

Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen

Die Ansprüche an die Umwelt steigen nicht nur für Autos und Lastwagen, sondern auch für den Asphalt, auf dem sie fahren. Deshalb wird in nord- und mitteleuropäischen Ländern immer mehr Asphalt recycelt. Die Hersteller stehen jedoch vor einem Dilemma, denn die Abluftqualität am Werksstandort verschlechtert sich durch Umstellung der Produktion auf Recyclingprodukte. Im Rahmen einer Ökobilanz über den gesamten Lebensweg verschiedener Asphaltmischungen konnten Experten der Ostschweizer Fachhochschule OST Standort Rapperswil aufzeigen, dass die Gesamtbilanz von Recycling-Asphalt dennoch positiv ist. Im Vergleich der insgesamt sechs untersuchten Asphaltprodukt-Varianten wird klar: Je höher der Anteil an Sekundärrohstoffen, desto geringer die Umweltbelastung im Lebensweg von Asphaltbelägen. Den stärksten Einfluss hat das Bindemittel Bitumen, ein Nebenprodukt aus der Erdölverarbeitung. Direkt dahinter folgen die Umweltbelastungen, die durch Herstellung und Transport der Kiessande (Splitt und Brechsand) entstehen. Die anlagenspezifischen Luftemissionen hingegen sind von untergeordneter Bedeutung. Unter dem Strich lässt sich also festhalten: Obwohl bei der Produktion von Recycling-Asphalt am Werksstandort mehr Schadstoffe an die Luft abgegeben werden, sprechen die Gesamt-Ökobilanzen deutlich für das Recycling. Bei der Produktion von Asphalt aus frischen Rohstoffen wäre nur schon die Umweltbelastung dreimal höher als beim Asphalt, der zu 60 Prozent aus Sekundärrohstoffen aus dem Strassenbau besteht.

Environmental standards for motor vehicles have tightened in recent years just as well as standards for the pavements they are driving on. Currently, authorities in Northern and Middle European countries encourage asphalt recycling. Asphalt producers, however, are in the dilemma of choosing between closing material cycles and optimizing air quality at production sites as hazardous air emissions increase when using asphalt waste in production. Experts at the University of Applied Sciences Eastern Switzerland investigated the environmental impacts of different asphalt mixtures during the product life-cycle. Their LCA study reveals that recycling asphalt reduces environmental impacts. For three different asphalt mixtures produced with either high or low temperature the study shows clear advantages of a higher content of secondary raw material for the overall environmental performance. The binding agent bitumen – a by-product of processing crude oil – contributes most to the product life-cycles environmental impact. The environmental load from production and transportation of aggregates comes second. Air emissions at the construction, however, are of minor importance with regard to the whole life-cycle of asphalt pavements. Bottom line: Even though the use of recycling asphalt leads to higher air pollution at the production site, the life-cycle assessment clearly speaks in favour of recycling.

1 Ausgangslage

Seit mehr als 30 Jahren wird in Zentral-, Nord und Nordwesteuropa Ausbausphalt, nachfolgend RAP genannt (engl. Reclaimed Asphalt Pavement), in Form von Asphaltgranulat wiederverwendet, wobei die Recyclingquoten in neuen Asphaltsschichten 2010 noch bei etwa 20 % lagen. Bedingt durch



technische Neuerungen der bestehenden Asphaltmischanlagen und die guten Erfahrungen aus internationalen Studien und Pilotstrecken sind heute deutlich höhere Zugaberraten an RAP technisch möglich und angestrebt (z. B. bis 60 M.-%, bzw. 70 M.-% in Asphalttrag- und Fundationsschichten, vgl. SN 640 431-1). Die Konzeption eines Asphaltes mit einer hohen RAP-Zugaberrate erfolgt derzeit in Europa mittels konventionelle Labor-Prüfverfahren. Mit zunehmender Komplexität bitumenhaltiger Bindemittel, insbesondere bei modifizierten Bitumen, stossen diese Prüfverfahren an ihre Grenzen und liefern teilweise widersprüchliche und unplausible Ergebnisse. Es besteht deshalb die Gefahr, dass eine nachhaltige Asphaltkonzeption und damit eine optimale Asphaltlebensdauer nicht erreicht werden können, wenn die Zusammensetzung des neuen Asphaltes mit RAP allein auf der Grundlage konventioneller Untersuchungen basiert. Neben solchen technischen Bedenken, die dort zu einem zurückhaltenden RAP-Einsatz führen, wo neuere Prüfverfah-

ren noch nicht etabliert sind, besteht aber noch ein anderer Konflikt, der mancherorts die Wiederverwendung dämpft: die Schadstoffproblematik bei der Produktion von Asphalt mit RAP.

Schadstoffe werden nicht nur durch die Fahrzeuge in die Luft geblasen, sondern auch die Herstellung, die Verarbeitung und

■ Verfasser

Prof. Dr. Susanne Kytzia
susanne.kytzia@ost.ch

OST Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Bau und Umwelt (IBU)
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil

Thomas Pohl
thomas.pohl@ost.ch

OST Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil

Recycling-Anteil	Niedertemperaturasphalt	Heissasphalt
0 %	L0	H0
30 %	L3	H3
60 %	L6	H6

Tabelle 1: Benennung der betrachteten Asphaltprodukt-Varianten

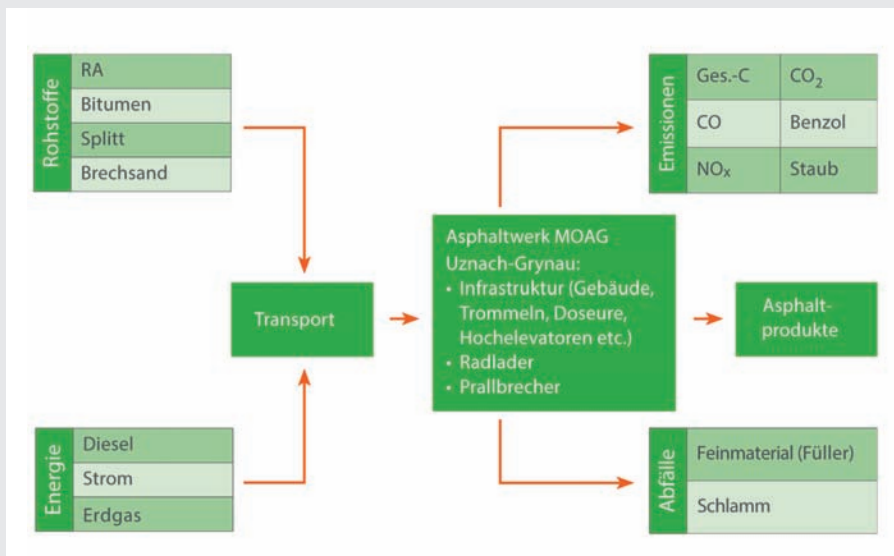


Bild 1: Ökobilanz-Modell zum Vergleich verschiedener Asphaltarten des betrachteten Asphaltmischgutwerks

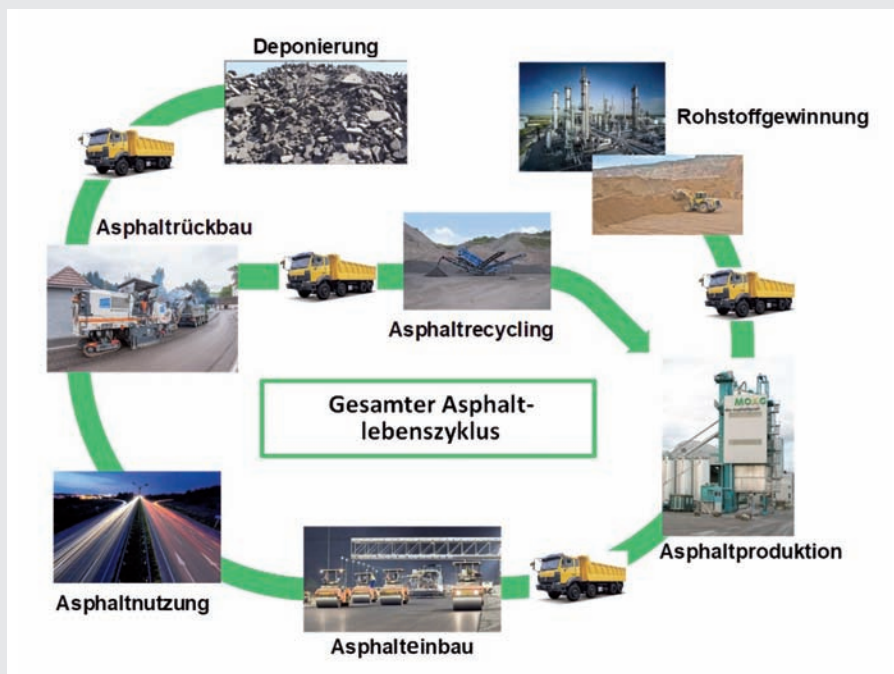


Bild 2: Gesamter Asphalt-Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung/Verwertung

die Entsorgung von Strassenbelägen verursachen umweltschädliche Emissionen. Ein Problem ist der RAP, der bei der Erneuerung unseres Strassennetzes vermehrt anfällt. Seine Qualität variiert erheblich und er kann gesundheitsschädliche Stoffe enthalten. Belagshersteller stehen vor der Herausforderung,

aus diesem Abfallstoff ein hochwertiges Recyclingprodukt herzustellen. Aus Sicht der Ressourceneffizienz im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft wäre es wünschenswert, den ausgebauten Strassenbelag aufzubereiten und als Sekundärbaustoff wieder im Mischgut als Trag-, Binder und

Deckschichten sowie zur Verstärkung der Foundation einzusetzen. Deshalb wird in nord- und mitteleuropäischen Ländern immer mehr Asphalt recycelt. Die Belagshersteller stehen jedoch vor einem Dilemma, wenn sich die Abluftqualität am Werkstandort infolge einer Umstellung der Produktion auf Recyclingprodukte verschlechtert. In den letzten Jahren konnte nämlich festgestellt werden, dass die Emissionen von flüchtigen organischen Kohlenstoffen (VOC) bei der Produktion deutlich ansteigen, wenn RAP in der Produktion eingesetzt wird.

