 ($V = 21,5$ Vol.-%). Beim PA 1 und PA 2 führte außerdem die geringere Neigung erwartungsgemäß zu längeren Austrittszeiten (um 17 bzw. 19 Sekunden). Beim PA 3 war dies jedoch nicht der Fall, was aber möglicherweise auf die geringe Aussagekraft der nur einfachen Belegung zurückgeführt werden kann.

Asphalt	Neigung	mittlere Zeitdauer bis zum ersten Benzinaustritt in [s]			
		vorne	rechts	hinten	links
PA 1	2,5 %	63	46	32	54
	6,0 %	46	60	62	51
PA 2	2,5 %	79	45	41	50
	6,0 %	60	53	53	55
PA 3 *	2,5 %	70	62	35	73
	6,0 %	72	64	58	58

* Werte für Variante PA 3 nur einfach belegt

Tab. 7: Mittlere Zeitdauer bis zum ersten Benzinaustritt an den Plattenrändern

Die Austrittszeiten an der linken und rechten Plattenseite sollten aufgrund der symmetrischen Versuchsanordnung eigentlich in der gleichen Größenordnung liegen. Während dies bei der starken Neigung auch der Fall ist (hier liegen die Unterschiede bei maximal 6 Sekunden), so sind die Abweichungen bei 2,5 % Neigung deutlich größer. Dieser Effekt ist mit den herrschenden Fließgeschwindigkeiten im Porensystem erklärbar. Bei langsameren Fließgeschwindigkeiten, wie sie bei der geringeren Neigung auftreten, wirken sich Inhomogenitäten im Porensystem deutlich stärker aus. Übergreifend wurde festgestellt, dass mit zunehmender Neigung die Zeiten bis zum Austritt an der Vorderseite tendenziell abnahmen und die Zeiten bis zum Austritt an den übrigen Seiten zunahmten. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen zum Ausbreitungsverhalten, wonach mit einem schnelleren Austritt an der Vorderseite auch mehr Benzin in diesem Bereich abfließt.

4.2.5 Dichten des aufgefangenen Benzin-Bitumen-Gemischs

Während des Versuchsdurchgangs durchströmte das aufgegebene Benzin den offenporigen Asphalt und löste Bitumen sowie zum Teil kleinere Partikel des Asphaltmischguts. Durch die Vermischung des Fluides mit gelösten Stoffen (Bitumen, Asphaltmischgut) des Versuchskörpers veränderte sich die Dichte und entsprach nicht mehr derjenigen von reinem Benzin, die zuvor zu $0,740 \text{ g/cm}^3$ bestimmt wurde. Aufgrund der höheren Dichte von Bitumen ($1,05 \text{ g/cm}^3$) und vom Asphaltmischgut ($2,586 \text{ g/cm}^3$) lag die Dichte des austretenden Benzin-Bitumen-Gemischs erwartungsgemäß höher als $0,740 \text{ g/cm}^3$.

Um einen repräsentativen Wert für die mittlere Dichte zu erhalten, wurden nur Zylinder mit einem Füllinhalt größer als 100 ml ausgewertet, da bedingt durch die Einteilung der Messskala Ungenauigkeiten bei der Volumenablesung nicht ausgeschlossen werden konnten. Durch dieses Vorgehen wurden aber immer noch über 90 % des Benzin-Bitumen-Gemischs erfasst.

In der Tab. 8 werden je Platte die Anzahl der Messzylinder mit ≥ 100 ml aufgefangener Flüssigkeit sowie die über das Flüssigkeitsgewicht gewichtete Dichte dieser Proben aufgeführt. Fasst man die einzelnen Belegungen zusammen, so liegt die berechnete mittlere Dichte zwischen $0,741$ und $0,776 \text{ g/cm}^3$.

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass ein höherer Hohlraumgehalt und eine stärkere Neigung tendenziell zu höheren Dichten führen. Eine erhöhte Dichte infolge der ansteigenden Neigung ist mutmaßlich durch eine höhere Oberflächenreibung und dem damit verbundenen Ablösen von Partikeln infolge der vorherrschenden Fließgeschwindigkeit zu erklären.

Der Einfluss des Hohlraumgehalts ist darauf zurückzuführen, dass das ins Porengefüge eintretende Benzin eine größere Fläche des Probekörpers benetzt und dadurch eine größere Auswaschung stattfindet (siehe Kapitel 4.2.7).

4.2.6 Verdunstung des aufgegebenen Benzins

Nach Durchführung aller Versuche wurden deutliche Unterschiede zwischen der aufgegebenen und der in den Standzylindern in Summe aufgefangenen Benzinmenge festgestellt. Als Verlustquelle wurde neben dem im Porensystem verbleibenden Benzin auch die Verdunstung während der Versuchsdurchführung identifiziert. Außerdem traten beim Umsetzen der schweren Platten nach Versuchsende geringe Mengen an Benzin-Bitumen-Gemisch aus den Plattenrändern aus, was nicht gänzlich vermeidbar war. Führt man sich außerdem den Effekt der Auswaschung von Bitumen vor Augen, so wird die Schwierigkeit einer exakten Massenbilanzierung deutlich.

Die Ermittlung der verdunsteten Menge durch Wägung der Platten während der Versuchsdurchführung war nicht möglich.

Um dennoch Aussagen bezüglich der Verdunstung treffen zu können, wurde ein Versuch an einer kleineren offenporigen Asphaltplatte durchgeführt. Hier konnte während der Versuchsdurchführung kontinuierlich die Gewichtsabnahme des Gesamtsystems mittels Wägung erfasst werden (siehe Bild 47). Die Außentemperatur lag bei ca. 12 °C.

Als wichtigste Erkenntnis dieses Zusatzversuches ist festzuhalten, dass die verdunsteten Mengen durchaus nennenswert sind. Nach 5 Minuten waren von den 2 Litern (ca. 1.450 g), welche innerhalb von 90 s aufgegeben wurden, über 100 g verdunstet. Rechnet man dies auf die Abmessungen der großformatigen Versuchsplatten hoch, so liegt die Menge des verdunsteten Benzins während der Versuchsdauer bei schätzungsweise 500 g.

Aus dem Verdunstungsverlauf (siehe Bild 48) ist außerdem zu erkennen, dass die Verdunstungsrate mit zunehmender Zeit abnimmt. Diese Beobachtung ist insofern plausibel, da die leicht flüchtigen Benzinbestandteile sehr schnell verdunsten. Mit zunehmendem Anteil schwerer flüchtiger Bestandteile verlangsamt sich der Prozess sukzessive.

Asphalt	Neigung	Belegung	Platte	gefüllte Messzylinder	Anzahl der Proben ≥ 100 ml	gewichtete Dichte aller Proben ≥ 100 ml	mittlere gewichtete Dichte aller Proben ≥ 100 ml
PA 1	2,5 %	1	P16	47	26	0,753	0,765
		2	P15	61	26	0,769	
		3	P9	55	38	0,768	
		4	P10	54	31	0,770	
	6,0%	1	P18	48	21	0,781	0,776
		2	P13	39	30	0,765	
3		P14	45	22	0,782		
PA 2	2,5%	1	P13	57	27	0,765	0,755
		2	P14	61	31	0,737*	
		3	P16	59	37	0,741	
		4	P11	58	28	0,776	
	6,0%	1	P12	53	31	0,758	0,763
		2	P15	50	32	0,753	
		3	P17	53	18	0,777	
PA 3	2,5%	1	P1	54	24	0,741	0,741
	6,0%	1	P2	48	18	0,753	0,753
SMA	2,5%	1	P11	23	16	0,745	0,757
		2	P13	20	13	0,746	
		3	P4	14	9	0,778	
	6,0%	1	P12	16	11	0,773	0,758
		2	P10	13	10	0,764	
		3	P5	14	11	0,752	
		4	P3	16	13	0,744	

* Dichte aufgrund Ungenauigkeiten in der Mengenerfassung unter 0,740 g/cm³.

Tab. 8: Übersicht der Dichten

Der Verdunstungseffekt ist bei einem leichtflüchtigen Stoff wie Benzin grundsätzlich nicht zu vermeiden. Hinzu kommt der Einfluss der Witterung (Temperatur, Windstärke etc.), der zu Schwankungen in der Verdunstungsintensität führen kann.



Bild 47: Kleinversuch zur Abschätzung des Verdunstungseffektes

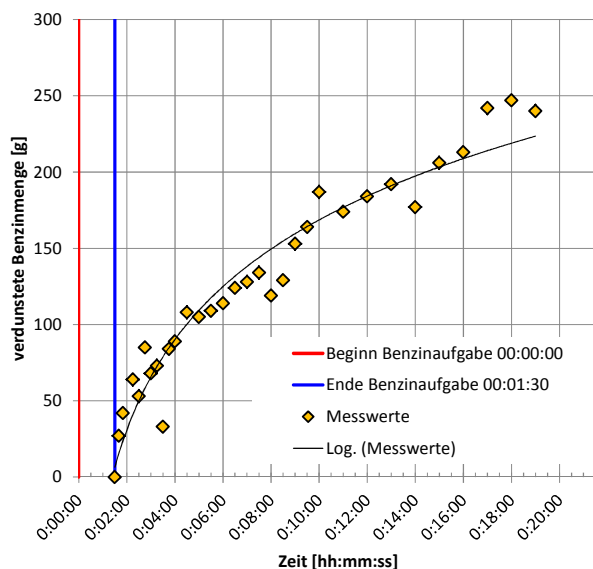


Bild 48: Verlauf des Verdunstungsprozesses

Variante	Neigung	Belegung				M.-%	
		1	2	3	4	Benzin	Bitumen
PA 1	2,5 %	P16	P15	P9	P10	89,0%	11,0 %
	6,0 %	P18	P13	P14	-	84,4%	15,6 %
PA 2	2,5 %	P13	P14	P16	P11	92,7%	7,3 %
	6,0 %	P12	P15	P17	-	89,9%	10,1 %
PA 3	2,5 %	P1	-	-	-	99,7%	0,3 %
	6,0 %	P2	-	-	-	94,0%	6,0 %
SMA	2,5 %	P11	P13	P4	-	92,7%	7,3 %
	6,0 %	P12	P10	P5	P3	91,9%	8,1 %

Tab. 9: Durchschnittlicher Bitumengehalt der Benzin-Bitumen-Gemische (ermittelt aus Wägung und Volumenablesung der Standzylinder)

4.2.7 Bitumenauswaschung

Sowohl beim Abfluss an der Oberfläche, wie er bei der Referenzvariante SMA auftritt, als auch beim Durchströmen des offenporigen Asphalts, wird Bitumen gelöst bzw. ausgewaschen. Dies wird alleine schon an der Verfärbung des aufgefangenen Benzins sichtbar. Allerdings stellte sich die quantitative Bestimmung der ausgewaschenen Bitumenmenge als schwierig heraus.

Bei der Differenzwägung tritt das bereits in Kapitel 4.2.2 beschriebene Problem auf, dass die ausgewaschene Bitumenmenge im Vergleich zum Plattengewicht sehr gering ist. Darüber hinaus verbleiben insbesondere bei den Varianten, die mit geringer Neigung geprüft wurden, nennenswerte Restmengen Benzin im Porensystem.

Somit liegen gegenläufige Effekte derart vor, dass das verbleibende Benzin zu einer Gewichtserhöhung und das ausgewaschene Benzin tendenziell zu einer Gewichtsreduktion führt. Hinzu kommt, dass eine Wägung unmittelbar nach Versuchsende grundsätzlich nicht verlässlich möglich war, da bereits bei geringfügiger Schrägstellung der Platten das Benzin-Bitumen-Gemisch aus den Platten herauslief bzw. tropfte. Aufgrund dieser Einschränkungen und der damit verbundenen begrenzten Aussagekraft waren die Wägeregebnisse nicht weiter verwendbar.

Um dennoch eine Aussage zur Bitumenauswaschung treffen zu können, wurden die aufgefangenen Benzin-Bitumen-Proben näher analysiert. Aus den Wägungen und den abgelesenen Volumina konnte je Versuch die gewichtete Dichte aller Proben ≥ 100 ml (siehe Kapitel 4.2.5, Tab. 8) bestimmt werden. Mit dieser Dichte und den bekannten Dichten für Benzin und Bitumen war es dann möglich, den durchschnittlichen Anteil des Bitumens zu berechnen (siehe Tab. 9).

Hierbei zeigte sich im Einklang mit den Ergebnissen der Dichtebetrachtungen (siehe Kapitel 4.2.5) für die PA-Varianten, dass die ausgewaschenen Mengen bei höherem Hohlraumgehalt und größerer Neigung tendenziell steigen, was vermutlich wiederum auf die höheren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Für die SMA-Variante ist keine Abhängigkeit von der Neigung feststellbar. Die ausgewaschene Menge ist erwartungsgemäß etwas geringer als bei den PA-Varianten.

Um die berechneten mittleren Dichten abzuschern, wurde zusätzlich an einer Stichprobe die Bitumenmenge durch destillative Rückgewinnung [TP-Asphalt 2007b] bestimmt. Für die Sammelprobe aus den Gefäßen 58 bis 64 der Variante PA 1, P15 wurden hiernach aus 414 g Gemisch 41,2 g

Bitumen rückgewonnen. Dies entspricht einem Bitumengehalt von 9,95 M.-% im Benzin. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie die aus den Messwerten berechneten Werte. Die errechneten Werte der Tab. 9 können somit für die spätere Modellbildung herangezogen werden.

4.2.8 Abschätzung der Schädigung des Asphalts

Eine unmittelbare Schädigung des Kornzusammenhalts tritt im Bereich des Benzinaufgabepunktes auf. Hier können nach Versuchsende einzelne Splittkörner mit der Hand entnommen werden. Das Benzin hat in diesem Bereich das Bitumen gänzlich gelöst.

Um auch eine Aussage zum Schädigungsgrad im Inneren der Platten treffen zu können, wurde von jeder PA-Variante eine Platte entlang der Symmetrieachse, d. h. in Neigungsrichtung, aufgesägt.

Bild 49 zeigt die entsprechende Schnittkante beispielhaft für die Variante PA 2 mit $s = 6\%$ (P12). Zu erkennen ist im oberen Teil die unmittelbare Aufgabestelle und im unteren Teil der vom Ab- bzw. Durchfluss betroffene Schichtbereich über der abdichtenden Bitumenbahn.

Alle Platten zeigen grundsätzlich ein vergleichbares Bild. Anhand der Bitumenfärbung war erkennbar, dass im Wesentlichen nur die unteren etwa 2 cm vom Benzin durchflossen wurden. Tendenziell war festzustellen, dass mit geringerem Hohlraumgehalt und Neigung die schwarz verfärbten Bereiche etwas größer wurden. Dies lässt sich durch die stärkere Aufstauung des abfließenden Benzins und den dadurch hervorgerufenen oberflächlichen Abfluss erklären. Dem Anhang können je Versuchsart und Asphaltvariante Fotoaufnahmen nach Versuchsdurchführung entnommen werden.

Relativierend ist jedoch zu sagen, dass auch der Schneidprozess als solches einen Einfluss hat, da es hierdurch zu unvermeidbaren Verschmierungseffekten kommt, die das Schnittbild verfälschen können.

Im Hinblick auf einen derartigen Schadensfall auf der Straße, wäre die Sanierung des betroffenen Bereichs in Form eines Austausches der gesamten PA-Schicht erforderlich. Schon ein kurzer Kontakt mit Benzin führt zur sofortigen Anlösung des Bitumens und damit zum Aufbrechen des Kornverbundes. Dies wurde bereits im Rahmen der Vorversuche nachgewiesen (siehe Kapitel 4.2.1).

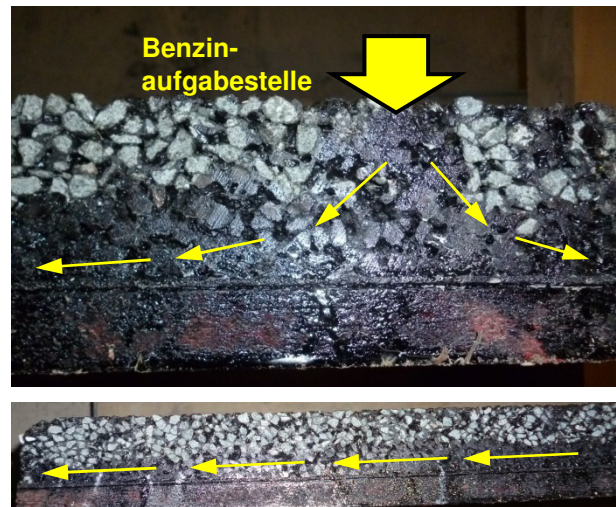


Bild 49: In Symmetrieachse aufgeschnittene Platte zur visuellen Beurteilung der inneren Schädigung

Eine bauliche Maßnahme zur Begrenzung der Flüssigkeitsausbreitung im Havariefall ist bei offenporigen Asphalten immer problematisch, da hierdurch auch die Entwässerung beeinträchtigt würde. Ein möglicher Lösungsansatz könnte die Einteilung in Fahrbahnabschnitte, die in Querrichtung durch Fugen voneinander getrennt sind, darstellen. Dadurch könnten geschädigte Bereiche partiell abgetragen und erneuert werden.

4.3 Brandversuche

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind zwei unterschiedliche Arten von Brandversuchen durchgeführt wurden.

Bei der ersten Art der Brandversuche wurde auf die Versuchsplatten eine zuvor definierte Menge Kraftstoff aufgegeben und diese anschließend angezündet (statisch Kraftstoffbelegung). Zur Bestimmung der maßgebenden Mengen wurde eine 100%ige Sättigung der Varianten PA 1 (9,5 l) und PA 2 (7,0 l) angestrebt. Die unterschiedlichen Belegungsvolumen stellten die Brandversuche „BV 1.1“ (9,5 l) und „BV 1.2“ (7,0 l) dar (siehe Bild 50).

Bei den Versuchsdurchführungen wurden das Brandverhalten, der zeitliche Temperaturverlauf, die Massenbilanz sowie die Energiefreisetzung bis zum selbstständigen Verlöschen beobachtet und dokumentiert. Die Brandversuche BV 1.1 wurden je 3-fach belegt. Für die Simulationsrechnungen wurden die anschließenden dynamischen Brandversuche als relevanter erachtet, daher wurden die Varianten im BV 1.2 nur 2-fach belegt, damit man für die späteren Versuche mehr Platten zur Verfügung hatte.

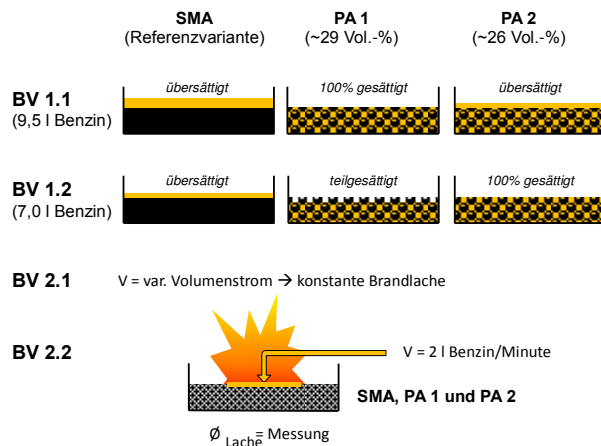


Bild 50: Übersicht der Brandversuche

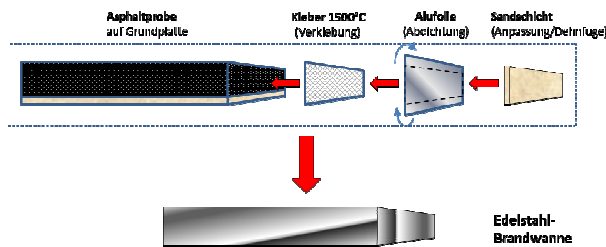


Bild 52: Brandversuche: Seitlicher Schichtenaufbau zur Abdichtung der Versuchsplatten.

