

Einfluss von Kornform und Wachsmodifikation auf technische, ökonomische und ökologische Eigenschaften von Gussasphalt – Teil 1

Bernhard Hofko, Mariyan Dimitrov, Oliver Schwab, Fabian Weiss, Anne Kaspar-Giebl, Helmut Rechberger und Hinrich Grothe

Durch Temperaturabsenkung in der Gussasphalt-Produktion ist es möglich, Kosten und Energieverbrauch sowie den Ausstoß gesundheitsrelevanter Aerosole über den gesamten Lebenszyklus zu verringern. Die Wachsmodifizierung von Bitumen zur Temperaturabsenkung ist eine Methode, die inzwischen in den Stand der Technik übergegangen ist. In einem interdisziplinären Forschungsprojekt an der TU Wien wurde eine effiziente Alternative zur Temperaturabsenkung von Gussasphalt entwickelt. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen zum Gebrauchsverhalten und zur Partikelemission sowie eine Lebenszyklusanalyse an verschiedenen temperaturabgesenkten Gussasphalten durchgeführt und mit einem Referenz-Mischgut verglichen. Zur Anwendung kamen eine Bitumenmodifizierung mittels Amidwachs sowie die neu entwickelte Methode, bei der Kantkorn gezielt durch Rundkorn ersetzt wird. Dabei zeigt sich, dass für beide Methoden eine Temperaturabsenkung von 30 °C erreicht werden kann. Werden beide Methoden kombiniert, also Wachsmodifikation und Einsatz von Rundkorn, so kann die Temperatur um 50 °C abgesenkt werden. In Bezug auf das Gebrauchsverhalten zeigt sich, dass der Widerstand gegen bleibende Verformungen nicht durch die Kornform beeinflusst wird, und dass die Amidwachs-Modifikation zu einer Verdopplung des Verformungswiderstands führt. Der Widerstand gegen Kälterisse wird weder durch die Kornform noch durch Amidwachs-Beigabe beeinflusst. Die Emissionsanalyse zeigt, dass mehr als 80 % der bei der Produktion ausgestoßenen Partikel kleiner als 2,5 µm sind. Aus der Sicht der Lebenszyklusanalyse ist die Hauptmotivation für Temperaturabsenkung die deutliche Verringerung der Partikelemissionen. Bei 50 °C Absenkung reduzieren sich die PM₁₀-Emissionen um 80 %. Zudem können 20 % der Produktionsenergie eingespart werden. Der Einsatz von Wachs reduziert Energiekosten bei der Produktion, erhöht jedoch bei Berücksichtigung der Materialkosten die Gesamtkosten. Insgesamt legen die untersuchten Varianten nahe, dass der Einsatz von Wachsadditiven als kontrovers, der Ersatz von Kantkorn durch Rundkorn als vorteilhaft einzustufen ist.

Temperature reduction of mastic asphalt (MA) mixtures has the potential to decrease cost and energy demand as well as health-relevant emissions of particulate matter throughout the life cycle. The state-of-the-art method for temperature reduction is wax modification of the bituminous binder to reduce its viscosity. In this paper, the results of an extensive study on mechanical performance, particulate matter emission and life-cycle analysis of temperature-reduced MA are presented. Therefore, a reference MA is compared to three temperature-reduced MAs: a state-of-the-art reduction by modification with amide wax and an alternative method by substituting crushed by rounded aggregates. For both methods, a temperature reduction of 30 K can be realized. In addition, a combination of both methods, wax modification and use of rounded aggregates, is investigated, for which a reduction of 50 K is possible. The results show that the resistance to permanent deformation is not decreased by using rounded aggregates and that it can be doubled by employing amide wax regardless of the aggregate shape. Resistance to low-temperature cracking is affected by neither of the employed methods for temperature reduction. Emission analysis reveals that more than 80 % of the emitted particulates are below 2.5 µm. From a life cycle perspective, a main benefit of temperature-reduced MAs is the significant decrease in particulate emissions, and that a reduction of 50 K reduces PM₁₀ emissions by 80 %. Also, up to 20 % of production process energy can be saved when the mixing temperature is reduced by 50 K. Application of a wax additive reduces process energy costs, but increases the total life cycle costs. Based on the considered scenarios, the application of additives is controversial and the substitution of crushed aggregates by round aggregates seems to be beneficial.

Verfasseranschriften:
Ass. Prof. DI Dr. B. Hofko,
bernhard.hofko@
tuwien.ac.at;
Dipl.-Ing. M. Dimitrov;
Dipl.-Geoökol. (MSc)
O. Schwab;
Dipl.-Ing. F. Weiss;
Ao. Prof. Dr. A. Kaspar-Giebl;
Univ.-Prof. Dipl.-Ing.
Dr. techn. H. Rechberger;
Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Chem.
Dr. rer. nat. H. Grothe,
Technische Universität
Wien, Institut für
Verkehrswissenschaften,
Gußhausstraße 28/E230-3,
A-1040 Wien

1 Einleitung

Gussasphalt (MA) nimmt aufgrund seiner Zusammensetzung, seines Einsatzgebietes und seiner Lastabtragung einen speziellen Platz innerhalb der Asphaltarten ein.

