

KFG-Subgruppe Asphalt

Projekt 3: Einheitliches Verfahren zur Darstellung der Ökobilanz von Belägen

November 2024

KIES FÜR GENERATIONEN

Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences

Partner und Fachbegleitgruppe Projekt 3

Trägerschaft

Plattform Kies für Generationen

Projektsteuerung KFG Subgruppe Asphalt: Dr. Rupert Lieb und Gregor Schguanin
Projektleiter: Hans-Peter Beyeler

Finanzpartner

Bundesamt für Strassen ASTRA, Umweltämter und/oder Tiefbauämter aus den Kantonen Aargau, Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Freiburg, Graubünden, Luzern, Obwalden, St. Gallen, Thurgau, Tessin, Uri, Waadt, Wallis, Zug, Zürich, Tiefbauamt der Stadt Zürich sowie die Verbände Baustoff Kreislauf Schweiz, asphaltsuisse und SBV

Fachbegleitkommission

Christoph Abegg, TBA Kanton Zürich
Thierry Berset, TBA Kanton Freiburg
Stefano Bradanini, TBA Kanton Aargau
Philip Bürgisser, TBA Kanton Basel-Landschaft
Gion Dosch, TBA Kanton Graubünden
Benedikt Eberle, TBA Kanton Thurgau
Christoph Gassmann, TBA Kanton Zürich
Bernhard Hirschi, asphaltsuisse Baustoff Kreislauf Schweiz
Martin Horat, TBA Stadt Zürich
Roman Kohler, VZS SBV ZH/SH
Bernhard Kunz, asphaltsuisse
Dominik Oetiker AWEL Kanton Zürich
Olga Paperna, TBA Kanton Aargau
Fabian Traber, ASTRA
Volker Wetzig, Baustoff Kreislauf Schweiz

Wissenschaftspartner / Autoren

Berner Fachhochschule (BFH-AHB), Institut für Baustoffe und biobasierte Materialien, Fachgruppe Strassenbaustoffe und Fachgruppe Werkstoffe und Ökobilanzierung

- Patrick Fuchs
- Prof. Dr. Aude Chabrelie
- Paola Catalano
- Prof. Dr. Aybike Öngel, Fachgruppenleiterin

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes der Plattform «Kies für Generationen» wurde ein einheitliches Verfahren zur Darstellung der Ökobilanz von Asphaltbelägen auf der Grundlage einer Literaturanalyse entwickelt. Ziel war es, eine standardisierte Methodik zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen verschiedener Asphaltbeläge, insbesondere solcher mit hohem Recyclinganteil, zu erstellen, die als Grundlage für die Ökobilanzierung von zukünftigen Strassenbauprojekte dienen soll. Die Methodik wurde anhand einer externen Prüfung validiert. Die paar Rückmeldungen des externen Prüfers wurden umgesetzt respektive informativ ergänzt. Diese Methodik wurde auf drei Asphaltschichten (Deck-, Binder- und Tragschicht) angewendet, wobei die Treibhausgasemissionen, die ökologische Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP'21) sowie der Primärenergieverbrauch berechnet wurden. Dabei wurden gemäss EN 15804+A2 die folgenden Lebenszyklusphasen betrachtet: Herstellungsphase, Bauphase, Nutzungsphase (Ersatz während 60 Jahren Nutzungsdauer) und Entsorgungsphase. Dazu werden auch Vorteile und Belastungen ausserhalb der Systemgrenze betrachtet. Alle drei untersuchten Umweltwirkungsindikatoren zeigen vergleichbare Resultate bei der Relevanz der untersuchten Module. Vorwiegend bei der Deck- und Binderschicht ist der Ersatz von zentraler Bedeutung – je öfter man ersetzt, umso höher die Umweltwirkungen. Ebenfalls hohe Umweltwirkungen werden durch die Rohstoffbereitstellung von Bitumen, die Asphalt-Herstellung und den Einbauprozess verursacht. Die Resultate zeigen eine Senkung der Umweltwirkungen bei Asphaltschichten mit einem Anteil an Sekundärrohstoffen respektive einem hohen Recyclinganteil.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Literaturanalyse	6
	2.1 Normierung	6
	2.2 Softwares und Tools	7
	2.3 Datenbanken	9
	2.4 Ökobilanzen von Strassenbelägen	10
3	Methodik	12
	3.1 Grundlegende Methodik	12
	3.2 Projektspezifische Annahmen	12
	3.3 Rohstoffbereitstellung (A1)	13
	3.4 Transporte (A2, A4 und C2)	16
	3.5 Asphalt-Herstellung (A3)	16
	3.6 Ein- und Rückbau (A5 und C1)	17
	3.7 Ersatz (B4)	17
	3.8 Abfallbehandlung und Deponierung (C3 und C4)	17
	3.9 Modul D	18
4	Resultate und Diskussion	20
	4.1 Treibhausgasemissionen	20
	4.2 Ökologische Knappheit	24
	4.3 Primärenergie	26
	4.4 Modul D	27
5	Schlussfolgerung	30
6	Abbildungsverzeichnis	31
7	Tabellenverzeichnis	32
8	Literaturverzeichnis	33
Anhang A – Prüfbericht Umtec Technologie AG		34
Anhang B – zusätzliche Abbildungen und Tabellen von Resultaten		40
Anhang C – Modellierung der Prozesse in openLCA		42

1 Einleitung

Die Plattform «Kies für Generationen» (KFG) ist eine Innovations- und Austauschplattform, die von Mitgliedern des Branchenverbands Baustoff Kreislauf Schweiz und der Baudirektion des Kantons Zürich getragen wird. Aufgrund der zunehmenden Menge an Ausbauasphalt (rückgebauter Asphalt), die durch regelmässige Sanierungen von Verkehrswegen anfällt, gewinnt die Wiederverwertung von Ausbauasphalt zunehmend an Bedeutung.

Während der ersten Projektphase (2019-2021) wurden grundlegende Massnahmen zur Förderung der Wiederverwendung von Ausbau- und Niedertemperaturasphalt erarbeitet. Dabei zeigte sich jedoch ein zusätzlicher Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung eines einheitlichen Verfahrens zur Darstellung der Ökobilanzierung von Asphaltbelägen. Deshalb konzentriert sich dieses Projekt genau auf diese Entwicklung.

Das Hauptziel besteht darin, eine standardisierte Methode zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen verschiedener Asphaltbeläge, insbesondere solcher mit hohem Recyclinganteil, zu erstellen. Durch eine umfassende Literaturanalyse und in Zusammenarbeit mit der Umtec Technologie AG soll eine Methodik definiert werden, womit die Umweltwirkungen der Deck-, Binder- und Tragschicht berechnet und dargestellt werden können. Diese Methodik wird in einer abschliessenden externen Prüfung validiert.

In einer Literaturanalyse zu Ökobilanzierungen von Asphaltbelägen wird die Voraussetzung für die Entwicklung einer Methodik geschaffen. Dabei werden verwendete Normen, Software-Lösungen, Datenbanken und berechnete Umweltwirkungsindikatoren zusammengefasst. Aufbauend auf dieser Literaturanalyse und in Absprache mit Experten wird eine Methodik für die Ökobilanzierung von Asphaltbelägen definiert. Die Methodik umfasst die Bewertung der ökologischen Auswirkungen in der Herstellungsphase, der Bauphase, des Ersatzes, der Entsorgungsphase und der Vorteile und Belastungen ausserhalb der Systemgrenzen. Sie berücksichtigt verschiedene Umweltwirkungsindikatoren wie Treibhausgasemissionen, ökologische Knappheit und Primärenergieverbrauch.