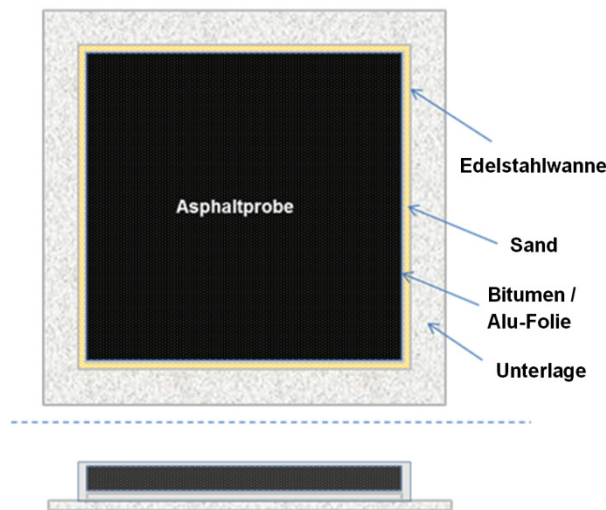


Bild 53: Konzeption des Versuchsaufbaus (Draufsicht und Seitenansicht)

Bei der zweiten Brandversuchsreihe sollte die Zuflussrate so eingestellt werden, dass sie der Abbrandrate entspricht. Im Verlauf der ersten Versuchsdurchführung („BV 2.1“) stellte sich jedoch heraus, dass die Ermittlung des benötigten Volumenstroms zum Erreichen einer konstanten Brandfläche nicht realisierbar war. Nach Rücksprache mit

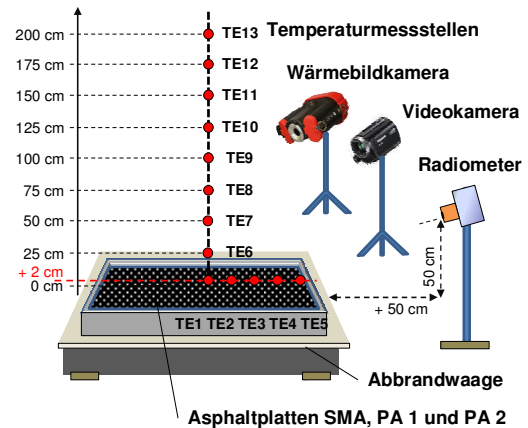


Bild 51: Anordnung der Messtechnik

dem Forschungsgeber wurde deshalb ein neuer, verbesserter Brandversuchsstand konzipiert („BV 2.2“). Auch Zugunsten der nachfolgenden Simulationsberechnung wurde der Versuch insofern geändert, dass jede Variante kontinuierlich mit einem konstanten Volumenstrom von 2,0 l/min 3-fach belegt wurde.

4.3.1 Versuchskonzept

Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung war bei allen durchgeführten Versuchen identisch. In Bild 52 und Bild 53 sind die durchgeführten Maßnahmen zur Aufbereitung der Asphaltproben dargestellt. Um einen „Randeffekt“ durch ausfließenden Kraftstoff zu vermeiden wurden die Probekörper seitlich mit einer Alu-Folie abgedichtet. Diese wurde mit einem Hochtemperaturkleber, der bis zu 1.500°C beständig ist, aufgebracht. Die Brandwannen wurden so bemessen, dass trotz möglicher Undichtigkeiten dieser Randeffekt in Grenzen gehalten werden könnte. Die Wannen umschlossen die Proben mit einer Spaltbreite von ca. 1 cm. Dieser Zwischenraum wurde mit Sand verfüllt und diente als Dehnfuge. Ebenso ermöglichte die Fuge, die Probe nach der Versuchsdurchführung leichter aus der Brandwanne herauslösen zu können.

Messtechnik

Der in Bild 51 dargestellte Versuchsaufbau zeigt, dass insgesamt 13 Temperaturmessstellen (Thermoelemente) eingesetzt wurden. Die Messstellen TE1 bis TE5 dienten der Ermittlung der Oberflächentemperatur. Die Messstellen befanden sich 2 cm über der Asphaltplatte. Die Messstellen TE6 bis TE13 wurden über der Plattenmitte installiert. Mit ihnen wurde das vertikale Flammenfeld im Brandzentrum erfasst. Zusätzlich zu den 13 Tem-

peraturmessstellen wurde in den Versuchsreihen BV 2.1 und BV 2.2 eine weitere Messstelle (TE14) hinzugefügt. Diese Temperaturmessstelle bestimmte die Kraftstofftemperatur im Zulauf. Da mit einer erheblichen Aufheizung des zuführenden Rohrs zu rechnen war, wurde die Kraftstoffzufuhr zusätzlich isoliert.

Die Messwerterfassung erfolgte über ein PC-gestütztes Vielkanal-Messwerterfassungssystem. Die Versuche wurden grundsätzlich mit Videorecorder und Wärmebildkamera aufgezeichnet. Zur Beurteilung der seitlichen Wärmestrahlung diente ein Radiometer⁹. Es befand sich in 50 cm Abstand vom Probenrand und 50 cm oberhalb der Probenoberfläche. Das Radiometer wurde auf die Mitte der Platte ausgerichtet und erfasste die Strahlungsflussdichte aus dem vorderen Halb-Raum in W/cm^2 ($10 kW/m^2$).

Der Masseverlust wurde mit einer Abbrand-Waage erfasst und aufgezeichnet. Diese befand sich unterhalb der Versuchswanne und nahm die Brandwanne mit Brandmedien auf.

Zur besseren nachträglichen Identifizierung der Flammenhöhe wurden horizontale Metallstäbe am Messständer montiert. Am hervortretenden oberen Stab war eine Kette befestigt. Sie trug die Thermolemente der vertikalen TE-Messstellen.

System zur Kraftstoffzufuhr und -regelung

Die Nachführung des Kraftstoffs zur Bestimmung der Abbrand- bzw. der Energiefreisetzungsrate machte einen gesonderten Versuchsaufbau, wie in Bild 54 und Bild 55 gezeigt, notwendig. Die Kraftstoffzuführung wurde gemessen und „von Hand“ eingestellt und nachgeregelt. Eine exakte Vorausberechnung war aufgrund der sich ändernden thermischen Verhältnisse während des Versuchablaufs nicht möglich. Zur Nachreglung wurde eine mit Druckluft betriebene Membranpumpe eingesetzt, die das Druckluftsystem des Brandhauses nutzte. Die Pumpe wurde durch einen Feindruckregler reguliert. Um für einen konstanten Kraftstofftransport zu sorgen, wurde zunächst im Kreislauf gefördert. Mit Versuchsbeginn wurde der Dreiwegehahn umgelegt und der Kraftstoff direkt auf die Brandfläche gebracht und gezündet. Diese Lösung enthielt die Option, gegebenenfalls einen Bypass zu fahren und die Kraftstoffmenge weiter zu minimieren. Der Kraftstoff wurde über ein gebogenes Edelstahlrohr nahe der Oberfläche

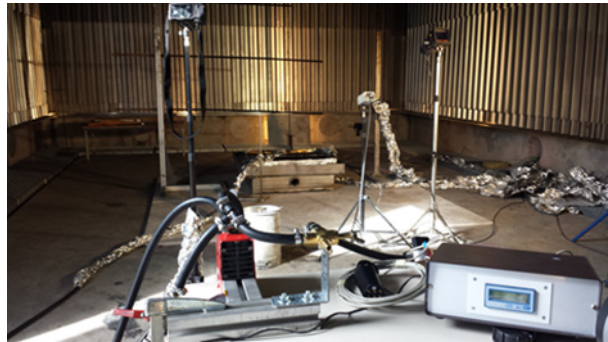


Bild 54: Versuchsaufbau mit Kraftstoffsteuerung

zugeführt, um ein Verspritzen zu vermeiden. Der durch Flammen beanspruchte Bereich des Rohrs wurde durch Doppelummantelung thermisch isoliert. Hier erfolgte auch die Bestimmung der Temperatur des zugeführten Kraftstoffs. Da im Brandverlauf mit einer erheblichen Aufheizung des Rohrsystems zu rechnen war, wurde in den ersten Vorversuchen die thermisch belasteten Bereiche mit Steinwolle-Matten umwickelt und mit dicker Alufolie von außen umfasst und abgebunden. Während der Brandverläufe kam es teilweise zum Abschmelzen der Folie. Dies hatte jedoch keine Auswirkungen auf den Versuchsaufbau. Die umfassende Folie musste je Versuch erneuert werden.

Die Kraftstofftemperatur (TE14) wurde mit einem Thermolement im Rohr gemessen. Dies wurde ca. 20 cm in die Rohröffnung eingeschoben. Beim fließenden Kraftstoff lagen die Temperaturen im Brandverlauf stets unter $20^{\circ}C$, sodass die einfache Isolierung beibehalten wurde und zum Erfolg führte. Der Kraftstoff stellte somit das Kühlmedium des Einlaufrohres dar. Nach Abschalten des Kraftstoffzuflusses wurde das Rohr umgehend aus dem Flammenbereich des Versuchs herausgenommen um ein unnötiges Überhitzen zu vermeiden.

Bei den Brandversuchen BV 2.2 wurde der Durchfluss bereits vor Versuchsbeginn eingeregelt und festgestellt, so dass beim Start der Kraftstoffzuführung nur noch der Dreiwegehahn umzulegen war. Der Durchflusswert des Zuflusses wurde mit einem Durchflussmesser angezeigt und bei Bedarf nachgeregelt. Die Schwankungen in der Kraftstoffzufuhr lagen deutlich unter 5 % ($\leq 100 ml/min$) des Anzeigewertes von 2 l/min. Exaktere Angaben waren nicht möglich, da der Kraftstofffluss nicht aufgezeichnet werden konnte.

Zur Verbesserung des Regelverhaltes wurde bei späteren Versuchen ein Bypass eingesetzt. Dieser führte den geförderten Kraftstoff nach der Pumpe wieder zurück in den Ausgangskanister. Die Regelung der Pressluft zeigte eine zu träge Reaktion

⁹ Strahlungsflussaufnehmer (Radiometer der Firma Medtherm vom Typ 64-10-20, Alabama, USA)

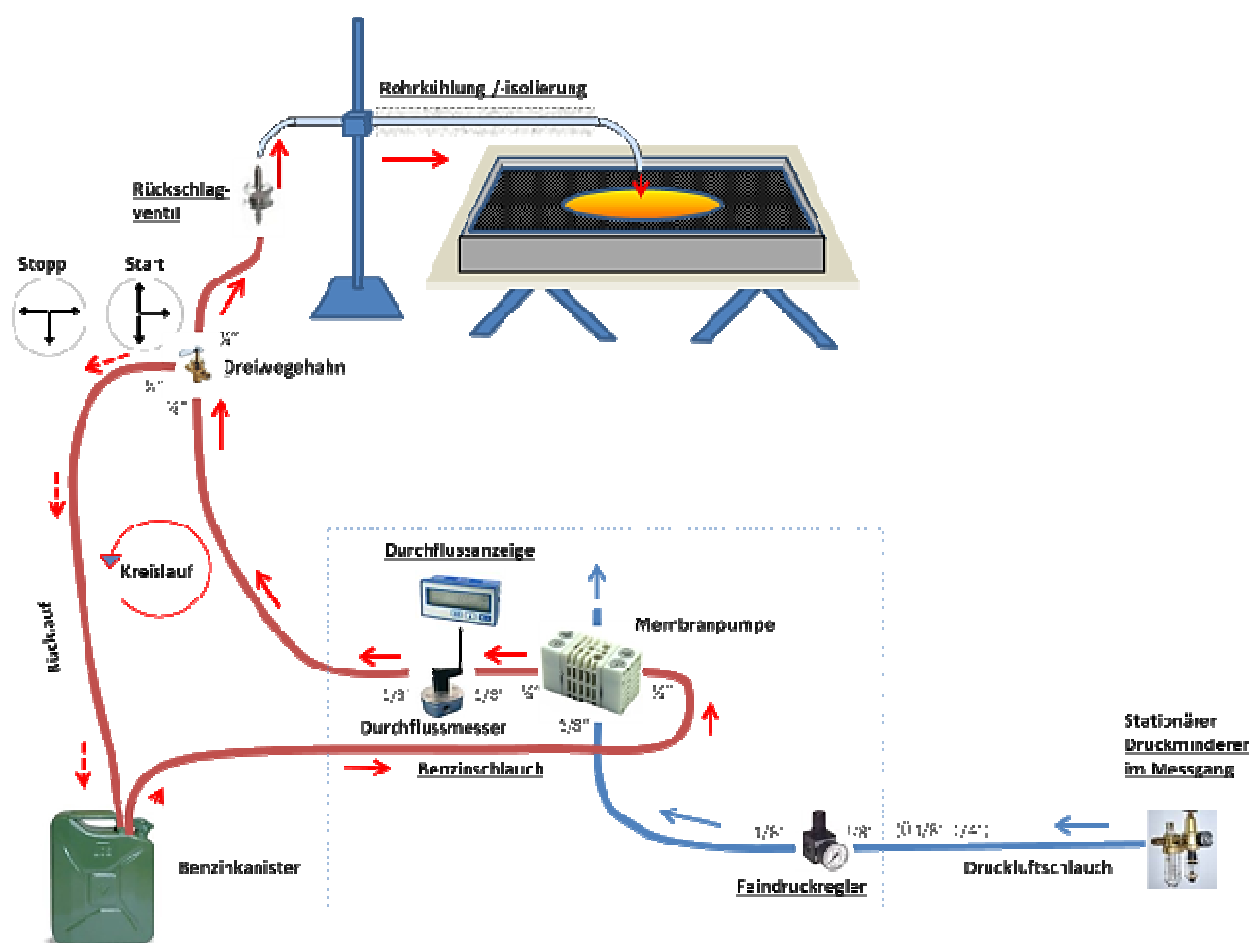


Bild 55: System zur Kraftstoffnachführung

beim Nachregeln. Der Bypass ist im Bild 55 nicht mit eingezeichnet.

4.3.2 Vorversuche für die Brandversuche

Da diese Art der Kraftstoffaufbringung ein Novum darstellte, waren Vorversuche in zwei Stufen notwendig.

4.3.2.1 Nasslabor

Der Versuchsaufbau wurde zunächst im Nasslabor mit Wasser getestet um Undichtigkeiten zu beheben, die Bedienung zu optimieren, die Durchflussmesstechnik zu testen und das Regelverhalten zu analysieren.

4.3.2.2 Realbrand

Es war zwingend notwendig, zum Test des allgemeinen Brandverhaltens erste Realbrandversuche an einigen mitgelieferten Testproben durchzuführen. Hier konnten für die Auffüllversuche die Größenordnungen der Kraftstoffmengen, Abbrandraten und Brandzeiten bestimmt werden. Eine größere Herausforderung stellten Versuche zur Nachführung der Kraftstoffmenge dar.

Das erstellte Konzept der Probeneinbettung (siehe 4.3.1) bewährte sich. Lediglich bei einer Versuchsdurchführung trat aufgrund eines Mikrorisses in der Alufolie eine Undichtigkeit auf. Diese Probe wurde nicht gezündet und floss demnach nicht in die Ergebnisinterpretation ein. Der Hochtemperaturkleber (1.500°C) zur Befestigung der Alufolie hat den Anforderungen voll entsprochen. Auch die Alufolie an sich überstand die hohen thermischen Belastungen nahezu unversehrt und verhinderte ein Auslaufen des anstehenden Kraftstoffs bei allen Versuchen. Die Sandfüllung diente als thermisches und mechanisches Ausgleichsmedium und ließ ein problemloses Entnehmen und Wechseln der Proben zu (siehe Bild 56).

Die Versuche wurden im Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (Brandraum 3) durchgeführt. Der Brandraum hat die Grundmaße 8 x 5 m und eine Raumhöhe von 10 m. Während der Versuche wurden die Türen geschlossen. Die Zuluft wurde über 5 Zuluft-Klappen am Boden zugeführt, der Brandrauch über Lüfter an der Decke der Rauchgaswäsche zugeführt. Die Messwerterfassung wurde im benachbarten Brandraum 2 installiert. Lediglich die Bedienung der

Kraftstoffförderung und das Vermessen der Brandlachendurchmesser durch das Personal erfolgten im Brandraum 3 selbst. Das Personal hielt sich stets im Zuluft-Bereich auf und hatte so Zugriff auf den Brandprozess.

Zur Analyse des Brandverhaltens bis hin zum Erlöschen wurde eine robuste Wärmebildkamera¹⁰ eingesetzt (siehe Bild 57). Sie wurde in 2 m Entfernung von Brandobjekt aufgestellt um den Nahbereich thermografisch abzudecken. Gegenüber den punktuell aufgezeichneten Temperaturverläufen geben Infrarotaufnahmen die geschlossene flächenmäßige Temperaturverteilung wieder. Insbesondere können die interessanten Prozesse beim Ausbrennen der Platten in der Spätphase des Brandverlaufs besser beobachtet und analysiert werden (siehe Bild 58).

4.3.3 Versuchsdurchführung und Messergebnisse für die CFD-Simulation

Während der einzelnen Brandversuche (BV 1.1 bis BV 2.2) wurden mittels zuvor genannter Messtechnik Brandverhalten, zeitlicher Temperaturverlauf, Massenbilanz sowie Energiefreisetzung erfasst. Nachfolgend wird nur exemplarisch auf wesentliche Messergebnisse eingegangen. Detailliertere Auswertungen der Brandversuche können dem Anhang entnommen werden.

4.3.3.1 Brandverhalten

Brandversuche BV 1.1 und BV 1.2

Die Brände auf den offenporigen Asphalten dauerten im Vergleich zu denen auf dem SMA sehr viel länger an. Die Anfangsphase der Brände lief dabei ähnlich ab. Es zeigte sich jedoch, dass sich das Brandverhalten auf offenporigen Asphalten nach Abbrand des an der Oberfläche anstehenden Benzins deutlich von dem auf einem SMA unterscheidet, da das Benzin dann nur noch im Porengefüge des Asphalts zur Verfügung steht.

Während beim SMA nach Abbrand des sich an der Oberfläche befindlichen Benzins der Brand erlischt, reduziert sich der Brand auf PA lediglich in seiner Höhe bzw. Leistung. Nach ungefähr 1/3 der Branddauer waren noch ca. 10 - 20 cm hohe Flammen auf der Oberfläche zu verzeichnen (siehe Bild 58). Der Brand reduzierte sich im weiteren Brandverlauf immer mehr und es erfolgte ein Ausbrennen mit vergleichsweise kleinen Flammen.

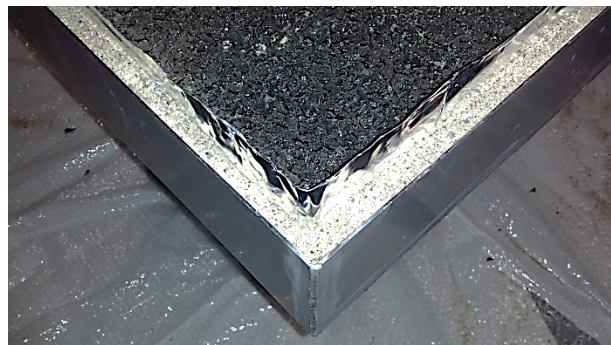


Bild 56: Einbettung der Proben in die Brandwanne



Bild 57: Einsatz der Wärmebildkamera

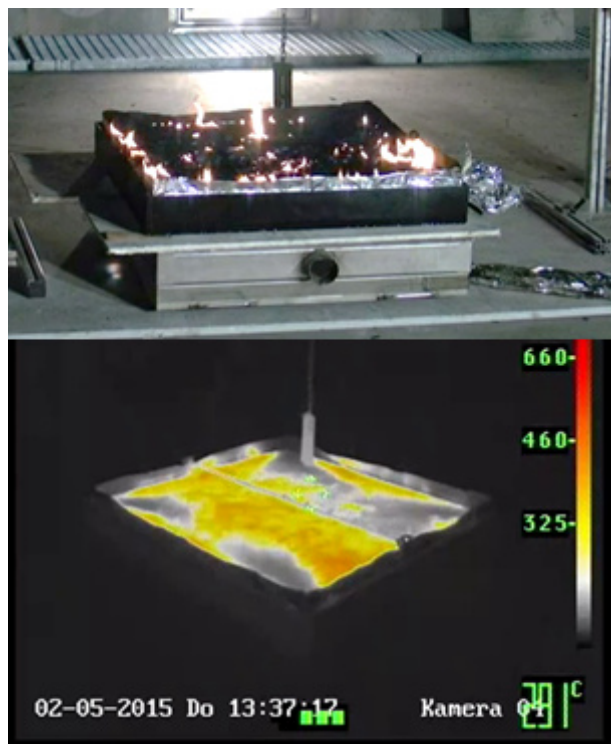


Bild 58: BV 1.1 – Ausbrennen der Platten (PA 1-P7 ca. 33 min nach Zündung)

¹⁰ Es handelte sich um die Kamera ISG E380.

