

Einfluss von Kornform und Wachsmodifikation auf technische, ökonomische und ökologische Eigenschaften von Gussasphalt – Teil 2

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. (M. Sc.)
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

Mit diesem Teil wird der Beitrag abgeschlossen, dessen Teil 1 im Heft 4/2016 dieser Zeitschrift erschienen ist.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Temperaturabsenkung

Eine umfangreiche Bearbeitung der Temperaturabsenkung auf Bitumen- und Mischgutebene mit detaillierten Darstel-

lungen 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.

Bild 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 13,6 K und 22,2 K. Für das Polyethylenwachs zeigt die Bitumenebene höheres Absenkpotezial als die Mischgutebene. Der Unterschied beträgt hier 7,3 K. Die Reihung der einzelnen Produkte stimmt jedoch für beide Betrachtungsebenen überein: Polyethylenwachs mit dem geringsten Potenzial, gefolgt von Fischer-Tropsch-Wachs und Amidwachs.

Rechts in Bild 6 ist der Einfluss der Kornform auf die Temperaturabsenkung dargestellt. Je nachdem welche Kornfraktion substituiert wird, ergeben sich Absenkpoteziale zwischen 23,1 K (Substitution Kornklasse 0/4) bis 36,7 K (Substitution Kornklasse 0/11).

Damit zeigt sich, dass das Absenkpotezial 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 Absenkpotezial um 8,2 K bis 13,6 K höher als bei Amidwachs-Modifikation.

5.2 Gebrauchsverhalten

Auf Basis der oben dargestellten Ergebnisse zum Absenkpotezial 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 in Abschnitt 3 dargestellten Szenarien untersucht.

5.2.1 Beständigkeit gegen bleibende Verformungen

Bild 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 zugehörigen 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 Ein-

fluss 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.

5.2.2 Beständigkeit gegen Kälterisse

Bild 8 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 überschreiten. Im Diagramm sind jeweils Mittelwerte aus drei Einzelversuchen mit der zugehörigen Standardabweichung ersichtlich.

Festzustellen ist, dass die Bruchtemperatur bei allen Mischgütern zwischen - 33 °C 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. Andererseits 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 Wachsansatzes eine deutliche Erhöhung

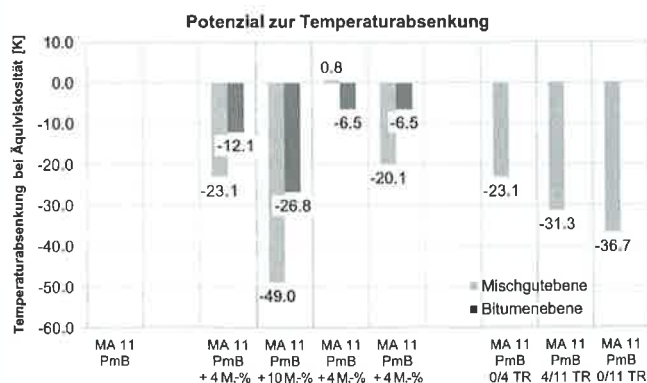


Bild 6: Vergleich der Temperaturabsenkung auf Bitumen- und Mischgutebene

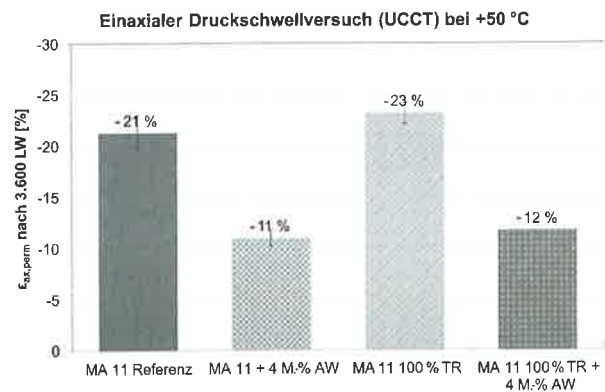
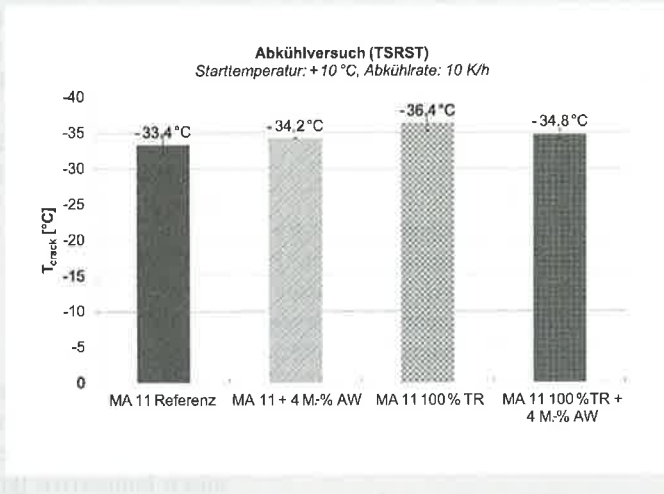


Bild 7: Ergebnisse der einaxialen Druckschwellprüfung (UCCT)

Bild 8: Ergebnisse der Abkühlprüfung (TSRST)



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.