Diese Methodik wurde auf drei Asphaltschichten (Deck-, Binder- und Tragschicht) angewendet. Die Berechnungen wurden mithilfe der Software openLCA und der Datenbank UVEK 2018 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie bieten wertvolle Einblicke in die Umweltwirkungen von Asphaltbelägen und verdeutlichen die Vorteile der Verwendung von RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), in diesem Bericht als RAP bezeichnet, Sekundärsplitt wird nicht betrachtet). Die entwickelte Methodik wurde abschliessend in einer externen Prüfung validiert und soll als Grundlage für die Ökobilanzierung von zukünftigen Strassenbauprojekte dienen.

2 Literaturanalyse

Die Literaturanalyse dient als Grundlage für die im Anschluss erarbeitete Methodik zur Berechnung einer Ökobilanzierung von Asphaltbelägen. Diese Analyse beinhaltet die Durchsicht von Studien zu Ökobilanzen von Asphaltbelägen sowie verfügbare Datenbanken, Softwares und Tools zur Erstellung von Ökobilanzen. Ebenfalls wurde analysiert, welche Umweltwirkungsindikatoren in den untersuchten Studien berechnet und welche Normierungen berücksichtigt wurden.

2.1 Normierung

Im Bereich der Normierungen für Ökobilanzen von Asphaltbelägen sind drei Normen zentral: ISO 14040 (Grundsätze und Rahmenbedingungen), ISO 14044 (Anforderungen und Anleitungen) und EN 15804+A2 (Nachhaltigkeit von Bauwerken, Umweltproduktdeklarationen, Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte). Die ISO-Normen definieren dabei das generelle Vorgehen und die Rahmenbedingen. In der EN 15804+A2 wird spezielle auf die Ökobilanzierung von Bauprodukten für die Erstellung von Umweltproduktedeklarationen (Environmental Product Declaration EPD) eingegangen.

Gemäss der Norm ISO 14040 ist eine Ökobilanz «eine Methode zur umfassenden Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts, einer Dienstleistung oder eines Prozesses über den gesamten Lebenszyklus hinweg». Dabei wird ein Lebenszyklus als «die Gesamtheit der Phasen eines Produktsystems, von der Rohstoffbereitstellung oder der Erzeugung von natürlichen Ressourcen bis zur Entsorgung» definiert. Eine Ökobilanz wird nach ISO 14040 in vier Phasen aufgeteilt:

- Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

In der Norm EN 15804+A2 wird eine Ökobilanz in verschiedene Lebenszyklusphasen unterteilt. Eine Lebenszyklusphase (wie z.B. die Herstellungsphase) besteht aus mehreren Modulen (wie z.B. Rohstoffbereitstellung, Transport und Herstellung). Die Umweltwirkungen werden in den einzelnen Modulen berechnet und dargestellt. Abbildung 1 zeigt die Lebenszyklusphasen mit den Modulen einer Ökobilanzierung gemäss EN 15804+A2. In Gelb sind die Module hinterlegt, welche in dieser Studie berechnet wurden. Ausserhalb der Systemgrenze wird das Modul D informativ angegeben. Gemäss EN 15804+A2 soll «das Informationsmodul D Transparenz für die Umweltvorteile oder -belastungen schaffen, die durch wieder verwertbare Produkte, recycelte Stoffe und/oder nutzbare Energieträger, die das Produktsystem z.B. als Sekundärstoffe oder -brennstoffe verlassen, verursacht werden».

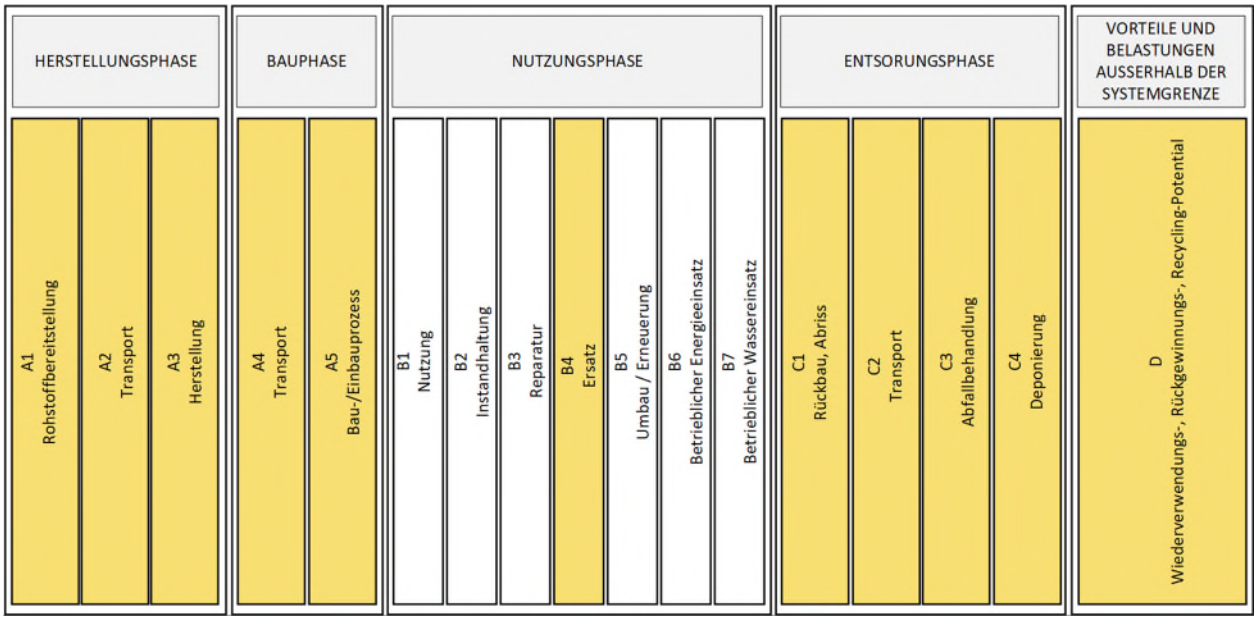

Abbildung 1 : Lebenszyklusphasen und Module einer Ökobilanzierung nach EN 15804+A2. In Gelb hinterlegt sind die in dieser Studie berücksichtigten Module.

Für die Vergleichbarkeit von einzelnen Ökobilanz-Berechnungen ist eine funktionale oder eine deklarierte Einheit anzuwenden. Diese definierte Einheit muss messbar sein. Gilt die Berechnung für eine bestimmte Funktion oder ein bestimmtes Szenario, wird eine funktionale Einheit angewendet (z.B. 1 m^2 Aussenfassade, Anzahl Punktfundamente mit definierter Lastabtragung oder 1 m^2 Aussenwand mit einem definierten U-Wert). Gilt die Berechnung für mehrere Funktionalitäten und Szenarien, wird eine deklarierte Einheit angewendet (z.B. in Masse oder Volumen). Auf der Grundlage dieser Bezugsgrösse werden die Umweltwirkungen in den betrachteten Modulen berechnet und die Resultate dargestellt (EN 15804+A2).

2.2 Softwares und Tools

Auf dem Markt gibt es zahlreiche Softwares oder Tools zur Berechnung von Ökobilanzen. Dabei gibt es solche, die branchenübergreifend einheitlich eingesetzt werden können (z.B. SimaPro) und eher kleinere Tools für spezifische Branchen und Problemstellungen (z.B. Palate). In dieser Studie werden die eher grösseren branchenübergreifenden Lösungen als Softwares und die eher kleineren branchenspezifischen Lösungen als Tools bezeichnet. Eine weitere Abgrenzung sollte zu den Ökobilanzierungs-Methoden gemacht werden (z.B. IPCC 2021, ReCiPe oder IMPACT 2002+). Diese geben die Methodik zur Berechnung der Umweltwirkungsindikatoren vor und können in verschiedenen Softwares oder Tools angewendet werden.