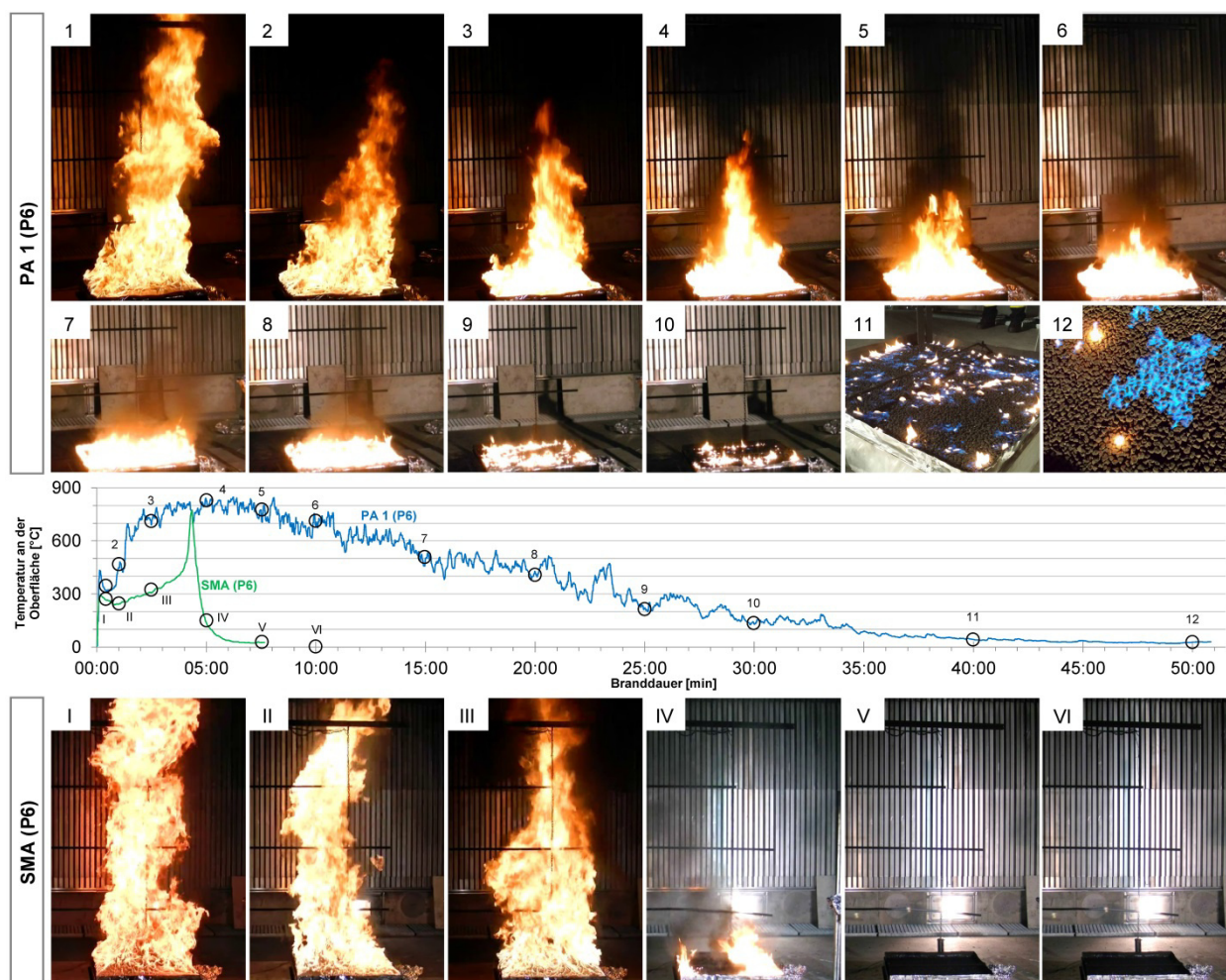


Bild 59: BV 1.1 - Beispielhaftes Brandverhalten auf PA 1 und SMA (BV 1.1 mit 9,5 l)

Aufgrund des inhomogenen Porengefüges teilte sich die Brandoberfläche im fortgeschrittenen Brandverlauf in mehrere kleinere Brände auf. Das Bild 58 zeigt beispielhaft das Ausbrennen eines PA 1 ($V = 29$ Vol.-%) nach ca. 33 Minuten. Anhand der Darstellung wird ersichtlich, dass die Probenoberfläche nur teilweise mit kleinen Flammen belegt ist, jedoch ein erheblich größerer Teil des Asphalts eine Temperatur von über 300°C aufweist. Dadurch, dass bei der PA-Variante im Gegensatz zur SMA-Variante nicht nur oberflächlich Kraftstoff verbrennt, weist der PA auch nach Versiegen des Brandes an der Oberfläche eine hohe Temperatur auf.

Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass die kleinen Flammen nicht in ihrer Lage fixiert waren sondern sich über die Oberfläche in ihrer Lage verschoben. Neben den wandernden kleineren Brandflächen waren aufgrund der durch die Poren nach oben austretenden Gase über einen sehr langen Zeitraum immer wieder aufzüngelnde Flammen zu beobachten.

Das ständige Aufflammen führte dazu, dass die Flammen beim BV 1.1 bei den überstauten Platten des PA 2 ($V = 26$ Vol.-%) im Durchschnitt erst nach ca. 35 Minuten und beim gesättigten PA 1 erst nach ca. 45 Minuten erloschten. Die Brände auf dem SMA dauerten dagegen bei einer Aufgabe von 9,5 l Kraftstoff im Durchschnitt nur ca. 7 Minuten.

In Bild 59 sind exemplarisch die Brandverläufe mit zugehöriger Temperatur an der Plattenoberfläche eines PA 1 und eines SMA vergleichend gegenübergestellt.

Das Brandverhalten in den BV 1.2 ähnelte stark dem der Versuchsreihe BV 1.1. Die Brände auf dem SMA versiegten bereits nach ca. 5 Minuten. Auch bei den PA 1 und PA 2 Varianten war nur ein Unterschied von wenigen Minuten festzustellen. Ebenso konnte beim BV 1.2 auch das Aufzüngeln einzelner Flammen aus den Versuchsplatten des PA beobachtet werden.

Beim Brandbeginn der teilgesättigten Variante PA 1 zeigte sich beim BV 1.2, dass bei Zündung

nur eine sehr geringe Flammenhöhe erreicht wird. Diese Brandhöhe stieg jedoch mit der Dauer der Brandzeit an um - wie in den Versuchen von BV 1.1 - einige Zeit später wieder abzufallen.

Die unterschiedliche Kraftstoffaufgabe spiegelte sich bei den PA-Varianten folglich in der Branddauer und beim Verhalten während des Brandbeginns (siehe Bild 60) wieder.

Bei den durchgeführten Versuchen war auffällig, dass sich die untersuchten PA 1 Platten (P11 und P12) stark voneinander unterschieden. So dauerte es bei der Platte P11 ca. 4 Minuten bis der Brand anfang sich zu entwickeln. Bei der Versuchsplatte P12 dauerte dieser Vorgang lediglich ca. 1 Minute. Das Porengerüst ist demnach ein entscheidender Parameter bei der Brandentwicklung und sein Einfluss kann aufgrund der Inhomogenität nicht verallgemeinert werden.

Aufgrund des deutlichen Zeitversatzes werden im weiteren Verlauf bei den Ergebnissen des BV 1.2 der Variante PA 1 nicht die Mittelwerte, sondern die Einzelwerte der Platten P11 und P12 aufgeführt.

Der Brandbeginn auf den PA 2 und SMA Varianten war mit denen aus dem BV 1.1 zu vergleichbar.

Bei allen Bränden wurde eine für Bitumen typische Rauchbildung nur in geringem Umfang beobachtet. Die langkettigen Moleküle verbrennen demnach weniger stark als die kurzkettigen Moleküle des Benzins, die schneller ausgasen. Es wird daher angenommen, dass nur wenig Bitumen verbrennt.

Zusammenfassend kann der ersten Versuchsart entnommen werden, dass eine offenporige Asphaltsschicht eine deutlich längere Branddauer zur Folge hat, der Brandbeginn von der vorhandenen Sättigungsrate abhängig ist und es zu Bränden im Porengefüge kommt, wodurch die Brandfläche nicht in ihrer Lage fixiert ist.

Brandversuch BV 2.1

Die 1-fache Belegung jeder Versuchsplatte zeigte auf, dass sich das Brandverhalten unter einer kontinuierlichen Kraftstoffzufuhr im Verlauf der Belegungsdauer stark verändert. Auf dem durch Hitze und Benzin beschädigten Korngerüst der Asphaltproben konnte im Rahmen der Versuchsdurchführung keine konstante Brandlache hergestellt werden.

BV 2.2

Die Entwicklungen der Brandlachen unterschieden sich auf dem SMA signifikant von denen auf dem PA. Während beim SMA die Lachen durchschnittlich

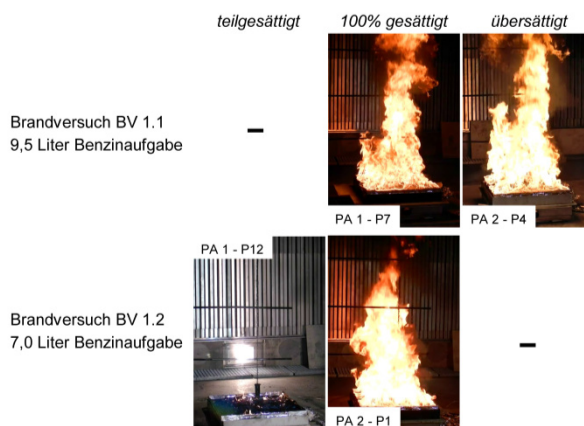


Bild 60: BV 1.2 - Vergleich des Brandverhaltens von PA 1 und PA 2 (10 s nach der Zündung)

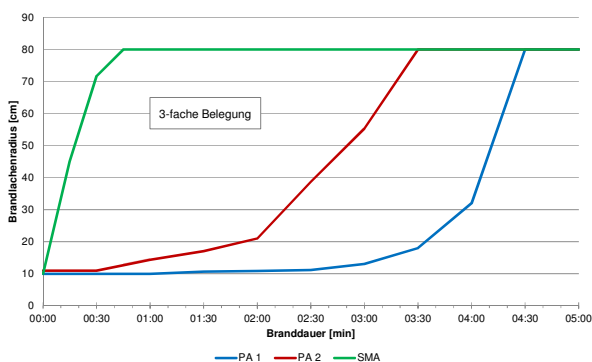


Bild 61: BV 2.2 - Brandlächenausbreitung

lich nach ca. 30 s ihr mögliches Maximum (80 cm) erreichten, dauerten die Lächenausbreitungen auf der PA 2 Variante im Durchschnitt ca. 3,5 min und auf dem PA 1 ca. 4,5 min an (siehe Bild 61).

Die Hohlräume des PA ermöglichen eine Lächenausbreitung an der Oberfläche sowie im Porengefüge. Somit breitet sich der Kraftstoff der nicht direkt verbrennt zunächst im Porensystem aus. Demnach konnten in den ersten Minuten der Versuche relativ konstante Brandlachen an der Oberfläche beobachtet werden. Mit zunehmender Sättigung des Porengefüges stiegen die Brandlachen kontinuierlich bis zum Maximum an.

4.3.3.2 Zeitlicher Temperaturverlauf

Brandversuche BV 1.1 und BV 1.2

Die an der Oberfläche (TE01 – TE05) der Platten gemessenen Temperaturen liegen beim SMA stets unter denen der PA-Varianten.

Die über die Höhe (TE06 – TE13) gemessenen Temperaturen zeigen, dass der Brand auf dem SMA recht konstant verläuft. Erst nach Verbrennen des Kraftstoffs verringert sich die Temperaturkurve und fällt unter die des PA.

In Bild 62 bis Bild 67 werden die zeitlichen Temperaturverläufe über die Höhe der einzelnen Asphaltvarianten in den unterschiedlichen Brandversuchen (BV 1.1 und BV 1.2) gegenübergestellt.

Die zeitlichen Temperaturverläufe des BV 1.2 zeigen die zuvor genannten Unterschiede (verzögerte Brandentwicklung) in den Versuchsplatten des PA 1 deutlich auf.

Brandversuche BV 2.1 und BV 2.2

Die Temperaturen der Brandversuche BV 2.1 und BV 2.2 stiegen mit der Kraftstoffzuführung und

sanken bei Abbruch (siehe Bild 68 und Bild 69).

Es war eine Steigerung der Temperatur bei allen Varianten bis zum Erreichen des maximalen Brandlachendurchmessers zu verzeichnen. Nachdem der maximale Durchmesser erreicht wurde, wurde die Kraftstoffzufuhr abgebrochen. Das nachfolgende Ausbrennen des Benzins erfolgt vergleichbar zu dem der BV 1.1.

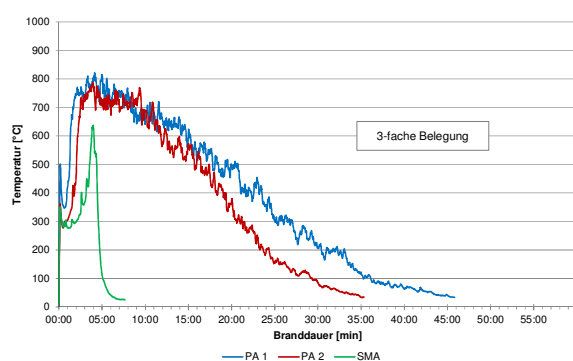


Bild 62: BV 1.1 - zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche (TE01 – in Plattenmitte)

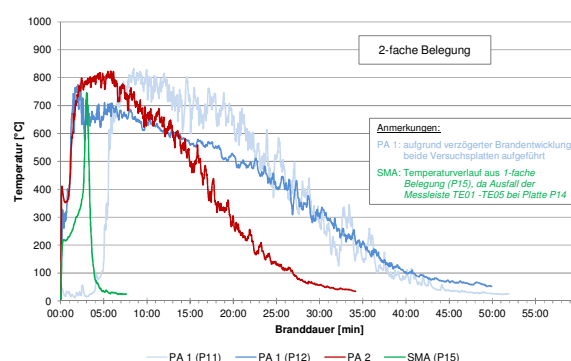


Bild 63: BV 1.2 - zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche (TE01 – in Plattenmitte)

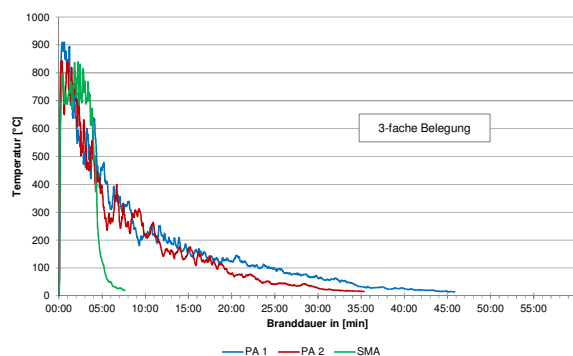


Bild 64: BV 1.1 - zeitlicher Temperaturverlauf über die Höhe (TE07 – 50 cm über dem Brandherd)

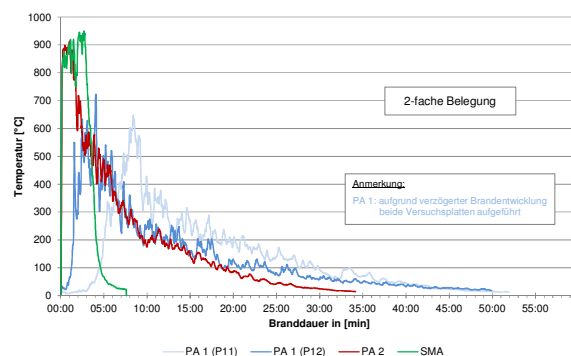


Bild 65: BV 1.2 - zeitlicher Temperaturverlauf über die Höhe (TE07 – 50 cm über dem Brandherd)

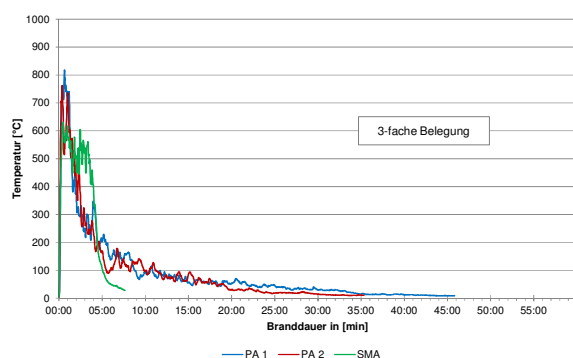


Bild 66: BV 1.1 - zeitlicher Temperaturverlauf über die Höhe (TE09 – 100 cm über dem Brandherd)

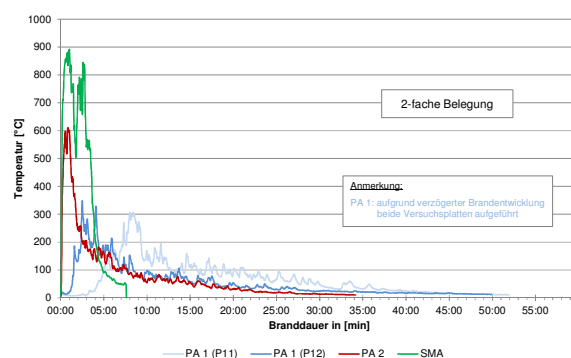


Bild 67: BV 1.2 - zeitlicher Temperaturverlauf über die Höhe (TE09 – 100 cm über dem Brandherd)

4.3.3.3 Massenbilanz während der Verbrennung

Brandversuche BV 1.1 und BV 1.2

Der Massenverlust während der Versuche wurde jeweils mittels einer Brandwaage erfasst. Hierzu wurde alle 30 Sekunden das Gewicht der Platten abgelesen und notiert.

Beim BV 1.1 nahm beim PA 2 in den ersten Minuten der Brände die Masse der Gesamtkonstruktion durch die geringe Überstauung von 0,5 cm ähnlich konstant ab, wie beim SMA (siehe Bild 70). Nach Abbrand des an der Oberfläche zur Verfügung stehenden Benzins vollzog sich der Masseverlust, welcher das Verbrennen des Benzins widerspiegelt, deutlich langsamer. Der langsamere Massenverlust spiegelt auch die geringe Brandleistung ab diesen Zeitpunkt wieder.

Der BV 1.2 weist ähnliche Massenbilanzen auf. Auch hier lässt sich die zeitliche Verzögerung des Abbrands der Variante PA 1 bei Teilsättigung beobachten (siehe Bild 71).

Es fiel auf, dass die Platten des PA als auch des SMA nach Versuchsende geringfügig höhere Massen als zuvor besaßen. Eine Erklärung dafür ist, dass sich während des Brands das Bitumen

verflüssigt und sich mit dem Benzin vermischt. Hierdurch können kleine Benzinvolumina im Bitumen eingeschlossen werden, so dass keine Verbrennung mehr stattfinden kann.

Brandversuche BV 2.1 und BV 2.2

Die Massenbilanz während der Verbrennung der Brandversuche BV 2.1 und BV 2.2 wird nicht aufgeführt, da der Fokus dieser Versuchsdurchführung die Brandlächenausbreitung war.

4.3.3.4 Verlauf der Energiefreisetzung

Brandversuche BV 1.1 und BV 1.2

Die Verläufe der Wärmestrahlung in Bild 72 und Bild 73 geben die deutlich längere Brandzeit auf dem PA wider, die mit einer Dämpfung der Wärmefreisetzungsrate einhergeht. Die in Bild 64 bis Bild 67 dargestellten höheren Temperaturen beim SMA sind ebenfalls in den Darstellungen erkennbar.

Beim SMA lässt sich ein starker Abfall der Wärmestrahlung im Vergleich zum PA erkennen.

Auch die Verzögerung des PA 1 im BV 1.2 ist aus der Darstellung der Wärmestrahlung erkenntlich.