Im Umweltbereich kann sich daher ein Konflikt ergeben zwischen dem Ziel des Schliessens der Materialkreisläufe einerseits und der Belastung der Luft durch organische Kohlenstoffe am Produktionsstandort andererseits. Aktuelle Forschungsergebnisse weisen auf die erheblichen Emissionen von Luftschadstoffen während der Lagerung, des Verlags, des Einbaus sowie der Nutzung des Asphalts hin, die bislang in Ökobilanzstudien grossteils aufgrund mangelnder Daten vernachlässigt wurden [1]. Es stellt sich nun die Frage, ob dieses Phänomen den Nutzen der Herstellung von Recycling-Asphalten grundsätzlich infrage stellt.

Dieser Frage sind Frau Prof. Dr. Susanne Kytzia vom Institut für Bau und Umwelt und Thomas Pohl vom Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik der Ostschweizer Fachhochschule OST in Rapperswil nachgegangen. Der vorliegende Beitrag basiert auf einer Umweltbewertung mittels Ökobilanz und liefert eine Grundlage, um diesen Zielkonflikt zu analysieren.

2 Stand der Forschung

Ökobilanzen für Asphalt bilden in einigen Ländern die Grundlage für Umweltproduktdeklarationen (EPD) [2]. Allerdings sind erst wenige detailliert dokumentierte Studien zu diesem Thema in der deutsch- bzw. englischsprachigen Literatur vorhanden [3, 4, 5]. Der Vergleich wird vielfach durch die national unterschiedlichen Rahmenbedingungen erschwert (z. B. im Strommix oder bei den Transportdistanzen). In einer aktuellen Schweizer Studie im Auftrag des Bundesamts für Strassen werden die Vorteile von Niedertemperaturasphalten untersucht [3]. Sie liefert wichtige Erkenntnisse über die Umweltbelastungen im Lebensweg von Asphaltbelägen. Im Gegensatz zu schon vorhandenen Studien fokussiert die hier vorgestellte Un-

Zusammensetzung [kg/t Asphalt]	Deckschicht AC 8 S, 0 % RAP	Binderschicht AC B 22, 0 % RAP	Deckschicht AC 8 S, 50 % RAP	Binderschicht AC B 22, 60 % RAP
Brechsand	460	363	98	40
Splitt	479	602	380	344
Bitumen	61	35	22	16
RAP	0	0	500	600
Total	1'000	1'000	1'000	1'000

Tabelle 2:
Zusammensetzung der in der Ökobilanz verwendeten Asphaltrezepturen

tersuchung auf die Umweltwirkung der Luftschadstoffe, insbesondere auf einen Vergleich der Umweltwirkungen am Betriebsstandort mit den Umweltwirkungen im gesamten Lebensweg von Bindemitteln als Teil des Strassenoberbaus. Unsere Resultate werden später im Kapitel „Diskussion“ in Zusammenhang mit Ergebnissen internationaler Studien gesetzt und diskutiert.

3 Zielsetzung und Inhalt

In diesem Beitrag werden einerseits die Umweltwirkungen der Belagsherstellung detailliert untersucht. Andererseits werden die Umweltwirkungen von verschiedenen Asphaltprodukten mit einem unterschiedlichen Anteil an Sekundärmaterial im gesamten Lebensweg einander gegenübergestellt. Dabei wird auch gezeigt, welchen Beitrag eine Reduktion der Materialtemperatur in den Trocknertrommeln zur Optimierung leisten kann.

3.1 Belagsherstellung

Zur Ökobilanz der Belagsherstellung wurden

- der Prozessablauf der Asphaltherstellung an einem Betriebsstandort eines ostschweizerischen Asphaltherstellers (in der Folge MOAG genannt) systematisch beschrieben und die Stoff- und Energieflüsse für alle relevanten Betriebszustände erfasst.
- alle Prozesse im Lebensweg der untersuchten Asphaltprodukte beschrieben. Mithilfe von Inventardaten aus der Umweltdatenbank KBOB Bauökobilanzdatenbestand 2016 [6] und Ecoinvent 3.6 [7] wurden anschliessend die Umweltwirkungen abgeschätzt.
- Ökobilanzen für die untersuchten Asphaltprodukte mit der Software SimaPro V9 [8] erstellt (inkl. Unsicherheitsanalysen und Interpretation).

In einem ersten Schritt wurden die zu untersuchenden Asphaltprodukte festgelegt:

- Asphaltbeton der Mischgutsorte AC 8 S für Deckschichten mit Recyclinganteil 0 %,
- Asphaltbeton der Mischgutsorte AC B 22 für Trag- und Binderschichten mit Recyclinganteil 30 % und
- Asphaltbeton für Tragschichten mit Recyclinganteil 60 %.

Für diese drei Produkte wurden jeweils zwei Szenarien betrachtet: (i) Herstellung als Niedertemperaturasphalt und (ii) Herstellung als Heissasphalt. Die verschiedenen Asphaltprodukt-Varianten sind wie in Tabelle 1 dargestellt benannt.

Daraus ergeben sich sechs „Betriebszustände“ für die Asphaltherstellung, für die detaillierte Daten zu den Energieverbräuchen der Trocknertrommeln sowie den Luftemissionen erfasst wurden.

In einem zweiten Schritt wurden die Stoff- und Energieflüsse der Asphaltherstellung am Standort des ostschweizerischen Asphaltherstellers untersucht. Für die Ökobilanzanalyse wurden folgende Daten vom Asphalthersteller zur Verfügung gestellt resp. durch den Hersteller der Asphaltanlage und durch das Amt für Umwelt des Kantons St. Gallen erhoben:

- Zerkleinerung Sekundärmaterialien: Betriebsstunden und Energieverbrauch der Baumaschinen (Radlader, Prallbrecher),
- Produktionsanlage: Stromverbrauch pro Jahr (Durchschnitt), Lebensdauer und jährliches Produktionsvolumen (Durchschnitt),
- Verbrauch an Erdgas/Erdöl für jeden der sechs untersuchten Betriebszustände (siehe oben) sowie jährliche Verbrauchsbzw. Produktionsmengen (zur Validierung),
- Abfallmengen unterschieden nach Feinmaterial (Füller), Schlämme aus der Entwässerung und sonstigem Abfall sowie Entsorgungswege,
- Messwerte für NO_x , VOC, CO, Gesamtstaub und Benzol für jede der sechs

untersuchten Asphaltprodukt-Varianten (Tabelle 1) sowie Volumenstrom und Produktionsmenge,

- Zusammensetzung der verschiedenen Asphaltprodukte (Rezepturen).

Bild 1 zeigt eine Übersicht der benötigten Daten für das Ökobilanz-Modell.

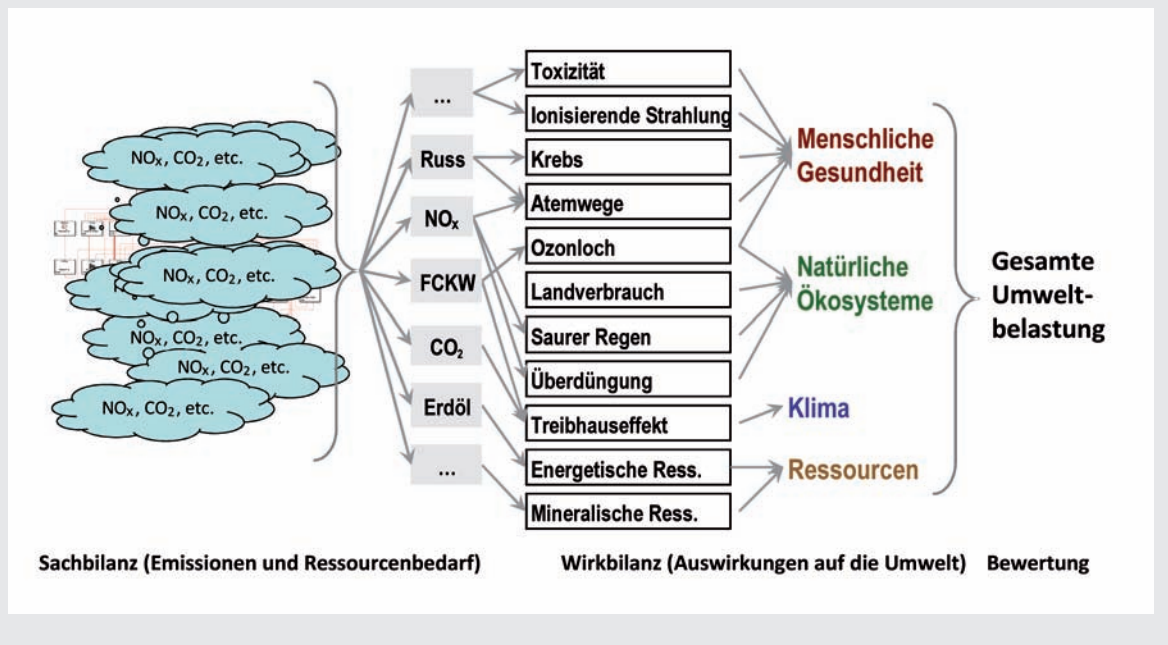
3.2 Gesamter Asphaltlebenszyklus

Nach der Auswertung der Ökobilanz auf Stufe Asphaltproduktionsstandort, wurde der gesamte Lebenszyklus von der Bereitstellung der Rohstoffe bis hin zur Entsorgung betrachtet (Bild 2). Die Grundlage bilden Daten aus einer Schweizer Studie aus Küsnacht im Kanton Zürich, [9].

Im Vordergrund der Studie stand die gross-technische Realisierung einer Teststrecke in der Gemeinde Küsnacht im Kanton Zürich, bei der Mischgut mit erhöhten RAP-Zugaberaten sowohl in der Deck- als auch in der Binderschicht verwendet wurde. Dabei fand die Umsetzung von hohen Recyclingquoten in Asphaltbelägen ohne Einschränkung in der Asphaltperformance statt. Es wurden Asphalte mit hohen Recyclinganteilen systematisch nach technischen und ökologischen Gesichtspunkten bewertet. Wobei zwei konzipierte Asphalte mit hohen RAP-Zugaberaten mit konventionellen Asphalten ohne RAP-Anteile verglichen wurden.