Die Hauptbestandteile von Gussasphalt sind die Füllerkomponente ($\leq 0,063$ mm) mit bis zu 30 M.-% und das Bindemittel mit 8 M.-% bis 10 M.-% (CEN, 2013). Bis zu 40 M.-% des Mischguts sind daher als Mastix zu bezeichnen, der Rest wird

durch gröbere Körnungen eingenommen. Dieser Aufbau steht in klarem Gegensatz zu Walzasphalt-Sorten, z. B. Asphaltbeton (AC) mit 10 bis 15 M.-% Mastix. Aufgrund der volumetrischen Zusammensetzung wird Gussasphalt ohne zusätzliche

Verdichtungsgeräte nicht eingebaut, sondern, wie der Name sagt, gegossen. Dabei ist das Ziel, ein dichtes Mischgut ohne technisch relevanten Hohlraumgehalt zu erzeugen. Ein wesentlicher Unterschied zu anderen Mischgutsorten besteht auch in der Abtragung der Verkehrsbelastung. Während bei Walzasphalten die Lastabtragung hauptsächlich durch Interaktion der groben Gesteinskörnung sichergestellt wird, geschieht dies bei Gussasphalt durch eine ausreichend steife Mastix. Aufgrund des geringeren Grobkorn-Anteils ist die Korn-Interaktion für die Lastabtragung vernachlässigbar.

Aufgrund der oben genannten Eigenschaften wird Gussasphalt häufig als Schutz- und Deckschicht auf Brücken (Widyatmoko et al. 2005; Medani et al. 2007), als Deckschicht im hochrangigen Straßennetz, in historischen Stadtzentren, für Geh- und Radwege, sowie Garagenbeläge verwendet.

Nachdem bei Gussasphalt die Mastix für die Lastabtragung verantwortlich ist, werden harte, im hochrangigen Straßennetz oft polymermodifizierte Bindemittel eingesetzt. Um das Mischgut dennoch ausreichend fließfähig zu halten, muss die temperaturabhängige Viskosität der Mastix bzw. des Mischguts auf der Baustelle gering genug sein. Daher sind im Normalfall hohe Produktionstemperaturen von bis zu 250 °C notwendig. Nachdem mehr als 70 % des Energieverbrauchs in der Asphaltproduktion auf die Mischanlage entfallen (Canada 2005), kann Gussasphalt als besonders energieintensiv eingestuft werden. Zudem zeigen einige Untersuchungen, dass Bitumentemperaturen über 200 °C möglicherweise negativen Einfluss auf die Gesundheit von einbauendem Personal haben (Hansen 1991; Ruhl et al. 2007; Kriech und Osborn 2014). Daher gilt eine Temperaturabsenkung von Gussasphalt als notwendige Voraussetzung für bessere Energieeffizienz und ein sicheres Arbeitsumfeld.

Bitumen mit Wachsmodifikation ist inzwischen eine in den Stand der Technik übergegangene Methode zur Absenkung von Produktions- und Einbautemperaturen von Asphaltmischgut (Biro et al. 2009; Silva et al. 2010; Rubio et al. 2012; Wu und Zeng 2012). Oberhalb des Tropfpunkts des eingesetzten Wachses kommt es zu einer Viskositätsreduktion im Bindemittel, wodurch eine Temperaturabsenkung ermöglicht wird. Zurzeit sind unterschiedliche Wachsorten auf dem Markt, die jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf die

