Eine alternative Methode zur Temperaturabsenkung von Gussasphalt

Rundkorn statt Kantkorn

Bernhard Hofko , Mariyan Dimitrov, Oliver Schwab, Fabian Weiss, Helmut Rechberger, Hinrich Grothe, Wien

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 Griffigkeit bei Deckschichten nicht möglich ist, stellt die Umstellung der Kornform für Gussasphalt kein Problem dar, erstens, weil die Lastabtragung von der Mastix übernommen wird und zweitens, da aufgrund des Bindemittelüberschusses bei Deckschichten ohnehin ein Absplitten vor Verkehrsfreigabe notwendig ist, um eine ausreichende Griffigkeit herzustellen.
Das im Folgenden präsentierte Projekt umfasst zunächst die Optimierung der Temperaturabsenkung unter Beimengung unterschiedlicher Wachsarten, Parallelentwicklung der Methode der Kornsubstitution. 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 Gussasphalt überprüft. Zudem wurden Emissionsmessungen durchgeführt, um Änderungen von Partikelemissionen (PM_{10}) 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.

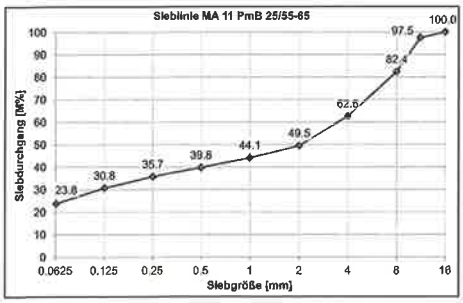

Abbildung 1: Sieblinie des MA 11

Motivation und Zielsetzung

Nachhaltigkeit im Bauwesen im Allgemeinen, sowie im Straßenbau im Besonderen ist ein Thema, das in den letzten 20 Jahren starke Beachtung erhalten 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 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 Forschungsprojekts 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 Mischgutebene,
- Untersuchung des Gebrauchsverhaltens (Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Kälterisse) der temperaturabgesenkten Mischgüter und Vergleich zum Referenzmischgut,
- Analyse potentiell gesundheitsrelevanter Partikelemissionen durch Impaktor-Messungen während der Laborproduktion für das Referenzmischgut bei 240 °C und ein temperaturabgesenktes Mischgut bei 190 °C sowie
- Zusammenfassung aller Ergebnisse in einer umfassenden Lebenszyklusanalyse, in der Änderungen der Material-, Energie und Kostenflüsse durch Temperaturabsenkung betrachtet werden.

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 Abbildung 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.

Parameter	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	50 dmm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	77.6 °C
Performance Grade	PG 82-16

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

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 Absenkpotential herausstellte, wurden im weiteren Verlauf des Projekts die Untersuchung des Gebrauchsverhaltens, 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 °C),
- Szenario 2: MA 11 100 % Rundkorn (TR) – Produktionstemperatur: 210 °C (-30 °C) sowie
- Szenario 3: MA 11 100 % TR + 4 M.-% AW – Produktionstemperatur: 190 °C (-50 °C).

Prüfungen zur Temperaturabsenkung

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

Rotationalviskosimeter (Bitumenebene)
Mithilfe des RVs kann die dynamische Viskosität von Bindemitteln in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt werden.

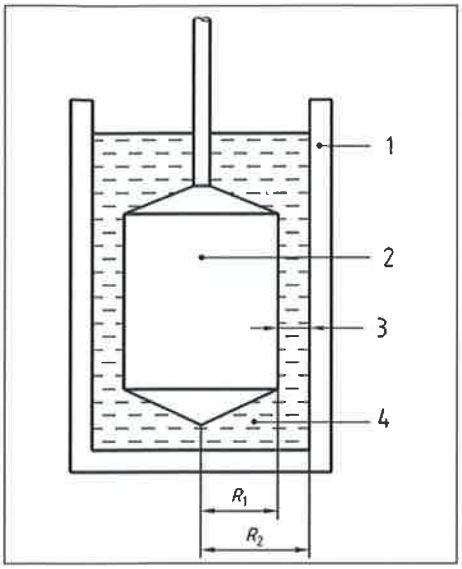

Abbildung 2: Prinzip des RVs (CEN, 2010)

	Szenario 0 MA 11	Szenario 1 MA 11 + 4 M.-% AW	Szenario 2 MA 11 100 % TR	Szenario 3 MA 11 100 % 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.-%		
Gesteinskörnung vollständig gerundet			65,5 M.-%	65,5 M.-%

Tabelle 2: Rezeptur der vier betrachteten Szenarien

	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

Abbildung 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 Wachsgehalten von 2 M.-% 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 °C Schritten durchgeführt. Bei jeder Temperatur erfolgte eine dreifache Bestimmung. Die Prüfungen am Grundbitumen, sowie das Bitumen mit 4 M.-% Amidwachs wurde an 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 äquiviskosen Temperaturen (Temperatur, bei der sich dieselbe Viskosität einstellt) der wachsmodifizierten Proben wurden im Anschluss ermittelt. Die Temperaturdifferenz bei Äquiviskosität ergibt das Absenkpotenzial

Abbildung 3: Labormischer mit Drehmomentaufnehmer *Foto: Infratest*

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 U/min 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 Abbildung 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 gewährleisten. 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.

Mischmomentmessungen wurden an allen 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 Mischmoment 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.

Gebrauchsverhalten

Zur Ermittlung des Gebrauchsverhaltens wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Abkühlprüfungen (TSRST) nach EN 12697-46 (CEN, 2012) an prismatischen Probekörpern (50x50x200 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. Abbildung 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. Abbildung 4 zeigt den Prüfaufbau.

Emissionsanalyse

Zur Ermittlung und Simulation der Emissionen während der Produktion von Gussasphalt wurden zwei Szenarien untersucht: Das Referenzmischgut (Szenario 0) bei 240 °C und Mischgut mit 4 M.-% Amidwachs und Rundkorn (Szenario 3) bei 190 °C. Damit kann die Veränderung von Emissionen zwischen Referenzmischgut und 50 °C 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 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.