In der genannten Studie aus Küsnacht handelte es sich um den Asphalt AC 8 S in der Deckschicht und den Asphalt AC B 22 S in der Binderschicht. Bei den konventionellen Asphalten wurde normgerecht in der Deckschicht kein RAP beigegeben, auch in der Binderschicht wurde kein RAP verwendet. Im Gegensatz dazu wurde auf der Teststrecke mit erhöhten Recyclinganteilen ein Deckschichtasphalt AC 8 S mit 50 % und ein Binderschichtasphalt AC B 22 S mit 60 % RAP eingebaut. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der in der Studie verwendeten Asphaltrezepturen.

Bild 3: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanz bei einer gesamttaggregierenden Methode wie die UBP- oder ILCD-Methode [16]



Die Tragschicht wurde nicht mitberücksichtigt, da dort in der Regel der Recyclinganteil schon hoch ist und davon auszugehen ist, dass die Luftemissionen in der Nutzungsphase von untergeordneter Relevanz sind. Neben der Überprüfung technischer Messgrößen und der Asphaltperformance wie z. B. Ermüdungswiderstand oder Widerstand gegen Kälterissbildung wurde auch die Umweltwirkung von erhöhten RAP-Zugabemengen evaluiert. Dabei wurden zwei Szenarien ökologisch miteinander verglichen:

- Referenzszenario RS: Deckschicht AC 8 S mit 0 % RAP (Einbaustärke 3 cm), Binderschicht AC B 22 S mit 0 % RAP (Einbaustärke 10 cm).
- Alternativszenario AS: Deckschicht AC 8 S mit 50 % RAP (Einbaustärke 3 cm), Binderschicht AC B 22 S mit 60 % RAP (Einbaustärke 10 cm).

Die Grundlagendaten zur Belagsherstellung von der MOAG (siehe Abschnitt 3.1) konnten in der Künsnacht-Studie verwendet werden. Die Daten zum Einbau wurden von der Hüppi AG geliefert. Dabei war der Energiebedarf der Maschinen (Schwarzbelagsfertiger und Walzen) des Asphalteinbaus angegeben.

Die Daten zur Modellierung der Nutzungsphase stammen aus der Asphaltstudie vom Bundesamt für Strassen ASTRA [3] (PLANET-Studie). Dabei wurden auch PAK-Emissionen aus dem Leaching des Asphalts mitberücksichtigt, die durch eine Auswaschung durch Regenwasser auftreten können. Die Leaching-Raten von PAK aus Asphalt (mit und ohne RAP) wurden ebenfalls

durch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt der Schweiz EMPA in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich ETH experimentell bestimmt [10]. Die Messungen aus der PLANET-Studie vom ASTRA [3] decken sich mit den Messungen der Studie der EMPA und der ETH Zürich [10] respektive lagen die PAK-Leaching-Werte in der EMPA/ETH-Studie sogar noch leicht tiefer. Aus derselben Studie vom Bundesamt für Strassen ASTRA (PLANET-Studie) [3] wurde der Maschinen- und Energiebedarf für den Rückbau verwendet. Gleiches gilt für die Entsorgung/Verwertung des rückgebauten Asphalts. Mehr Details dazu finden sich im nachfolgenden Abschnitt 4 «Methoden».

4 Methoden

Zur Bewertung der Emissionen und Ressourcenverbräuche wurden die im Baubereich üblichen Wirkungskategorien „Treibhauspotenzial CO₂-Äquivalente“ und „Graue Energie MJ Öl-Äquivalente/Kumulierter Energieaufwand KEA“ verwendet. Zusätzlich wurden gesamttaggregierende Ökobilanzmethoden, welche ein eindeutiges und eindimensionales Ergebnis liefern, zur Analyse herangezogen: „Methode der ökologische Knappheit/Umweltbelastungspunkte UBP“ und die international anerkannte und breit abgestützte Bewertungsmethode ILCD (International Reference Life-Cycle Data System), welche besonders auch im EU-Raum häufig verwendet wird. Nachfolgend werden

die Wirkungskategorien und die Ökobilanzmethoden vorgestellt.

Treibhauspotenzial

Diese Wirkungskategorie berücksichtigt alle klimaschutzrelevanten Emissionen eines Produktes oder Prozesses über den gesamten Lebenszyklus. Sie quantifiziert die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO₂ auf Basis der Treibhauspotenziale des 5. Sachstandsberichts des IPCC (2013) [11].

Graue Energie

Wird auch „kumulierter Energieaufwand (nicht erneuerbarer Energien)“ genannt, weil die gesamt aufgewandte Energie über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder Prozesses kumuliert wird [12]. Diese Umweltwirkungskategorie zeigt dabei den direkten und auch den indirekten Energieverbrauch, welche über Charakterisierungsfaktoren in MJ Öl-Äquivalente umgerechnet werden. Diese Wirkungskategorie beinhaltet die energetischen Inputs für die Gewinnung, Herstellung und Entsorgung aller benötigten Materialien und Hilfsstoffe und bewertet dabei den Bedarf an nicht erneuerbaren primären Energieträgern wie Kohle, Öl oder Uran.

Ökologische Knappheit (UBP-Methode)

Diese Methode quantifiziert die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süßwasser, durch Emissionen in Luft, Ge-

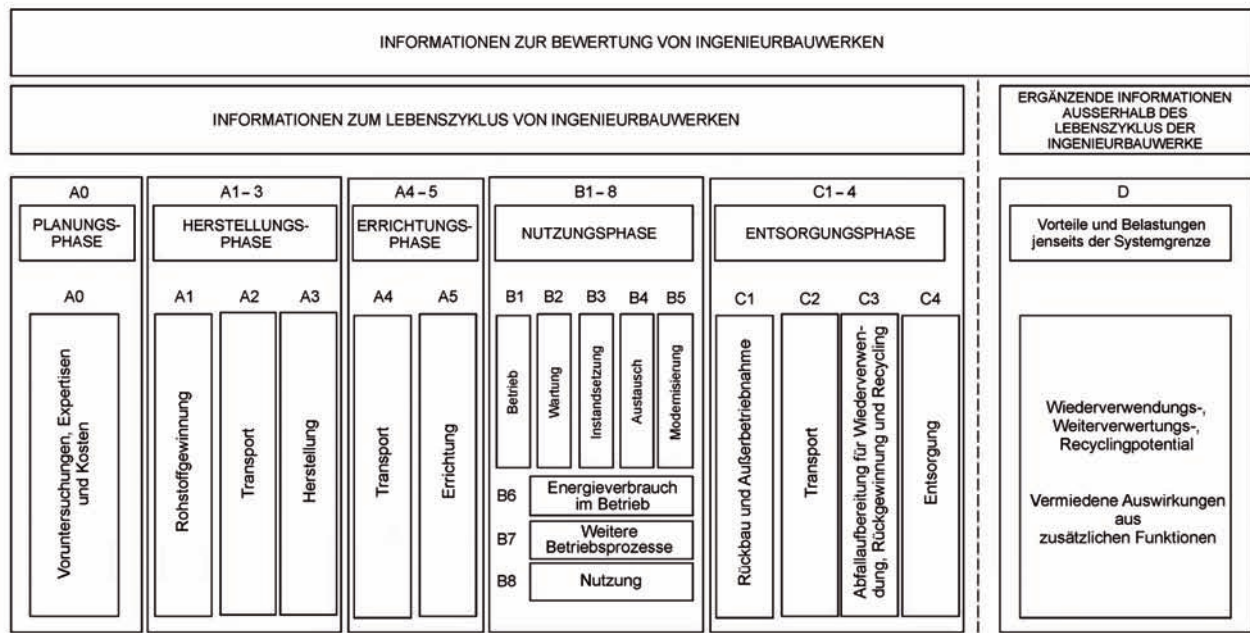


Bild 4: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [17].

wässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. Sie basiert auf einem Vergleich zwischen der aktuellen Belastung mit der gesellschaftspolitisch als zulässig angesehenen Belastung und wird daher international als „distance-to-target“-Ansatz bezeichnet. Eine Umweltbelastung ist demnach umso bedeutsamer, je weiter ein Land von der Erreichung der gesellschaftspolitisch akzeptierten Belastung entfernt ist. In der Schweiz sind die Ziele der Schweizer Umweltgesetzgebung bzw. Umweltpolitik massgeblich. Die Methode wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt auch besonders hilfreich als Entscheidungsgrundlage in verschiedenen Geschäftsbereichen privater wirtschaftlicher Unternehmen [13].

ILCD

Das ILCD (International Reference Life-Cycle Data System) Handbook [14] basiert auf den ISO-Standards 14'040/44 und liefert Empfehlungen für Behörden und Unternehmen hinsichtlich Ökobilanzdaten, -methoden und -bewertungen mit hoher Qualität und Konsistenz. Die Empfehlungen beinhalten eine Auswahl von 16 Wirkkategorien (u. a. Klimawandel, Humantoxizität, Versauerung, Landverbrauch, Ressourcenverbrauch etc.) basierend auf aktuellen und neuesten Erkenntnissen. ILCD v1.04 beinhaltet auch einen Normalisierungs- und Gewichtungsschritt.

Für die Gewichtung wurde der Vorschlag einer Studie des Joint Research Center der Europäischen Kommission in Konformität der EU27 verwendet [15].

Indikatoren der Wirkungsbilanz wie z. B. das Treibhauspotenzial oder der kumulierte Energieaufwand (KEA) decken jeweils nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Da die Berechnung dieser Indikatoren auf wissenschaftlichen Modellen basiert, haben sie eine hohe Akzeptanz.

Ein Interpretationsproblem besteht dann, wenn die verschiedenen Auswirkungen unterschiedliche Schlüsse zulassen. So kann z. B. ein untersuchtes Produkt wesentlich geringere Auswirkungen auf das Klima haben als ein anderes, jedoch viel grössere Auswirkungen auf die Gewässer. Ein eindeutiger und nachvollziehbarer Vergleich ist in diesem Fall unmöglich, da die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Hier helfen Methoden, mit denen man einen Gesamtindex für alle untersuchten Wirkungskategorien ermitteln kann – sogenannte vollaggregierte Methoden – wie „ILCD“ und „die Methode der ökologischen Knappheit 2013“.

Auch wenn die Anwendung dieser Methoden nicht der ISO-Norm 14'040 entspricht,

werden die Methoden in der hier vorgestellten Studie verwendet, um ein möglichst umfassendes Bild der Gesamtbelastung zu erhalten.