Nachfolgend sind die zehn verbreitetsten Softwares für Ökobilanzen aufgelistet (LCA-Software 2024):

1. SimaPro
2. GaBi
3. openLCA
4. Umberto

5. Ecochain Mobius
6. SOLIDWORKS Sustainability
7. sphera (früher GaBi)
8. One Click LCA
9. OpenIO
10. QED

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich verschiedener Tools und deren Fähigkeiten zur Bewertung unterschiedlicher Umweltwirkungsindikatoren. Die verglichenen Tools sind Palate, ECORCE2, LCA Pave, eLCAP, TRACI und Eco2struct. Zu den bewerteten Umweltwirkungsindikatoren gehören Treibhausgasemissionen, Primärenergieverbrauch, Ökologische Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP'21), Bodennahe Ozonbildung (POCP), Versauerungspotenzial, Ökotoxizität, Eutrophierungspotenzial (Salzwasser, Süsswasser, Land), Menschliche Gesundheit (Humantoxizität, Lärm), Ozonabbaupotenzial und Erschöpfung der Ressourcen fossiler Brennstoffe. In der Tabelle ist ersichtlich, dass die Treibhausgasemissionen und die Primärenergie mit den meisten Tools berechnet werden können.

Tabelle 1 : Branchenspezifische Tools für Ökobilanzierungen von Strassenbelägen mit den Berechnungsmöglichkeiten der Umweltwirkungsindikatoren.

Indikator	Palate	ECORCE2®	LCA Pave	eLCAP	TRACI	Eco2struct
Treibhausgasemissionen	👍	👍	👍	👍	👍	👍
Primärenergie	👍	👍	👍	👍		
Ökologische Knappheit (UBP)		👍				👍
Bodennahe Ozonbildung (POCP)					👍	
Versauerungspotenzial			👍	👍	👍	
Ökotoxizität			👍	👍	👍	
Eutrophierungspotenzial (Salzwasser, Süsswasser, Land)		👍	👍	👍	👍	
Menschliche Gesundheit (Humantoxizität, Lärm)			👍	👍	👍	
Ozonabbaupotenzial			👍	👍	👍	
Erschöpfung der Ressourcen fossiler Brennstoffe			👍	👍	👍	

2.3 Datenbanken

Eine Ökobilanzierung kann auf der Grundlage einer oder mehrerer Datenbanken berechnet werden. Je nach Software respektive Tool stehen mehr oder weniger Datenbanken zur Verfügung. Aufbauend auf den bestehenden Prozessen aus einer oder mehrerer Datenbanken wird die Sachbilanz mit allen In- und Outputs modelliert. Bei der Software openLCA zum Beispiel können sowohl kostenlose als auch kostenpflichtige Datenbanken importiert werden. Weit verbreitet bei der Durchführung von Ökobilanzen im Baubereich ist die Verwendung der Datenbank ecoinvent und in der Schweiz, der auf ecoinvent-aufbauende UVEK-Datenbestand. In der Abbildung 2 sind beispielhaft einige Datenbanken aufgeführt, welche in openLCA verfügbar sind.



Abbildung 2 : Beispiele von Ökobilanz-Datenbanken (Bild: openLCA 2024).

2.4 Ökobilanzen von Strassenbelägen

Im Rahmen der Literaturanalyse wurden acht Studien zu Ökobilanzen von Strassenbelägen ausgewertet (Schindler et al. 2024, Piao et al. 2022, Liechti et al. 2016, Bueche et Dumont 2016, Gauch et al. 2016, Kytzia et Pohl 2014, Gschösser et al. 2013, Milachowski et al. 2010). Da die Studien in unterschiedlichen Kontexten, mit unterschiedlichen Zielen und Methoden durchgeführt wurden, lassen sich die Resultate nicht einfach vergleichen. So spielt zum Beispiel die Rohstoffzusammensetzung (insbesondere der Bitumen-Anteil und die Verwendung von RAP, die berücksichtigten Lebenszyklusphasen, die definierte funktionale Einheit und die hypothetisch angenommene Lebensdauer der Asphaltprodukte eine entscheidende Rolle. Werden diese grundlegenden Aspekte in Ökobilanzen verschieden definiert, sind die Resultate nur noch schwer vergleichbar.

Die meisten Studien über Ökobilanzierungen von Strassenbelägen konzentrieren sich auf die Herstellungsphase, die Bauphase, den Ersatz und die Entsorgungsphase. In der Nutzungsphase werden die Umweltwirkungen während der Nutzungsdauer der Asphaltschichten untersucht. Dazu gehören Instandsetzungen, insbesondere die für die Instandsetzung benötigte Energie und die Emissionen, die mit der Nutzung der Strasse durch Fahrzeuge verbunden sind. Oft beschränkt sich die Ökobilanzierung in der Nutzungsphase auf die Instandsetzung und Sanierung der Strassenoberfläche (z.B. Kytzia et al. 2014). Die Nutzung der Strasse durch Fahrzeuge und die damit verbundenen Emissionen werden jedoch häufig nicht detailliert in der Ökobilanzierung berücksichtigt. Dies liegt vor allem daran, dass es schwierig ist, genaue und umfassende Daten über die Fahrzeugemissionen über die Lebensdauer verschiedener Fahrbahntypen zu erhalten. Um diese Emissionen genau zu modellieren, ist ein Zugriff auf detaillierte, ortsspezifische Verkehrsdaten erforderlich.

Alle analysierten Studien in Tabelle 2 führten eine Berechnung der Treibhausgasemissionen als zentralen Umweltwirkungsindikator durch. Zusätzlich wurden auch oft der Primärenergieverbrauch sowie die ökologische Knappheit in Form von Umweltbelastungspunkten erfasst.

Tabelle 2 : Studien zu Ökobilanzierungen von Asphaltbelägen mit den jeweils berechneten Umweltwirkungsindikatoren.

Indikator	Lärmarme Strassenbeläge Ökobilanz und Lebenszykluskosten (Schindler et al. 2024)	Life cycle assessment with noise considerations (Piao et al. 2022)	PLANET EP-2 (Liechti et al. 2016)	PLANET EP-5 (Bueche et Dumont 2016)	Projekt MatCH (Gauch et al. 2016)	Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen (Kytzia et Pohl 2014)	Life Cycle Assessment of Swiss Road (Gschösser et al. 2013)	Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts (Milachowski et al. 2010)
Treibhausgasemissionen	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍
Primärenergie	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	
Ökologische Knappheit (UBP)	👍	👍			👍	👍	👍	
Bodennahe Ozonbildung (POCP)			👍	👍				👍
Versauerungspotenzial			👍	👍				👍
Ökotoxizität			👍	👍				
Eutrophierungspotenzial (Salzwasser, Süsswasser, Land)			👍	👍				👍
Menschliche Gesundheit (Humantoxizität, Lärm)		👍	👍	👍				
Ozonabbaupotenzial			👍					👍

Zusätzlich fokussiert sich das laufende Projekt «SABINA» auf die Entwicklung eines ganzheitlichen Bewertungsrahmens für die Nachhaltigkeit von Strasseninfrastrukturen. In der Schweiz werden über alle Lebenszyklusphasen die Umweltwirkungsindikatoren Treibhausgasemissionen, Primärenergie und Ökologische Knappheit betrachtet. Das von der Umtec Technologie AG geleitete Projekt sieht eine Zusammenarbeit mit Partnern wie dem Institut für Software der Ostschweizer Fachhochschule OST vor, um technische und ökologische Aspekte umfassend zu integrieren.