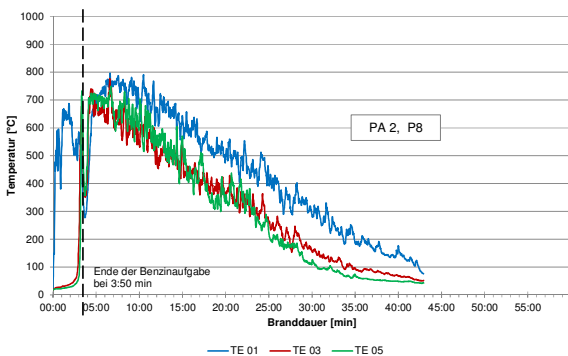


Bild 68: BV 2.2 – zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche

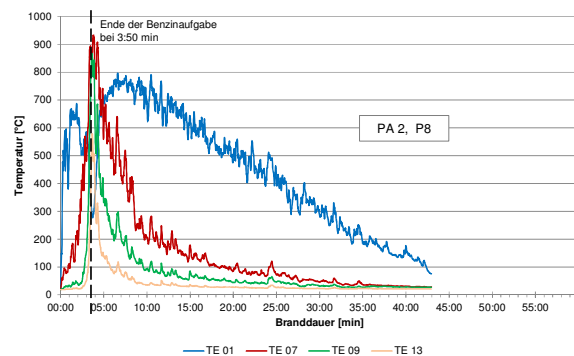


Bild 69: BV 2.2 - zeitlicher Temperaturverlauf über die Höhe

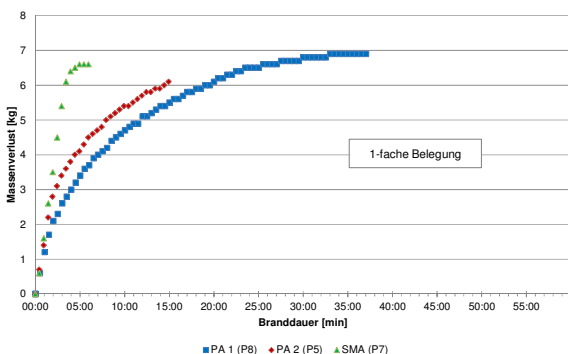


Bild 70: BV 1.1 – exemplarischer Massenverlust

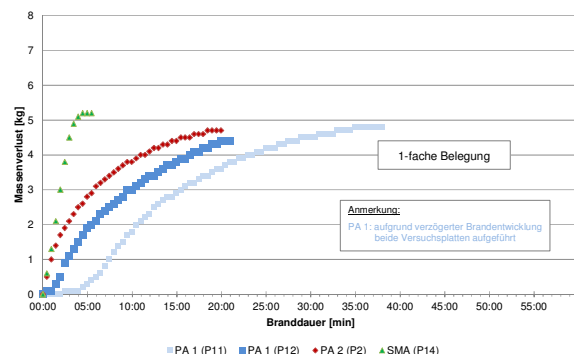


Bild 71: BV 1.2 - exemplarischer Massenverlust

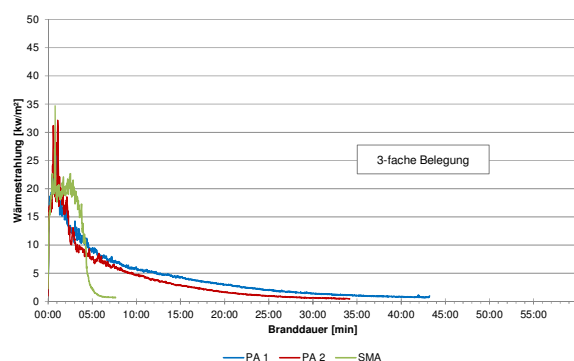


Bild 72: BV 1.1 – Wärmestrahlung

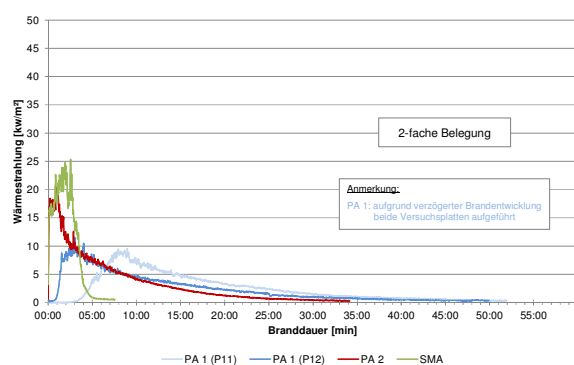


Bild 73: BV 1.2 – Wärmestrahlung



Bild 74: Manueller Aufbruch der Versuchsplatte nach Brandversuchsende (PA 2, P4)

Die Wärmestrahlungen der über- bzw. unterstauten Varianten verhalten sich proportional zu den erfassten Temperaturverläufen. Somit ist beim teilgesättigten PA 1 (BV 1.2) eine Verzögerung in der Energiefreisetzung zu erkennen. Der übersättigte PA 2 (BV 1.1) weist auch in der Wärmestrahlung ein starkes Wachstum zum Brandbeginn auf und verläuft im späteren Verlauf nahezu parallel zum PA 1.

Brandversuche BV 2.1 und BV 2.2

Die Energiefreisetzungen der Brandversuche BV 2.1 und BV 2.2 werden nicht weiter untersucht, da diese abhängig von der Kraftstoffzufuhr und der Größe der Brandlache sind.

4.3.4 Prüfkörper nach Versuchsdurchführung

Unmittelbar nach den durchgeführten Brandversuchen wiesen die Versuchsplatten keine feste Oberfläche mehr auf. Die enormen Temperaturen, die an der Oberfläche der Versuchsplatten auftraten, führten zum Verflüssigen des Bitumens, wodurch das starre Gefüge des Asphaltgesamtkörpers geschwächt wurde. Die Aufweichung des Probekörpers führte dazu, dass die Oberfläche „von Hand“ verformt bzw. beschädigt werden konnte (vgl. Bild 74).

Optisch waren an der Oberfläche nach den Brandversuchen keine signifikanten Unterschiede zu verzeichnen. Lediglich die Versuche mit kontinuierlicher Kraftstoffbelegung (BV 2.1 und BV 2.2) wiesen eine leichte Verfärbung bzw. Beschädigung um den Aufgabepunkt herum auf.

Dem Anhang können exemplarisch je Brandversuche und Asphaltvariante eine Aufnahme des Asphalt nach Versuchsdurchführung entnommen werden.

5 CFD Berechnung

5.1 Validierung anhand des Ableit- und Durchflussverhaltens

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind zu den Versuchen korrespondierende CFD-Simulationen durchgeführt worden. Dabei wurden die selben Parameter verwendet, die den Versuchen zugrunde lagen.

Die Simulationen der Ableit- und Durchflussversuche wurden über einen Zeitraum von 10 Minuten durchgeführt, wobei über die ersten 5 Minuten eine konstante Beaufschlagung mit insgesamt 10 Litern Benzin erfolgte. Danach wurde der Benzinzufluss gestoppt, ein Abfließen des auf der Platte befindlichen Benzins jedoch weiter gewährleistet. Als Benzin wurde C_8H_{18} mit den zugehörigen Stoffeigenschaften angesetzt.

Die Auswertung der Simulationen erfolgte analog zu den Versuchen. Dazu wurden die Austrittsflächen an den Rändern der vier Seiten in jeweils 16 gleiche Teile unterteilt. Über alle simulierten Zeitschritte wurde das abgeflossene Benzin über die 64 Auswerteflächen aufsummiert und in Diagrammen den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. In diesen sind die Versuchsergebnisse der Ableit- und Durchflussversuche, anders als in Kapitel 4.2.3, als Mittelwerte mit jeweiligen Standardabweichungen der 3- bzw. 4-fachen Belegung dargestellt. Die in den Diagrammen dargestellten Volumina der Versuche wurden aus der über das Flüssigkeitsgewicht gewichteten mittleren Dichte der Proben mit mehr als 100 ml aufgefangener Menge und dem Gewicht dieser Flüssigkeiten berechnet (vgl. Kapitel 4.2.5).

Es wurden die Ableit- und Durchflussversuche auf

SMA und PA abgebildet. Die Plattenneigung wurden dabei wie bei den Realversuchen einmal mit 2,5 % und einmal mit 6 % angenommen. Bild 75 zeigt beispielhaft das simulierte Abflussverhalten bei unterschiedlichen Neigungen auf einem SMA.

5.1.1 Validierung hinsichtlich des Ableitverhaltens bei SMA

In Bild 76 sind die Ergebnisse aus den Ableit- und Durchflussversuchen den Ergebnissen aus den CFD-Simulationen für eine SMA-Platte mit einer Neigung von 2,5 % vergleichend gegenübergestellt. Im Versuch wurden insgesamt 7,824 Liter gemessen und in der CFD-Simulation wurden 10,022 Liter ermittelt. Damit erklärt sich, dass die Säulen der CFD-Simulation länger sind als die der Versuche. Die CFD-Simulation liefert ausschließlich Ergebnisse in den Auswerteflächen 1 bis 16, das Benzin ist im Vergleich zum Versuch, bei dem es einen leichten seitlichen Ausfluss gab, nicht zu den Seiten hin ausgeflossen. Ein weiterer Unterschied ist die Form der ausgebildeten Parabel. Die Simulationsergebnisse sind symmetrischer und weiter gestaucht.

Bild 77 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Ableit- und Durchflussversuchen und den CFD-Simulationen für eine SMA-Platte mit einer Neigung von 6 %. Im Versuch wurden insgesamt 8,677 Liter Benzin gemessen und in der CFD-Simulation wurden 9,78 Liter ermittelt. Die Form der Parabel, die sich aus den Säulen bildet, ist auch in diesem Fall bei der CFD-Simulation stärker gestaucht als bei den Messergebnissen und die Säulen der CFD-Simulation sind aus dem zuvor genannten Grund auch länger als in den Versuchen. Die Ergebnisse der CFD-Simulation sind erwartungsgemäß symmetrisch.

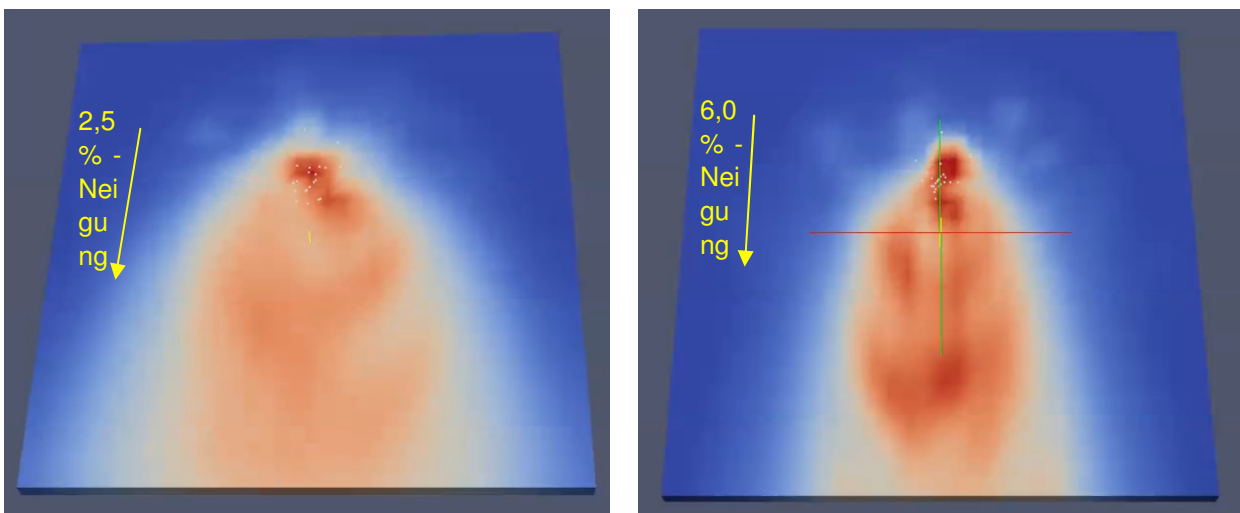


Bild 75: SMA-Simulationsbeispiele zum Abflussverhalten bei unterschiedlichen Längsneigungen

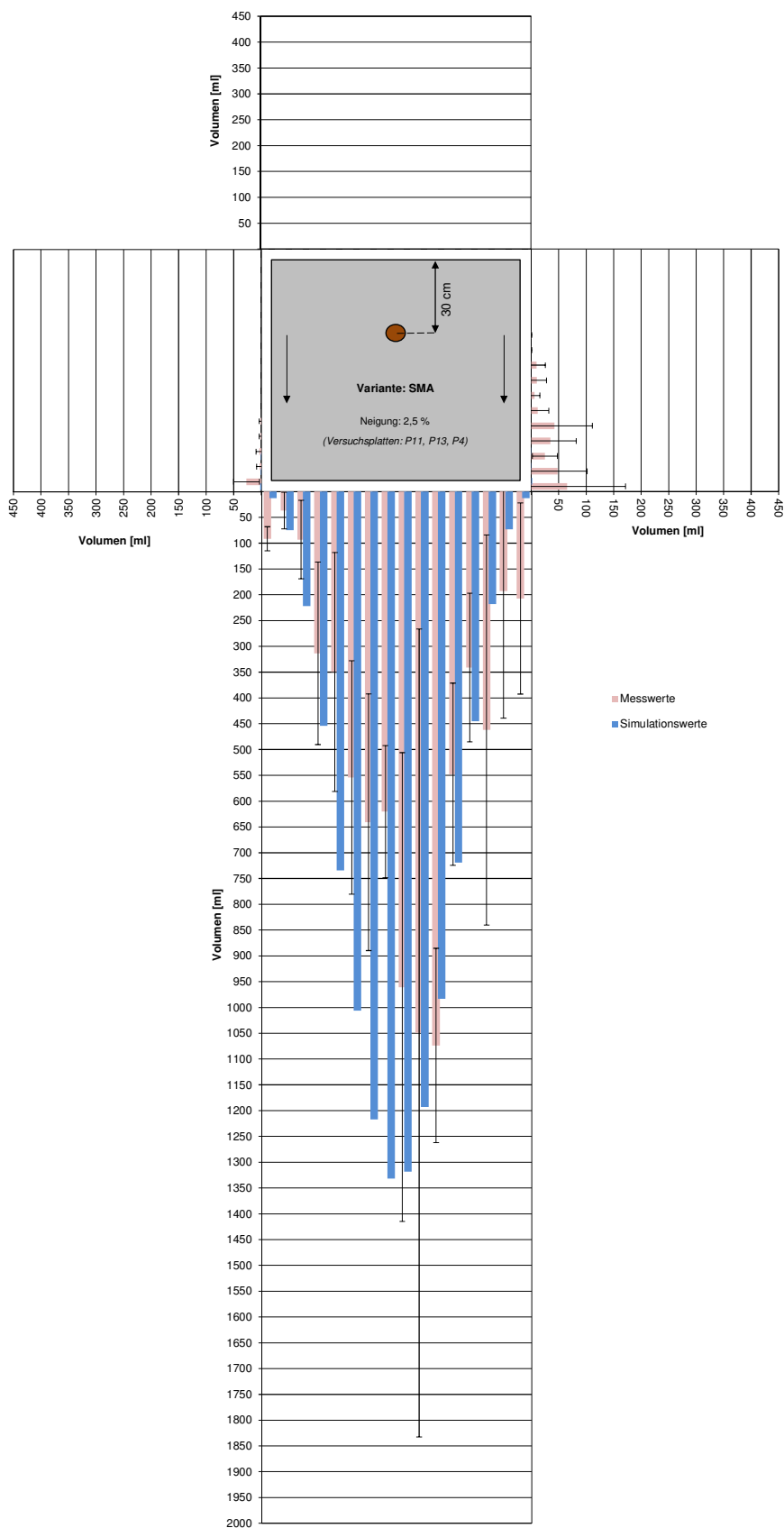


Bild 76: Vergleichende Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationswerte für eine SMA-Platte mit 2,5% Neigung

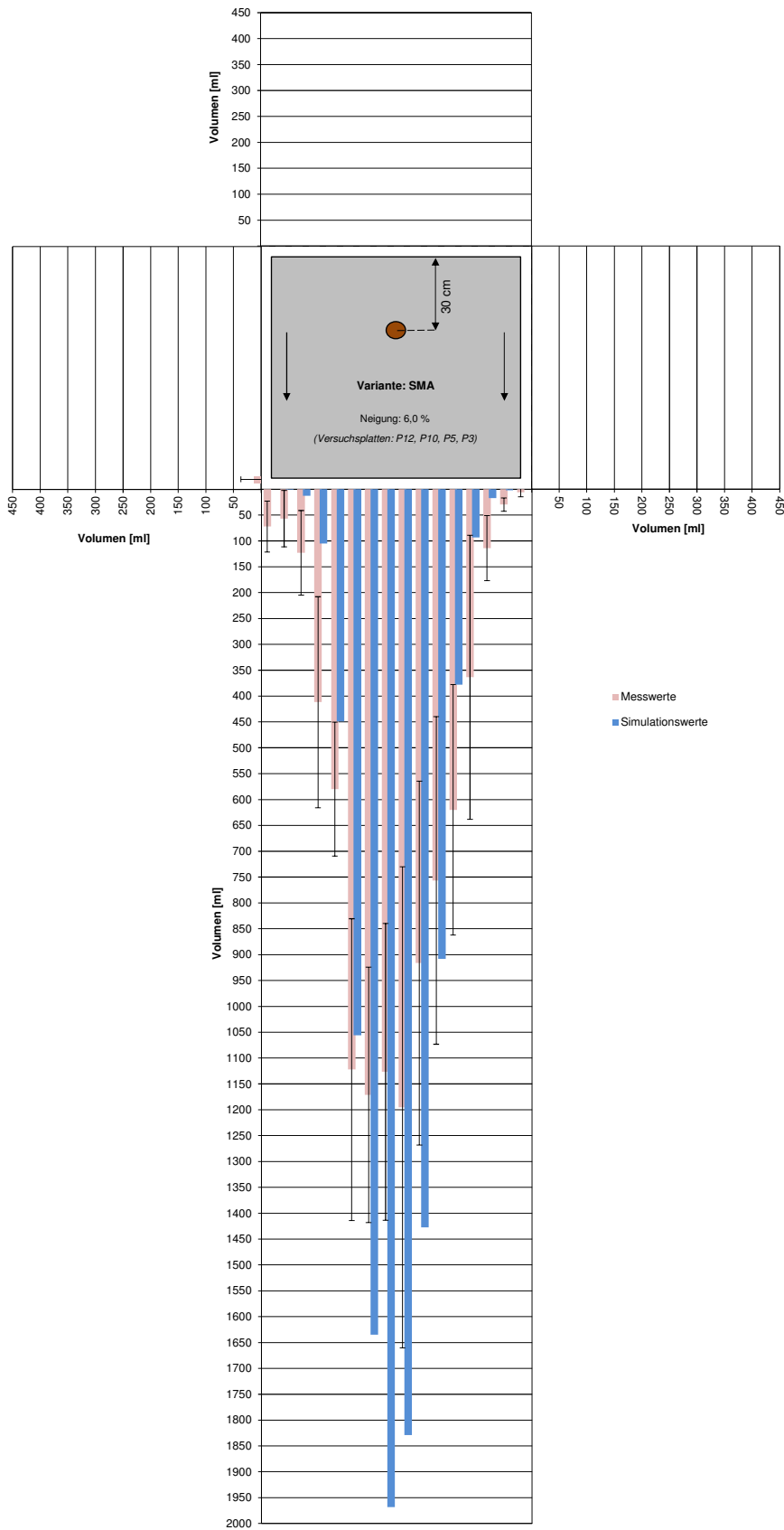


Bild 77: Vergleichende Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationswerte für eine SMA-Platte mit 6,0 % Neigung

Trotz der aufgeführten Differenzen kann jedoch gesagt werden, dass die Modellbildung erfolgreich war und für die weiteren Berechnungen eine ausreichend genaue Grundlage bildet.

5.1.2 Validierung hinsichtlich des Ableit- und Durchflussverhaltens von PA

Die Porosität kann in OpenFOAM lediglich über das Reziproke der Permeabilität abgebildet werden. Der Hohlraumgehalt kann nicht direkt abgebildet werden. Es kann nur eine Permeabilität eingestellt werden, die einem gewissen Hohlraumgehalt entspricht. Eine mathematische Überführung des Hohlraumgehaltes in die Permeabilität ist nicht möglich. Um die Permeabilität im Modell einzustellen wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

Aufgrund der Komplexität des Modells gibt es für jedes Medium nur ein schmales Band in dem die Simulationen sowohl die Kriterien der Stabilität als auch der sinnigen physikalischen Abbildung erfüllen. Eine Simulation gilt als numerisch stabil, wenn vor allem bei transienten Berechnungen kein Aufschaukeln einzelner Parameter auftritt. Dieses Aufschaukeln führt dann dazu, dass das Modell zu sehr schwingt und somit abstürzt. Es kann also festgehalten werden, dass das alleinige Durchlaufen der Simulation bis zur Endzeit nicht als Kriterium ausreicht. Kommt es zu einem Aufschaukeln eines Parameters, der nicht zum Absturz führt, so hat dies zur Folge, dass das Modell die Realität nicht mehr hinreichend abbilden kann. Dies wird überprüft, indem die Läufe im Postprocessing ausgewertet werden. Für Wasser wird eine andere stabile Einstellung als für Benzin ermittelt. Für Wasser liegt die stabile Einstellung für die Permeabilität um den Faktor 100 höher als für Benzin. Die Untersuchungen haben ergeben, dass für die zu betrachtenden Hohlraumgehalte die Permeabilitäten zwischen $6 \cdot 10^{-13}$ und $2 \cdot 10^{-14}$ variiert werden mussten.