Die Ökobilanz stützt sich auf die Umweltdatenbank KBOB und Ecoinvent 3.6 sowie auf Betriebsdaten und Emissionsmessungen eines Werksstandorts in der Ostschweiz. Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, die Umweltbelastungen am Standort der Belagsherstellung in Bezug zu setzen zu den restlichen Umweltbelastungen im Lebensweg der hergestellten Asphaltbeläge. Daher wurde eine Tonne Asphalt ab Werk als Bezugseinheit gewählt. Beim Vergleich zwischen den Produktionsvarianten Niedrig- bzw. Heisstemperatur entspricht diese Bezugseinheit für jede der drei Produktvarianten einer funktionalen Einheit gemäss ISO Norm 14'040. Ein direkter Vergleich zwischen den drei in Tabelle 1 dargestellten Produktvarianten gemäss ISO Norm 14'040 ist jedoch nicht möglich, da diese Produkte unterschiedliche Funktionen erfüllen.

Bei der Definition der Systemgrenze stützen wir uns auf die kürzlich erschienene europäische Norm zur Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturbauten EN 15643-5 [17], (Bild 4). In der hier vorgestellten Studie werden zwei verschiedene Systemgrenzen gewählt:

- Systemgrenze 1 „Von der Wiege bis zum Werkstor/Cradle-to-Gate“: Für den Ver-

gleich zwischen den Umweltwirkungen am Standort der Produktionsanlagen und den Umweltwirkungen im gesamten Lebensweg wurde zunächst ein System analysiert, das nur die Herstellungsphase umfasst (Module A gemäss EN 15643-5). Sie wird gewählt, weil wir davon ausgehen, dass sich die Umweltwirkungen der untersuchten Produktvarianten beim Einbau, der Nutzung und des Rückbaus nicht signifikant unterscheiden. Daher werden diese Phasen des Produktlebenswegs in der hier vorgestellten Studie vernachlässigt. Diese Annahme wird in [3] bestätigt. Die funktionelle Einheit (Bezugseinheit) bezieht sich auf die Produktion von 1 Tonne Asphalt mit den in Abschnitt 3 definierten Eigenschaften.

- Systemgrenze 2 „von der Wiege bis zur Bahre/Cradle-to-Grave“: Um den kompletten Lebenszyklus des Asphalts aufzuzeigen, wurde die Systemgrenze erweitert. Gemäss EN 15643-5 [17] umfasst das analysierte System die Herstellungsphase der Baustoffe (Module A1 bis A3), die Errichtungsphase des Bauwerks (Module A4 und A5), einen Teil der Nutzungsphase des Bauwerks (Module B1 bis B5) sowie die Entsorgungsphase (Module C1 bis C4). Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D aus Bild 4) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt, da diese für die Asphaltherstellung nicht relevant sind. Diese Systemgrenze wurde gewählt, um die Ergebnisse aktueller Studien zu materialbedingten Umweltwirkungen während der Nutzungsphase mit einzubeziehen. Dazu wird ein zusätzliches Szenario analysiert.

In der Herstellungsphase werden die Rohstoffgewinnung, der Transport und die Herstellung der mengenmässig wichtigsten verwendeten Baumaterialien bzw. Bauelemente betrachtet (ca. 98 % der Masse aller eingesetzten Materialien). Der Schwerpunkt liegt auf den verwendeten Baumaterialien: Splitt, Brechsand, Bitumen und RAP. Für diese Materialien wurden die Prozessketten der Herstellung möglichst realistisch beschrieben.

In der Errichtungsphase werden der Transport der Baumaterialien bis zur Baustelle und die Bauprozesse (Einbau) betrachtet. In der Nutzungsphase werden nur diejenigen Auswirkungen betrachtet, die sich aus dem Betrieb, dem Unterhalt und der Werterhaltung des Bauwerks ergeben. Die Nutzung des Bauwerks hingegen durch die Verkehrs-

teilnehmer wird vernachlässigt (z. B. der Energieverbrauch der Fahrzeuge auf der Strasse und die daraus entstehenden Emissionen). Es wird davon ausgegangen, dass die Nutzungsdauer der Binder- und der Deckschicht bei 20 Jahren liegt. Die Nutzungsdauer wurde bei der Binder- und der Deckschicht identisch und unabhängig vom RAP-Anteil angenommen.

In der Entsorgungsphase wird das Bauwerk rückgebaut und die dabei entstehenden Materialien werden wiederverwendet oder als Abfälle entsorgt. Beim Rückbau wurde der schweizweite Mittelwert angenommen: 30 % wird abgelagert in einer Deponie und 70 % wiederverwertet als RAP. Dieser Wert wurde auch in der PLANET-Studie vom Schweizerischen Bundesamt für Strassen ASTRA verwendet [3]. Es werden alle damit verbundenen Prozesse (inkl. Transporte) betrachtet unter Annahme des aktuellen Stands der Technik. Gemäss EN 15643-5 [17] werden die Prozessketten der Entsorgungsphase soweit betrachtet bis das rückgebaute Material den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht. In der vorliegenden Studie wird dieser Ansatz im verwendeten Softwareprogramm SimaPro [18] umgesetzt durch Wahl der entsprechenden Allokationsmethode (mit «Alloc Rec» bzw. «Cut-off»-Bezeichnung) [7, 19]. Sie wird allgemein als «Recycled Content»-Modell bezeichnet [20]. Sie trennt den ersten Lebenszyklus eines Produktes aus Primärrohstoffen (z. B. Stahl aus der Verhüttung von Eisenerz) klar vom zweiten Lebenszyklus, indem Recyclingstahl genutzt wird, der aus dem im ersten Lebenszyklus anfallenden Eisenschrott hergestellt wird. Die Trennung («Cut-off») erfolgt, wenn das Eisen am Ende seiner ersten Gebrauchsphase der Recyclingsammlung zugeführt wird. Dann verliert der Schrott seine «Abfalleigenschaft» und wird als Sekundärrohstoff zum Ausgangspunkt des nächsten Lebenszyklus.

Die funktionelle Einheit für die erweiterte Systemgrenzenbetrachtung bezieht sich jeweils auf die Umweltwirkung pro 1 m² Strasse und Jahr.

Den verwendeten Ökoinventardaten liegen eine Reihe von Allokationen zugrunde, da es sich bei der Herstellung von Bitumen und der Aufbereitung des Ausbruchsasphalts zu Asphaltgranulaten um Kuppelproduktionen handelt:

- Im Herstellungsprozess in der Raffinerie wird Bitumen von den destillierbaren Anteilen des Erdöls getrennt und unter verbindlichen technischen Normen ge-

zielt aufbereitet. Da der Prozess der Erdölverarbeitung mehrere Produkte liefert (Diesel, Benzin, Kerosin, Bitumen etc.), muss die dabei entstehende Gesamtumweltwirkung auf die einzelnen Produkte verteilt werden. Dabei spricht man von einer Allokation oder Zuordnung. In der Umweltdatenbank Ecoinvent wird die Umweltwirkung der Rohölgewinnung massenmässig zugeordnet. Das heisst, das Produkt mit dem grössten Massenanteil am ökonomisch relevanten Gesamtoutput des Produktionsprozesses trägt den grössten Anteil der Gesamtbelastung der Rohölgewinnung. Bei der Erdölverarbeitung wird die Gesamtumweltbelastung anhand einer ökonomischen Allokation über den Marktwert des zu handelnden Gutes vorgenommen.

- Bei der Aufbereitung von Ausbruchsasphalt zu Asphaltgranulaten wird einerseits eine Entsorgungsdienstleistung erbracht und andererseits ein Sekundärrohstoff hergestellt. Bei der Bilanzierung werden sämtliche Umweltbelastungen der Aufbereitung dem Entsorgungsprozess zugerechnet. Die Asphaltgranulate stehen – aus Sicht der Umwelt – „belastungsfrei“ zur Verfügung.

Um die Ergebnisse aktueller Forschungsprojekte zu Emissionen während der Nutzung von Asphalt zu berücksichtigen, wird das folgende Szenario definiert:

Szenario «Materialbedingte Emissionen während der Nutzung des Strassenoberbaus»

Eine aktuelle Studie [1] zeigt, dass 1–5 g Luftschadstoffe (vor allem VOC flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub < 2.5 µm) pro kg verbaute Asphalt während der Nutzungsphase ausdünsten. Diese Werte beziehen sich auf einen Belag in Los Angeles (Kalifornien, USA) mit entsprechend starker Sonneneinstrahlung und hoher Temperatur (60 °C). Wird davon ausgegangen, dass pro kg Asphalt ca. 50 g Bitumen verwendet wird, entsprechen die in der Studie genannten Emissionen 2–10 % des gesamten Bitumens, welcher während der Nutzungsphase verdunsten würde. Um diese Erkenntnisse auf Schweizer Verhältnisse anzupassen, nehmen wir den Mittelwert von 6 % = 3 g Luftschadstoffe/kg Asphalt (2.7 g VOC und 0.30 g Feinstaub pro kg Asphalt) für unsere Abschätzung an, da in mittel- und nordeuropäischen Ländern der Asphalt während der Nutzungsphase in der Regel nicht gleich stark durch Sonnenlicht erwärmt wird wie in Los Angeles.