3 Methodik

Auf der Grundlage der Literaturanalyse wurde ein erster Vorschlag für die Methodik zur Berechnung von Ökobilanzen von Asphaltbelägen erstellt. Dieser wurde mit Umtec Technologie AG diskutiert und abgestimmt. Insbesondere hat man sich bei der Ökobilanzierung von Asphaltbelägen auf eine einheitliche Datenbank geeinigt. Ebenfalls wurden die Prozesse für die Herstellung von Asphalt, die Herstellung von polymermodifiziertem Bitumen, die Abfallbehandlung inklusive des Recyclings von Ausbauasphalt und generell die verwendeten Prozesse für die Rohstoffe und die Transporte mit Umtec Technologie AG abgestimmt. Nach der Durchführung der Ökobilanz wurden die Methodik und die Resultate durch eine andere Fachabteilung bei Umtec Technologie AG kritisch geprüft (Prüfbericht im Anhang A). Die im Prüfbericht aufgeführten Kritikpunkte beziehen sich eher auf kleinere Änderungen, welche alle in dieser Studie umgesetzt oder informativ ergänzt wurden.

Im nachfolgenden Unterkapitel 3.1 wird die grundlegende Methodik aus der Literaturanalyse und Abstimmung mit Umtec Technologie AG vorgestellt. Zusammen mit den modellierten Sachbilanzen der wichtigsten Prozesse (Anhang C) wird diese grundlegende Methodik für zukünftige Ökobilanzierungen von Strassenbelägen vorgeschlagen. Im Unterkapitel 3.2 folgen dann projektspezifische Annahmen gefolgt von den Berechnungsgrundlagen in den einzelnen Modulen (Unterkapitel 3.3 bis 3.9).

3.1 Grundlegende Methodik

Um zukünftig vergleichbare Ökobilanzierungen von Strassenbelägen in Asphaltbauweise zu erstellen, ist es wichtig, dass gewisse grundlegende Methoden abgestimmt werden. Insbesondere tragen eine einheitliche Normierung, Datenbank, Systemgrenze, funktionale Einheit und Referenznutzungsdauer zur besseren Vergleichbarkeit bei. Nach der Literaturanalyse und Absprache mit Umtec Technologie AG kann folgende Methodik als Grundlage für weitere Ökobilanzierungen vorgeschlagen werden:

- Normen: ISO 14040, ISO 14044 und EN 15804+A2
- Datenbank: UVEK-Ökobilanzdatenbestand basierend auf ecoinvent 2.2 (auch als BAFU-Ökobilanzdatenbestand bezeichnet)
- Systemgrenze: «von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen, den Modulen C1-C4 und Modul D» nach EN 15804+A2
- Funktionale Einheit: 1 m^2 Strasse
- Referenznutzungsdauer: 60 Jahre

3.2 Projektspezifische Annahmen

In der vorliegenden Studie wurde eine Ökobilanzierung von Asphaltbelägen nach ISO 14040, ISO 14044 und EN 15804+A2 durchgeführt. Dabei wurde die Systemgrenze als «von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen, den Modulen C1-C4 und Modul D» definiert. Dementsprechend wurden zusätzlich zu den Pflichtmodulen (Herstellungsphase A1-A3, Entsorgungsphase C1-C4 und Vorteile und Belastungen ausserhalb der Systemgrenze Modul D) die Module Bauphase (A4 und A5) sowie der Ersatz während der

Nutzungsphase (B4) berechnet. Der betrachtete Lebenszyklus beginnt und endet mit einer abgefrästen Kantonsstrasse.

Eine Ökobilanzierung wurde bei drei Asphaltschichten durchgeführt: Deckschicht (SDA 4-16), Binderschicht (AC B 16 S/H) und Tragschicht (AC T 22 S/H). Dabei wurde die funktionale Einheit für alle drei Asphaltschichten als 1 m^2 Schweizer Kantonsstrasse definiert. Die Schichtstärke wurde mit 30 mm für die Deckschicht, 50 mm für die Binderschicht und 70 mm für die Tragschicht angenommen. Neben der Schichtstärke variiert auch der RAP-Gehalt bei den drei untersuchten Schichten. Die Deckschicht weist keinen RAP-Anteil auf, die Binderschicht einen RAP-Anteil von 50 Masse-% und die Tragschicht einen RAP-Anteil von 60 Masse-%. Auch die anderen Rohstoff-Anteile sowie die Asphalt-Dichte variieren bei den drei Schichten und werden im Kapitel Rohstoffbereitstellung (A1) detailliert aufgezeigt.

Die Berechnungen wurden mit der Software openLCA (2.1) und der Datenbank UVEK 2018 (UVEK LCI Data DQRv2:2018) durchgeführt. Der erst kürzlich erschienene Datenbestand UVEK 2022 konnte in dieser Studie noch nicht verwendet werden, da dieser noch nicht für openLCA verfügbar ist. Bei einer zukünftigen Ökobilanzierung sollte der aktuelle Stand des Datenbestandes verwendet werden.

Für alle drei Schichten wurden die Umweltwirkungsindikatoren Treibhausgasemissionen (ecoinvent 3.10, IPCC 2021, GWP100), Ökologische Knappheit (ecoinvent 3.10, Ecological Scarcity 2021, Total UBP'21) und Primärenergie (ecoinvent 3.10, Cumulative Energy Demand) berechnet. Die Primärenergie wurde aufgeteilt in erneuerbare Primärenergie, welche stofflich (PERM, z.B. verbautes Holz in einem Dachstuhl) oder energetisch (PERE, z.B. verbranntes Holz als thermische Energiequelle), und in nicht erneuerbare Primärenergie, welche stofflich (PENRM, z.B. verbautes Bitumen in Asphalt) oder energetisch (PENRE, z.B. verbrannter Diesel in Maschine) genutzt wurde. Die Aufteilung wurde mit einem oberen Heizwert von Bitumen von 41.39 MJ/kg errechnet (Ecoquery: «market for waste bitumen»). Nachfolgend nochmals die vier Primärenergie-Kategorien zur Übersicht:

- PENRM: Primärenergie nicht erneuerbar, stofflich verwendet
- PENRE: Primärenergie nicht erneuerbar, energetisch verwendet
- PERM: Primärenergie erneuerbar, stofflich verwendet
- PERE: Primärenergie erneuerbar, energetisch verwendet

3.3 Rohstoffbereitstellung (A1)

Abbildung 3 zeigt die prozentuale Aufteilung der Rohstoffe Primär-Bitumen, Primär-PmB (polymermodifiziertes Bitumen), RAP, Splitt, Brechsand und Füller in den drei untersuchten Schichten (Deckschicht SDA 4-16, Binderschicht AC B 16 S/H + RAP und Tragschicht AC T 22 S/H + RAP). In der Deckschicht sind 6.2 Masse-% Primär-PmB und in der Binderschicht 2.3 Masse-% Primär-PmB eingerechnet. Bei der Tragschicht sind 1.7 Masse-% nicht modifiziertes Bitumen (Primär-Bitumen) eingerechnet. Die Deckschicht enthält kein RAP, während die Binderschicht 50 Masse-% und die Tragschicht 60 Masse-% RAP enthält.