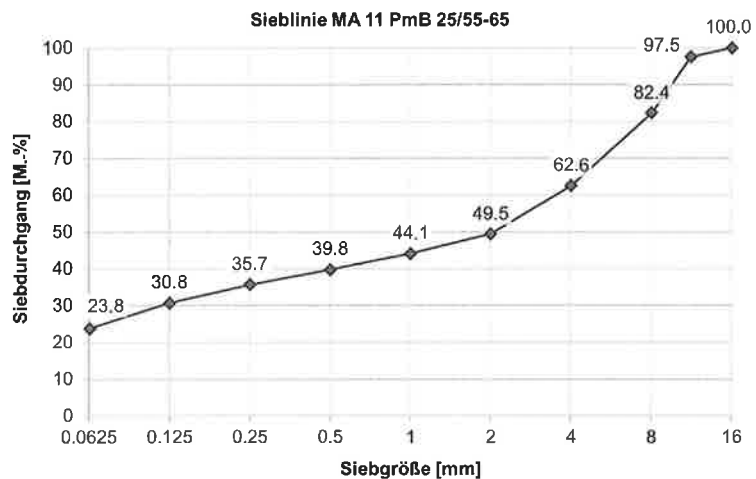


Bild 1: Sieblinie des MA 11

Verarbeitbarkeit, aber auch auf das Gebrauchsverhalten haben. Durch die Kristallisation der Wachse beim Abkühlen kommt es tendenziell zu einer verbesserten Verformungsstabilität bei hohen Temperaturen und in einigen Fällen zu geringerem Widerstand gegen Kälterisse (Edwards et al. 2006; Cardone et al. 2009; Edwards 2009; Merusi und Giuliani 2011; Capitao et al. 2012).

Im Rahmen eines Forschungsprojekts (Hofko et al. 2015b) wurde die Temperaturabsenkung von Gussasphalt durch ein interdisziplinäres Team (Straßenbau, Materialchemie und Lebenszyklusanalyse) näher beleuchtet und eine neue, effiziente Methode für die Temperaturabsenkung speziell für Gussasphalt entwickelt. Basis der neuen Methode ist die teilweise oder vollständige Substitution des bisher üblichen und laut Richtlinien auch vorgeschriebenen Kantkorns durch Rundkorn. Während dieser Ansatz für Walzasphalt aufgrund der Lastabtragung über Korn-Interaktion und der notwendigen Kantkörnung für eine entsprechende Griffbarkeit bei Deckschichten nicht möglich ist, stellt die Umstellung der Kornform für Gussasphalt kein Problem dar, nachdem die Lastabtragung von der Mastix übernommen wird und aufgrund des Bindemittelüberschusses bei Deckschichten ohnehin ein Absplitten vor Verkehrsfreigabe notwendig ist, um ausreichende Griffbarkeit herzustellen.

Das im Folgenden präsentierte Projekt umfasst zunächst die Optimierung der Temperaturabsenkung unter Beimengung unterschiedlicher Wachsorten bzw. wird parallel dazu die Methode der Kornsubstitution entwickelt. Dabei wurde die

mögliche Temperaturabsenkung auf Bindemittel- und Mischgutebene untersucht. Anschließend wurde das Gebrauchsverhalten in Bezug auf Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Kälterisse für temperaturabgesenkte Gussasphalte überprüft. Zudem wurden Emissionsmessungen durchgeführt, um Änderungen von Partikelemissionen (PM₁₀) durch Temperaturabsenkung abschätzen zu können. Alle Daten wurden im Rahmen von Lebenszyklusanalysen zusammengefasst, die Auskunft über Änderung der Material-, Energie- und Kostenflüsse über den Lebenszyklus geben.

2 Motivation und Zielsetzung

Nachhaltigkeit im Bauwesen im Allgemeinen sowie im Straßenbau im Besonderen ist ein Thema, das in den letzten 20 Jahren starke Beachtung gefunden hat. Ein nachhaltiger Baustoff muss dabei verschiedene Dimensionen berücksichtigen, unter anderem den effizienten Umgang mit knappen, natürlichen Ressourcen und Energie, Kosteneffizienz und Gesundheitsaspekte von Personal und Nutzern. Für langlebige Bauwerke, wie Straßen, mit einer Lebensdauer von 20 Jahren und mehr, reicht es nicht aus, nur den Zeitpunkt der Produktion und Herstellung zu berücksichtigen, sondern der gesamte Lebenszyklus muss in die Betrachtung mit einfließen.

Der Verbrauch von Energie und Bitumen als knappe Ressourcen hat aufgrund der hohen Produktionstemperaturen und der Zusammensetzung spezielle Relevanz für Gussasphalt.

Im Rahmen des oben genannten For-

Tabelle 1: Merkmale des Bindemittel PmB 25/55-65

Parameter	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	50 dmm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	77,6 °C
Performance Grade	PG 82-16

		Szenario 0	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
		MA 11	MA11 + 4 M.-% AW	MA11 100 % TR	MA11 100 % TR + 4 M.-% AW
Bindemittel	PmB 25/55-65	8,20 M.-%	7,87 M.-%	8,20 M.-%	7,87 M.-%
Additiv	Amidwachs		0,33 M.-%		0,33 M.-%
Füller	Kalksteinmehl	26,3 M.-%	26,3 M.-%	26,3 M.-%	26,3 M.-%
Gesteinskörnung	Vollständig gebrochen	65,5 M.-%	65,5 M.-%		
	Vollständig gerundet			65,5 M.-%	65,5 M.-%

Tabelle 2: Rezeptur der vier betrachteten Szenarien

schungsprojekts wurden daher folgende Ziele definiert:

- Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt durch Wachsmodifikation bzw. gezielte Substitution von Kantkorn (totally crushed - TC) durch Rundkorn (totally rounded - TR).
- Vergleich der ermittelten Temperaturabsenkung auf Bitumen- und Mischgut-Ebene.
- Untersuchung des Gebrauchsverhaltens (Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Kälterisse) der temperaturabgesenkten Mischgüter und Vergleich zum Referenzmischgut.
- Analyse potenziell gesundheitsrelevanter Partikelemissionen durch Impaktormessungen während der Laborproduktion für das Referenzmischgut bei 240 °C und ein temperaturabgesenktes Mischgut bei 190 °C.
- Zusammenfassung aller Ergebnisse in einer umfassenden Lebenszyklusanalyse, in der Änderungen der Material-, Energie- und Kostenflüsse durch Temperaturabsenkung betrachtet werden.

3 Materialien

Basis für die Untersuchungen ist ein Gussasphalt MA 11. Als Fremdfüller wird Kalksteinmehl eingesetzt, die Kantkörnung ist porphyritischen Ursprungs, die Rundkörnung Kalkstein. Als Bindemittel kommt PmB 25/55-65 (PG 82-16) zum Einsatz. Die Sieblinie des Mischguts ist in Bild 1 dargestellt, einige Bindemittelkennwerte in Tabelle 1. Wesentlich ist, dass bei Substitution des Kantkorns durch Rundkorn lediglich die feine und grobe Gesteinskörnung ausgetauscht wurde. Füllerart, Füllergehalt, Bitumen und Bitumengehalt sowie Sieblinien blieben dabei unverändert.

Für die Optimierung der Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation kamen kommerzielle Produkte zum Einsatz: Amidwachs (AW), Fischer-Tropsch-Wachs (FTW), Montanwachs (MW) sowie Polyethylenwachs (PEW).

Nachdem sich bei der Optimierung der Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation, Amidwachs als Produkt mit dem höchsten Absenkpotezial herausstellte, wurden im weiteren Verlauf des Projekts die Untersuchung des Gebrauchsverhal-

tens, die Emissionsanalyse sowie die Lebenszyklusanalyse anhand folgender vier Szenarien näher untersucht:

- Szenario 0: MA 11 PmB 25/55-65 - Produktionstemperatur: 240 °C (Referenz)
- Szenario 1: MA 11 + 4 M.-% AW - Produktionstemperatur: 210 °C (-30 K)
- Szenario 2: MA 11 100 % Rundkorn (TR) - Produktionstemperatur: 210 °C (-30 K)
- Szenario 3: MA 11 100 % TR + 4 M.-% AW - Produktionstemperatur: 190 °C (-50 K).

Tabelle 2 zeigt die Rezepturen der vier betrachteten Szenarien im Überblick.

4 Prüfmethode und Prüfprogramm

4.1 Temperaturabsenkung

Zwei Prüfmethode wurden eingesetzt, um das Absenkpotezial auf Bitumen- und Mischgut-Ebene zu analysieren und zu vergleichen: Der Rotationalviskosimeter (RV) und die Messung des Mischmoments in einem Gegenlaufzwangsmischer, wie er für die Laborproduktion von Asphaltmischgut eingesetzt wird.

4.1.1 Rotationalviskosimeter (Bitumenebene)

Mithilfe des RVs kann die dynamische Viskosität von Bindemitteln in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt werden. Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau: Ein koaxiales System aus einer statischen, äußeren Hülle (1) und einer rotierenden inneren Spindel (2). Die Hülle wird mit Bitumen gefüllt (4). Das Moment, das notwendig ist, um die Spindel mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 Umdrehungen pro Minute zu bewegen, steht in direktem Zusammenhang zur dynamischen Viskosität der Probe. Die Prüfung wurde gemäß (CEN, 2010) durchgeführt.

Tabelle 3 zeigt das Prüfprogramm im RV. Die dynamische Viskosität wurde für das Grundbitumen bestimmt sowie für modifizierte Bindemittel mit unterschiedlichen Wachgehalten von 2 bis 30 M.-% bezogen auf die Bindemittelmasse. Die Proben wurden jeweils auf 135 °C erhitzt und anschließend Messungen bei 135 °C sowie 140 bis 250 °C in 10-K-Schritten durchgeführt. Bei jeder Temperatur erfolgte eine dreifache Bestimmung. Die Versuche mit dem Grundbitumen sowie mit dem Bitumen mit 4 M.-% Amidwachs wurden an