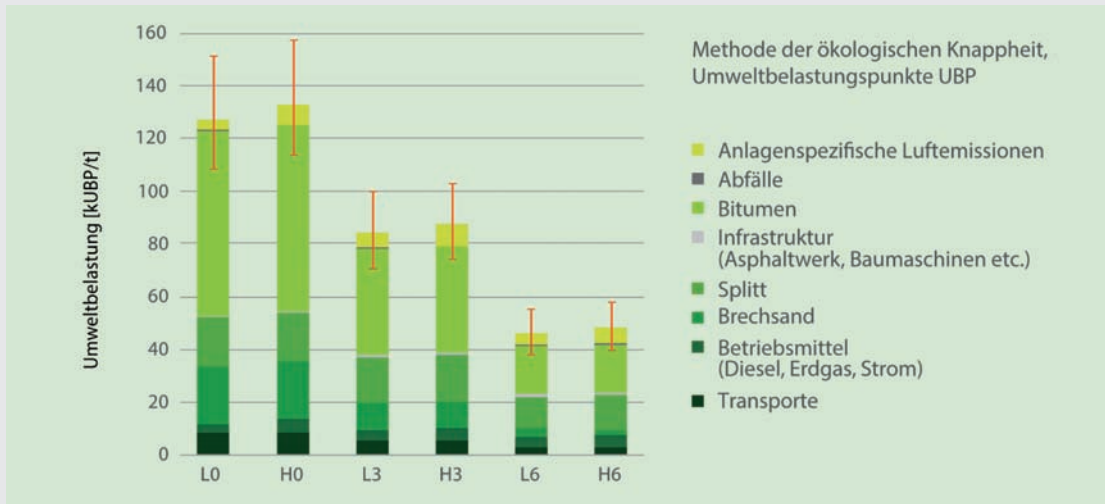


Bild 5: Ökobilanz verschiedener Asphaltproduktvarianten mit Auflösung nach Prozessbeitrag, berechnet mit der UBP-Methode. Die Aussagekraft der Resultate wird über die Fehlerindikatoren in Form eines 95-%-Konfidenzintervalls abgebildet

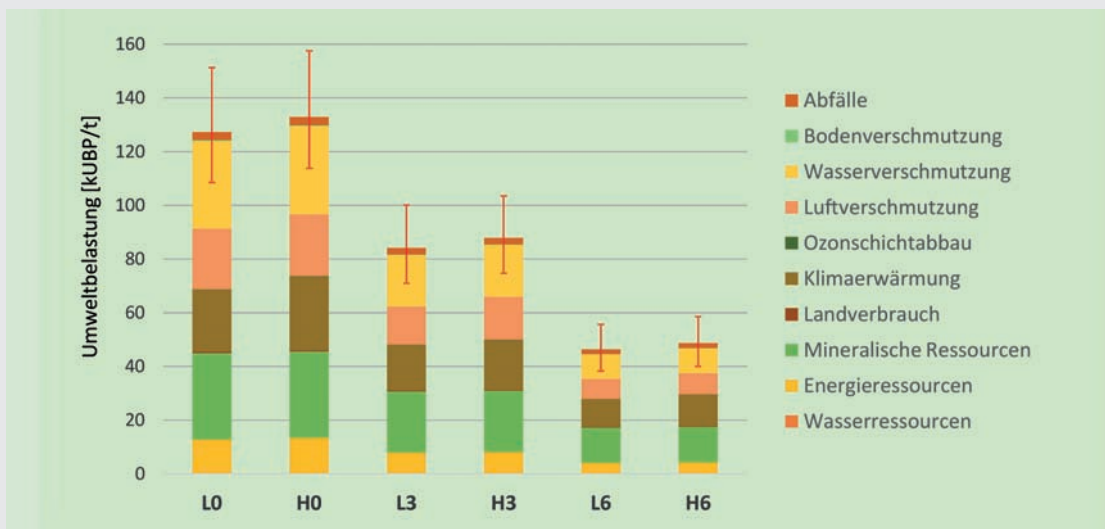


Bild 6: Ökobilanz verschiedener Asphaltproduktvarianten mit Auflösung nach Wirkungskategorie der UBPMethode. Die Aussagekraft der Resultate wird über die Fehlerindikatoren in Form eines 95-%-Konfidenzintervalls abgebildet

5 Resultate und Diskussion

5.1 Resultate und Diskussion Cradle-to-Gate-Betrachtung

Bild 5 zeigt das Ergebnis der Ökobilanz basierend auf der UBPMethode unter Berücksichtigung der Datenunsicherheit (Fehlerbereich gezeigt als 95-%-Konfidenzintervall). Die Ökobilanz von allen Asphaltproduktvarianten wird von der Bereitstellung der Rohmaterialien der Asphaltherstellung, insbesondere des Bitumens, dominiert. Dabei werden auch die Emissionen miteinbezogen, die bei der Ressourcenextraktion und -aufbereitung anfallen.

Bild 5 zeigt auch, dass die Belagsherstellung keine „abfallintensive“ Industrie ist, denn abgesehen von Füller (Mineralik < 0.063 mm) und dem Schlammsammler der Platzenzwässerung fallen keine nennenswerten Abfälle an. Auch die gesamte Infrastruktur des Mischgutwerkes, wie z. B. Trocknertröm-

mel, Doseure, Hochelevator, Radlader etc. tragen nur einen relativ kleinen Teil zur Gesamtbilanz bei.

Die Betriebsmittel und die Transporte verursachen die zweitniedrigsten Belastungen. Ein signifikanter Unterschied lässt sich auch in Bezug auf die verwendete Menge Asphaltgranulat (aus Ausbruchasphalt) feststellen. Denn je höher der Anteil an verwendetem Asphaltgranulat im Asphalt ist, desto vorteilhafter schneidet dessen Umweltbilanz ab. Zum Vergleich wurde die Ökobilanz neben der UBPMethode auch mit der ILCD-Methode berechnet, welche in diesem Fall die oben gemachten Aussagen bestätigt (Bild 7).

Dieser Sachverhalt wird durch die beiden Wirkungskategorien „Treibhauspotenzial CO₂-Äquivalente“ und „Graue Energie MJ Öl-Äquivalente“ in den Bildern 8 und 9 weiter untermauert.

Zum besseren Verständnis der Resultate

werden in Bild 6 die Ergebnisse nach den in der UBPMethode bewerteten Wirkungskategorien aufgeschlüsselt. Es ist ersichtlich, dass vor allem die Wirkungskategorien „Klimaerwärmung“, „Wasserverschmutzung“, „Mineralische Ressourcen“ und „Luftverschmutzung“ die Umweltbilanz dominieren.

Der Einfluss der Temperatur bei der Herstellung von Mischgut wird in der Ökobilanz bei der Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ deutlich (Bild 8).

Durch den verminderten Einsatz von Erdgas bei Niedertemperaturasphalten wird die Ökobilanz um ca. 10–13 % verbessert. Die UBPM- und ILCD-Methode sowie die Wirkungskategorie „Graue Energie“ hingegen zeigen auf eine Verbesserung von lediglich ca. 5 % (Bilder 5, 7 und 9).

Bild 9 zeigt die Wirkungskategorie „Graue Energie“, bei der die anlagenspezifischen Luftemissionen wegfallen, da sie mit dieser

Bild 7: Ökobilanz verschiedener Asphaltproduktvarianten mit Auflösung nach Prozessbeitrag, berechnet mit der ILCD-Methode.

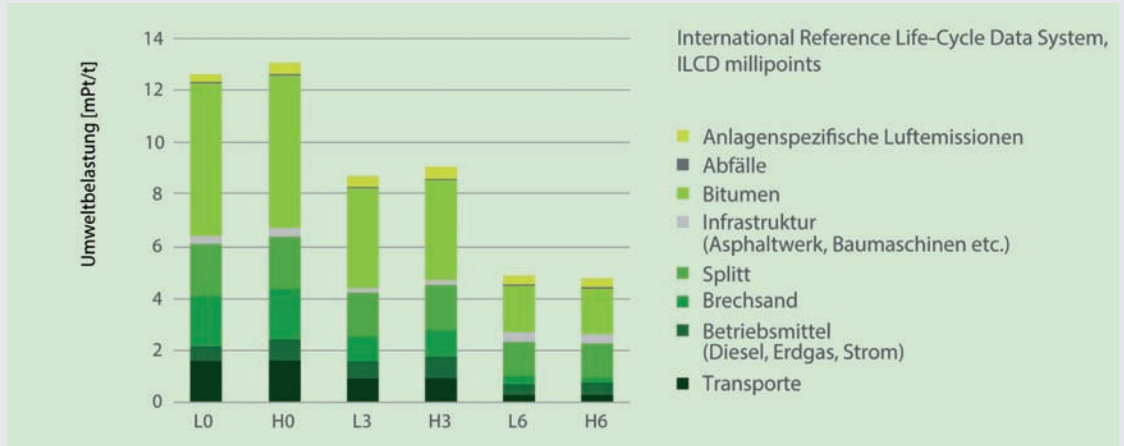


Bild 8: Ökobilanz verschiedener Asphaltproduktvarianten mit Auflösung nach Prozessbeitrag, berechnet für die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial.

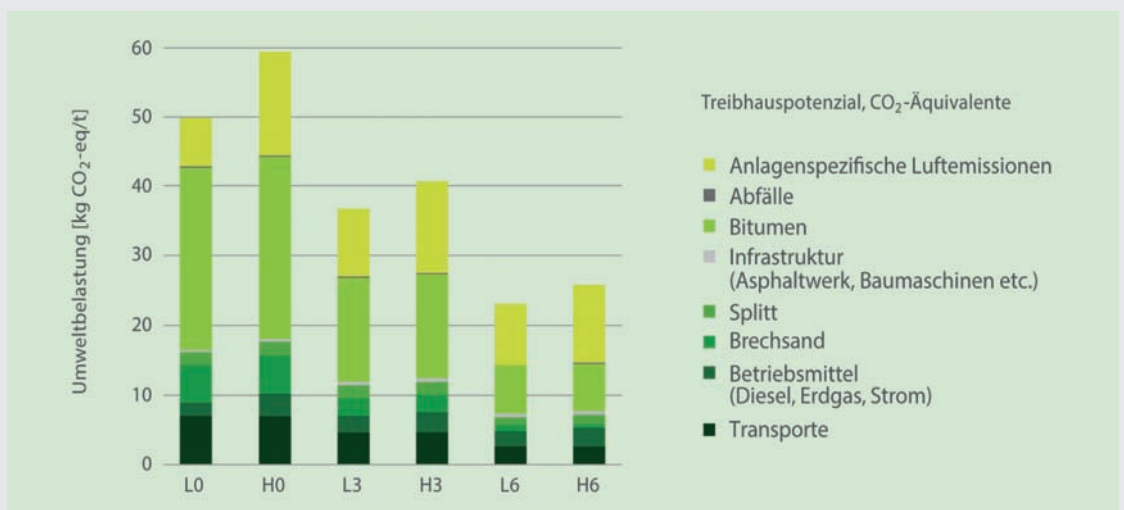
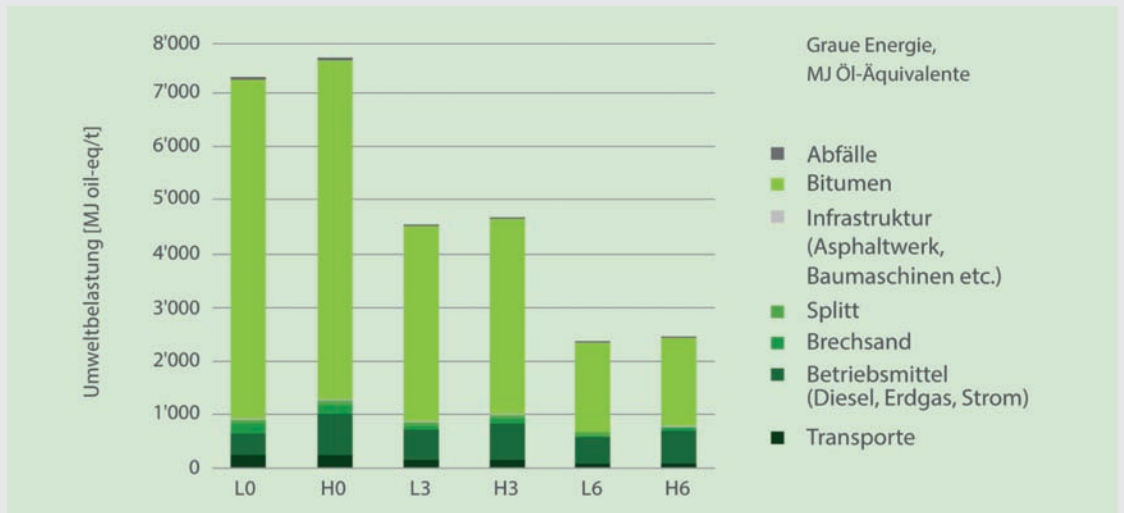