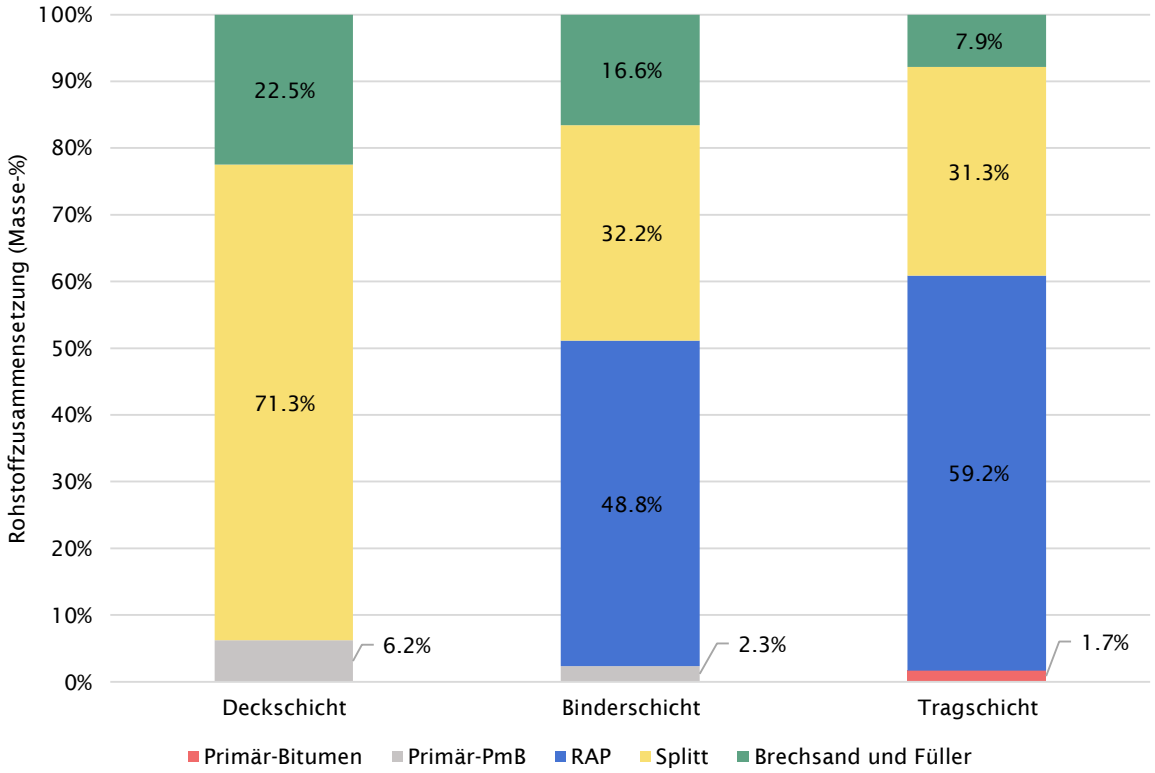

Abbildung 3: Prozentuale Aufteilung der Rohstoffe Primär-Bitumen, Primär-PmB, RAP, Splitt, Brechsand und Füller für die drei untersuchten Schichten: Deck-, Binder, und Tragschicht.

Tabelle 3 zeigt die Schichtstärken und -dichten der Deck-, Binder- und Tragschicht sowie das daraus berechnete Volumen und die Masse pro Quadratmeter. Die Deckschicht hat eine Stärke von 30 mm und eine Dichte von 2453 kg/m³, was ein Volumen von 0,03 m³ und eine Masse von 73,6 kg/m² ergibt. Die Binderschicht weist eine Stärke von 50 mm und eine Dichte von 2484 kg/m³ auf, was zu einem Volumen von 0,05 m³ und einer Masse von 124,2 kg/m² führt. Die Tragschicht hat eine Stärke von 70 mm und eine Dichte von 2510 kg/m³, mit einem Volumen von 0,07 m³ und einer Masse von 175,7 kg/m².

Es ist wichtig, die Lebensdauer der Asphaltbeläge zu berücksichtigen, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit hat. Die Lebensdauer der Deckschicht wird auf 10 Jahre geschätzt, die der Binderschicht auf 20 Jahre und diejenige der Tragschicht auf 60 Jahre. Diese Schätzungen basieren auf Erfahrungen und Daten, die von verschiedenen Kantonen im Rahmen dieses Projektes gesammelt wurden.

Tabelle 3: Schichtstärke und -dichte der ausgewählten Deck-, Binder und Tragschicht und das daraus berechnete Volumen und die Masse.

	Schicht-Stärke (mm)	Volumendichte (kg/m^3)	Volumen (m^3)	Flächendichte (kg/m^2)
Deckschicht (SDA 4-16)	30	2453	0.03	73.6
Binderschicht (AC B 16 S/H + RAP)	50	2484	0.05	124.2
Tragschicht (AC T 22 S/H + RAP)	70	2510	0.07	175.7

Füller können aus gemahlenem Sandstein hergestellt werden. Sandsteine setzten sich aus vielen Mineralien zusammen. Tabelle 4 zeigt die mineralogische Füller-Zusammensetzung beispielhaft gemäss dem Unternehmen Famsa. Da es für die Berechnungen der Umweltwirkungen in dieser Studie keinen gemahlenen Sandstein im UVEK-Datenbestand gibt, wurden Datensätze der einzelnen Mineralien angenommen. In Anbetracht der geringen Füller-Mengen und der relativ tiefen Umweltwirkungen, erschein dieses Vorgehen vertretbar. Zukünftig sollten diese Annahmen mit einem gemahlenen Sandstein, welcher mit Herstellerangaben modelliert wird, ersetzt werden.

In der Tabelle 4 werden die ursprünglichen Anteile der Füller-Rohstoffe von Famsa und ihre Zuordnung zu den entsprechenden Namen in der UVEK-Datenbank dargestellt, gefolgt von der neuen Aufteilung in Prozent. Der Rohstoff Quarz, der bei Famsa einen Anteil von 33,3 % hat, wird in der UVEK-Datenbank als Silica Sand bezeichnet und macht nun 57 % der neuen Aufteilung aus. K-Feldspat, ursprünglich mit 4,2 % vertreten, wird als Feldspar in der UVEK-Datenbank geführt und hat in der neuen Aufteilung einen Anteil von 7 %. Na-Plagioklas und Pyrit, die bei Famsa 12,3 % bzw. 0,8 % ausmachen, sind in der UVEK-Datenbank nicht vorhanden und werden daher in der neuen Aufteilung nicht berücksichtigt. Calcit, das 17,3 % der Füller-Rohstoffe bei Famsa ausmacht, wird als Limestone in der UVEK-Datenbank bezeichnet und hat nun einen Anteil von 30 %. Dolomit bleibt mit einem Anteil von 3,2 % (Dolomite) nahezu unverändert und hat in der neuen Aufteilung 6 %. Muscovit / Illit und Chlorit, die bei Famsa 6,6 % bzw. 3,3 % ausmachen, sind ebenfalls nicht in der UVEK-Datenbank vorhanden und werden in der neuen Aufteilung nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Neue Aufteilung der Füller-Rohstoffe von Famsa gemäss vorhandenen Datensätzen im UVEK-Datenbestand 2018.