	0 M.-%	2 M.-%	4 M.-%	6 M.-%	10 M.-%	30 M.-%
PmB	3x					
AW		x	3x	x	x	x
FTW		x	x	x	x	x
MW		x	x	x		
PEW		x	x	x	x	

Tabelle 3: Prüfprogramm RV

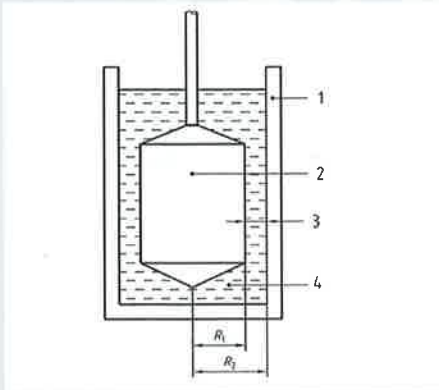


Bild 2: Prinzip des RVs (CEN, 2010)



Bild 3: Labormischer mit Drehmomentaufnehmer (Quelle: Infracrest)

Bild 4: TSRST-Aufbau (links) und UCCT-Aufbau (rechts)



drei verschiedenen Proben wiederholt, um die Wiederholbarkeit der Prüfung sowie der Wachsmodifikation zu überprüfen.

Die Ermittlung der möglichen Temperaturabsenkung erfolgte dermaßen, dass zunächst die Viskosität des Grundbitumens bei 230 °C ermittelt wurde. Die entsprechenden äquivalenten Temperaturen (Temperatur, bei der sich dieselbe Viskosität einstellt) der wachsmodifizierten Proben wurden im Anschluss ermittelt. Die Temperaturdifferenz bei Äquivalenz ergibt das Absenkpotenzial

4.1.2 Mischmoment-Messungen (Mischgut-Ebene)

Um das Potenzial zur Temperaturabsenkung nicht nur auf Bitumenebene zu untersuchen, sondern auch auf Mischgut-Ebene, wurden Mischmoment-Messungen mit Variation der Mischtemperatur durchgeführt. Dafür wurde ein der EN 12697-35 entsprechender Labormischer (Gegenlaufzwangsmischer) mit einer Kapazität von 30 l Mischgut verwendet. Die Mischgeschwindigkeit ist dabei zwischen 25 und 60 U/min variierbar. Die Trommel kann bis 250 °C aufgeheizt werden. Als Zusatzeinrichtung ist ein Drehmomentaufnehmer vorhanden, der das notwendige Moment

des Mischwerkzeugs während des Mischens kontinuierlich aufzeichnet. Dieses Mischmoment wurde bei konstanter Geschwindigkeit als Kennwert für die Verarbeitbarkeit des Mischguts herangezogen. Der Mischer ist in Bild 3 dargestellt.

Zwar gibt das Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt der FGSV (M TA 2011) auch eine Methode zur Ermittlung des Verarbeitungsverhaltens von Gussasphalt an, der Maßstab des Probenbehälters und des Mischwerkzeugs dieser Methode ist jedoch aus der Erfahrung vorangegangener Projekte zu klein gewählt, um ein Durchmischen der Probe tatsächlich zu erreichen. Speziell bei niedrigeren Temperaturen kommt es bei der Methode nach M TA zu einem Schieben des Mischguts an den Wänden des Behälters und damit zur Messung der Wandreibung und nicht der Verarbeitbarkeit beim Durchmischen.

Mischmoment-Messungen wurden an allen in Abschnitt 3 genannten Szenarien durchgeführt. Dabei wurden die Ausgangsstoffe zunächst bei 170 °C vorgeheizt und anschließend bei dieser Temperatur im Mischer bei einer Mischgeschwindigkeit von 40 U/min verarbeitet. Dafür wurden jeweils 22 kg Mischgut verwendet. Nach dem Mischprozess wurde das Mischmo-

ment bei 170 °C für 300 sec aufgezeichnet. Anschließend wurde das Mischgut im Mischer um 20 °C erwärmt und nach Erreichen der Temperatur wiederum jeweils für 300 sec mit Aufzeichnung des Moments gemischt. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis eine Temperatur von 250 °C erreicht wurde.

Zur Ermittlung der möglichen Temperaturabsenkung wird das notwendige Mischmoment des Referenzasphalts bei 230 °C festgestellt und anschließend für alle untersuchten Szenarien die Temperatur ermittelt, bei der dasselbe Mischmoment auftritt. Die Differenz der Temperaturen bei gleichem Mischmoment ergibt das Absenkpotenzial.

4.2 Gebrauchsverhalten

Zur Ermittlung des Gebrauchsverhaltens wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Abkühlprüfungen (TSRST) nach EN 12697-46 (CEN, 2012) an prismatischen Probekörpern (50 x 50 x 200 mm) beginnend von einer Temperatur von +10 °C mit einer Abkühlrate von 10 K/h. Die Bruchtemperatur wurde als Maß für die Beständigkeit gegen Kälterisse herangezogen. Bild 4 zeigt einen eingebauten Probekörper beispielhaft.
- Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) nach EN 12697-25, Teil A (CEN 2005) an zylinderförmigen Probekörpern (Durchmesser: 148 mm, Höhe: 60 mm) bei einer Temperatur von +50 °C. Die Belastung erfolgte mittels Blockimpuls mit einer Rate von 0,5 Hz. Die bleibende Axialverformung nach 3.600 LW wird als Maß für die Beständigkeit gegen bleibende Verformungen herangezogen. Bild 4 zeigt den Prüfaufbau.