Bild 78 zeigt beispielhaft das simulierte Abflussverhalten infolge unterschiedlicher Längsneigungen für eine PA-Schicht.

Bild 79 zeigt eine Gegenüberstellung der Versuchs- und der CFD-Simulationsergebnisse des Ableit- und Durchflussverhaltens einer PA-Platte (PA 1) mit einer Neigung von 2,5 %. Die gemessene Benzinmenge beträgt 7,164 Liter und die ausgewerte Benzinmenge aus der CFD-Simulation beträgt 9,31 Liter. Diese Diskrepanz erklärt, dass bei der Simulation ungefähr die doppelte Menge Benzin nach unten abgeflossen ist. Zur linken Seite hin ist in etwa die gleiche Benzinmenge abgeflossen. Zur rechten Seite hin ist dies nicht der Fall und die CFD-Simulationsergebnisse sind nicht symmetrisch. Es ist eine Lücke erkennbar, da drei Säulen in der CFD-Simulation nicht mit Benzin gefüllt sind. Nach oben hin ist bei der CFD-Simulation weniger als die Hälfte im Vergleich zum Versuch nach oben abgeflossen.

Im Bild 80 sind die Ergebnisse aus den Ableit- und Durchflussversuchen den Ergebnissen sowie den CFD-Simulationen für eine PA-Platte mit einer Neigung von 6 % vergleichend gegenübergestellt. Im Versuch wurden insgesamt 6,983 Liter gemessen und in der CFD-Simulation wurden 9,699 Liter ausgewertet. Nach unten hin ist mehr Benzin in der CFD-Simulation abgeflossen. Die Formen dieser Parabeln der Säulen sind nahezu identisch. Bei der CFD-Simulation sind die Säulen nach unten hin jedoch länger, was aus der höheren Benzinmenge folgt. Zur rechten Seite hin ist nahezu gleich viel wie im Versuchsfall abgeflossen. Zur linken Seite hin ist gegenüber dem Versuchsfall geringfügig mehr abgeflossen. Nach oben hin zeigt sich in der Simulation im Vergleich zum Versuch kein Austritt von Benzin.

Insgesamt kann gesagt werden, dass trotz der einzelnen Differenzen die Abbildung erfolgreich war.

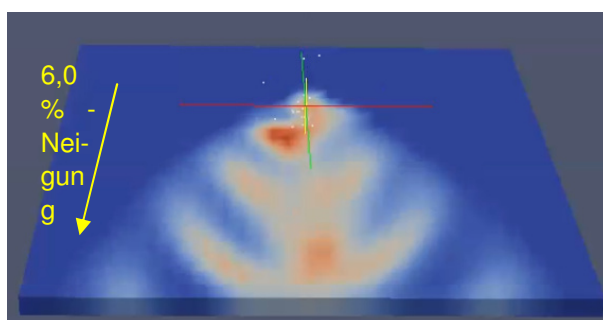
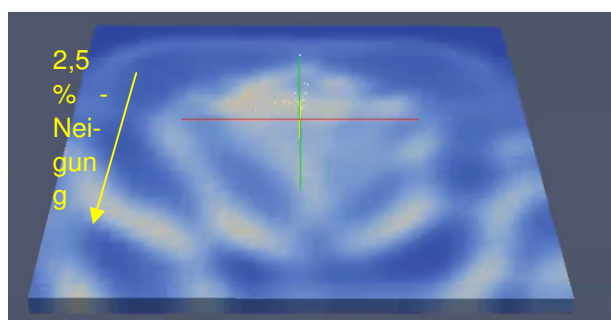


Bild 78: PA-Simulationsbeispiele zum Abflussverhalten bei unterschiedlichen Längsneigungen

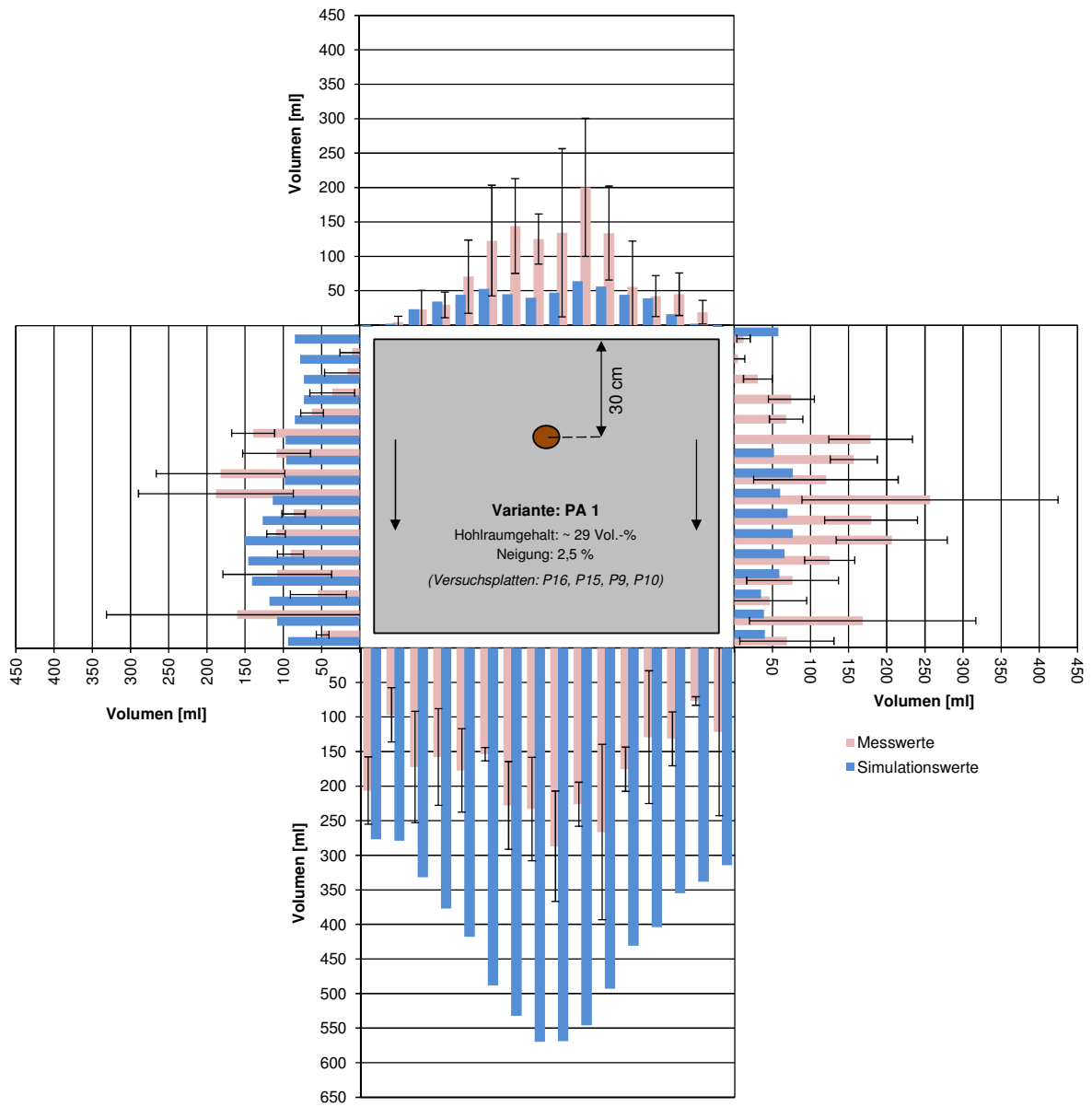


Bild 79: Vergleichende Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationswerte für eine PA-Platte mit 2,5% Neigung

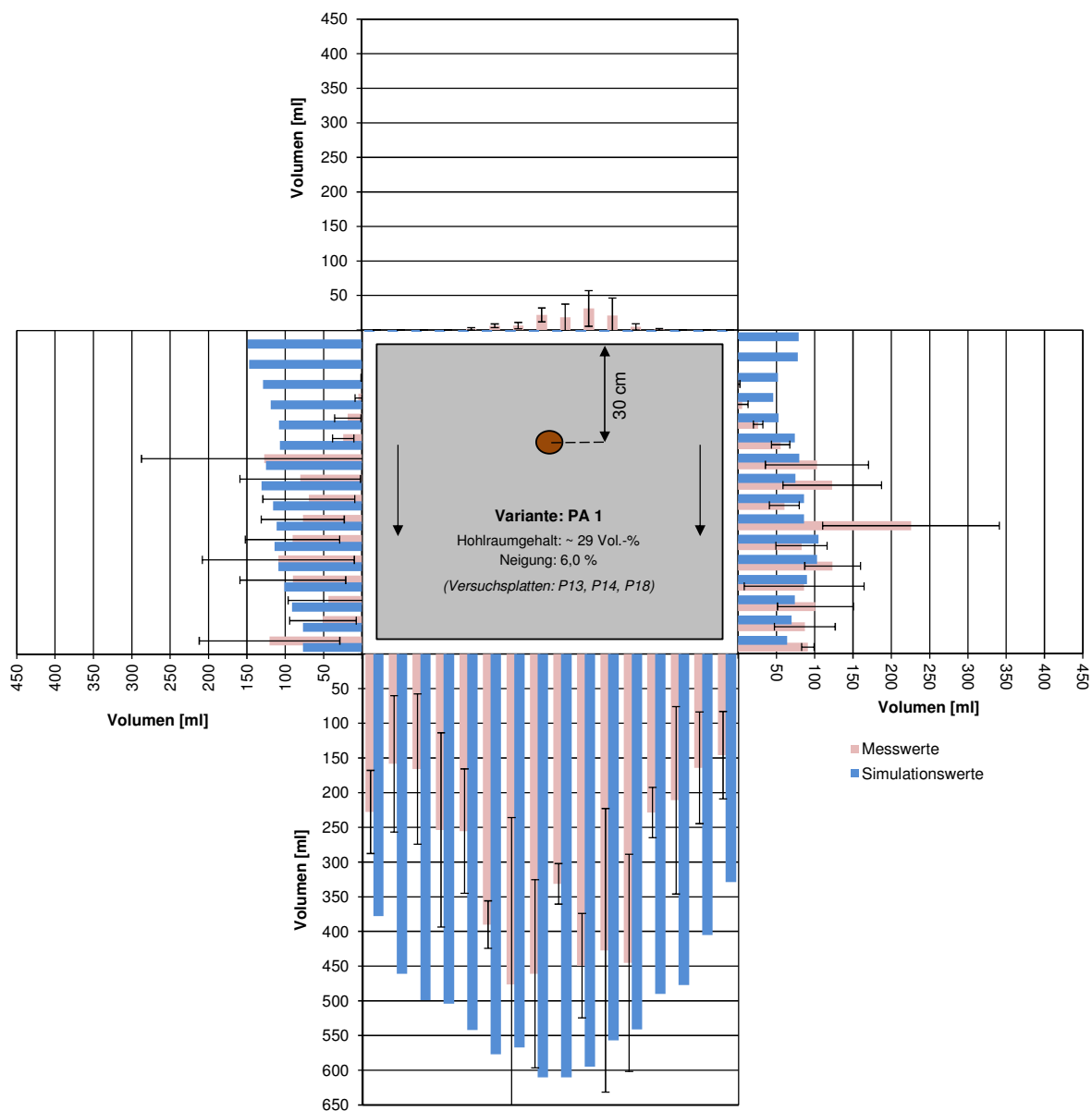


Bild 80: Vergleichende Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationswerte für eine PA-Platte mit 6% Neigung

5.2 Validierung des CFD-Modells anhand der Brandversuche

Bild 81 Der mit dem Dünnschichtmodell simulierte Brand auf einem SMA-Belag ist beispielhaft in Bild 81 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass das entwickelte Modell grundsätzlich die Berechnung der Ausbreitung und das Abbrennen von Benzinflächen ermöglicht. Da die CFD-Berechnungen zu den Brandversuchen jedoch numerische Instabilitäten aufwiesen, konnte keine abschließende Validierung der Rechenergebnisse durchgeführt werden. Für die weiteren Bearbeitungsschritte wurde daher zur Abschätzung der Brandleistung in offenporigen Asphalten ein alternativer Ansatz erforderlich.

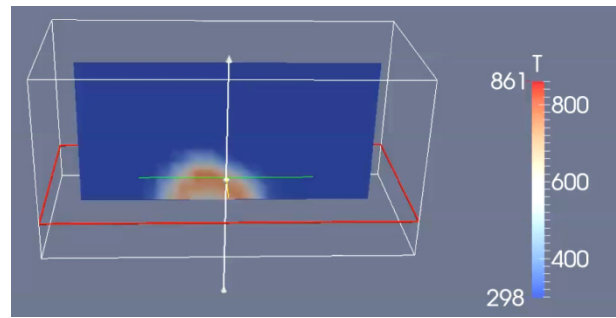


Bild 81: Beispiel einer mit dem Dünnschichtmodell durchgeführten Brandsimulation

5.3 Modell zur Abbildung der Brandleistung bei PA

Die Brandversuche auf PA haben gezeigt, dass sich Flammen lediglich an den Stellen bilden, an denen das Benzin nahe der Oberfläche anzutreffen ist. Solange das Benzin innerhalb der PA-Schicht abfließen kann, tritt es oberflächennah lediglich am Ort der Beaufschlagung auf. Die Größe der sich am Beaufschlagungsort ausbildenden Fläche ist abhängig von der Freisetzungsrate (Beaufschlagungsrate) sowie dem Ableiten des Benzins innerhalb der PA-Schicht. Über diese brandwirksame Fläche lässt sich auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Brandversuchen sowie den numerischen Berechnungen zum Durchflussverhalten die resultierende Brandleistung ermitteln. Zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf bisherige Risikoanalysen ist die Freisetzungsrate zunächst für fest vorgegebene Brandleistungen zu ermitteln, bevor darüber die brandwirksame Fläche und die daraus resultierende Brandleistung bestimmt werden können. In Bild 82 ist die Ausbildung der brandwirksamen Fläche schematisch dargestellt.

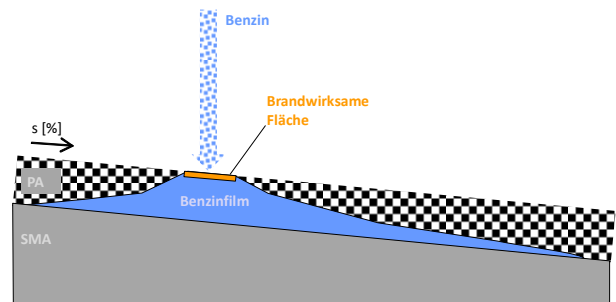


Bild 82: Brandwirksame Fläche

rend auf der in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Gleichung zur Ermittlung der Brandleistung

$$\dot{Q} = A_F \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad (18)$$

sowie zur Bestimmung des stationären Durchmessers

$$D_{eq} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}_L}{\pi \cdot \dot{y}}} \quad (19)$$

erhält man mit nachfolgendem Ansatz für die Brandfläche

$$A_F = \pi \cdot \frac{D_{eq}^2}{4} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c} \quad (20)$$

schließlich die Freisetzungsrate in Abhängigkeit der Brandleistung zu:

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c} \cdot \dot{y} \quad (21)$$

5.3.1 Ermittlung der Freisetzungsrate als Funktion der Brandleistung

Grundlage bisheriger Risikoanalysen sind Brand-szenarien mit Energiefreisetzen von 5, 30, 50 und 100 MW. Diese repräsentieren brandgutunabhängig die Energiefreisetzung typischer Pkw- und Lkw-Brände. Zur Abbildung entsprechender Brandleistungen infolge von Benzinfreisetzen wird daher ein funktionaler Zusammenhang zur Beschreibung der jeweiligen Freisetzungsrate in Abhängigkeit der Brandleistung erforderlich. Basie-

Die hiermit für unterschiedliche Brandleistungen berechneten Freisetzungsraten sind in **Tab. 10** zusammengefasst. Daraus ist zu entnehmen, dass mit einer Freisetzungsrate von ca. 2 l/min, wie sie zur Durchführung der Brandversuche verwendet wurde, eine Brandleistung von ca. 0,7 MW erzielt wird. Für Brandleistungen zwischen 5 MW und 100 MW variieren die erforderlichen Freisetzungsraten zwischen 14 l/min und 285 l/min.

5.3.2 Bestimmung der Brandleistung in Abhängigkeit der brandwirksamen Fläche

Auf Grundlage der in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Gleichungen erhält man infolge der brandwirksamen Fläche $A_{F,bw}$ folgenden Zusammenhang für die Brandleistung:

$$\dot{Q}_{red} = A_{F,bw} \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad (22)$$

Die Größe der brandwirksamen Fläche kann dann über die Ergebnisse aus den CFD-Berechnungen zu den Durchflussversuchen in offenporigen Asphalten abgeschätzt werden. Durch Bilanzierung der zu- und abfließenden Volumenströme an einem Volumenelement ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{V}_{zu} = \sum_{n=1}^4 \dot{V}_{ab,i} \quad (23)$$

Mit: \dot{V}_{zu} : zuströmendes Fluid (Freisetzungsrate)

$\dot{V}_{ab,i}$: über die Seitenflächen abströmendes Fluid

Bild 83 veranschaulicht schematisch die am Volumenelement der brandwirksamen Fläche auftretenden zu- und abfließenden Volumenströme.

Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung lassen sich die abfließenden Volumenströme in Abhängigkeit der durchströmten Seitenflächen $A_{ab,i}$

und der Durchströmgeschwindigkeit $u_{ab,i}$ beschreiben.

$$\dot{V}_{ab,i} = A_{ab,i} \cdot u_{ab,i} \quad (24)$$

Mit: $A_{ab,i}$: Seitenflächen des Volumenelements
 $u_{ab,i}$: Geschwindigkeit des Fluids in der durchströmten Fläche

Durch Umformen erhält man dann für die einzelnen Flächen:

$$A_{ab,i} = \frac{\dot{V}_{ab,i}}{u_{ab,i}} \quad (25)$$

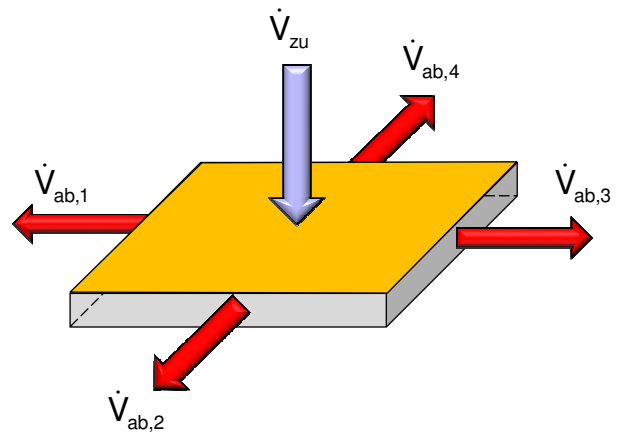


Bild 83: Am Volumenelement der brandwirksamen Fläche zu- und abfließende Volumenströme

Brandleistung	\dot{Q}	[MW]	0,7	5	30	50	100
Flächenbezogene Brandrate für Benzin	\dot{m}''	[kg/(m ² *s)]	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
Umsetzungsgrad	χ	[-]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Heizwert	ΔH_c	[MJ/kg]	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7
Dichte Benzin	ρ	[kg/m ³]	720	720	720	720	720
Vertikale Abbrandrate	\dot{y}	[m/s]	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008
Freisetzungsrate	\dot{V}_L	[m ³ /s]	0,000033	0,000238	0,001426	0,002377	0,004755
	\dot{V}_L	[l/s]	0,033	0,238	1,426	2,377	4,755
	\dot{V}_L	[l/min]	1,997	14,265	85,589	142,649	285,298
	\dot{m}	[kg/s]	0,024	0,171	1,027	1,712	3,424
Brandfläche	A_F	[m ²]	0,416	2,972	17,831	29,719	59,437
Stationärer Lachendurchmesser	D_{eq}	[m]	0,728	1,945	4,765	6,151	8,699

Tab. 10: Freisetzungsraten für unterschiedliche Brandleistungen

bzw. als gesamt durchströmte Fläche:

$$A_{ab} = \sum_{n=1}^4 A_{ab,i} = \sum_{n=1}^4 \frac{\dot{V}_{ab,i}}{u_{ab,i}} \quad (26)$$

In der Ebene gilt dann für die durchströmte Gesamtfläche:

$$A_{ab} = \frac{\dot{V}_{zu}}{u_F} \quad (27)$$

Mit: \dot{V}_{zu} : Zuströmendes Fluid (Freisetzungsrate)
 u_F : Geschwindigkeit des Fluids in der durchströmten Fläche

Bei bekannter Schichtdicke δ_F lässt sich der Umfang der brandwirksamen Fläche wie folgt beschreiben:

$$U = \frac{A_{ab}}{\delta_F} = \pi \cdot D = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (28)$$

Mit: A_{ab} : Seitlich durchströmte Gesamtfläche
 δ_F : Schichtdicke
 D : Durchmesser
 r : Radius

Über den Umfang kann schließlich die brandwirksame Fläche $A_{F,bw}$ wie folgt ermittelt werden:

$$A_{F,bw} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (29)$$

$$= \pi \cdot \frac{\left(\frac{A_{ab}}{\delta_F \cdot \pi}\right)^2}{4} = \pi \cdot \frac{\left(\frac{\dot{V}_{zu}}{u_F \cdot \delta_F \cdot \pi}\right)^2}{4}$$

Daraus wird ersichtlich, dass die brandwirksame Fläche lediglich von der Freisetzungsrate des zuströmenden Fluids, der Schichtdicke des Fluids im Bereich der brandwirksamen Fläche sowie von der Abfließgeschwindigkeit (Durchströmgeschwindigkeit) abhängig ist. Im Rahmen der Brandversuche wurde festgestellt, dass sich Flammen nur dann bilden, wenn das Benzin bis an die Oberfläche des PA heranreicht. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass es zur Flambildung kommt, wenn in einer 5 cm dicken PA-Schicht das Benzin einen Füllstand bzw. eine Schichtdicke δ_F von 4 cm erreicht hat.