Bezeichnung von Famsa	Aufteilung Füller Famsa (%)	Bezeichnung in der UVEK-Datenbank	neue Aufteilung (%)
Quarz	33.3%	Silica Sand	**57%**
K-Feldspat	4.2%	Feldspar	**7%**
Na-Plagioklas	12.3%	nicht vorhanden	nicht berücksichtigt
Calcit	17.3%	Limestone	**30%**
Dolomit	3.2%	Dolomite	**6%**
Pyrit	0.8%	nicht vorhanden	nicht berücksichtigt
Muscovit / Illit	6.6%	nicht vorhanden	nicht berücksichtigt
Chlorit	3.3%	nicht vorhanden	nicht berücksichtigt

3.4 Transporte (A2, A4 und C2)

Tabelle 5 zeigt die angenommenen Transportwege für verschiedene Rohstoffe und Produkte, die im Projekt verwendet werden, und gibt die jeweiligen Quellen an. Alle Transporte werden mit einem durchschnittlichen Schweizer Lastwagen (32-40 t) angenommen. Alle diese Annahmen sind wichtig, um die Umweltwirkungen der Transporte zu bewerten und die Nachhaltigkeit der Materialbeschaffung zu analysieren.

Tabelle 5: Angenommene Transportwege pro Material unter Angabe der Quelle.

Material	Transportweg (km)	Quelle
Bitumen/PmB (A2)	300	Lenk 2023
Füller (A2)	150	Lenk 2023
RAP (A2)	34	Schindler et al. 2024
Splitt (A2)	50	Lenk 2023
Brechsand (A2)	50	Lenk 2023
Einbau-Asphalt (A4)	34	Schindler et al. 2024
Ausbau-Asphalt (C2)	34	Schindler et al. 2024

3.5 Asphalt-Herstellung (A3)

Für die Produktion von 1 Tonne Deckschicht wurde für Elektrizität 4 kWh/t (Lenk 2023) und für Wärme 75 kWh/t angenommen (Milachowski et al. 2010). Bei der Binder- und Tragschicht wurde ebenfalls mit 4 kWh/t Elektrizität gerechnet, aber bei der Wärme ein etwas tieferer Verbrauch mit 61.4 kWh/t angenommen (Erfahrungswert Umtec Technologie AG). Zusätzlich dazu wurde eine Industriehalle aus Stahl, ein Förderband, Industriemaschinen und deren Diesel-Verbrauch miteingerechnet. Die Emissionen bei der Asphaltherstellung wurden aus der Studie von Liechti et al. (2016) übernommen. Eine Auflistung aller verwendeten Datensätze für die Herstellung von Asphalt ist im Anhang C aufgeführt.

3.6 Ein- und Rückbau (A5 und C1)

Die Ein- und Rückbauprozesse wurde von Lenk (2023) übernommen. Seine Modellierung basiert auf einer Teststrecke in Frick AG mit einer Breite von 7.55 m und einer Länge von 150 m. Diese wurde mit dem Asphaltwerk GABAG durchgeführt.

Der Einbau der Asphaltschichten beginnt mit der Reinigung der abgefrästen Strasse mit einem Schraubenkompressor und einer Strassenreinigungsmaschine, so dass für den Einbau eine trockene und saubere Fräsfläche zur Verfügung steht. Da die Reinigung der gefrästen Fläche nur einmal durchgeführt wird (Schraubenkompressor und Strassenreinigungsmaschine), wird diese Aktivität auf alle erneuerten Schichten gleichmässig verteilt.

Der Einbau wird anschliessend mit Asphaltfertiger, Vibrowalzen, kleinen Vibrowalzen und statischen Dreiradwalzen durchgeführt. Die Modellierung der einzelnen Maschinen von Lenk (2023) wurde für 1 m^2 angepasst und bei allen drei Schichten gleich angenommen.

Der Ersatz beginnt mit dem Ausbau der Schichten anhand einer Strassenfräse. Auch die Modellierung der Strassenfräse wurde von Lenk (2023) übernommen und für 1 m^2 angepasst. Im Anschluss folgt der Einbau wie oben beschrieben. Nach 60 Jahren werden alle drei Schichten mit einer Strassenfräse ausgebaut. Eine Auflistung aller verwendeten Datensätze für die Ein- und Ausbaumaschinen ist im Anhang C aufgeführt.

3.7 Ersatz (B4)

Im Modul B4 ist der Ersatz während 60 Jahren modelliert. Dies beinhaltet jeweils den Ausbau der alten Schicht(en) und deren Entsorgung sowie die Neu-Herstellung der Schicht(en) und deren Einbau. In 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal (Jahr 10, 20, 30, 40 und 50), die Binderschicht 2-mal (Jahr 20 und 40) und die Tragschicht nicht ersetzt.

3.8 Abfallbehandlung und Deponierung (C3 und C4)

Gemäss der Studie von Gauch et al. (2016) wird angenommen, dass der ausgebaute Asphalt zu 83 Masse-% rezykliert und zu 17 Masse-% deponiert wird. Nicht betrachtet wurden hier die Effizienz respektive die Verluste während des Recycling-Prozesses. Anhand von Daten aus Recyclingbetrieben könnten die stofflichen Ströme zukünftig weiter präzisiert werden. Bei der Abfallbehandlung gilt es abzuwägen, ob die Prozessschritte beim Recycling innerhalb oder ausserhalb der Systemgrenzen betrachtet werden. In anderen Worten, ob diese Prozessschritte als Abfallbeseitigung oder Herstellung von RAP angesehen werden. In dieser Studie wurde deshalb eine ökonomische Allokation angewandt. Gemäss publizierten Preislisten bekommen Recyclingwerke deutlich mehr Geld für die Abfallbeseitigung als für das hergestellte RAP. Gemäss diesen Preislisten und Angaben von Umtec Technologie AG wurde die ökonomische Allokation in dieser Studie wie folgt festgelegt: 81 % der Recyclingprozesse werden innerhalb der Systemgrenzen (Abfallbeseitigung) und 19 % ausserhalb der Systemgrenzen (Herstellung von RAP) betrachtet.

3.9 Modul D

Die Berechnung der Belastung und Vorteile über die Systemgrenzen hinaus wurde gemäss der Norm EN 15804+A2 durchgeführt. Dabei wurden die Lasten und Vorteile bezogen auf den Export von Sekundärmaterial errechnet. Es wird angenommen, dass das RAP 1:1 Primärrohstoffe ersetzt. Die Umweltwirkungen der Herstellung von RAP (respektive 19 % davon, siehe ökonomische Allokation im Unterkapitel 3.8) werden den Umweltwirkungen der Herstellung der Primärrohstoffe Bitumen, Splitt, Brechsand und Füller gegenübergestellt. Die im RAP enthaltenen Sekundärrohstoffe (Bitumen, Splitt, Brechsand und Füller) wurden anhand der Rohstoffzusammensetzung der einzelnen Schichten in diesem Projekt berechnet.

In Modul D werden nicht nur die ausgebaute Menge im Jahr 60 berücksichtigt, sondern alle Abfallströme über die gesamten 60 Jahre. Davon wird schlussendlich nur die Menge, welche rezykliert wird abzüglich der bereits berücksichtigten RAP-Menge innerhalb der Systemgrenze, berücksichtigt. Die RAP-Menge, welche innerhalb der Systemgrenze bereits berücksichtigt wurde, ist jene Menge, welche in dieser Studie bei der Rohstoffbereitstellung (A1) respektive beim Ersatz (B4) eingerechnet ist und bereits zu einer Reduktion der Primärrohstoffe geführt hat.