5.3 Emissionsanalyse während der Mischgut-Produktion

Die quantitative Analyse der PM₁₀-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 K führt dazu, dass die

	PM ₁₀ [mg/m ³]	OC [mg/m ³]	OC in PM ₁₀ [%]
Experiment 1			
Filter 1 (1 m)	10,0 ± 0,2 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: PM₁₀-Filter-Immissionsanalyse von Szenario 0 bei 240 °C

² Schwankungen ergeben sich aufgrund von Fehlerfortpflanzungen (wie Wäge- und Messfehler).

	PM ₁₀ [mg/m ³]	OC [mg/m ³]	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: PM₁₀-Filter-Immissionsanalyse von Szenario 3 bei 190 °C

Szenario	Emission [mg/kg]	Emission [g/m ²]
0	740	5,3
3	148	1,1

Tabelle 7: Berechnete PM₁₀-Emission von Szenario 0 und 3

PM₁₀-Emissionen auf ein Fünftel zurückzuführen. Die durch die Messungen ermittelten Werte beim Mischprozess wurden weiterverwendet, 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.

Bild 9 zeigt die ermittelte Größenverteilung der Partikelemission, wie 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.

5.4 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.

5.4.1 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 PM₁₀, die während des Lebenszyklus einer FE Gussasphalt auftreten. Im Referenzszenario treten 40 kg PM₁₀ pro FE auf. Diese Emissionen können durch Temperaturabsenkung bei der Produktion um bis zu 40 % reduziert werden.

Mit 50 % an den gesamten emittierten PM₁₀ trägt der Einbau von Gussasphalt bei Berücksichtigung der gesamten Lebensdauer den größten Anteil an Emissionen. Auch Beiträge aus der benötigten 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) als auch aus der Energiebereitstellung (d. h. aus den Energieträgern) herrühren. Auf der Output-Seite sind zur Erstellung einer geschlossenen Materialbilanz zudem weitere Emissionen, z. B. CO₂, 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.

5.4.2 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 (Bild 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 %).

5.4.3 Kosten

Die Material- und Energiekosten pro FE betragen zwischen 30.000 und 35.000 Euro (Bild 11). 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 Einbauleis-

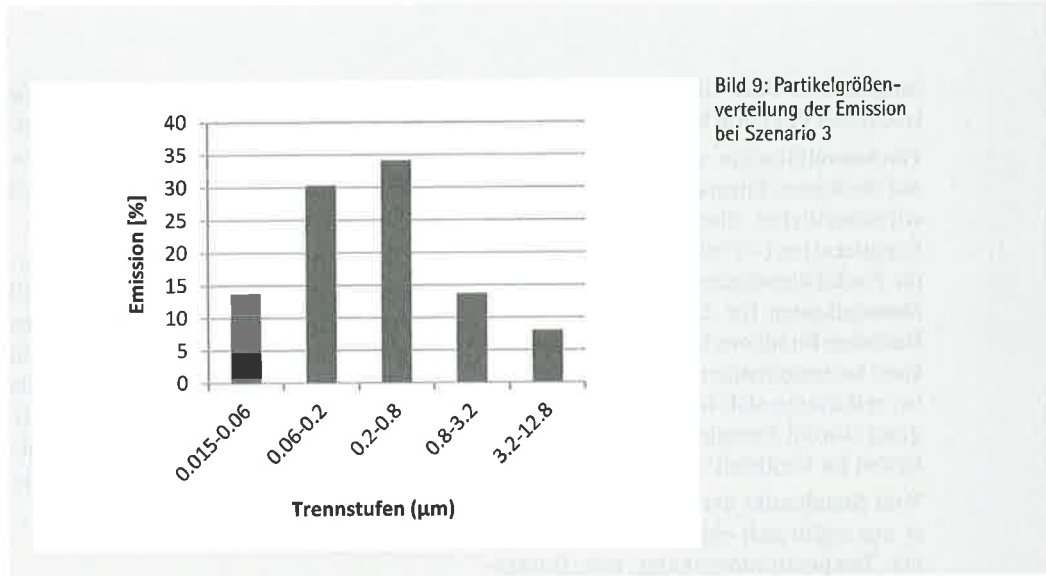


Bild 9: Partikelgrößenverteilung der Emission bei Szenario 3

Partikel (kg/kg)	Szenario 0(Referenz)			Szenario 1			Szenario 3			
	Materialbedarf (t/FE)	Partikel (kg/FE)	Anteil (%)	Material t/FE	Partikel (kg/FE)	Änderung gegen Referenz (%)	Materialbed. t/FE	Partikel (kg/FE)	Änderung gegen Referenz (%)	
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	39	10.3	24.3	37	9.9	-4.0	37	9.9	-4.0
Additiv	2.56E-06	0	0.0	0.0	2	0.0	NA	2	0.0	NA
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 PM₁₀ pro FE: Ökologischer Rucksack der Ausgangsstoffe und Prozessemissionen aus Produktion, Einbau, Erhaltung und Rückbau sind berücksichtigt