Die Abfließgeschwindigkeit (Durchströmgeschwindigkeit) von Benzin in einer offenporigen Asphalt-

schicht lässt sich über die durchgeführten CFD-Berechnungen bestimmen. Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Bild 84 für eine PA-Schicht mit einer Längsneigung von 2,5 % und in Bild 85 für eine PA-Schicht mit einer Längsneigung von 6,0 % exemplarisch dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die Werte starken Oszillationen unterliegen können. Grund hierfür ist das schwallartige, unregelmäßige Ausfließen aus der PA-Schicht. Als mittlere Geschwindigkeitswerte wurden bei 2,5 % Längsneigung 0,02 m/s und bei 6,0 % Längsneigung 0,08 m/s ermittelt.

Im Folgenden wird von einer Durchströmgeschwindigkeit von 0,02 m/s ausgegangen, da dies auf der sicheren Seite liegend den ungünstigeren Fall für die Größenermittlung der brandwirksamen Fläche und der daraus resultierenden Brandleistung darstellt. In Tab. 11 sind die Eingangsgrößen und Rechenergebnisse zusammenfassend dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass bei gleicher Freisetzungsrate (Beaufschlagung) durch die Verwendung einer PA-Deckschicht im Vergleich zu einer SMA-Schicht eine signifikante Reduktion in der Brandleistung erzielt wird. So reduziert sich beispielsweise ein 100 MW-Brand durch den Einsatz eines PA auf einen 5 MW-Brand. Die daraus resultierenden Effekte im Hinblick auf das Sicherheitsniveau in Straßentunneln bei Verwendung von offenporigen Asphalten werden in den anschließenden Wirkungsanalysen risikoanalytisch untersucht und bewertet.

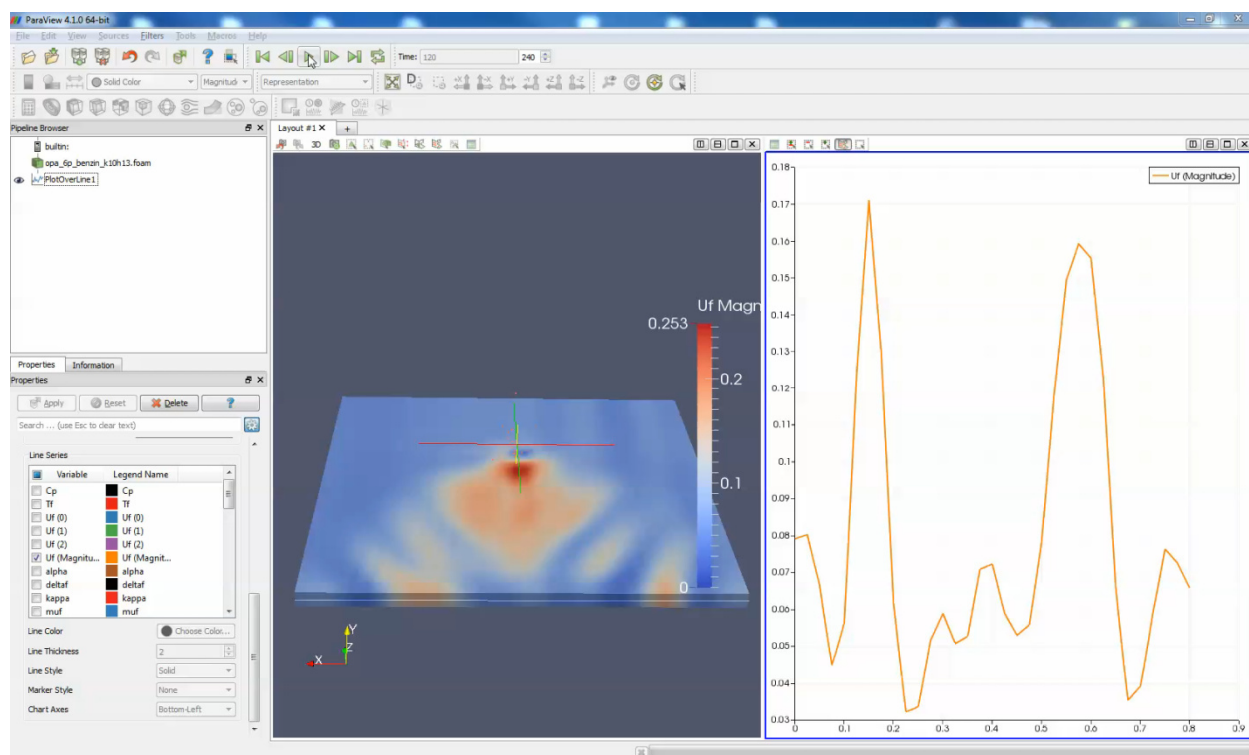


Bild 84: Durchströmgeschwindigkeit u_f innerhalb einer PA-Schicht bei einer Längsneigung von 2,5%

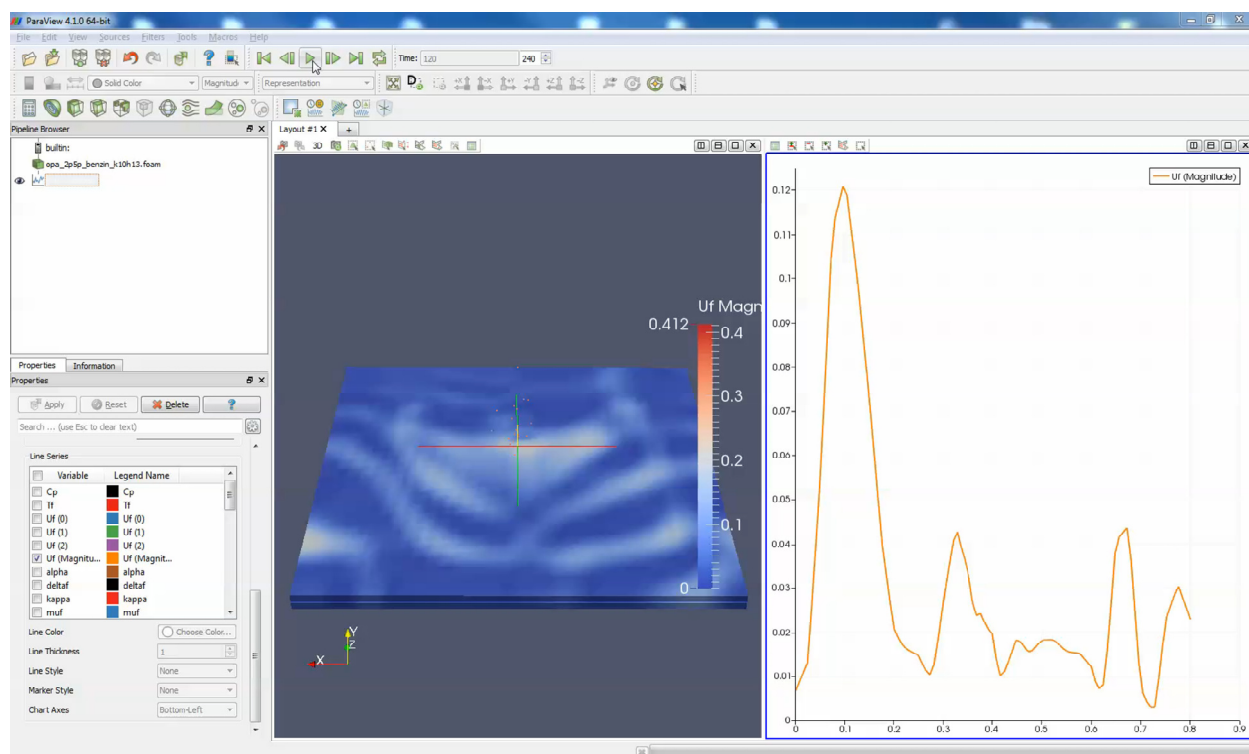


Bild 85: Durchströmgeschwindigkeit u_f innerhalb einer PA-Schicht bei einer Längsneigung von 6,0%

Nominelle Brandleistung	\dot{Q}	[MW]	0,7	5	30	50	100
Abfluss	$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_L$	[m ³ /s]	0,000033	0,000238	0,001426	0,002377	0,004755
Durchströmgeschwindigkeit	$u_{ab} = u_F$	[m/s]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Umfangfläche	$A_u = \frac{Q_{ab}}{u_{ab}}$	[m ²]	0,001664	0,011887	0,071325	0,118874	0,237749
Schichtdicke	δ_F	[m]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Umfang	U	[m]	0,041606	0,297186	1,783114	2,971857	5,943713
Durchmesser	D	[m]	0,013244	0,094597	0,567583	0,945971	1,891943
Radius	r	[m]	0,006622	0,047299	0,283791	0,472986	0,945971
Brandwirksame Fläche	$A_{F,bw} = \pi \cdot r$	[m ²]	0,000138	0,007028	0,253016	0,702823	2,811291
Resultierende Brandleistung	\dot{Q}_{red}	[MW]	0,000232	0,011825	0,425687	1,182464	4,729857
		[KW]	0,232	11,825	425,687	1.182,464	4.729,857
		[W]	232	11.825	425.687	1.182.464	4.729.857

Tab. 11: Ermittlung der reduzierten Brandleistung

6 Wirkungsanalyse mit Modell aus FE 15.492/2010/FRB

Grundlage für die risikoanalytischen Untersuchungen zum Sicherheitsniveau bildet der Forschungsauftrag FE 15.492/2010/FRB (Risikoanalytische Untersuchungen zum Sicherheitsniveau offener Einhausungen) [BAST 2010]. Dort sind die angesetzten Tunnelcharakteristika detailliert beschrieben. Nachfolgend werden die grundsätzlichen Randbedingungen und Szenarien übernommen um die Auswirkungen der unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen PA und SMA für die Grundbauwerkstypen Tunnel sowie Einhausungen mit seitlichen oder oben liegenden Öffnungen vergleichen zu können.

Das Vorgehen zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten sowie der zugehörigen Schadensausmaße ist [BAST 2009b] zu entnehmen.

6.1 Eingangsparemeter Bauwerke

Für sämtliche betrachteten Bauwerksvarianten sind die relevanten Parameter in den nachfolgenden Tabellen (Tab. 13 und Tab. 14) dargestellt.

Dabei basiert der Tunnel 2 auf dem Tunnel 1, jedoch wird zusätzlich zum Längslüftungssystem eine Rauchabsaugung angesetzt. Das Lüftungssystem ist analog auf eine Brandleistung von 30 MW dimensioniert.

Parameter	Einhausung Seitenöffnung, RV	Einhausung Seitenöffnung, GV	Einhausung Deckenöffnung, RV	Einhausung Deckenöffnung, GV
Abkürzung	RV-ESO	GV-ESO	RV-EDO	GV-EDO
Infrastruktur				
Bauwerkslänge	1.200 m	1.200 m	1.200 m	1.200 m
Verkehrsart	Richtungsverkehr (RV)	Gegenverkehr (GV)	Richtungsverkehr (RV)	Gegenverkehr (GV)
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung (Regelquerschnitt, Breite b_q)	2 (RQ 26t)	1 (RQ 10,5T)	2 (RQ 26t)	1 (RQ 10,5T)
Querschnittshöhe, h_q	5,5 m	5,5 m	5,5 m	5,5 m
Längsneigung	-3,0 %	+/-3,0 %	-3,0 %	+/-3,0 %
Lüftungssystem	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung
Notausgangabstand	300 m	300 m	300 m	300 m
Höhe des seitlichen Unterzugs in Längsrichtung (oben), h_o	1 m	1 m	-	-
Neigung der Decke, α	0 %	0 %	-	-
Ausgestaltung Deckenunter-sicht	Unterzüge quer zur Fahrbahn (Höhe 1 m)	Unterzüge quer zur Fahrbahn (Höhe 1 m)	-	-
Breite Deckenöffnung, b_d			2,5 m	2,5 m
Verkehr				
DTV pro Röhre	20.000 Kfz/d	20.000 Kfz/d	20.000 Kfz/d	20.000 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	15 %	15 %	15 %	15 %
Ereignis				
Brandort	Mitte Bauwerk	Mitte Bauwerk	Mitte Bauwerk	Mitte Bauwerk
Brandleistung	5 / 30 / 100 MW	5 / 30 / 100 MW	5 / 30 / 100 MW	5 / 30 / 100 MW
Branddetektion	120 s	120 s	120 s	120 s

Tab. 12: Parameter Galeriebauwerk

Parameter	Tunnel Längslüftung, RV	Tunnel Längslüftung mit Rauchabsaugung, RV	Tunnel Längslüftung, GV	Tunnel Längslüftung mit Rauchabsaugung, GV
Abkürzung	RV-Tunnel 1	RV-Tunnel 2	GV-Tunnel 1	GV-Tunnel 2
Infrastruktur				
Tunnellänge	1.200 m	1.200 m	1.200 m	1.200 m
Verkehrsart	Richtungsverkehr (RV)	Richtungsverkehr (RV)	Gegenverkehr (GV)	Gegenverkehr (GV)
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung(Regelquerschnitt)	2 (RQ 26t)	2 (RQ 26t)	1 (RQ 10,5T)	1 (RQ 10,5T)
Querschnittshöhe	5,5 m	5,5 m	5,5 m	5,5 m
Längsneigung	-3,0 %	-3,0 %	+/-3,0 %	+/-3,0 %
Lüftungssystem	Längslüftung	Längslüftung mit Rauchabsaugung	Längslüftung	Längslüftung mit Rauchabsaugung
Notausgangabstand	300 m	300 m	300 m	300 m
Verkehr				
DTV pro Tunnelröhre	20.000 Kfz/d	20.000 Kfz/d	20.000 Kfz/d	20.000 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	15 %	15 %	15 %	15 %
Ereignis				
Brandort	Mitte Tunnel	Mitte Tunnel	Mitte Tunnel	Mitte Tunnel
Brandleistung	5 / 30 / 100 MW	5 / 30 / 100 MW	5 / 30 / 100 MW	5 / 30 / 100 MW
Branddetektion	60 s	60 s	60 s	60 s
Bemerkungen	--	Lüftungsausstattung für Tunnel mit erhöhter Stauneigung	--	--

Tab. 13: Parameter Tunnelbauwerk

6.2 Eingangsparameter Risikoanalyse

Grundlage für die nachfolgende Risikoanalyse bildet das Schadensereignis Brand.

6.2.1 Brandhäufigkeiten

Die Kollisionshäufigkeit kann nach [BAST 2009b] abgeschätzt werden. Dort wird abhängig vom Bauwerkstyp eine mittlere Unfallrate angegeben, über die die Brandhäufigkeiten ermittelt werden können. Für die nachfolgenden Berechnungen werden Einhausungen und Tunnel hinsichtlich der Eintrittshäufigkeiten gleichgesetzt. Für den Fall des Gegenverkehrsbetriebes ergeben sich dabei generell deutlich erhöhte Eintrittshäufigkeiten mit einem Faktor von etwa 3 (siehe Tab. 14).

Für die Bauwerke lassen sich somit unter Berücksichtigung eines DTV von 20.000 Fahrzeugen pro

Tag und Tunnelröhre und einer Bauwerkslänge von 1.200 m die in Tab. 15 ausgewiesenen Brandhäufigkeiten ableiten.

6.2.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf

Die nachfolgenden Verzweigungspunkte und ihre jeweiligen Wahrscheinlichkeiten werden berücksichtigt:

Verzweigung Brandtyp

Für die Risikoanalyse wird zwischen dem Brandtyp Feststoffbrand und Flüssigkeitsbrand unterschieden.

- Brandtyp Feststoffbrand: variabel
- Brandtyp Flüssigkeitsbrand: variabel

Bauwerkstyp	Unfallrate α
Richtungsverkehrstunnel	$2,28 * 10^{-7} [1/(Fzg*km)]$
Gegenverkehrstunnel	$6,81 * 10^{-7} [1/(Fzg*km)]$

Tab. 14: Unfallrate α zur Abschätzung der Kollisionshäufigkeit

Häufigkeit Brand	Gegenverkehr [pro Jahr u. Röhre]	Richtungsverkehr [pro Jahr u. Röhre]
Infolge Kollisionen	$1,8 * 10^{-2}$	$0,6 * 10^{-2}$
Infolge technischer Defekte	$2,6 * 10^{-2}$	$2,6 * 10^{-2}$
Summe	$4,4 * 10^{-2}$	$3,2 * 10^{-2}$

Tab. 15: Ermittelte Brandhäufigkeiten

Die jeweiligen Verhältnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln variiert, um die Auswirkungen darzustellen. Dabei ergeben sich bei einem Feststoffbrand keine Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen von SMA und PA. Beim PA ergeben sich für Flüssigkeitsbrände zusätzliche Auswirkungen auf das Brandverhalten und das damit in Verbindung stehende Risiko.

Verzweigung Brandleistung

Die Brandlast/Brandleistung bestimmt maßgeblich das resultierende Schadenausmaß. In der Regel steht dabei hinsichtlich der resultierenden Personenschäden – insbesondere in Tunneln – die Wirkung der entstehenden Rauchgase im Vordergrund.

Es werden drei Brandlasten unterschieden, für welche vereinfachend die folgenden Annahmen zur Verteilung zugrunde gelegt werden:

- Brandleistung von 5 MW: 90,00 %
- Brandleistung von 30 MW: 9,90 %
- Brandleistung von 100 MW: 0,10 %

Dabei repräsentieren 5 MW typische Pkw-Brände, wohingegen 30 MW und 100 MW bei Lkw-Bränden auftreten können. Die Werte werden für Feststoffbrände auf PA sowie Brände auf SMA allgemein zum Ansatz gebracht.

Im Kapitel 5.3.2 wurde festgestellt, dass für Flüssigkeitsbrände auf PA deutlich reduzierte brandwirksame Flächen zu berücksichtigen sind. Demnach reduzieren sich die Energiefreisetzungen.

Für Flüssigkeitsbrände auf offenporigem Asphalt wird folgender Ansatz verwendet:

- Brandleistung von 5 MW: 0,10%
- Brandleistung von 30 MW: 0,00%

- Brandleistung von 100 MW: 0,00%

Die Verteilung berücksichtigt, dass für Pkw-Brände und kleinere LKW-Brände mit typischerweise 30 MW Brandleistung die brandwirksamen Flächen so klein werden, dass es zu keiner signifikanten Brandentwicklung kommt. Vereinfachend werden die Energiefreisetzungen für 5 und 30 MW auf Null reduziert. Die Brandleistung von 100 MW auf SMA wird für Flüssigkeitsbrände auf 5 MW herabgesetzt (siehe Tab. 11).