4.3 Emissionsanalyse

Zur Ermittlung und Simulation der Emissionen während der Produktion von Gussasphalt wurden zwei Szenarien untersucht: das Referenzmischgut (Szenario 0) bei 240 °C und das Szenario 3 bei 190 °C. Damit kann die Veränderung von Emissionen zwischen Referenzmischgut und 50 K Temperaturabsenkung untersucht werden. Beide Mischgüter wurden gleich hergestellt: Die Ausgangsstoffe sowie der Mischer wurden entsprechend vorgeheizt, anschließend wurde das Gestein für 30 sec im Mischer homogenisiert und schließlich nach Beigabe des Bindemittels für 3 min bei 40 U/min gemischt. Es wurde jeweils

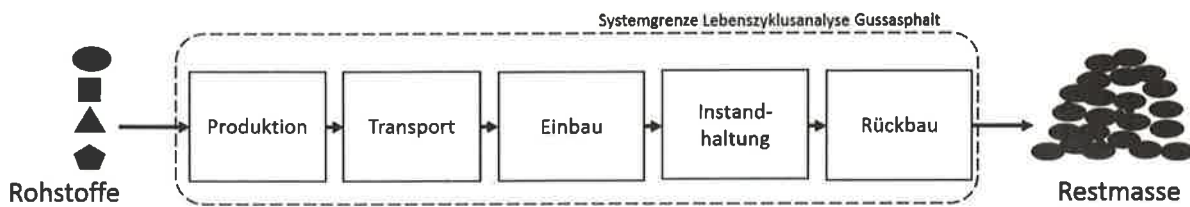


Bild 5: Systemgrenze für die Lebenszyklusanalyse einer Gussasphalt-Deckschicht

Produktion:	Verbrennung von Braunkohlestaub zur Gewinnung von Produktionsenergie, 0,1 M.-% Materialverlust als Feststoffe, Partikelemissionen aus Energieproduktion, keine Partikelemissionen aus Asphaltmischgut.
Transport:	Transportentfernung 50 km, 0,1 M.-% Materialverlust als Feststoffe, Partikelemissionen aus Dieselverbrennung in Transportfahrzeug.
Einbau:	0,1 M.-% Materialverlust als Feststoffe während Einbauprozess, Partikelemissionen aus Dieselverbrennung in Baumaschinen und aus Mischgut beim Ausgießen.
Instandhaltung:	Keine Instandhaltung in den ersten 10 Jahren nach Einbau, dann jährlicher Ersatz der oberen 3 cm von 20 m ² Straßendecke pro FE, 0,1 M.-% Materialverlust als Feststoffe während Transport und Ausgießen von Reparaturmaterial, Schlaglöcher und Straßenabnutzung nicht berücksichtigt, Partikelemissionen von Dieselverbrennung (Transportfahrzeug und Baumaschine) sowie aus Ausgießen von Gussasphalt und Abfräsen der Straßendecke (Staubaufkommen 10 % der flächenspezifischen Einbauemissionen).
Rückbau:	Rückbau der Deckschicht durch mobile Trommelfräse, Partikelemissionen aus Dieselverbrennung in Baumaschinen und Abfräsen der Straßendecke (Staubaufkommen 10 % der flächenspezifischen Einbauemissionen).

Tabelle 4: Modellannahmen für die fünf Abschnitte der Lebenszyklusanalyse

eine konstante Masse von 22 kg Mischgut verwendet. Nach dem Mischvorgang wurde die Emissionsanalyse gestartet: Die Messungen wurden jeweils über einen Zeitraum von 30 Minuten durchgeführt, während der Mischer bei offenem Deckel arbeitete. Auf diese Weise soll der Einbau auf der Baustelle im Labor simuliert werden.

4.3.1 Impaktor

Um die Partikelemissionen PM₁₀ zu ermitteln, wurden zwei Impaktoren, die mit Quarzfaserfiltern (Schmidl et al., 2008) be-

stückt sind, im Abstand von 1 bzw. 2,5 m von der Quelle entfernt aufgestellt. Die Filter wurden vorgereinigt und vor jeder Wägung bei 20 °C und 50 % rel. Luftfeuchte konditioniert. Für Szenario 3 wurde zusätzlich ein sechsstufiger Impaktor im Abstand von 1 m zur Quelle positioniert. Die Probennahme erfolgt hierbei auf gereinigter Aluminiumfolie mit folgenden Auftrennungsstufen: 12,8/3,2/0,8/0,2/0,06/0,015 µm. Damit kann auch eine Aussage über die Größenverteilung gemacht werden. Die Analyse des organischen Kohlenstoffanteils sowie des elementaren Kohlenstoffs erfolgt nach den Vorgaben des EUSAAR-

2-Protokolls (European Supersites for Atmospheric Aerosole Research) (Cavalli et al. 2010; Cachier et al. 1989).