tungen (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. Zudem können bis zu 20 % der Prozessenergie eingespart werden, wenn die Produktionstemperatur von 240 °C 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 geografische, technische oder wirtschaftliche Randbedingungen nur eingeschränkt möglich.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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

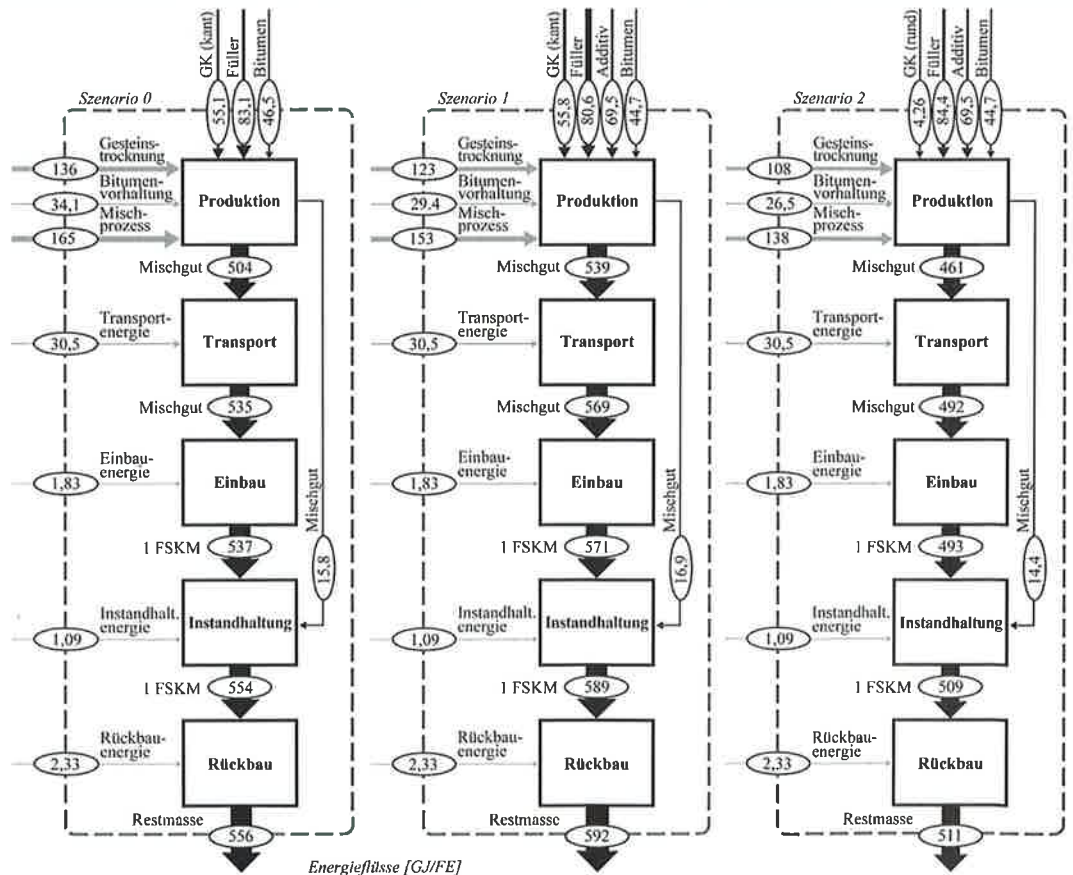
- Ein Referenzmischgut MA 11 PmB 25/55-65 bei einer Produktionstempe-

ratur von 240 °C (Szenario 0)

- Ein temperaturabgesenktes Mischgut mit 4 M.-% Amidwachs zur Bindemittelmodifikation bei einer Produktionstemperatur von 210 °C (Temperaturabsenkung 30 K) (Szenario 1)
- Ein temperaturabgesenktes Mischgut, bei dem Kantkorn durch Rundkorn ersetzt wurde. Dadurch ist eine Temperaturabsenkung von ebenfalls 30 K möglich. Somit ergibt sich eine Produktionstemperatur von 210 °C. (Szenario 2)
- Eine Kombination aus Wachsmodifikation und Rundkorn bei einer Produktionstemperatur von 190 °C (Temperaturabsenkung 50 K) (Szenario 3).