Um die Partikelemissionen PM_{10} zu ermitteln wurden zwei Impaktoren, die mit Quarzfaserfiltern (Schmidl et al., 2008) bestückt sind, im Abstand von 1 m bzw. 2,5 m von der Quelle entfernt aufgestellt.

Die Filter wurden vorgereingt 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 Vorgabe des EUSAAR 2 Protokolls (European Supersites for Atmospheric Aerosole Research) (Cavalli et al., 2010, Cachier et al., 1989).

Abbildung 4: TSRST Aufbau (links) und UCCT Aufbau (rechts)

Lebenszyklusanalyse

Lebenszyklusanalysen wurden in diesem Projekt eingesetzt, um Auswirkung von Temperaturabsenkung nicht nur für den Zeitpunkt des Einbaus, sondern über die gesamte Lebensdauer einer Gussasphalt-Deckschicht zu ermitteln.

wZiel einer Lebenszyklusanalyse im Allgemeinen ist die Bewertung von Produkten und Prozessen über ihren gesamten Lebenszyklus, also von der sprichwörtlichen Wiege bis zur Bahre (Hellweg and 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 (1000 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 Abbildung 5 dargestellt.

Ressourcenverbrauch und eine Emissionsaufkommen werden mittels einer Stoffflussanalyse (SFA) (Brunner and Rechberger, 2004) analysiert. Dabei liegt der Fokus bei den Emissionen auf Partikel ≤ 10µm, da diese beim Einbau von Gussasphalt in signifikanten Mengen auftreten und als gesundheitsrelevant bekannt sind (Pope and 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

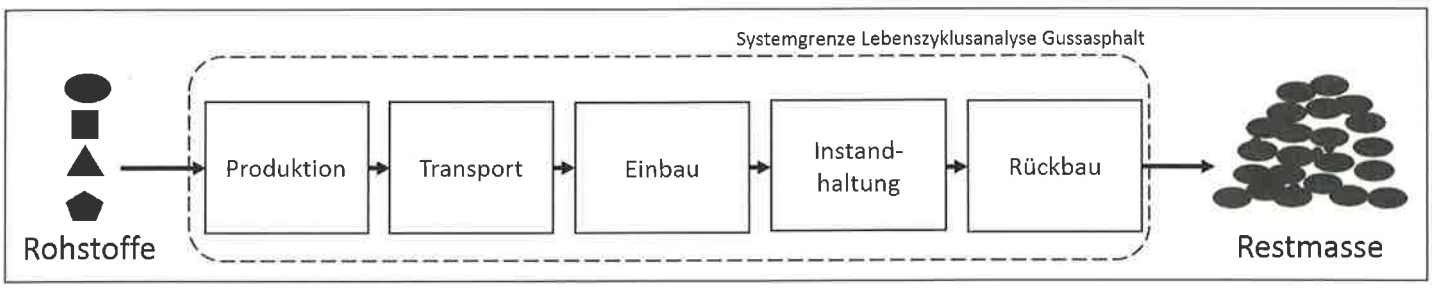

Abbildung 5: Systemgrenze für die Lebenszyklusanalyse einer Gussasphalt-Deckschicht

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 m² 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

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.

Ergebnisse und Diskussion

Temperaturabsenkung

Eine umfangreiche Bearbeitung der Temperaturabsenkung auf Bitumen- und Mischgutebene mit detaillierten Darstellungen zu Zusammenhängen zwischen Wachszugabe und dynamischer Viskosität, sowie zwischen Temperatur und Mischmoment findet sich in (Hofko et al., 2015a). Hier soll nur im Überblick und vergleichend auf die Ergebnisse, die auf Bitumen- bzw. Mischgutebene, gewonnen wurden, eingegangen werden. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der möglichen Temperaturabsenkung von verschiedenen Bindemitteln bzw. Mischgütern im Vergleich zum Referenzbindemittel PmB 25/55-65 ohne Zusätze bzw. zum Referenzmischgut MA 11 PmB 25/55-65. In Bezug auf wachsmodifizierte Produkte wird deutlich, dass die Temperaturabsenkung auf Bitumenebene in jedem Fall klar von der ermittelten Absenkung auf Mischgutebene abweicht. Bei Amidwachs und Fischer-Tropsch-Wachs unterschätzt eine Analyse auf Bitumenebene die tatsächlich mögliche Absenkung auf Mischgutebene. Der Unterschied zwischen den beiden Betrachtungsebenen liegt zwischen 14 und 22 °C. Für das Polyethylenwachs zeigt die Bitumenebene höheres Absenkpotential als die Mischgutebene. Der Unterschied beträgt hier 7 K. Die Reihung der einzelnen Produkte stimmt jedoch für beide Betrachtungsebenen überein: Polyethylenwachs mit dem geringsten Potential, gefolgt von Fischer-Tropsch-Wachs und Amidwachs.

Rechts in der Abbildung 6 ist der Einfluss der Kornform auf die Temperaturabsenkung dargestellt. Je nachdem welche Kornfraktion substituiert wird, ergeben sich Absenkpotentiale zwischen 23 (Substitution Kornklasse 0/4) bis 37 °C (Substitution Kornklasse 0/11).

Damit zeigt sich, dass das Absenkpotential durch Ersatz von Kantkorn durch Rundkorn gleich bzw. höher ist als bei Wachsmodifikation. Wird lediglich die 0/4 Fraktion ersetzt, so ergibt sich eine Temperaturabsenkung, die mit 4 M.-% Amidwachs-Modifikation vergleichbar ist. Für den Austausch der 4/11 bzw. der gesamten 0/11 Fraktion ist das Absenkpotential um 8 bis 14 °C höher als bei Amidwachs-Modifikation.

Gebrauchsverhalten

Auf Basis der oben dargestellten Ergebnisse zum Absenkpotential, wurden in weiterer Folge Amidwachs und Kornsubstitution im Detail betrachtet. In diesem Abschnitt wird der Widerstand gegen bleibende Verformungen, sowie gegen Tieftemperaturrisse für die vier Szenarien untersucht.