4.4 Lebenszyklusanalyse

Lebenszyklusanalysen wurden in diesem Projekt eingesetzt, um die Auswirkung von Temperaturabsenkung nicht nur für den Zeitpunkt des Einbaus, sondern über die gesamte Lebensdauer einer Gussasphalt-Deckschicht zu ermitteln. Ziel einer Lebenszyklusanalyse im Allgemeinen ist die Bewertung von Produkten und Prozessen über ihren gesamten Lebenszyklus,

HYDROG bei YouTube

www.hydrog.com

PROFESSIONELLE MASCHINEN FÜR DEN STRASSENBAU

HYDROG GmbH - Wildau bei Berlin - Dipl.-Ing. Lutz Regel - l.regel@hydrog.com - tel. 0160-88-11-770

also von der sprichwörtlichen Wiege bis zur Bahre (Hellweg und Canals 2014). Der Fokus liegt dabei häufig auf Umweltauswirkungen, jedoch können auch soziale und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

In diesem Projekt werden Materialflüsse, Energieverbrauch und Kosten von zwei temperaturabgesenkten Gussasphalten (Szenario 1 und 3) einem Referenzmischgut (Szenario 0) gegenübergestellt. Als funktionelle Einheit (FE) wird ein Fahrstreifenkilometer (1.000 x 3,75 x 0,05 m) über eine angenommene Lebensdauer von 20 Jahren angenommen. Für die Analyse werden Produktion, Transport und Einbau des Mischguts sowie Instandhaltungsmaßnahmen und Rückbau nach Ende der Lebensdauer berücksichtigt. Die Systemgrenze ist in Bild 5 dargestellt.

Ressourcenverbrauch und Emissionsaufkommen werden mittels einer Stoffflussanalyse (SFA) (Brunner und Rechberger 2004) analysiert. Dabei liegt der Fokus bei den Emissionen auf Partikel $\leq 10 \mu\text{m}$, da diese beim Einbau von Gussasphalt in signifikanten Mengen auftreten und als gesundheitsrelevant bekannt sind (Pope und Dockery 2006). Die ökologischen Rucksäcke (Partikelemissionen), die während der Herstellung der Ausgangsstoffe (Bitumen, Gestein, Wachse) auftreten, werden berücksichtigt. Ebenso wird die graue Energie, die zur Produktion der Ausgangsstoffe benötigt wird, und die Prozessenergie innerhalb der Systemgrenzen in die Betrachtung der Lebenszyklusenergie nach (Cabeza et al. 2014) aufgenommen. Material- und Energiekosten fließen in die Analyse der Lebenszykluskosten nach (Hunkeler et al. 2008) mit ein. Inputdaten in Bezug auf Materialzusammensetzung, Dichte, Emissionsverhalten, graue Energie, Energieaufwand, Heizwert von Brennstoffen, Material- und Energiekosten wurden aus Laboruntersuchungen, aus der vorhandenen Literatur bzw. Datenbanken sowie aus Expertengesprächen ermittelt. Die Analysen wurden mittels der SFA-Software STAN (www.stan2web.net) durchgeführt und als Sankey-Diagramme dargestellt. In Sankey-Diagrammen entspricht die Dicke eines Flusses seiner Quantität, also je nach Betrachtungsebene entweder dem Material (Tonnen), der Energie (GJ) oder den Kosten (€). Quellen zu den Eingangsdaten finden sich unter <http://tinyurl.com/o4l39t7>. Die Modellannahmen sind in Tabelle 4 angegeben.

Dieser Beitrag wird in STA 5/2016 mit „Ergebnisse und Diskussion“ fortgesetzt.