Bild 9: Ökobilanz verschiedener Asphaltproduktvarianten mit Auflösung nach Prozessbeitrag, berechnet für die Wirkungskategorie Graue Energie in der Einheit MJ Öl-Äquivalente.



Wirkungskategorie nicht betrachtet werden. Dafür zeigt der Wirkungsindikator Graue Energie deutlich, dass zur Bereitstellung von Bitumen sehr viel nicht erneuerbare Energie aufgebracht wird. Dies nicht zuletzt, weil im Erdölprodukt „Bitumen“ sehr viel nicht erneuerbare Energie gespeichert ist, die nicht mehr für andere Zwecke zur Verfügung steht.

Die Analysen lassen sich in den folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

- Bereitstellung der Ressourcen, insbesondere Bitumen, verursacht den grössten Anteil an der Umweltwirkung.
- Je mehr Recyclingasphalt wiederverwendet wird, umso vorteilhafter fällt die Ökobilanz aus. Es resultiert ein klares Ergebnis: signifikante Verbesserung

durch Erhöhung des Recyclingasphaltanteils. Dabei muss angemerkt werden, dass die Vermeidung einer Deponierung von RC-Granulat in der Ökobilanz nicht mit einbezogen wurde, da die Ergebnisse schon ohne eine solche Gutschrift klar genug ausfielen. Ein solcher Einbezug würde die Vorteile einer Wiederverwendung von RC-Granulat aus umwelt-

Treibhauspotenzial in kg CO ₂ -Äquivalente			
MOAG (Durchschnitt)	Frankreich (USIRF) (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Francaise USIRF, 2016)	KTH Schweden (Durchschnitt) (Butt, 2012)	PLANET-Studie (Liechti, et al., 2017)
41.9	45.7	46.3	49.7

Tabelle 3: Vergleich der Ökobilanz von Heissasphalten verschiedener Studien für die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“

technischer Sicht jedoch noch stärker unterstreichen.

- Standortemissionen des Asphaltwerks sind im Vergleich zur Gesamtumweltbilanz nicht wichtig.
- Anhand der Ökobilanz wird kein eindeutiger Unterschied zwischen Niedertemperatur- und Heissasphalten festgestellt. Die Unterschiede sind marginal.

Diese Erkenntnisse werden durch die eingangs erwähnte Studie, welche im Auftrag des Bundesamts für Strassen erstellt wurde, bestätigt [3]. Sie kommt auch zum Schluss, dass sich der Einfluss der Herstellungstemperatur nicht entscheidend auf die Ökobilanz auswirkt. Die Rohmaterialien (Bitumen, Splitt und Brechsand) tragen dafür wesentlich zur Umweltbelastung von Asphaltbelägen bei.

Tabelle 3 zeigt Ökobilanzresultate verschiedener Studien für die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ und untermauert die hier vorgestellten Resultate zusätzlich. Denn unter Einbezug der Ökobilanzen zugrunde liegenden Unsicherheiten liegen die in Tabelle 3 aufgeführten Werte sehr nahe beieinander. Die Unterschiede zwischen den Resultaten der PLANET-Studie [3] und der vorliegenden Studie (Daten MOAG) lassen sich vermutlich darauf zurückführen, dass in der PLANET-Studie beim Heissasphalt kein RC-Granulat eingesetzt wurde, weshalb der gemittelte Wert der MOAG in Tabelle 3 etwas tiefer liegt.

Des Weiteren konnte im Abgleich mit der PLANET-Studie [3] festgestellt werden, dass der mittlere elektrische Energiebedarf zwischen 5–8 kWh und der mittlere thermische Energiebedarf bei 50–80 kWh pro Tonne Mischgut liegt (abhängig von der Herstellungstemperatur und weiteren Faktoren). Die hier vorgestellten Erkenntnisse decken sich auch mit anderen, internationalen Studien.

In [4] wird bestätigt, dass die mit der Ressourcenbereitstellung (Bitumen, Brechsand und Splitt) verbundene Umweltwirkung (Energieverbräuche und Emissionen) die Ökobilanz dominiert.

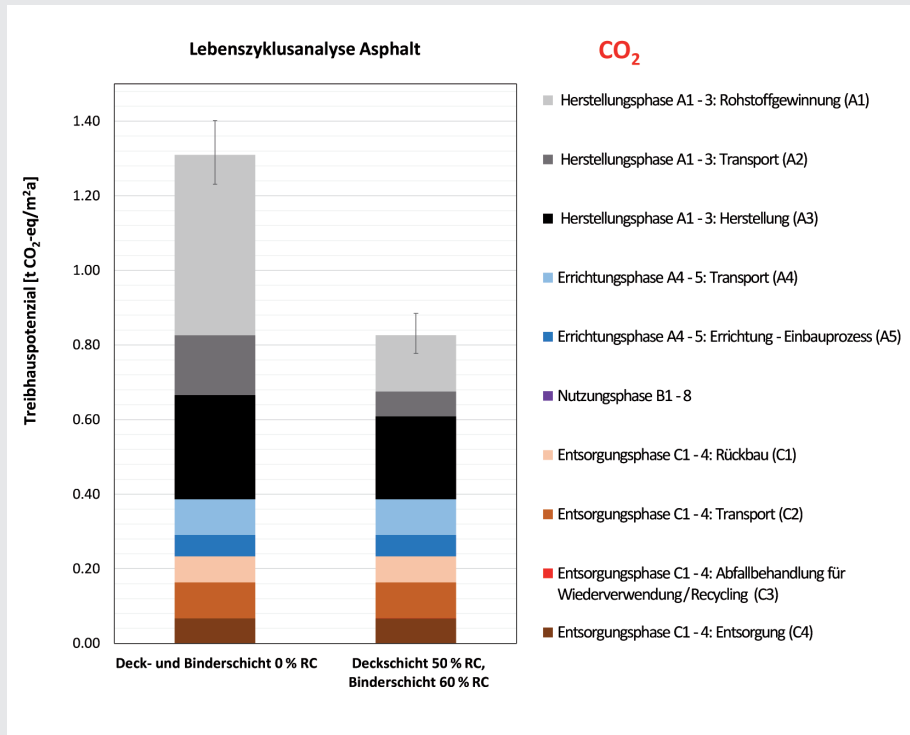


Bild 10: Ergebnis der Ökobilanz mit der Treibhauspotenzial-Methode (CO₂) für einen Asphalt der Deck- und Binderschicht ohne RAP und für einen Asphalt mit 50 % RAP in der Deck- und 60 % RAP in der Binderschicht.

Des Weiteren konnte im Abgleich mit [2] verifiziert werden, dass die Ökobilanzresultate der Wirkungskategorien „Treibhauspotenzial“ und „Graue Energie“ in der gleichen Größenordnung liegen. Zudem konnte in einer anderen Studie der KTH-Universität in Schweden [5] gezeigt werden, dass der thermische (60 kWh/t) und elektrische (8.3 kWh/t) Energiebedarf pro Tonne Asphalt im gleichen Rahmen liegt wie in der vorliegenden Studie. Dasselbe gilt für die CO₂-Emissionen in der Abluft der Mischgutanlage.

5.2 Resultate und Diskussion «Cradle-to-Grave»-Betrachtung (gesamter Lebenszyklus)

Bild 10 bis Bild 12 zeigen die Resultate der Ökobilanz mit der gesamten Lebenszyklusphasenbetrachtung mit dem Asphalt für Deckschicht mit 0 % RC und dem Asphalt der Binderschicht für 0 % RC gegenüber dem Asphalt für Deckschicht mit 50 % RC und dem Asphalt der Binderschicht mit 60 % RC

(Tabelle 2). Bild 10 zeigt das Resultat der Ökobilanz als Treibhauspotenzial mittels CO₂-Äquivalenten. Bild 11 zeigt hingegen das gesamt aggregierte Resultat mit der UBP-Methode und Bild 12 mit der ILCD-Methode. Aus allen Bildern geht hervor, dass der Strassenaufbau mit erhöhten RAP-Zugaberraten gegenüber dem Strassenaufbau ohne RAP in der Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) besser abschneidet.