Beständigkeit gegen bleibende Verformungen

Abbildung 7 stellt die Ergebnisse zum Widerstand gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen dar. Diese Eigenschaft wurde anhand der bleibenden Axialdehnung im UCCT bei +50 °C nach 3.600 Lastwechseln festgemacht. Die dargestellten Daten zeigen den Mittelwert aus drei Einzelprüfungen mit der dazugehörigen Standardabweichung. Das Referenzmischgut mit 100 % gebrochenem Korn zeigt eine Axialdehnung von -21 %. Szenario 1 mit 4 M.-% Amidwachs-Modifikation erleidet im Vergleich zum Referenzmischgut nur die Hälfte der bleibenden Verformungen (-11 %) und Szenario 2, bei dem das gebrochene Korn vollständig durch gerundetes Korn ersetzt wurde, zeigt ähnliches Verhalten (-23 %) wie das Referenzmischgut. Die Kombination aus Wachs und Rundkorn in Szenario 3 ergibt ähnliche Ergebnisse wie Szenario 1 (-12 %).

Daraus wird erkennbar, dass die Kornform bei Gussasphalt keinen signifikanten Einfluss auf den Widerstand gegen bleibende Verformungen hat und – wie aus der Erfahrung bekannt – die Beimengung von Wachs einen starken Anstieg des Verformungswiderstands mit sich bringt, wiederum unabhängig von der Kornform im Mischgut.

Beständigkeit gegen Kälterisse

Abbildung 8 (Seite 18) beinhaltet die Ergebnisse der Abkühlprüfung für alle vier Szenarien. Dabei wird die Bruchtemperatur T_{crack} dargestellt, bei der ein Probekörper reißt, weil die thermisch induzierten (kryogenen) Spannungen die Zugfestigkeit überschreitet. Im Diagramm sind jeweils Mittelwerte aus drei Einzelversuchen mit der zugehörigen Standardabweichung ersichtlich.

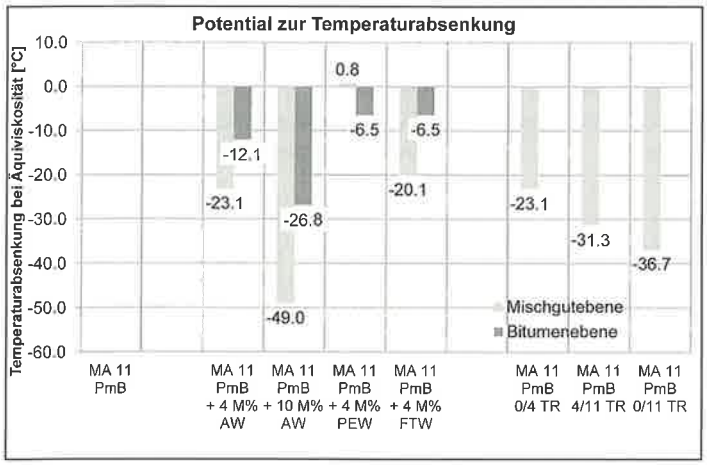

Abbildung 6: Vergleich der Temperaturabsenkung auf Bitumen- und Mischgutebene

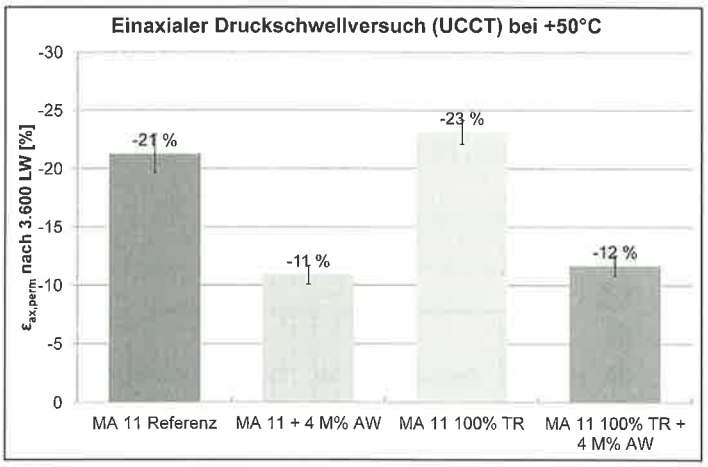

Abbildung 7: Ergebnisse der einaxialen Druckschwellprüfung (UCCT)

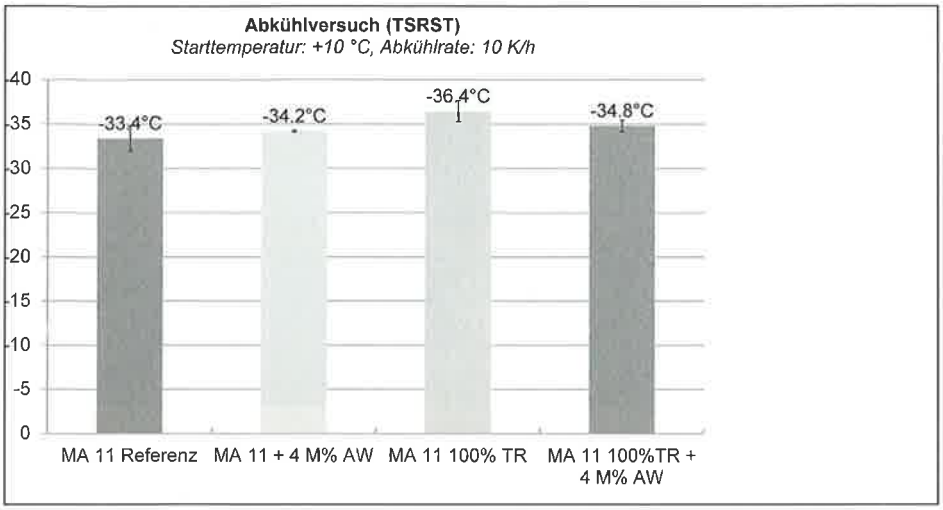

Abbildung 8: Ergebnisse der Abkühlprüfung (TSRST)