Literaturverzeichnis

- Biro, S.; Gandhi, T.; Amirkhanian, S. 2009: Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21, 316–323.
- Brunner, P. H.; Rechberger, H. 2004: *Practical handbook of material flow analysis*, Boca Raton, FL, CRC/Lewis.
- Cabeza, L. F.; Rincon, L.; Vilarino, V.; Perez, G.; Castell, A. 2014: Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.
- Cachier, H.; Bremond, M. P.; Buat-Menard, P. 1989: Determination of atmospheric soot carbon with a simple thermal method. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, 41, 379–390.
- Canada, N. R. 2005: *Road Rehabilitation Energy Reduction Guide for Canadian Road Builders*. In: CONSERVATION, C. I. P. F. E. (ed.).
- Capitao, S. D.; Picado-Santos, L. G.; Martinho, F. 2012: Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 1016–1024.
- Cardone, F.; Pannunzio, V.; Virgili, A.; Barbati, S. 2009: An evaluation of use of synthetic waxes in warm-mix asphalt. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vols 1 and 2, 627–638.
- Cavalli, F.; Viana, M.; Yttri, K. E.; Genberg, J.; Putaud, J. P. 2010: Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 79–89.
- CEN 2005. EN 12697-25: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test. Brussels.
- CEN 2010. EN 13302: Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus. Brussels.
- CEN 2012. EN 12697-46: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. Brussels.
- CEN 2013. EN 13108-6: Bituminous mixtures - Material specifications - Part 6: Mastic Asphalt. Brussels.
- Edwards, Y. 2009: Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance. *Road Materials and Pavement Design*, 10, 313–335.
- Edwards, Y.; Tasdemir, Y.; Isacson, U. 2006: Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 45, 31–41.
- Hansen, E. S. 1991: Mortality of Mastic Asphalt Workers. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, 17, 20–24.
- Hellweg, S.; Canals, L. M. I. 2014: Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344, 1109–1113.
- Hofko, B.; Dimitrov, M.; Hospodka, M. 2015a: Assessing temperature reduction potential of various additives on binder and asphalt mix level for mastic asphalt. *Proceedings of the 8th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*.
- Hofko, B.; Dimitrov, M.; Schwab, O.; Weiss, F. 2015b: *High Efficient Low Emission Mastic Asphalt - Final Report*. Vienna, Austria.
- Hunkeler, D.; Lichtenvort, K.; Rebitzer, G.; Ciroth, A.; Europe, S. 2008: *Environmental life cycle costing*, Pensacola, Fla.; Boca Raton, SETAC; CRC Press.
- Kriech, A. J.; Osborn, L. V. 2014: Review and implications of IARC monograph 103 outcomes for the asphalt pavement industry. *Road Materials and Pavement Design*, 15, 406–419.
- Medani, T. O.; Huurman, M.; Liu, X. Y.; Scarpas, A.; Molenaar, A. A. A. 2007: Describing the behaviour of two asphaltic surfacing materials for orthotropic steel deck bridges. *Advanced Characterisation of Pavement Soil Engineering Materials*, Vols 1 and 2, 1351–1368.
- Merusi, F.; Giuliani, F. 2011: Rheological characterization of wax-modified asphalt binders at high service temperatures. *Materials and Structures*, 44, 1809–1820.
- Pope, C. A.; Dockery, D. W. 2006: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709–742.
- Riehmann, P.; Hanfler, M.; Froehlich, B. 2005: Interactive Sankey diagrams. *INFOVIS 05: IEEE Symposium on Information Visualization, Proceedings*, 233–240.
- Rubio, M. C.; Martinez, G.; Baena, L.; Moreno, F. 2012: Warm-mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84.
- Ruhl, R.; Musanke, U.; Kolmsee, K.; Priess, R.; Breuer, D. 2007: Bitumen emissions on workplaces in Germany. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4, 77–86.
- Schmidl, C.; Marr, L. L.; Caseiro, A.; Kotianova, P.; Berner, A.; Bauer, H.; Kasper-Giebl, A.; Puxbaum, H. 2008: Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. *Atmospheric Environment*, 42, 126–141.
- Schmidt, M. 2008a: The sankey diagram in energy and material flow management. *Journal of Industrial Ecology*, 12, 82–94.
- Schmidt, M. 2008b: The Sankey diagram in energy and material flow management - Part II: Methodology and current applications. *Journal of Industrial Ecology*, 12, 173–185.
- Silva, H. M. R. D.; Oliveira, J. R. M.; Peralta, J.; Zoorob, S. E. 2010: Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*, 24, 1621–1631.
- Vandenoosterkamp, P. F.; Goorse, A. A.; Blomen, L. J. M. J. 1993: Review of an Energy and Exergy Analysis of a Fuel-Cell System. *Journal of Power Sources*, 41, 239–252.
- Widyatmoko, I.; Elliott, R. C.; Read, J. M. 2005: Development of heavy-duty mastic asphalt bridge surfacing, incorporating Trinidad Lake Asphalt and polymer modified binders. *Road Materials and Pavement Design*, 6, 469–483.
- Wu, C. F.; Zeng, M. L. 2012: Effects of Additives for Warm-Mix Asphalt on Performance Grades of Asphalt Binders. *Journal of Testing and Evaluation*, 40, 265–272.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt (M TA)*, Ausgabe 2011, FGSV Verlag, Köln.