Zum besseren Verständnis, welche Mengen in Modul D berücksichtigt wurden, sind in der Abbildung 4 die Mengen für die Binderschichten beispielhaft ersichtlich. Vom gesamten Ausbauasphalt der 3 Binderschichten (372 kg) werden 83 Masse-% rezykliert (309 kg) und 17 Masse-% einer Deponie zugeführt (63 kg). Innerhalb der Systemgrenze wurden bei der Binderschicht bereits Sekundär-Rohstoffe berücksichtigt (48.8 Masse-% RAP, 182 kg für 3 Binderschichten). Diese Menge darf in Modul nicht mehr betrachtet werden und wird daher von der Recyclingmenge abgezogen. Damit verbleiben 127 kg aus den 3 ausgebauten Binderschichten, welche Primär-Rohstoffe in einem weiteren Lebenszyklus ersetzen könnten. Die Aufteilung der gegenübergestellten Primär-Rohstoffe erfolgt nach der Zusammensetzung der Ausbauschicht. Am Beispiel der Binderschicht könnten somit mit den 127 kg Ausbauasphalt 6 kg Primär-Bitumen, 100 kg Primär-Splitt und 21 kg Primär-Brechsand und -Füller ersetzt werden.

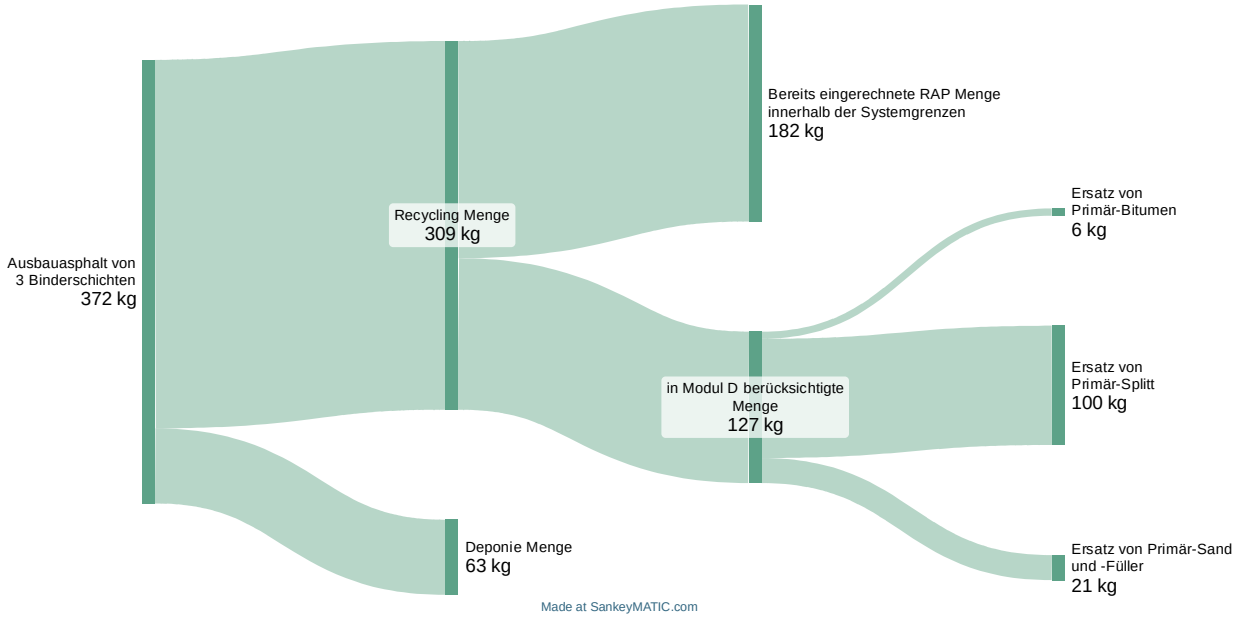

Abbildung 4 : Berechnung der berücksichtigten Mengen in Modul D für die Binderschichten.

4 Resultate und Diskussion

4.1 Treibhausgasemissionen

Über alle betrachteten Lebenszyklusphasen und 60 Jahre verursacht 1 m^2 Deckschicht 73.8 kg CO_2-eq., 1 m^2 Binderschicht 36.2 kg CO_2-eq. und 1 m^2 Tragschicht 13.7 kg CO_2-eq. Die grossen Unterschiede zwischen den Schichten kommen dabei hauptsächlich von der unterschiedlich angenommenen Lebensdauer und den damit verbundenen Ersatz-Zyklen. So macht bezüglich Treibhausgasemissionen die Lebensphase des Ersatzes (B4) bei der Deckschicht rund 84 % (5-mal ersetzt in 60 Jahren) und bei der Binderschicht rund 67 % aus (2-mal ersetzt in 60 Jahren). Da die Tragschicht in 60 Jahren nie ersetzt wird, gibt es keinen Ersatz (B4).

Da in der Deckschicht kein RAP verwendet wird, verursacht die Rohstoffbereitstellung (A1) von Bitumen, Splitt, Brechsand und Füller für 1 m^2 Deckschicht (4.1 kg CO_2-eq.) mehr Treibhausgasemissionen als bei 1 m^2 Binder- und Tragschicht, in denen RAP verwendet wird (2.7 kg CO_2-eq. und 2.2 kg CO_2-eq.). Dies obwohl die Binder- und Tragschicht, bedingt durch die grössere Schichtstärke, mehr Rohstoffe brauchen. Der Bau-/Einbauprozess (A5) gehört ebenfalls zu den Modulen, bei denen erhebliche Treibhausgasemissionen verursacht werden. Bei allen drei Schichten wurden diese Prozesse wegen fehlenden Hintergrundinformationen gleich angenommen und resultiert hier mit 3.4 kg CO_2-eq. Bei weiterführenden Arbeiten könnten die Ein- respektive Ausbauprozesse weiterentwickelt werden. Sicherlich interessant wäre die Betrachtung der Maschinenstunden in Abhängigkeit der Schichten respektive deren Stärken.

Die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung (A3) sind abhängig von der zu produzierenden Asphaltmenge. Für 1 m^2 Deckschicht wird am wenigsten Asphalt benötigt (2.1 kg CO_2-eq.), die Binderschicht liegt mengenmässig in der Mitte (3.0 kg CO_2-eq.) und für 1 m^2 Tragschicht wird am meisten Asphalt benötigt (4.2 kg CO_2-eq.). Als fünft wichtigste Lebensphase in Bezug auf die Treibhausgasemissionen ist der Rückbau/Abriss (C1) zu nennen, welcher für alle drei Schichten gleich angenommen wurde (1.0 kg CO_2-eq., Abbildung 5).

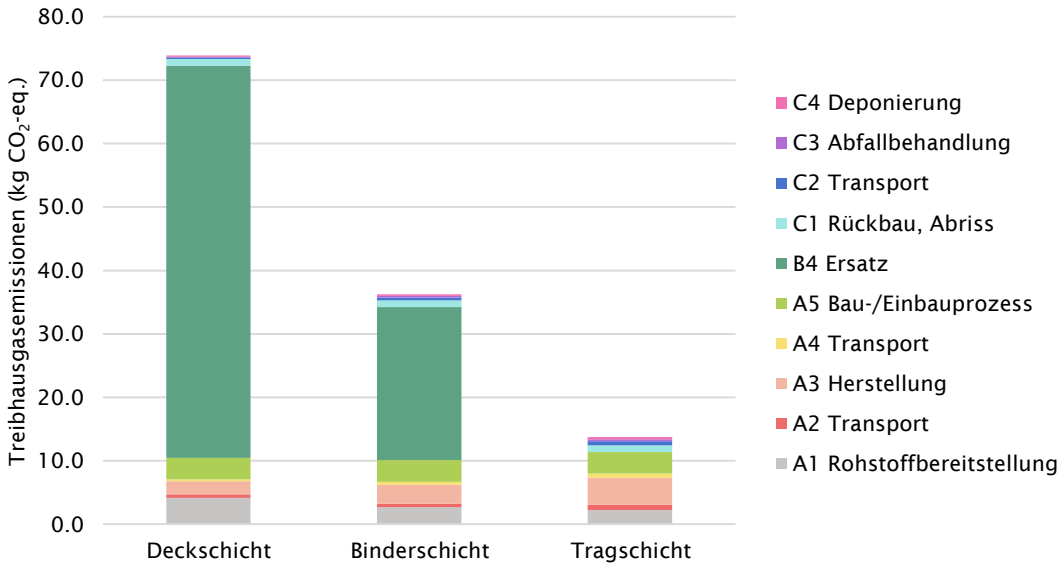

Abbildung 5 : Treibhausgasemissionen von 1 m² Deck-, Binder- und Tragschicht in den untersuchten Modulen. In der betrachteten Referenznutzungsdauer von 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal, die Binderschicht 2-mal und die Tragschicht nicht ersetzt.