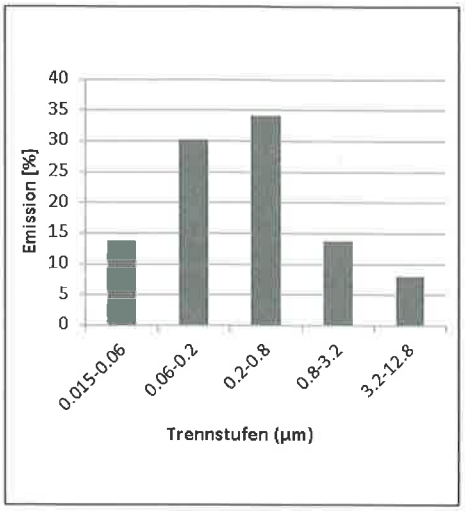

Abbildung 9: Partikelgrößenverteilung der Emission bei Szenario 3

Festzustellen ist, dass die Bruchtemperatur bei allen Mischgütern zwischen -33 und -36 °C liegt. Damit zeigen alle Szenarien eine hohe Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse. Die ermittelten Bruchtemperaturen sind im Vergleich zu anderen Asphalttypen deutlich günstiger. Dies ist zwei Umständen geschuldet: Einerseits weisen Gussasphalte einen hohen Anteil an Bindemittel auf, das für den Spannungsabbau bei Abkühlung verantwortlich ist. Zudem ist durch den geringen Hohlraumgehalt eine große effektive Querschnittsfläche verfügbar, wodurch die Zugfestigkeit ansteigt.

Unter Berücksichtigung der Streuung der Ergebnisse zeigt sich kein signifikanter Einfluss bei Wachsmodifikation auf das Tieftemperaturverhalten, obgleich bekannt ist, dass durch das Auskristallisieren des Wachsanteils eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit auftritt (Edwards, 2009). Zumindest bei der hier untersuchten Variante mit 4 M.-% Amidwachs-Modifikation lässt sich keine negative Auswirkung auf die Rissbeständigkeit feststellen.

Emissionsanalyse während der Mischgutproduktion

Die quantitative Analyse der PM_{10}-Filter zeigt eine hohe Partikelkonzentration, die während des Mischprozesses emittiert wird. Die Unterschiede zwischen dem Referenzszenario 0 (Tabelle 5), in dem bei 240 °C gemischt wird und dem Szenario 3 (Tabelle 6), in dem mit 190 °C verarbeitet wird, ist signifikant. Beide Mischgüter emittieren zum Großteil organischen Kohlenstoff (OC), jedoch werden im Szenario 3 nur 20 % der Emissionen im Vergleich zu Szenario 0 gemessen. Eine Temperaturabsenkung von 50 °C führt dazu, dass die PM_{10}-Emissionen auf ein Fünftel zurückgehen. Die durch die Messungen ermittelten Werte beim Mischprozess wurden weiter verwendet, um die Emissionen beim Einbau abschätzen zu können (Tabelle 7). Dabei werden zwei Kenngrößen ermittelt: die Emissionen pro Masse an eingebautem Gussasphalt (mg/kg) und die Emissionen pro eingebauter Gussasphalt-Fläche (g/m²). Für diese Berechnungen wird von einem stationären Zustand ausgegangen und die Abnahme der Partikelkonzentration von der Quelle durch eine logarithmische Funktion angenommen. Diese Schätzwerte werden in der folgenden Lebenszyklusanalyse zur Bilanzierung der Einbauemissionen verwendet. Abbildung 9 zeigt die ermittelte Größenverteilung der Partikelemission, die im Szenario 3 zusätzlich aufgenommen. Dabei zeigt sich, dass der Großteil der Emissionen unter 10 µm liegt und zumindest 78 % der Partikel kleiner als die als besonders gesundheitsrelevant eingestufte Größenstufe von 2,5 µm sind.

Lebenszyklusanalyse

Drei der vier Szenarien wurden im Rahmen der Lebenszyklusanalysen in Bezug auf Material- und Energieflüsse, sowie Kosten betrachtet: Das Referenzszenario 0, das Szenario 1 mit 4 M.-% Amidwachs-Modifikation und das Szenario 3 mit 100 % Rundkorn und 4 M.-% Amidwachs-Modifikation. In Bezug auf Produktionstemperaturen werden daher das Referenzszenario bei 240 °C betrachtet, die standardmäßige Temperaturabsenkung bei 210 °C und eine Alternativmethode durch Kombination aus Wachs und Rundkorn bei einer Temperatur von 190 °C.

Ressourcenverbrauch und Emissionen

Pro Fahrstreifenkilometer (= funktionelle Einheit, FE) werden insgesamt 460 t Gussasphalt für die Deckschicht benötigt. Werden hier noch Materialverluste beim Transport, sowie der Bedarf für die laufende Erhaltung berücksichtigt, ergeben sich 470 t Gussasphalt über den Lebenszyklus pro FE. Davon sind 300 t für Gestein (gebrochen oder gerundet), 130 t Fremdfüller, 35 t Bitumen und – in Szenario 1 und 3 – je etwa 1,5 t Wachs anzusetzen.

Tabelle 8 beinhaltet eine Auflistung der Partikelemissionen PM_{10}, die während des Lebenszyklus einer FE Gussasphalt auftreten. Im Referenzszenario treten 40 kg PM_{10} pro FE auf. Diese Emissionen können durch Temperaturabsenkung bei der Produktion um bis zu 40 % reduziert werden. Mit 50 % an den gesamten emittierten

Szenario	Emission [mg/kg]	Emission [g/m²]
0	740	5,3
3	148	1,1

Tabelle 7: Berechnete PM_{10} Emission von Szenario 0 und 3

Experiment 1	PM_{10} [mg/m³]	OC [mg/m³]	OC in PM10 [%]
Filter 1 (1 m)	10,0±0,2	10,0±0,3	100
Filter 2 (2,5 m)	7,2±0,2	7,0±0,2	97
Experiment 2			
Filter 1 (1 m)	9,4±0,2	9,5±0,3	100
Filter 2 (2,5 m)	7,8±0,2	6,4±0,2	82

Tabelle 5: PM_{10} Filter Immissionsanalyse von Szenario 0 bei 240°C.