Die Einsparung an Umweltbelastung beträgt zwischen 20 und 35 %, wenn Asphalte mit erhöhten RAP-Zugaberraten in der Deckschicht von 50 % RC und in der Binderschicht von 60 % verwendet werden (Bild 13). Mittels der Treibhauspotenzial- und der UBP-Methode ist ersichtlich, dass die Rohstoffgewinnung, gefolgt von der Produktion des Mischgutes, die umweltbelastendste Phase darstellt. Mit einem erhöhten Einsatz von Recyclingmaterial nimmt der Balken der Rohstoffgewinnung deutlich ab, da die Primärproduktion von Splitt, Sand und Bitu-

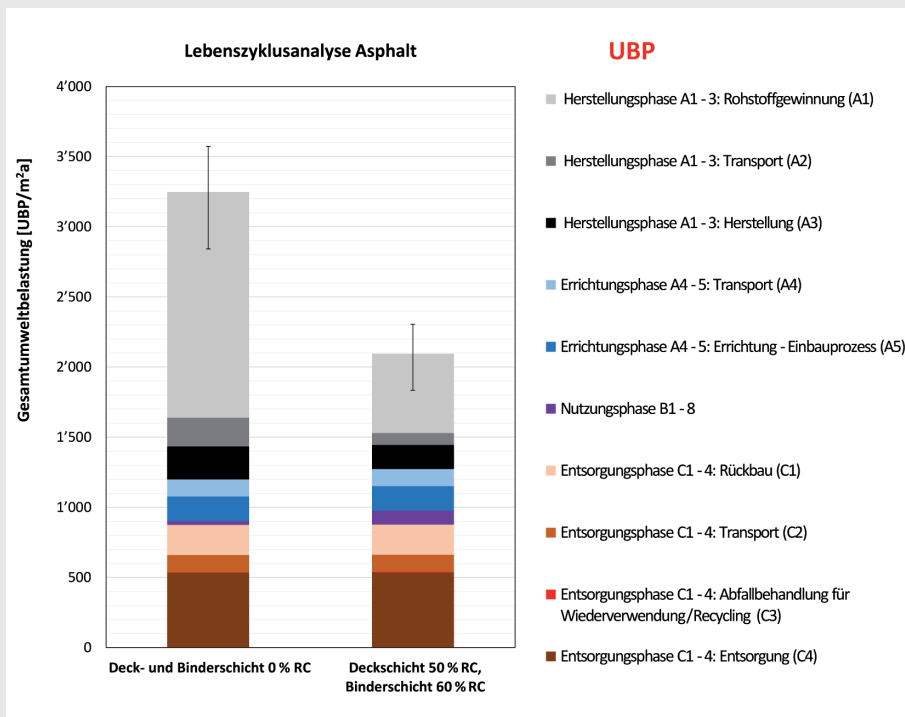


Bild 11: Ergebnis der Ökobilanz mit der Umweltbelastungspunkte-Methode (UBP) für einen Asphalt der Deck- und Binderschicht ohne RAP und für einen Asphalt mit 50 % RAP in der Deck- und 60 % RAP in der Binderschicht

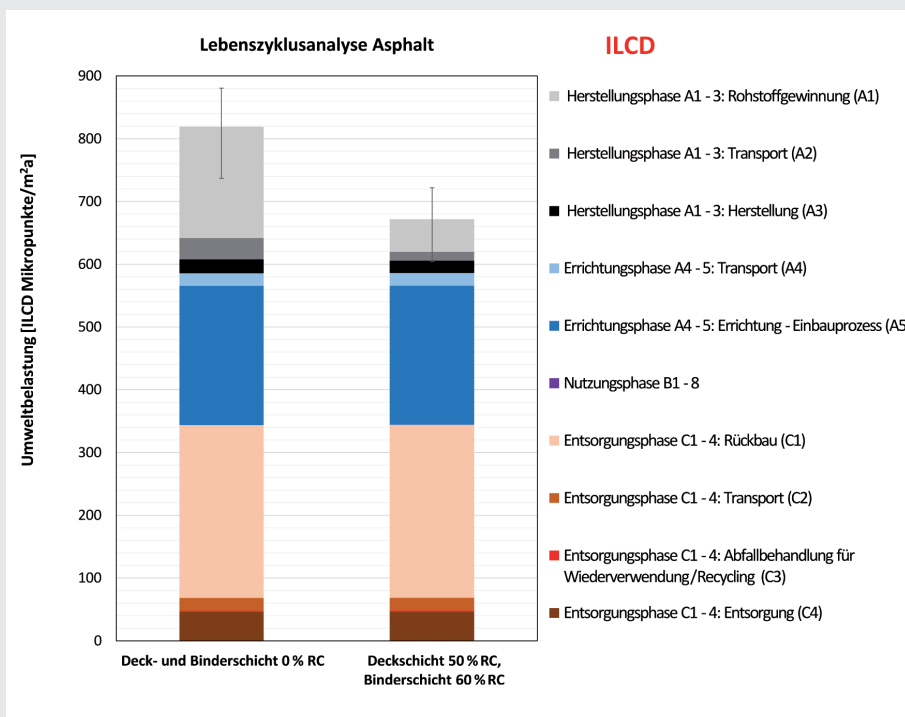


Bild 12: Ergebnis der Ökobilanz mit der International-Life-Cycle-Data-System-Methode (ILCD) für einen Asphalt der Deck- und Binderschicht ohne RAP und für einen Asphalt mit 50 % RAP in der Deck- und 60 % RAP in der Binderschicht

men eingespart wird. Ebenfalls werden in der Prozessvorkette Transporte der primären Rohstoffe eingespart, was sich positiv auf die Umweltbilanz auswirkt. Die Umweltbelastung der anderen Lebenszyklusphasen (Nutzung, Ausbau und Entsorgung/Wiederverwertung) unterscheidet sich nicht stark

zwischen den Asphalten mit und ohne RAP. Etwas anders sieht der relative Beitrag zur Gesamtbelastung bei der ILCD-Methode in Bild 12 aus. Neben der Herstellungsphase sind auch der Ein- und vor allem der Rückbau des Asphalts von umwelttechnischer Bedeutung. Dies kommt vor allem von den

in dieser Phase emittierten Schadstoffen (Feinstaub, VOC, PAK). Auch die benötigte Infrastruktur (Schwarzbelagsfertiger, Walzen und Ripper) und die dazugehörige Energie (hauptsächlich Diesel) beim Ein- und Rückbau wird bei der ILCD-Methode stärker gewichtet als bei der CO₂- und UBP-Methode. Interessant ist auch, dass die Aufwände für ein Materialrecycling (hauptsächlich Zerkleinerung und Lagerung) bei der CO₂-, UBP und der ILCD-Methode nicht sehr ins Gewicht fallen. In Bild 11 und Bild 12 ist ersichtlich, dass die UBP- und die ILCD-Methode im Gegensatz zur CO₂-Methode nicht nur das Treibhauspotenzial (Klimawirksamkeit der Emissionen), sondern auch andere Wasser- und Luftschadstoffe in Bezug auf deren Human- und Ökotoxizität bewerten. Der grösste Teil des violetten Balkens «Nutzungsphase» stammt aus PAK-Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Messungen aus der PLANET-Studie vom ASTRA [3] haben gezeigt, dass bei der Verwendung von hohen RAP-Zugaberraten die PAK-Emissionen in der Nutzungs- und Unterhaltungsphase höher sind gegenüber Asphalten mit tieferen RC-Anteilen (weniger RAP). Im Gesamtbild jedoch ist die Umweltbelastung der Nutzungs- und Unterhaltungsphase gering.

Bild 13 fasst die Auswertung mittels der drei Ökobilanzierungsmethoden nochmals zusammen.

Nun stellt sich die Frage, wie das Ergebnis der Ökobilanz der betrachteten Asphalte für die Deck- und Binderschicht mit und ohne RAP aussieht, wenn die Luftemissionen aus [1] mitberücksichtigt werden. Dies wurde im Szenario «Materialbedingte Emissionen während der Nutzung des Strassenoberbaus» analysiert. Bild 14 zeigt das Ergebnis der Szenarioanalyse über die gesamte Nutzungsdauer des analysierten Strassenaufbaus. Mittels der Methode des Treibhauspotenzials lassen sich human- und ökotoxische Schadstoffe begrenzt bis gar nicht abbilden. Deshalb ist in Bild 14 beim Treibhauspotenzial kein Unterschied zu Bild 13 zu erkennen. Bei der Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte) sowie auch bei der ILCD-Methode ist der Effekt der Luftemissionen während der Nutzungsphase deutlich zu sehen. Bei der UBP-Methode überwiegt nun die Nutzungsphase alle anderen Lebenszyklusphasen. Bei der ILCD-Methode ist nach wie vor die Entsorgungsphase (vor allem wegen des Rückbaus) die ökologisch dominierende Lebenszyklusphase. Allerdings zeigt nun

auch die Nutzungsphase einen deutlichen Anteil an der Gesamtumweltbelastung.

Die Gesamtaussage, dass der Einsatz von hohen RAP-Zugaberaten ökologisch sinnvoll ist, bleibt jedoch erhalten. Einzig bei der ILCD-Methode überlappen nun die Streubreiche (Fehlerindikatoren), sodass eher von einer Tendenz gesprochen werden muss. Allerdings ist der Überlappungsbereich sehr gering.

Interessant ist, dass die in [1] aufgeführten Emissionen in die Luft vergleichbar sind mit den VOC-Emissionen des Strassenverkehrs einer Strasse mit einem durchschnittlichen Tagesverkehrsaufkommen von 5'000 Fahrzeugen pro Tag (ca. 45 g VOC/m² · a). Dies zeigt eine Abschätzung über die VOC-Emissionen der durchschnittlichen Fahrzeugflotte der Schweiz im Jahr 2016 (Daten stammen aus der Datenbank KBOB Ökobilanzdatenbestand 2016 [6]).

6 Schlussfolgerung

Die anlagenspezifischen Luftemissionen der Asphaltherstellung vor Ort am Werksstandort führen zu deutlich kleineren Umweltwirkungen als die Bereitstellung der Rohmaterialien in der Vorkette. Die Ökobilanz liefert daher klare Argumente für Recyclingasphalt. Diese Aussage wird auch durch bereits vorhandene Studien zu dieser Fragestellung bestätigt.

Die Ökobilanz über den gesamten Lebens-

zyklus hat gezeigt, dass sich der hohe Einsatz von RAP-Zugaberaten ökologisch lohnt. Werden neueste Erkenntnisse über die Luftemissionen während der Nutzungsphase mitberücksichtigt, so können diese die Ökobilanz dominieren und sogar relevanter sein als die Herstellungsphase des Asphalts. Zukünftig wird den Luftschadstoffen aus der Nutzungsphase mehr Bedeutung zugeteilt. Diese neue Erkenntnis muss nun über weitere Messungen in unseren Breitengraden mit unseren Asphaltrezepturen und unseren Einbauverfahren erhärtet werden.