Verzweigung Zeitpunkt Tag / Nacht

Die Unterscheidung hinsichtlich der Tageszeit hat primär Einfluss auf die Zahl der in einem Brandfall exponierten Verkehrsteilnehmer. Die Situation „Tag“ repräsentiert dabei den Anteil der Verkehrsstunden mit durchschnittlichem oder erhöhtem Verkehrsaufkommen, die Situation „Nacht“ diejenige mit unterdurchschnittlichem Verkehrsaufkommen. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- „Tag“ zw. 6:00 und 22:00 Uhr: 67 %
- „Nacht“ zw. 22:00 und 6:00 Uhr: 33 %

Verzweigung Verkehrszustand Frei / Stau

Der Verkehrszustand ist normalerweise stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Hinsichtlich des Einflusses auf das Sicherheitsniveau spielt er eine maßgebende Rolle in Bezug auf die Personenexposition zum Zeitpunkt eines möglichen Brands. Für die vorliegende Analyse wird folgende Annahme getroffen:

- Situation „Freier Verkehr“: 97 %
- Situation „Stau“: 3 %

Verzweigung Detektion innerhalb 60 Sek. erfolgreich ja / nein

Die RABT fordern die Erkennung eines Brandes innerhalb von 60 s. Dennoch sind auch Situationen zu berücksichtigen, in denen keine Detektion erfolgt (z. B. aufgrund von technischen Defekten). Für die vorliegende Analyse wird folgende Annahme getroffen:

- Detektion innerhalb von 60 s: 99 %
- Keine Detektion: 1 %

Verzweigung Tunnelsperrung ja / nein

Wird nach erfolgter Detektion eines Brandes der Tunnel geschlossen, wird die Zufahrt weiterer Verkehrsteilnehmer in den Gefahrenbereich verhindert. Dies wirkt sich günstig auf die Zahl der gefährdeten Personen aus.

In Ermangelung allgemein gültiger Werte wird in Anlehnung an die angesetzten Wahrscheinlichkeiten

ten für die Verzweigung Detektion von folgenden Werten ausgegangen:

- Schließung nach Detektion in 99 % der Fälle
- Keine Schließung nach Detektion in 1 % der Fälle

Verzweigung Lüftungssystem funktioniert ja / nein

Analog zu oben werden hier folgende Annahmen getroffen:

- Lüftungssystem ist in 99 % der Fälle funktionsfähig
- Lüftungssystem ist in 1 % der Fälle nicht funktionsfähig

6.3 Einsatz von SMA und PA in Tunnel- und Galeriebauwerken

In den vorangegangenen Kapiteln sind die Auswirkungen der beiden unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen beschrieben. Diese führen zu unterschiedlichen Brandrisiken für Tunnel- und Galeriebauwerke in Abhängigkeit vom Brandtyp. Hinsichtlich des Fahrbahnaufbaus bestehen zwischen SMA und PA deutliche Unterschiede. Durch den hohen Hohlraumgehalt im PA kann austretende Flüssigkeit innerhalb der Fahrbahndecke abtransportiert werden. Bei SMA geschieht dies immer auf der Fahrbahnoberfläche, so dass hier kein Einfluss auf die brandwirksame Fläche vorhanden ist.

6.3.1 Vergleich SMA und PA bei einem Anteil der Flüssigkeitsbrände von 100 %

Bei den Gesamtsummenkurven (Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen) ergeben sich bei ausschließlicher Betrachtung reiner Flüssigkeitsbrände auf SMA und auf PA deutliche Unterschiede hinsichtlich der zu erwartenden Risiken. Durch die Begrenzung auf maximale Brandlasten von 5 MW bei den Flüssigkeitsbränden beim PA kommt es zu einer deutlichen Reduktion der maximalen Schadensausmaße, wie aus nachfolgenden Bildern (Bild 86 und Bild 87) hervorgeht. Dies gilt im gleichen Maße für Richtungsverkehrstunnel wie für Gegenverkehrstunnel.

6.3.2 Vergleich SMA und PA bei einem Anteil der Flüssigkeitsbrände von 20 %

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellte Betrachtung von 100% Flüssigkeitsbränden zeigt deutlich das Risikoreduktionspotential eines PA auf. Allerdings führt die Annahme von reinen Flüssigkeitsbränden zu unrealistischen Verhältnissen. Typischerweise sind in Tunneln Feststoff-

brände, in denen das Fahrzeug selbst oder seine Ladung brennt, ohne dass entzündliche Flüssigkeiten in einer relevanten Menge austreten, deutlich seltener. Bild 88 und Bild 89 berücksichtigen daher nur einen Anteil von 20 % Flüssigkeitsbränden am Gesamtaufkommen.

Die Risikoreduktionen fallen dementsprechend auch deutlich geringer aus und liegen bei etwa 20 %.

6.4 Risikowerte

Die Tab. 16 sowie Tab. 17 listen die Risikowerte zusammenfassend auf. Mit zunehmendem Anteil von Flüssigkeitsbränden sinkt beim PA das Sicherheitsrisiko unabhängig von Tunneltyp und der Verkehrsart. Das Verhältnis von Flüssigkeitsbrandereignissen zu Feststoffbrandereignissen bestimmt maßgeblich das Risikoreduktionspotential; dabei entspricht der Anteil an Flüssigkeitsbränden etwa dem des damit realisierbaren Sicherheitsgewinns durch PA in Tunnelbauwerken. Das bedeutet z.B., dass bei der Annahme eines Anteils von 20% Flüssigkeitsbränden sich ein um 20% reduziertes Risiko ergibt.

Sowohl im Richtungs- als auch im Gegenverkehrsbetrieb tritt das geringste Risiko bei den Galeriebauwerken mit Deckenöffnung auf. Hier kann infolge des Brandes der entstehende Rauch nach oben abziehen, so dass nur in unmittelbarer Nähe zum Brandherd Gefährdungen für Personen auftreten können. Demgegenüber treten die größten Risiken bei Galeriebauwerken mit Seitenöffnungen auf. Dies ist hier vor allem mit der fehlenden sicherheitstechnischen Ausstattung im Verhältnis zu den Tunnelbauwerken begründet. Galeriebauwerke sind in aller Regel nicht mit einer Brandventilation ausgestattet. Ebenso fehlen wichtige Komponenten wie automatische Brandmeldeeinrichtungen oder Lautsprecher zur Alarmierung von Personen.

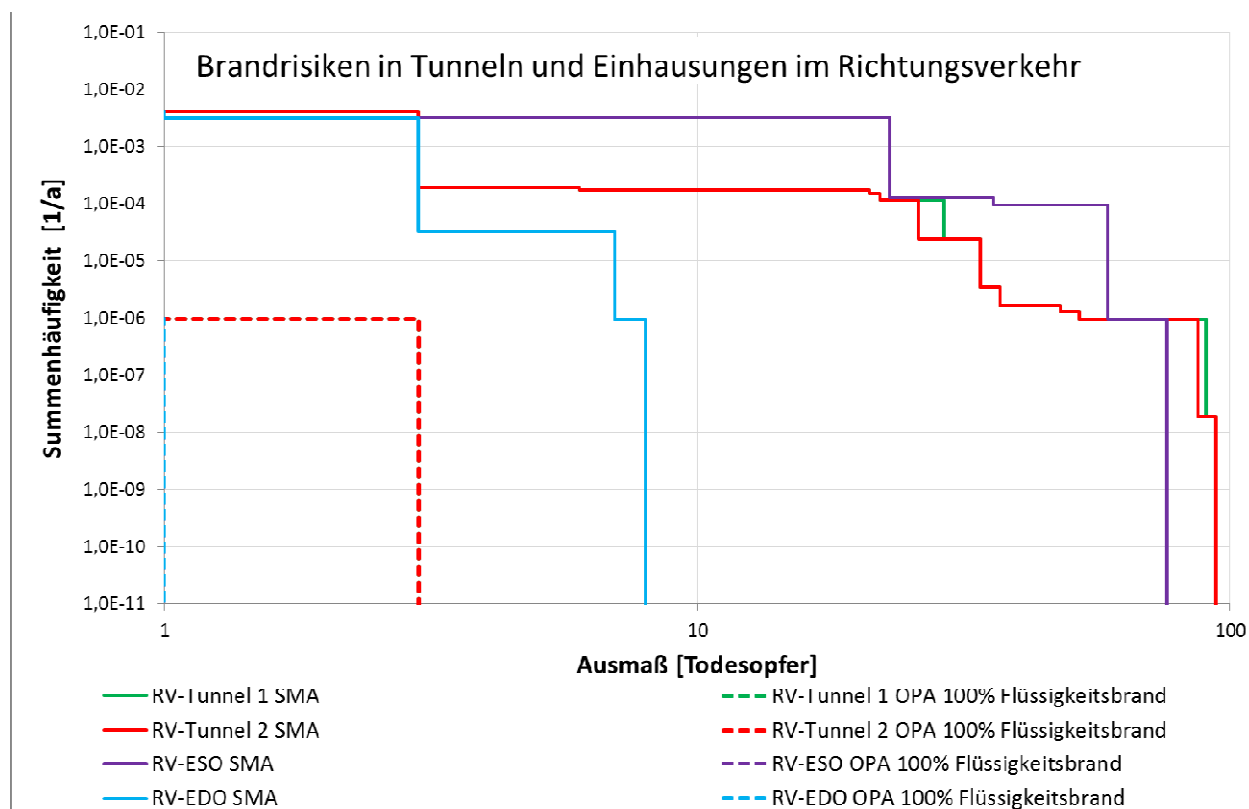


Bild 86: Gesamtsummenkurven Brandrisiko Richtungsverkehr (Anteil Flüssigkeitsbrände 100 %)

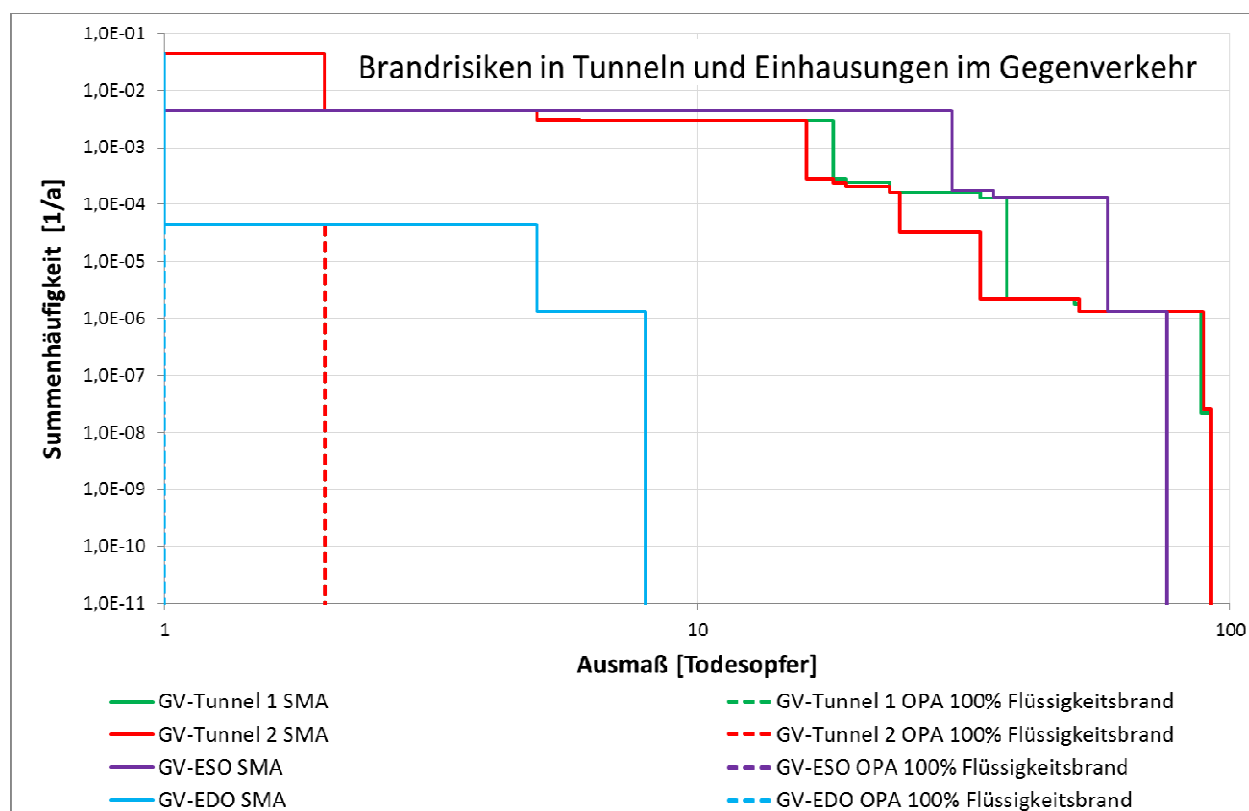


Bild 87: Gesamtsummenkurven Brandrisiko Gegenverkehr (Anteil Flüssigkeitsbrände 100 %)

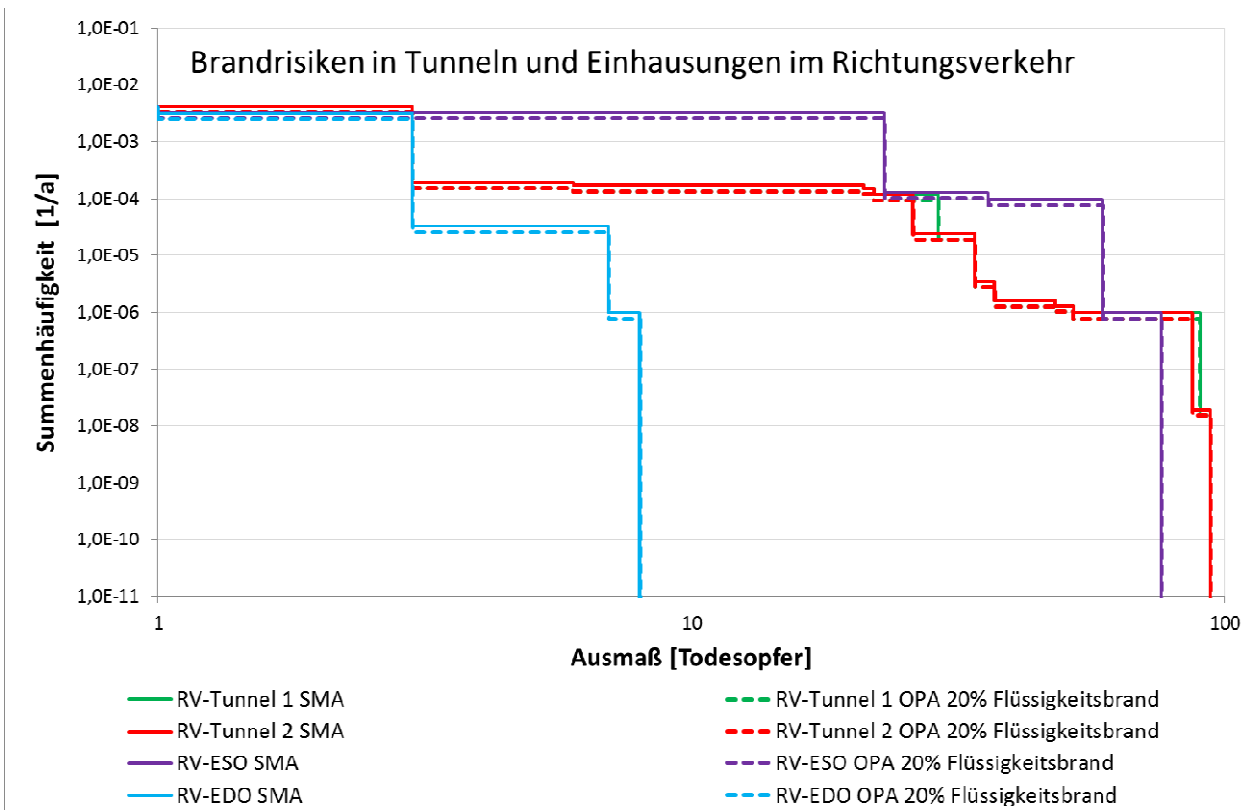


Bild 88: Gesamtsummenkurven Brandrisiko Richtungsverkehr (Anteil Flüssigkeitsbrände 20 %)

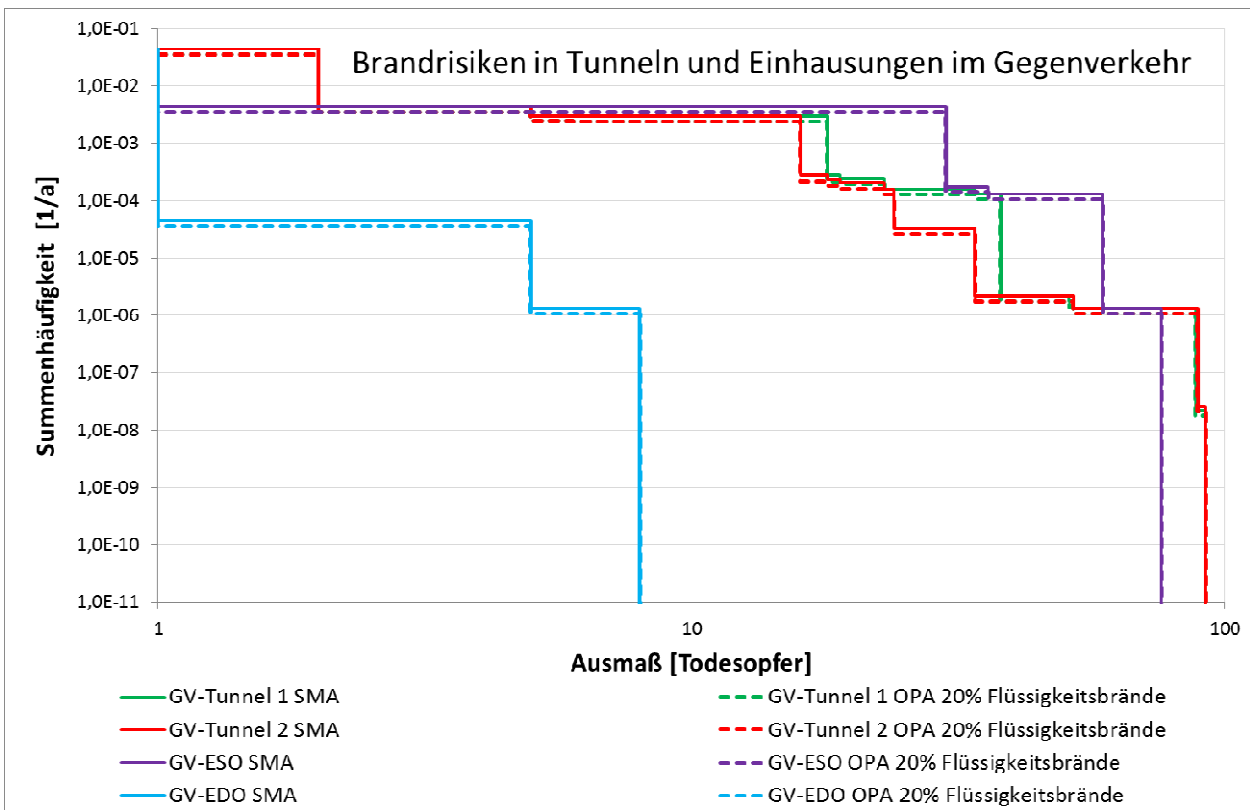


Bild 89: Gesamtsummenkurven Brandrisiko Gegenverkehr (Anteil Flüssigkeitsbrände 20 %)

Typ	Asphalt	Anteil Flüssigkeitsbrand	Anteil Feststoffbrand	Schadenserwartungswert	bewertetes Risiko	Risikoreduktion bei Flüssigkeitsbrand auf PA	
						Schadenserwartungswert [%]	bewertetes Risiko [%]
-	-	[%]	[%]	[Getötete/a]	[Getötete/a]	-	-
RV-Tunnel 1	SMA	-	-	1,66E-02	4,60E-02	-	-
	PA	20%	80%	1,33E-02	3,68E-02	-19,996%	-19,998%
		100%	0%	2,90E-06	5,03E-06	-99,982%	-99,989%
RV-Tunnel 2	SMA	-	-	1,63E-02	4,37E-02	-	-
	PA	20%	80%	1,30E-02	3,50E-02	-19,996%	-19,998%
		100%	0%	2,90E-06	5,03E-06	-99,982%	-99,988%
RV-EDO	SMA	-	-	1,05E-02	1,77E-02	-	-
	PA	20%	80%	8,39E-03	1,41E-02	-19,998%	-19,999%
		100%	0%	9,68E-07	9,68E-07	-99,991%	-99,995%
RV-ESO	SMA	-	-	7,90E-02	3,94E-01	-	-
	PA	20%	80%	6,32E-02	3,15E-01	-20,000%	-20,000%
		100%	0%	9,68E-07	9,68E-07	-99,999%	-100,000%

Tab. 16: Zusammenfassung Brandrisiken in Abhängigkeit des Brandtyps (Richtungsverkehr)

Typ	Asphalt	Anteil Flüssigkeitsbrand	Anteil Feststoffbrand	Schadenserwartungswert	bewertetes Risiko	Risikoreduktion bei Flüssigkeitsbrand auf PA	
						Schadenserwartungswert [%]	bewertetes Risiko [%]
-	-	[%]	[%]	[Getötete/a]	[Getötete/a]	-	-
GV-Tunnel 1	SMA	-	-	1,44E-01	3,87E-01	-	-
	PA	20%	80%	1,16E-01	3,10E-01	-19,988%	-19,994%
		100%	0%	8,84E-05	1,25E-04	-99,939%	-99,968%
GV-Tunnel 2	SMA	-	-	1,37E-01	3,37E-01	-	-
	PA	20%	80%	1,10E-01	2,69E-01	-19,987%	-19,993%
		100%	0%	8,84E-05	1,25E-04	-99,936%	-99,963%
GV-EDO	SMA	-	-	4,44E-02	4,46E-02	-	-
	PA	20%	80%	3,55E-02	3,57E-02	-19,980%	-19,980%
		100%	0%	4,42E-05	4,42E-05	-99,900%	-99,901%
GV-ESO	SMA	-	-	1,38E-01	7,68E-01	-	-
	PA	20%	80%	1,10E-01	6,14E-01	-20,000%	-20,000%
		100%	0%	1,33E-06	1,33E-06	-99,999%	-100,000%

Tab. 17: Zusammenfassung Brandrisiken in Abhängigkeit des Brandtyps (Gegenverkehr)

6.5 Auswirkungen auf Sicherheitseinrichtungen

Die Wirkungsanalyse zeigt auf, dass bei realen Brandlastverteilungen von Flüssigkeits- und Feststoffbränden hinsichtlich der Sicherheit der Tunnelnutzer nur marginale Unterschiede zwischen

der Verwendung eines SMA und eines PA auftreten. Von daher wird es generell nicht erforderlich, bei Verwendung von PA in Tunneln oder vergleichbaren Ingenieurbauwerken zusätzliche technische Maßnahmen, die über den Standard der RABT hinausgehen, vorzusehen. Der Einsatz von offenporigen Belägen in Tunneln und

Einhausungen hat keine konkreten Auswirkungen auf die Wahl der betriebstechnischen Tunnelausrüstung.