	PM_{10} [mg/m³]	OC [mg/m³]	OC in PM_{10} [%]
Experiment 1			
Filter 1 (1 m)	2,9±0,2	2,7±0,2	93
Filter 2 (2,5 m)	2,6±0,2	2,5±0,2	96
Experiment 2			
Filter 1 (1 m)	2,4±0,2	2,0±0,2	83
Filter 2 (2,5 m)	1,9±0,2	1,7±0,2	90

Tabelle 6: PM_{10} Filter Immissionsanalyse von Szenario 3 bei 190 °C.

		Szenario 0 (Referenz)			Szenario 1			Szenario 3		
		Material-bedarf (t/FE)	Partikel (kg/FE)	Anteil (%)	Material-bedarf (t/FE)	Partikel (kg/FE)	Änderungen gegenüber Referenz (%)	Material-bedarf (t/FE)	Partikel (kg/FE)	Änderungen gegenüber Referenz (%)
	Partikel (kg/kg)									
Ökologischer Rucksack (Partikelemissionen) Rohstoffe										
Körnung (kant)	1.98E-06	306	0,6	1,4	310	0,6	1,3	0	0,0	NA
Körnung (rund)	1.62E-06	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	304	0,5	NA
Füller	2.42E-06	128	0,3	0,7	124	0,3	- 3,1	130	0,3	1,7
Bitumen	2.65E-04	339	10,3	24,3	37	9,9	- 4,0	37	9,9	-
Additiv	2.56E-06	0	0,0	0,0	2	0,0	NA	2	0,0	4,0
Prozessemissionen										
Produktion (Energie)			7,4	17,6		6,8	- 9,0		6,0	- 18,7
Transport (Energie)			0,5	1,2		0,5	0,0		0,5	0
Einbau (Energie, Asphaltgießen)			19,9	47,0		12,0	- 39,6		4,1	- 79,2
Instandhaltung (Energie, Rückbaustaub, Einbau)			1,3	3,0		1,3	0,0		1,3	0
Rückbau (Energie, Rückbaustaub)			2,0	4,7		2,0	0,0		2,0	0
TOTAL			**42,3**	**100**		**33,3**	**- 21,3**		**24,6**	**- 41,8**

Tabelle 8:
Emissionen von PM_{10} pro FE: ökologischer Rucksack der Ausgangsstoffe und Prozessemissionen aus Produktion, Einbau, Erhaltung und Rückbau sind berücksichtigt

ATS
FAYAT GROUP

Ihr Erfolg ist unser Auftrag

Höchste Wirtschaftlichkeit und minimale Emissionen. Garantiert.
Wir haben passende Lösungen für jede Mischanlage.

www.ats-asphalt.de

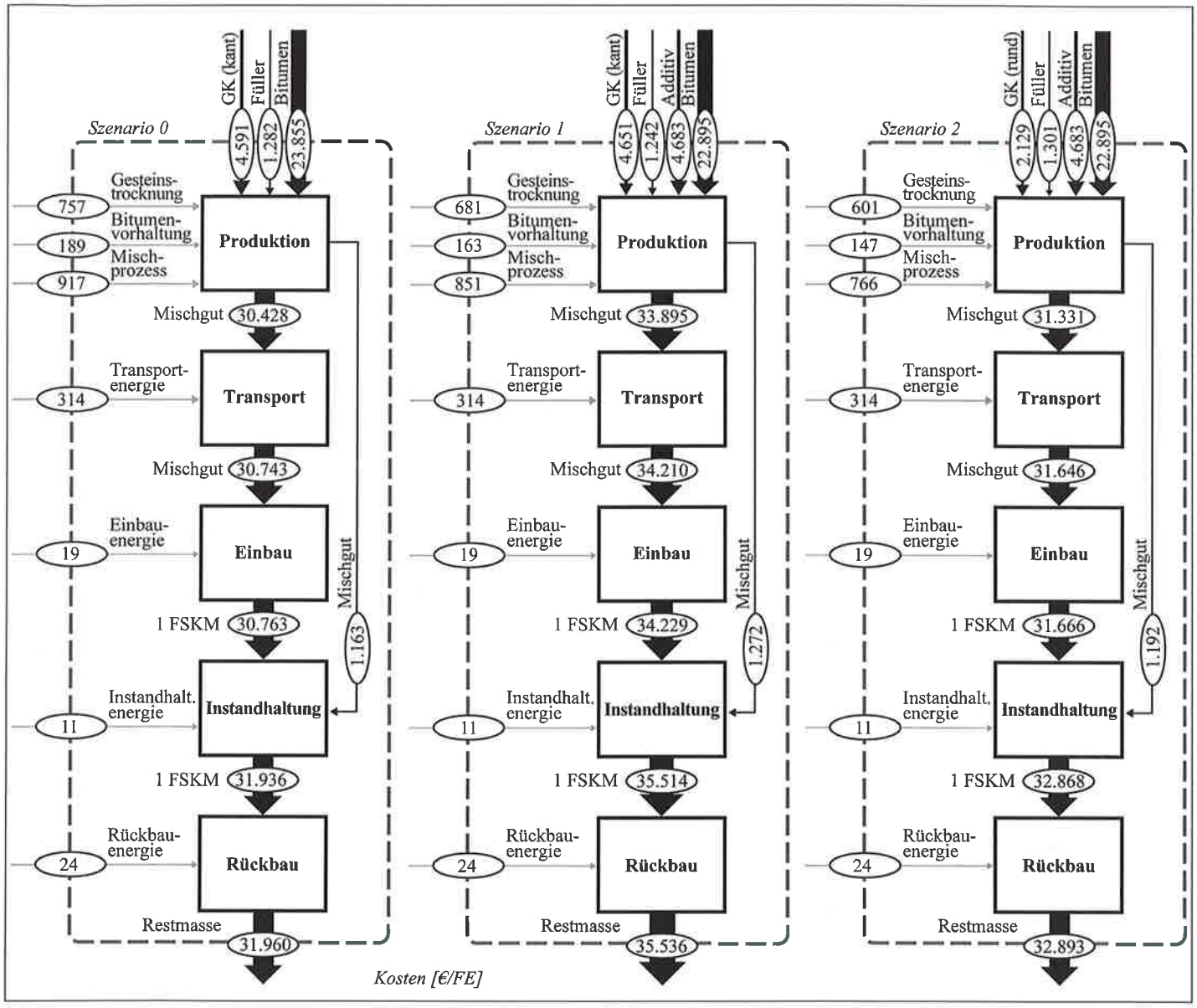

Abbildung 10: Energieflussdiagramme der grauen Energie (schwarze Pfeile) und der Prozessenergie (graue Pfeile) in GJ/FE für die drei Szenarien

PM_{10} trägt der Einbau von Gussasphalt bei Berücksichtigung der gesamten Lebensdauer den größten Anteil an Emissionen. Auch Beiträge aus der benötigen Energie für die Produktion (hier: Verbrennung von Braunkohlestaub) und der Bitumenproduktion machen einen signifikanten Teil der Partikelemissionen aus.