Der eingangs angesprochene Zielkonflikt kann durch diese Ökobilanz jedoch nur bedingt entschärft werden. Ökobilanzen unterstützen Managemententscheide zugunsten einer ökoefizienten Produktion/Produktentwicklung und beziehen sich auf national bzw. international bedeutende Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt). Das bundesländerspezifische bzw. nationale Umweltrecht hingegen zielt vielfach auf die Vermeidung von lokalen Risiken für die natürliche Umwelt und folgt dem Vorsorgeprinzip. Die Einhaltung dieser Vorgaben –

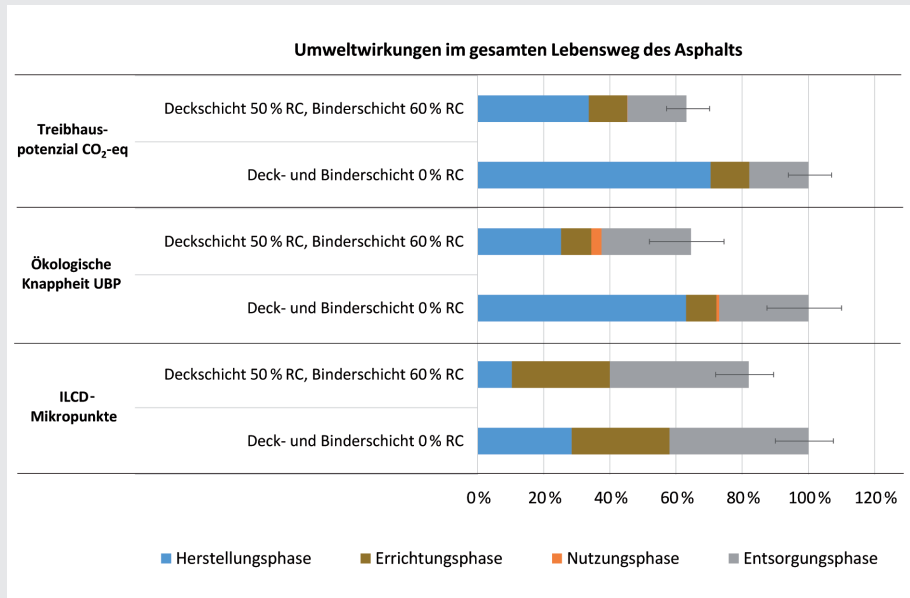


Bild 13: Zusammenfassung der Ökobilanz mittels der drei angewandten Ökobilanzierungsbewertungsmethoden des Treibhauspotenzials (CO₂), der Umweltbelastungspunkte (UBP) sowie der ILCD-Methode (ILCD-Mikropunkte)

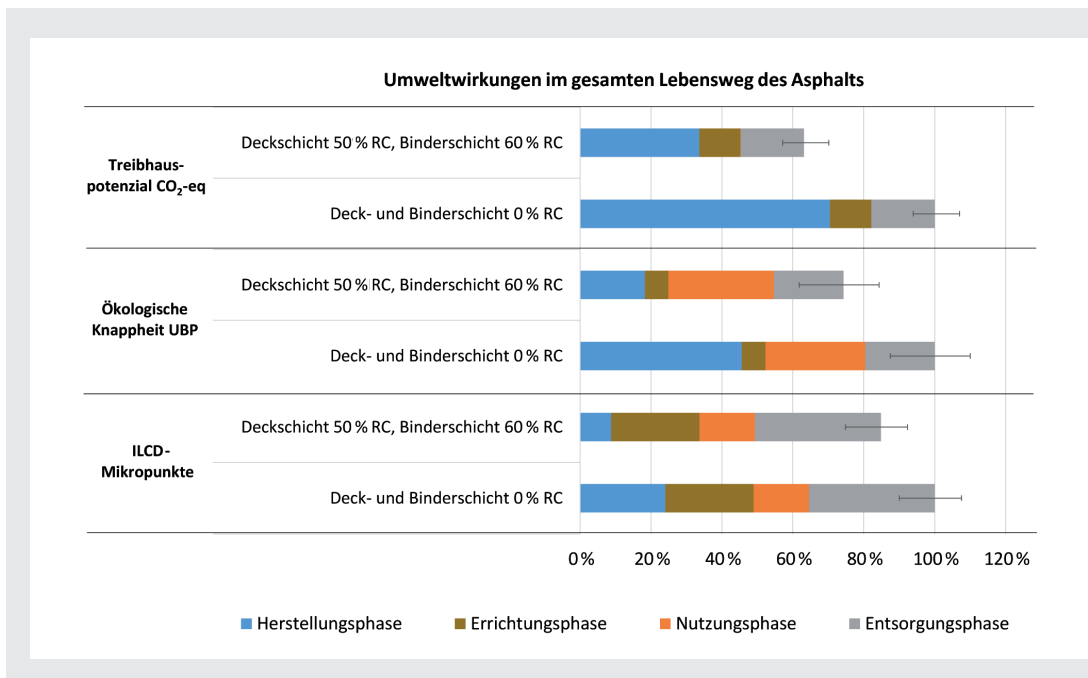


Bild 14: Zusammenfassung der Ökobilanz mittels der drei angewandten Ökobilanzierungsbewertungsmethoden des Treibhauspotenzials (CO₂), der Umweltbelastungspunkte (UBP) sowie der ILCD-Methode (ILCD-Mikropunkte). Im Gegensatz zu Bild 13 werden hier auch die Luftemissionen (VOC und Feinstaub) aus dem kürzlich erschienenen Science-Advances-Journal-Paper [1] mitberücksichtigt. Dadurch gewinnt die Nutzungsphase stark an ökologischer Bedeutung im gesamten Lebenszyklus von Asphalten

im Sinne des „legal compliance“ – setzt den Rahmen für die Optimierung der Öko-Effizienz. In Konfliktfällen geht es letztlich um eine Abwägung zwischen der Vermeidung lokaler Risiken und der Reduktion national bedeutender Umweltwirkungen. Die Ökobilanzierung kann nur Argumente für die damit verbundenen Aushandlungsprozesse liefern. Die vorliegende Studie liefert – in diesem Sinne – klare Argumente zugunsten des Einsatzes von Asphaltgranulaten RAP aus dem Rückbau von Strassenbelag.

Literaturverzeichnis

[1] Khare, P.; Machesky, J.; Soto, R.; He, M.; Presto, A. A.; Gentner, D. R.: «Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors» Science Advances - Atmospheric Science, 2020

[2] Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française USIRF: «Environmental Product Declaration - from Cradle to Gate» USIRF, 2016

[3] Liechti, J.; Gaschen, A.; Breimesser, M.; Angst, C.; Gorla, F.; Boesiger, L.; Bieder, A.: «Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten» Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2017

[4] Özgür, M.; Bektas, N.: «Life-Cycle Assessment of asphalt pavement product» Sustainability Environment Resources, Bd. 5, pp. 275-281, 2015

[5] Butt, A. A.: «Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements including the Feedstock Energy and Asphalt Additives» Division of High-

way and Railway Engineering KTH Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden, 2012

[6] KBOB; eco-bau und IPB: «KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016» Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2016

[7] ecoinvent, «ecoinvent 2019: Version 3.6 Swiss Life Cycle Inventories» ecoinvent, 2019

[8] Pré Consultants, «SimaPro (Version 8.4.0) Pré Consultants, Netherlands, 2017

[9] Pohl, T.; Bodmer, P.: «RC-Plus Küssnacht – Berichtteil Ökobilanz» Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Rapperswil, 2020

[10] Muñoz, M.; Haag, R.; Schreiner, C.; Zaumanis, M.; Cavalli, M. C.; Poulidakos, L. D.; Heeb, N. V.: «Environmental impact of rejuvenators in asphalt mixtures containing high reclaimed asphalt content» Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2021.1891129, 2021

[11] Stocker, T.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.: «Klimaänderung 2013 – Naturwissenschaftliche Grundlagen» Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), New York, 2013

[12] Boesch, M. E.; Hellweg, S.; Huijbrigts, M. A. J.; Frischknecht, R.: «Applying Cumulative Exergy Demand (CEXd) Indicators to the ecoinvent Database» International Journal of LCA, pp. 181-190, 2007

[13] Frischknecht, R.; Büsser Knöpfel, S.: «Methode der ökologischen Knappheit –

Ökofaktoren 2013» Bundesamt für Umwelt BAFU, Zürich, 2013

[14] European Commission – Joint Research Center – Institute for Environment and Sustainability, «International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2010

[15] G. European Commission - Joint Research Center - Institute for Environmental and Sustainability [Huppes und L. van Oers], «Evaluation of Weighting Methods for Measuring the EU-27 Overall Environmental Impact» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011

[16] Hochschule Luzern, «Skript Technik & Architektur - Unterrichtseinheiten zur Thematik Ökobilanz» FH Zentralschweiz, Luzern, 2009

[17] EN 15643-5:2017, «Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken – Teil 5 Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke» SN EN 15643-5:2017, 2018-11-01

[18] P. Sustainability, «Herausgeber der Ökobilanzsoftware SimaPro» Pré Sustainability, Amersfoort Netherlands, 2020

[19] Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B.: «The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology» International Journal of Life Cycle Assessment, pp. 1218-1230, 2016

[20] Frischknecht, R.: «LCI modelling approaches on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency» International Journal of LCA, pp. 666-671, 15 6 2009



C. Popp, W. Bartolomaeus, F. Berka, J. Claussen-Seggelke, J. Gerlach, E. Heinrichs, D. Kupfer, J. Ortscheid, G. Rodehack
 1. Auflage 2016, 388 Seiten, DIN B5, Hardcover
 89,00 € inkl. MwSt. und Versand im Inland
 ISBN 978-3-7812-1951-9
 Auch als E-Book inkl. KV-Reader erhältlich (Einzelplatzlizenz)

Lärmschutz in der Verkehrs- und Stadtplanung

Aktuelles und tiefgehendes Grundlagenwerk

Klar und übersichtlich strukturiert werden u. a. behandelt:

- ▶ **Lärmwirkungen:** Begriffe der Akustik, Wirkungsmechanismen, Ansätze der Manahmenevaluierung
- ▶ **Straßen- und Schienenverkehrslärm:** Entstehung, Pegelbestimmung, Maßnahmen zur Minderung
- ▶ **Rechtsinstrumentarien** auf den relevanten Planungsebenen
- ▶ **Lärmvorsorge und Lärmsanierung** an Straßen und Schienenwegen
- ▶ **Organisatorische Maßnahmen und bautechnische Ausführung** lrmmindernder Maßnahmen
- ▶ **Lärmschutz in der Bauleitplanung.**



Weitere Infos/Online-Bestellung unter www.kirschbaum.de