Da beim PA ein großflächiger Brand erst entsteht, wenn der Porenraum gefüllt ist bzw. ausreichend Sauerstoff an der Oberfläche der Poren zur Verfügung steht, bleibt für die Nutzer, unter der Voraussetzung einer rechtzeitigen Information, mehr Zeit zur Flucht. Die Detektionszeiten sollten durch geeignete technische Maßnahmen (z. B. Videodetektion) so kurz wie möglich gehalten werden.

Die Auswaschungsprozesse, die mit bitumenlösenden Flüssigkeiten, wie beispielsweise Benzin, einhergehen, erfordern nach einem Ereignisfall ein Prüfen der Entwässerungsanlage hinsichtlich bituminöser Ablagerungen. Es ist im Nachgang zu prüfen, ob vorhandene Ablagerungen die Abflussleistung mindern. Sofern signifikante Differenzen in der Abflussleistung zu verzeichnen sind, ist das Entwässerungssystem umgehend zu reinigen (z. B. durch Spülen) bzw. gänzlich zu ersetzen.

Für die Einsatzdienste können sich bei Verwendung von PA unklare Situationen ergeben. Infolge der Verteilung der flüssigen Gefahrgutstoffe im Porenraum des PA ist die Abschätzung eines sicheren Bereichs für den Aufenthalt von Fahrzeugen und Personen schwierig, da nicht direkt zu erkennen ist, an welcher Stelle die nächsten Flammen aufzüngeln und wie weit sich die Flüssigkeit ausgebreitet hat. Eine Möglichkeit zur Begrenzung der Ausbreitung wird im Einbau von Querschotts im Straßenbelag im Abstand von 25 m gesehen. Im Fall einer Freisetzung wären dann in Abhängigkeit vom Ort des Geschehens maximal 2 Abschnitte betroffen, wenn keine Überstaung im Bereich der Querschotte vorliegt. Die Einsatzkräfte könnten sich damit (Wärmebelastung und Wärmestrahlung unberücksichtigt) einer solchen Gefahrenstelle bis auf 25 m nähern, ohne Gefahr zu laufen, von Flammen eingeschlossen zu werden. Die Ausbildung einer solchen Querschottung in der Deckschicht muss resistent gegen gängige Flüssigkeiten (z. B. Benzin) und hitzebeständig sein. Die Abschottungen dürfen zu keiner negativen Veränderungen der Deckschicht führen.

Neben den Auswirkungen hinsichtlich des Ableit- und Brandverhaltens muss berücksichtigt werden, dass offenporige Asphalte nur im geringem Umfang aufgehellert werden können. Demnach kann der Einsatz von PA Einfluss auf die Beleuchtungsanlage aufweisen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Zur Festlegung möglicher Beschränkungen von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel wird ein risikobasiertes Verfahren zur Kategorisierung nach ADR angewendet. Zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Fahrbahnbeläge auf das Risiko wurden in der vorliegenden Forschungsarbeit die spezifischen Eigenschaften einer Deckschicht aus offenporigem Asphalt (PA) und Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) unter der Einwirkung von auslaufenden brennbaren Flüssigkeiten vergleichend gegenübergestellt, analysiert und bewertet.

Zur Ermittlung der risikoe erhöhenden bzw. -reduzierenden Auswirkungen einer Deckschicht aus offenporigem Asphalt (PA) wurden das Ableit- und Durchflussverhalten im Ereignisfall sowie das Brandverhalten auf PA untersucht.

Die Unterschiede zu herkömmlichen dichten bis semi-dichten Deckschichten (z. B. Splitt-Mastix-Asphalt) waren zu bestimmen.

Hierzu wurden unterschiedliche Versuchsreihen auf offenporigem Asphalt (PA) und Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) durchgeführt. Für die Versuchsdurchführungen wurden quadratische Versuchsplatten mit unterschiedlichen Deckschichten und Seitenlängen von je 80 cm hergestellt. Da ein offener Asphalt mit der Lebensdauer an Hohlraumgehalt verliert wurde eine PA-Variante mit einem Hohlraumgehalt von 29 Vol.-% (PA 1) und ein Asphalt mit einem niedrigeren Hohlraumgehalt von 26 Vol.-% (PA 2) hergestellt.

Bei den Ableit- und Durchflussversuchen wurden die Versuchsplatten, welche um 2,5 % und 6,0 % geneigt wurden, punktuell mit Benzin über einen Zeitraum von 5 Minuten belegt. Über Messzylinder an den Plattenrändern wurde die wieder austretende Flüssigkeit erfasst. Mit Hilfe von Videobildern wurde die Füllstandsentwicklung dokumentiert.

Im Rahmen der ersten Brandversuchsreihe wurden zur Abbildung des Verhaltens von teil-/gesättigten Asphalten eine zuvor definierte Menge Kraftstoff auf die Versuchsplatten aufgegeben und anschließend gezündet. Des Weiteren erfolgten Brandversuche bei denen während des Abbrands ein konstanter Benzinzufluss von 2 l/min auf die Plattenmitte erfolgte. Die Größe der sich verändernden Brandlache wurde dabei in regelmäßigen Abständen erfasst. Durch die Installation von bis zu 14 Temperaturmessstellen, Videoaufnahmen und Wärmebildaufnahmen konnten umfangreiche Versuchsdaten erhoben werden.

Mit Hilfe der Erkenntnisse, die sich aus den Versuchen ableiten ließen, erfolgte die Bewertung des unterschiedlichen Verhaltens von brennbaren Flüssigkeiten auf PA und SMA. Des Weiteren wurde basierend auf den erhobenen Messdaten das Fließ- und Abbrandverhalten von brennbaren Flüssigkeiten auf bzw. in offenporigen Asphalt-schichten mittels des CFD-Codes „OpenFOAM“ abgebildet.

Mit Hilfe der entwickelten Simulationsmodelle zur Abbildung erfolgten Berechnungen, mit welchen die Unterschiede zwischen einem offenporigen und einem dichten Belag hinsichtlich der zu erwartenden Risiken quantifiziert werden konnten. Hierbei wurden die Ergebnisse in Form von Schadenswertungswerten und Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen dargestellt.

Da die Lachenausbreitung bei offenporigen Asphalten stark von dem Füllzustand im Porengefüge abhängig ist, kann sich eine Brandverzögerung einstellen. Der effektive Hohlraumgehalt des Oberbaus ist elementar für die Aufnahmefähigkeit des Asphalts und damit für eine ggf. resultierende verzögerte Brandentwicklung bei Untersättigung. Die maßgeblichen Parameter welche die Zündung beeinflussen stellen demnach die austretenden Flüssigkeitsmenge, der effektive Hohlraumgehalt sowie die vorhandenen Neigungsverhältnisse dar. Bei einer verzögerten Zündung erhöht sich unter der Annahme einer frühzeitigen Alarmierung, die zur Selbstrettung zur Verfügung stehende Zeit.

Die vorhandene Oberflächenneigung weist in Bezug auf das Abbrandverhalten gegenläufige Effekte auf. Das Fluid kann sich im Porengefüge bei großen Neigungen schneller verteilen und einer Sättigung am Eintrittspunkt entgegenwirken, andererseits staut sich das Benzin bei Barrieren im Hohlraum schneller auf, so dass eine schnellere Sättigung der Schicht erfolgt.

Im Verlauf der Brandversuche konnten keine nennenswerten Unterschiede in der Rauchentwicklung zwischen den Bränden auf offenporigem Asphalt und einem dichten Oberbau mit SMA beobachtet werden. Da bei einem PA keine erhöhte Rauchentwicklung zu erwarten ist, beschränken sich die Auswirkungen auf die betriebstechnische Ausstattung im Fall eines Brandes lediglich auf die Entwässerungsanlage sowie den Oberbau an sich.

Aufgrund der bitumenlösenden Eigenschaften von auslaufenden Flüssigkeiten kann eine Verunreinigung der Entwässerungsanlagen nicht ausgeschlossen werden. Daher sind im Nachgang zu einem Ereignisfall die Entwässerungsanlagen auf ihre Funktionalität und ihre Sollabflussrate zu

prüfen. Kommt es zu Abweichungen zu den Vorgaben sind die Entwässerungsanlagen zu spülen bzw. zu ersetzen, so dass sie den notwendigen Anforderungen entsprechen.

Das in einem PA vorhandene Porengefüge bietet einer auslaufenden Flüssigkeit die Möglichkeit sich sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auszubreiten, theoretisch also im gesamten Tunnelquerschnitt. Für die Einsatzkräfte kann die sich im Porensystem ausbreitende Benzinlache, die oberflächlich nicht zu erkennen ist, ein schwer zu kalkulierendes Risiko darstellen. Sichere Bereiche sind nicht eindeutig zu erkennen, so dass die Gefahr des Einschließens durch plötzlich an der Oberfläche des Porenraums aufzüngelnde Flammen besteht. Diesem Problem kann beispielsweise durch Querschottungen im Fahrbelag entgegengewirkt werden. Diese können die Ausbreitung in Längsrichtung begrenzen, so dass in Abhängigkeit vom Ort der Frei- und Umsetzung sichere Bereiche entstehen. Zur Herstellung der Querschottungsbereiche muss die Ausbildung der Abdichtungen resistent gegenüber gängigen auslaufenden Flüssigkeiten (z. B. Benzin) sein und darf auch bei steigenden Temperaturen keine Undichtigkeiten aufweisen.

Im Fall eines Ereignisses mit bitumenlösenden Flüssigkeiten muss im Nachgang eine umfassende Sanierung durchgeführt werden. Die gesamte Deckschichtfläche, die durch die Flüssigkeit benetzt worden ist, muss abgetragen und ersetzt werden, da die Tragfähigkeit des Korngerüsts nicht mehr gegeben ist. Ebenso ist die Bitumenabdichtung unter der Deckschicht auf ihre Funktionalität zu prüfen und gegebenenfalls zu ersetzen.

Sofern keine Querschottungsbereiche erstellt wurden, können zur Ermittlung des betroffenen Bereichs beispielsweise Kernbohrungen ausgehend vom Eintrittspunkt vollzogen werden. Der betroffene Asphalt kann im Anschluss partiell ausgetauscht und mittels geeigneter Fugenbändern, welche die Wasserdurchlässigkeit weiterhin gewährleisten, mit dem bestehenden Oberbau verbunden werden.

Ein weiterer Unterschied zwischen einem PA und einem dichten Oberbau stellt die Brandbekämpfung durch Einsatzkräfte dar. Das Bekämpfen eines Flüssigkeitsbrandes auf einem PA kann nicht durch herkömmliches Löschwasser erfolgen. Dadurch dass u. a. Benzin eine geringere Dichte als Wasser aufweist, würde beim Löschen mit Wasser das Benzin im Porenraum an die Oberfläche steigen und somit ein zusätzliches Risiko darstellen.

Basierend auf der Wirkungsanalyse kann ausgesagt werden, dass die Unterschiede hinsichtlich der Sicherheit für die Tunnelnutzer und den Auswirkungen auf die Sicherheitseinrichtungen zwischen einem offenporigen Asphalt und einer dichten Oberfläche gering sind. Zwar weist der PA hinsichtlich des zu erwartenden Schadensausmaßes eine deutliche Verbesserung gegenüber dichten Oberbauten auf, jedoch ist bei einer realen Verteilung von Feststoff- und Flüssigkeitsbränden nur eine geringe Risikominimierung zu verzeichnen.

Die in der Forschungsarbeit ermittelten Ergebnisse werfen zum Teil neue Fragen auf. So sind u. a. innovative Lösungsansätze hinsichtlich der Ausbildung von Querschottungsbereichen zu finden. Ebenso konnten im Rahmen des Forschungsprojekts die Auswirkungen auf die Abdichtung unter der Deckschicht nicht bestimmt werden.

Abschließend lässt sich feststellen, dass offenporige Asphaltbeläge in Einhausungs- und Tunnelbauwerken unter risikoorientierten Gesichtspunkten nicht ungünstiger als dichte Fahrbahnbeläge einzustufen sind.

Literatur

- [ADR 2009]: 19. Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (19. ADR-Änderungsverordnung) und Anlagen, BGBl, 11.09.2008
- [ALB 2013]: Alber, S.: Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung; Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Heft 46, März 2013
- [ARS 2008]: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 11/2008
- [BAST 2007]: Mayer, Steinauer, Kündig: FE 03.0375/2004/FGB Brandversuche in Tunneln, Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung, BAST Heft B57, 2007
- [BAST 2008]: Zulauf, Baltzer, Mayer, Zimmermann, Kündig, Steinauer, Riepe: Leitfaden für Sicherheitsbewertungen gemäß RABT 2006, Juli 2008 (noch nicht veröffentlicht)
- [BAST 2009a]: Baltzer, Imhof, Mayer, Riepe, Zimmermann Zulauf: FE 03.0347/2007/FRB und FE 86.0050/2008 Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, Download über www.BAST.de, 2009
- [BAST 2009b]: Zulauf, Baltzer, Mayer, Zimmermann, Kündig, Steinauer, Riepe: FE 03.0378/2004/FRB Sicherheitsbewertung von Straßentunneln, BAST Heft B66, 2009
- [BAST 2010]: Zulauf, Imhof, Rengel, Mayer, Brenninger, Baltzer, Riepe, Zimmermann: FE 15.492/2010/FRB Risikoanalytische Untersuchungen zum Sicherheitsniveau offener Einhausungen, Schlussbericht, BAST, 2010, auszugsweise veröffentlicht im Taschenbuch für den Tunnelbau 2012, VGE Verlag GmbH, Essen, 2011
- [BLI 1957]: Blinov, Khudyakov: Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids, Academia Nauk, SSSR Doklady, pp, 1094-1098, 1957
- [DING 2009]: Ding Qingjun, Shen Fan, Huang Shaolong: Flameproof road surface of open-graded asphalt friction course based on ATH flame-retarding system, Journal of Central South University (Science and Technology), Vol 40, No 4, Aug. 2009
- [EG 2004]: Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union; Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, 29. April 2004
- [HU 2008]: Hu Shuguang, Huang Shaolong, Ding Qingjun: Porous Flame-retarded Asphalt Pavement for Highway Tunnel, Vol. 23 No.5, 2008
- [JSS 1982]: Japan Safety Society, Report on Burning Petroleum Fires, 1982
- [LEISTRA 2012]: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau Heft S 74, Bergisch Gladbach, Januar 2012
- [LIN 1993]: Lin, Schi-Juehn: Steuerung des Hohlraumgehaltes von Dränasphalt im Hinblick auf die Optimierung seiner bautechnischen Eigenschaften, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen ISE, Heft 41, Karlsruhe, 1993
- [M OPA 2013]: Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt, FGSV 750, FGSV-Verlag, 2013

- [MAY 2006]: Mayer, G.: Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation; Dissertation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006
- [MER 2011] Meridith, K., Xin, Y., De Vries, J.: A Numerical Model for Simulation of Thin-Film Water Transport over Solid Fuel Surfaces, Fire safety science-proceedings of the tenth international symposium, pp. 415-428, 2011
- [MEY 2014]: Meyer, A., Oeser, M., Beginn, U., Belke, E.: Pilotprojekt zum Einsatz von Nanotechnologie zur Performancesteigerung von Asphaltdeckschichten, Schlussbericht zu FE 07.0240/2010/LRB, September 2014 (noch nicht veröffentlicht)
- [MUD 1995]: K.S. Mudan, P.A. Croce: Fire Hazard Calculation for Large Open Hydrocarbon Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2nd Edition, 1995
- [NWC]: NWC, China Lake field tests, unpublished
- [OECD 2001]: Organisation for Economic Co-Operation and Development OECD, World Road Association PIARC; Safety in Tunnels – Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels, Ausgabe 2001
- [PIARC 2008]: PIARC C 3.3; Analyse des Risques pour les Tunnels Routiers / Risk Analysis for Road Tunnels, 2008
- [RABT 2006]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit : Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln – RABT, Ausgabe 2006
- [RES 2010]: Ressel, W.: Offenporiger Asphalt (OPA) - Wirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrslärm; 5. Deutsch-Russische Verkehrssicherheitskonferenz, Irkutsk, 21.-22.06.2010
- [TL-Asphalt 2013]: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07/13); FGSV 797 Ausgabe 2007, Fassung 2013
- [TL-Bitumen 2013]: Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen (TL Bitumen-StB); FGSV 794, FGSV Verlag 2007, Fassung 2013
- [TL-Gestein 2007]: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB); FGSV 613; FGSV Verlag 2004, Fassung 2007
- [TP-Asphalt 2007a]: Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB), Teil 6 Raumdichte von Asphalt-Probekörpern; FGSV 756, 2007
- [TP-Asphalt 2007b]: Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB), Teil 6 Rückgewinnung des Bindemittels - Rotationsverdampfer; FGSV 756, 2007
- [UBA 2014]: Lärmindernde Fahrbahnbeläge – Ein Überblick über den Stand der Technik, Aktualisierte Überarbeitung, Umweltbundesamt, 10.2014
- [VEL 2008]: Velske, S.; Mentlein, H.; Eymann, P.: Straßenbautechnik; Werner Verlag, Düsseldorf, 2008
- [YAN 2004]: Yang Liang; Guo Zhong-yin; Yang Xue-liang; Wang Shu-fan: Effect of porous asphalt pavement on highway tunnel fire protection, Journal of Safety and Environment, Vol. 4, No 4, Aug. 2004
- [YAN 2005]: Yang Qun; Guo Zhongyin; Lin Xixiong: Research on Fire-Retarded Open-Graded Friction Course Used in Road Tunnel, Journal of Tongji University (Natural Science), Vol 33, No3, 2005
- [ZTV-Asphalt 2013]: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB); FGSV 799, Ausgabe 2007, Fassung 2013

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsabrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken
Müller € 15,00

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen
Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennerberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennerberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Stand- sicherheit und Gebrauchstauglichkeit
Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln
Schmidt, Simon, Guder, Juknat, Hegemann, Dehn € 16,00

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vor- gespannten Zweifeldträger
Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespann- ten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Scha- densanalyse
Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperie- rung von Brücken
Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Daten- auswertung nachgerechneter Bauwerke
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infra- strukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thró
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur
Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen
Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Model- le und RFID-Tags
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbau- werke
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisie- rungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nach- haltigkeit
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchti- gungskonzepte von Straßenbrücken
Gehrein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie- 1-Schäden
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahr- zeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken
Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digi- tale Bildauswertung – Pilotstudie
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln
Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken
Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

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

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

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

www.schuenemann-verlag.de