Zur Erstellung einer geschlossenen Materialbilanz sollte der Umfang der betrachteten Materialien um die Energieträger erweitert werden. Dies ist nötig, da Partikelemissionen sowohl aus dem Material selbst (d.h. aus dem Mischgut) und aus der Energiebereitstellung (d.h. aus den Energieträgern) herrühren. Zusätzliche Partikelemissionen wie etwa aus dem Straßenabrieb sind in dieser Studie nicht betrachtet und sind in Nachfolgeuntersuchungen einzubeziehen. Auf der Output-Seite sind zur Erstellung einer geschlossenen Materialbilanz zudem weitere Emissionen, z.B. CO_2, mit zu bilanzieren. Das Berücksichtigen kleiner Stoffströme wie Emissionen ist jedoch schwierig, da diese in den Unsicherheiten wesentlich größerer Stoffströme untergehen können. So bewegen sich beispielsweise Emissionsmengen in der Dimension kg pro FE, während andere Stoffströme mehrere hundert Tonnen pro FE betragen können.

Ein vollständiges Sankey-Diagramm der Materialflüsse ist unter http://tinyurl.com/o4l39t7 abrufbar.

Energie

Über den Lebenszyklus werden insgesamt 500 - 600 GJ pro FE verbraucht. In jedem der drei betrachteten Szenarien überwiegt die Prozessenergie die graue Energie der Ausgangsstoffe deutlich (Abbildung 10).

Die Produktion benötigt bis zu 90 % der gesamten Prozessenergie und kann in Szenario 1 um 10 % bzw. um 20 % in Szenario 3 reduziert werden. Während durch die Beimengung von Wachs die Prozessenergie aufgrund geringerer Produktionstemperaturen verringert wird, erhöht sich eingebrachte graue Energie aufgrund der energieintensiven Produktion von Wachsen. Insgesamt steigt daher der Energieaufwand für die Herstellung einer FE Gussasphalt durch Wachsmodifikation von 504 GJ auf 539 GJ (+7 %). Der Ersatz von Kantkorn durch Rundkorn wiederum verringert sowohl die Prozessenergie aufgrund geringerer Produktionstemperaturen, als auch die eingebrachte graue Energie der Ausgangsstoffe. Dies liegt an der vergleichsweise weniger energieintensiven Erzeugung von Rundkorn. Daher sinkt bei Szenario 3 trotz Wachs-Modifikation aufgrund der Rundkornbeimengungen der Energieaufwand einer FE von 504 GJ auf 461 GJ (-9 %).

Kosten

Die Material- und Energiekosten pro FE betragen zwischen 30.000 und 35.000 Euro (Abbildung 11, siehe Seite 22). 99 % der gesamten Kosten fallen dabei auf den Abschnitt der Produktion. Dabei nehmen die Materialkosten mit 95 % an den Gesamtkosten den Hauptanteil im Vergleich zu den Kosten für Prozessenergie (5 %) ein.

Bitumen zeigt sich in allen Szenarien als kostenintensivster Faktor (64 bis 75 % der Gesamtkosten). Die Energiekosten während des Produktionsprozesses dominieren die Energiekosten über den gesamten Lebenszyklus und können in Szenario 1 um 10 % und in Szenario 3 um 20 % gegenüber dem Referenzfall reduziert werden. Zwar scheinen diese Kosteneinsparungen pro FE im Vergleich zu den Materialkosten gering, jedoch können sich auf betriebswirtschaftlicher Ebene deutliche Auswirkungen ergeben, wenn größere Baulose mit entsprechenden Einbauleistungen (d.h. dem vielfachen der hier betrachteten FE) berücksichtigt werden. Wachsmodifikation ermöglicht in Bezug auf die Kosten Einsparungen auf betriebswirtschaftlicher Ebene durch geringere Energiekosten (-9 %), jedoch erhöhen sich die Produktionskosten aufgrund der hohen Materialkosten für das Additiv (+11 %). Nachdem Rundkorn im Vergleich zu Kantkorn kostengünstiger in der Anschaffung ist, reduzieren sich bei Rundkornbeimengung sowohl Energie- als auch Materialkosten im Vergleich zu Szenario 1. Vom Standpunkt der Lebenszyklusanalyse aus ergibt sich ein wesentlicher Vorteil der Temperaturabsenkung von Gussasphalt durch die deutliche Einsparung von Partikelemissionen im Vergleich zum Referenzszenario. Zu beachten ist, dass es sich bei den diesen Berechnungen zugrunde liegenden Werten um auf Labormessungen basierende Abschätzungen handelt. Zudem können bis zu 20 % der Prozessenergie eingespart werden, wenn die Produktionstemperatur von 240 auf 190 °C gesenkt wird. Wachsmodifikation reduziert die Prozessenergie-Kosten, erhöht jedoch insgesamt die Lebenszykluskosten. Auf Basis der in diesem Projekt betrachteten Szenarien und bei Berücksichtigung von Materialien, Energie und Kosten, zeigt sich die Anwendung von Wachsen als kontrovers, während sich die Substitution von Kantkorn durch Rundkorn über den Lebenszyklus positiv sowohl auf den Energieverbrauch als auch auf die Kosten auswirkt.