Zunächst wurde das Potenzial zur Temperaturabsenkung auf Bitumenebene mittels Rotationalviskosimeter (RV) und auf Mischgutebene mittels Messung des Mischmoments in einem Labormischer ermittelt. Anschließend wurde für die vier Szenarien das Gebrauchsverhalten ermittelt. Dazu wurde der Widerstand gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen mittels einaxialem Druck-

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



schwellversuch (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 (1.000 x 3,75 x 0,05 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 Fäl-

len unterschätzt die Bitumenebene das Absenkpotenzial, teilweise wird das Potenzial jedoch auch überschätzt. Daher wird empfohlen, das Absenkpotenzial 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 Absenkpotenzial, 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 untersuchten Szenarien auf gleichem Niveau. Die Bruchtemperaturen liegen zwischen - 33 °C 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 (PM₁₀) während der Mischgutproduktion im Labor zeigt, dass mehr als 80 % der Emissionen organischen Ursprungs sind. Eine Temperaturreduktion von 240 °C auf 190 °C (- 50 K) 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.

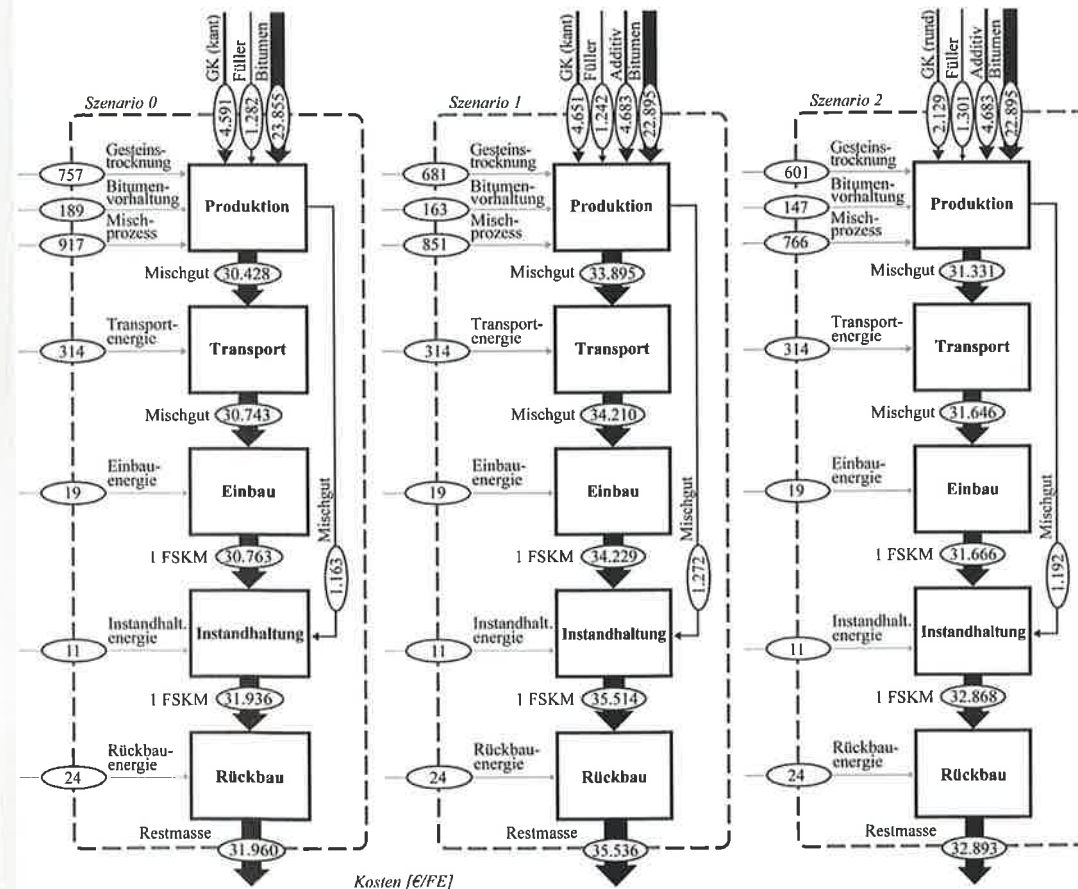


Bild 11: Materialkosten (Input von oben), Energiekosten (Input von links) und Gesamtkosten (Output) pro FE Gussasphalt

- Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass etwa 40 kg PM₁₀-Emissionen über den Lebenslauf einer FE Gussasphalt im Referenzfall auftreten. Bei Temperaturreduktion um 50 K reduziert sich diese Partikelmasse um 40 %. Die Hälfte der über den Lebenszyklus emittierten Partikel fällt 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 K 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 K bzw. 50 K 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.

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.; Barbatì, 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.; Hurman, 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

Riehmman, 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 characterization 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