Die Ergebnisse basieren auf Informationen und Untersuchungen, die zum Teil auf Abschätzungen beruhen und gewissen Schwankungen bei Kosten-, Material- und Energiedaten unterliegen. Daher ist die Übertragung dieser Ergebnisse auf andere geographische, technische oder wirtschaftliche Randbedingungen nur eingeschränkt möglich.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen eines umfassenden, interdisziplinären Forschungsprojekts wurden technische, ökologische und ökomische Aspekte von Temperaturabsenkung bei Gussasphalt untersucht. Dazu wurden im Wesentlichen vier Fälle betrachtet:

- ein Referenzmischgut MA 11 PmB 25/55-65 bei einer Produktionstemperatur von 240 °C (Szenario 0),
- ein temperaturabgesenktes Mischgut mit 4 M.-% Amidwachs zur Bindemittelmodifikation bei einer Produktionstemperatur von 210 °C (Temperaturabsenkung 30 °C) (Szenario 1),
- ein temperaturabgesenktes Mischgut, bei dem Kantkorn durch Rundkorn ersetzt wurde. Dadurch ist eine Temperaturabsenkung von ebenfalls 30 °C möglich. Somit ergibt sich eine Produktionstemperatur von 210 °C. (Szenario 2) sowie
- eine Kombination aus Wachsmodifikation und Rundkorn bei einer Produktionstemperatur von 190 °C (Temperaturabsenkung 50 °C) (Szenario 3).

Zunächst wurde das Potential zur Temperaturabsenkung auf Bitumenebene mittels Rotationalviskosimeter (RV) und auf Mischgutebene mittels Messung des Mischmoments in einem Labormischer bestimmt. Anschließend wurde für die vier Szenarien das Gebrauchsverhalten untersucht. Dazu wurde der Widerstand gegen

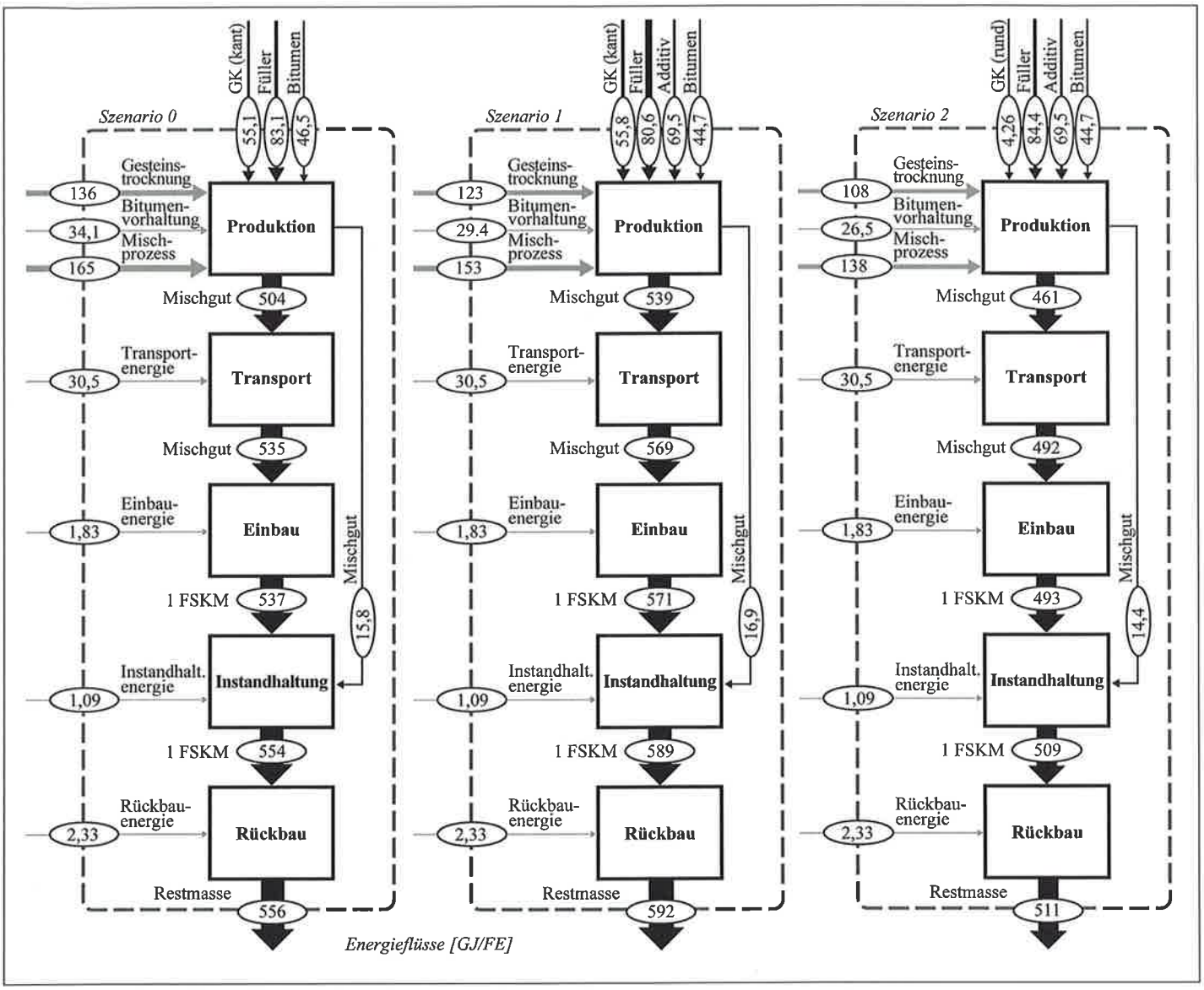

Abbildung 11: Materialkosten (Input von oben), Energiekosten (Input von links) und Gesamtkosten (Output) pro FE Gussasphalt

bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen mittels einaxialem Druckschwellversuch (UCCT) nach EN 12697-25 ermittelt. Zudem wurde der Widerstand gegen Tieftemperaturrisse mittels Abkühlversuch (TSRST) nach EN 12697-46 bestimmt.

Um gesundheitsrelevante Emissionen von Partikeln während der Produktion und des Einbaus zu untersuchen, wurden Emissionsmessungen mit Impaktoren im Labor während der Mischgutproduktion durchgeführt.

Eine Lebenszyklusanalyse, die eine funktionelle Einheit (FE) von einem Fahrstreifenkilometer (1000x3,75x0,05 m) berücksichtigt, wurde durchgeführt, um Energie- und Materialflüsse, sowie Kosten über den gesamten Lebenszyklus (20 Jahre) einer Gussasphalt-Deckschicht zu untersuchen und Änderungen durch Temperaturabsenkung bewerten zu können.

Aus den Ergebnissen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Bei der Ermittlung der möglichen Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation zeigen sich große Unterschiede zwischen den Betrachtungsebenen Bitumen und Mischgut. In einigen Fällen unterschätzt die Bitumenebene das Absenkpotential, teilweise wird das Potential jedoch auch überschätzt. Daher wird empfohlen das Absenkpotential auf Mischgutebene zu ermitteln. Dabei ist ein Labormischer mit einer Erweiterung zur Ermittlung des Mischmoments ein geeignetes Instrument.
  Eine kleinmaßstäbliche Ermittlung wie im FGSV-Merkblatt M TA 2011 hat sich in vorangegangenen Projekten als wenig geeignet herausgestellt.
- Eine Substitution von Kantkorn, das gemäß derzeit gültigen Normen für Gussasphalt vorgeschrieben ist, durch Rundkorn erlaubt eine Temperaturreduktion von 30 K. Diese Reduktion entspricht dem Absenkpotential, das bei einer Bindemittelmodifikation mit 4 M.-% Amidwachs auftritt. Eine kombinierte Anwendung von Rundkorn und Amidwachs führt zu einer Temperaturreduktion bei der Herstellung von 50 K.
- Der Widerstand gegen bleibende Verformung für das Mischgut mit Rundkorn ist vergleichbar mit dem des Referenzmischguts. Damit konnte gezeigt werden, dass Rundkorn keinen Einfluss auf das Verhalten bei hohen Temperaturen (+50 °C) hat. Bei Wachsmodifikation des Bindemittels verdoppelt sich der Widerstand gegen bleibende Verformungen. Dies gilt unabhängig von der eingesetzten Kornform.
- Der Widerstand gegen Risse bei tiefen Temperaturen ist für alle vier untersuchen Szenarien auf gleichem Niveau. Die Bruchtemperaturen liegen zwischen -33 und -36 °C. Damit kann allen Mischgütern ein hoher Widerstand gegen Tieftemperaturrisse attestiert werden. Modifikation mit Amidwachs führte in diesem Fall nicht zu einer Verringerung des Risswiderstands.
- Die Emissionsmessung von Partikeln (PM_{10}) während der Mischgutproduktion im Labor zeigt, dass mehr als 80 % der Emissionen or-

ganischen Ursprungs sind. Eine Temperaturreduktion von 240 auf 190 °C (-50 °C) führt zu einem dramatischen Abfall der Partikelemissionen auf ein Fünftel. Die Größenverteilung der Partikel macht ersichtlich, dass mehr als 80 % einen äquivalenten Durchmesser von kleiner als 2,5 µm zeigen.

- Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass etwa 40 kg PM_{10}-Emissionen über den Lebenslauf einer FE Gussasphalt im Referenzfall auftreten. Bei Temperaturreduktion um 50 °C reduziert sich diese Partikelmasse um 40 %. Die Hälfte der über den Lebenszyklus emittierten Partikel fallen beim Einbau an.
- In Bezug auf den Energieverbrauch entfallen 90 % der gesamten Prozessenergie auf die Produktion von Gussasphalt. Dieser Aufwand kann um 10% reduziert werden, wenn die Produktionstemperatur um 30 °C reduziert wird bzw. um 20 % bei einer Reduktion um 50 K.
- 99 % der gesamten Material- und Energiekosten (33.000 Euro) für einen Fahrstreifenkilometer fallen bei der Produktion an. Dabei sind wiederum 95 % für Materialkosten zu veranschlagen. Die Energiekosten können um 10 bzw. 20 % reduziert werden, wenn die Produktionstemperatur um 30 bzw. 50 °C abgesenkt wird.

Die in dieser Publikation dargestellten Ergebnisse basieren auf einer umfassenden Untersuchung, die bis dato auf Laboruntersuchungen beschränkt ist. Der nächste Schritt dieses Projekts umfasst die großtechnische Produktion aller hier beschriebenen Gussasphalt-Varianten, sowie das Anlegen von Teststrecken. Diese Strecken werden einer regelmäßigen Zustandserfassung unterzogen, um die in der hier präsentierten Studie gezeigten Laborergebnisse zu validieren und eine bessere Datengrundlage für weitere Lebenszyklusanalysen zu schaffen. Die Lebenszyklusanalysen werden sich im nächsten Projektschritt auf die Abschnitte „Produktion" und „Einbau" konzentrieren, da diese beiden Abschnitte am stärksten durch Mischgut-Modifikationen des Asphalts bzw. die Produktionstemperaturen beeinflusst werden. Zudem werden auch Untersuchungen zum Einfluss der Produktionstemperatur auf Kurz- und Langzeitalterung durchgeführt, um abschätzen zu können wie sich eine Änderung der Produktionstemperatur auf die Lebensdauer auswirkt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), sowie beim Klima- und Energiefonds und der Wirtschaftskammer Wien für die Förderung wesentlicher Teile dieser Arbeit.

Literatur

Biro, S., Gandhi, T. & Amirkhanina, S. 2009. Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, 21, 316-323.

Brunner, P. H. & Rechenberger, 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.

Cananda, 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 Characterisation of Bituminous Materials, Vols 1 and 2, 627-638.

Cavalli, F., Vianna, 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. & Isacsson, 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, SetacC ; 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. & Guiliani, 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.

Rühl, 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., Katianova, 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.

Vandenoosteerkamp, 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.

Anschrift des Verfassers:
Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Hofko
Technische Universität Wien
Institut für Verkehrswissenschaften
Gußhausstraße 28/E230-3
1040 Wien
bernhard.hofko@tuwien.ac.at
www.ivws.tuwien.ac.at