In Abbildung 6 ist am Beispiel der Tragschicht die prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen der betrachteten Module dargestellt (Abbildung für Binder- und Deckschicht in Anhang B). Wie vorher beschrieben, sieht diese Aufteilung bei der Binder- und Deckschicht leicht anders aus, dient hier aber als grobe Einstufung der Relevanz der Module. Ausser dem Ersatz sind somit der Bau-/Einbauprozess (A5), die Herstellung (A3) und die Rohstoffbereitstellung (A1) von grosser Bedeutung. Zählt man die Transporte A2, A4 und C2 zusammen, haben auch diese mit 16 % einen wesentlichen Anteil. Die Prozesse Abfallbehandlung C3 mit 2 % und die Deponierung C4 mit 3 % haben einen geringen Einfluss.

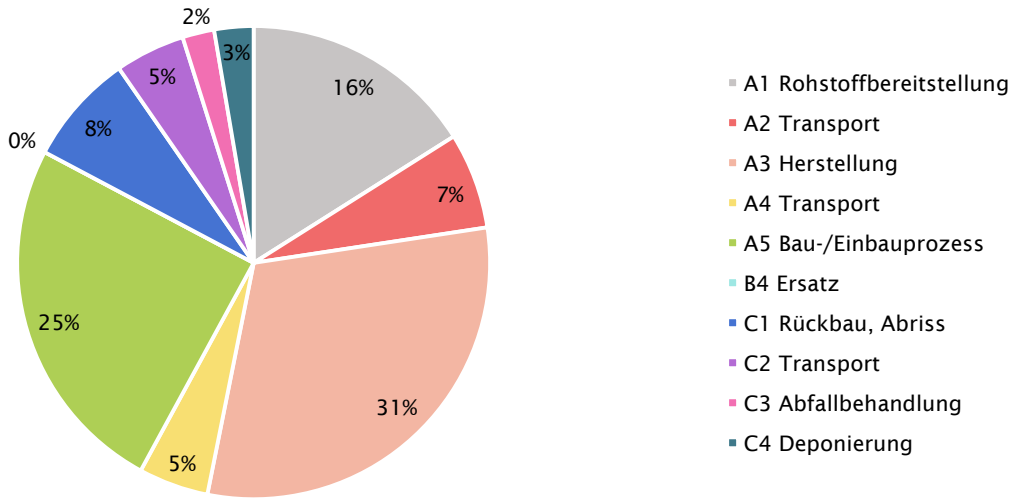

Abbildung 6 : Prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Modulen bei der Tragschicht.

Die Treibhausgasemissionen bei der Rohstoffbereitstellung (A1) werden hauptsächlich (81 % bis 92 %) vom Rohstoff Bitumen respektive polymermodifiziertes Bitumen (PmB) verursacht. In der Abbildung 7 ist zudem ersichtlich, dass bei der Binder- und Tragschicht die Treibhausgasemissionen vom Bitumen tiefer sind als bei der Deckschicht. Dies weil das «primäre» Bitumen durch Bitumen im RAP ersetzt wird und dieses «sekundäre» Bitumen im RAP deutlich weniger Treibhausgasemissionen bei der Aufbereitung verursacht. Die anderen Rohstoffe verursachen deutlich weniger Treibhausgasemissionen und zeigen bei allen Schichten vergleichbare Umweltwirkungen: Splitt 6 – 12 %, Brechsand und Füller 2 – 4 % und RAP 0 – 2 %.

Bei der Deck- und Binderschicht wird polymermodifiziertes Bitumen (PmB) verwendet. PmB besteht in dieser Studie aus 96 Masse-% Bitumen und 4 Masse-% Polybutadiene. Die Treibhausgasemissionen bei der Rohstoffbereitstellung von Polybutadiene sind um rund 6.5-mal höher als die von Bitumen (3.99 kg CO_2-eq./kg Polybutadiene und 0.61 kg CO_2-eq./kg Bitumen). Zudem wird PmB in einem Mischprozess vor der Asphaltherstellung hergestellt und verursacht dadurch zusätzliche Treibhausgasemissionen durch die Infrastruktur und die Bereitstellung von Energie.

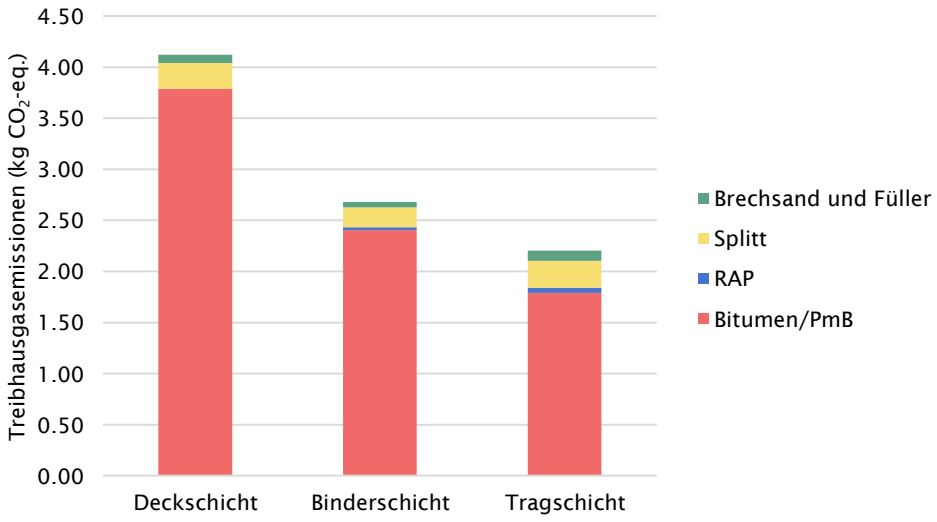

Abbildung 7 : Treibhausgasemissionen der Rohstoffbereitstellung (A1) von 1 m^2 Deck-, Binder- und Tragschicht.

Beim Bau-/Einbauprozess (A5) und dem Rückbau/Abriss (C1) kommen unterschiedliche Maschinen zum Einsatz. Dabei verursachen die Vibrowalze, der Asphaltfertiger und die Strassenfräse die meisten Treibhausgasemissionen beim Ein- respektive Ausbau von 1 m^2 Asphalt. Da der Bau-/Einbauprozess bei der Deck-, Binder- und Tragschicht wegen fehlenden Hintergrundinformationen gleich angenommen wurde, sind auch die Resultate für die drei Schichten identisch (Abbildung 8). Bei weiterführenden Arbeiten könnten die Ein- respektive Ausbauprozesse weiterentwickelt werden. Sicherlich interessant wäre die Betrachtung der Maschinenstunden in Abhängigkeit der Schichten respektive deren Stärken.

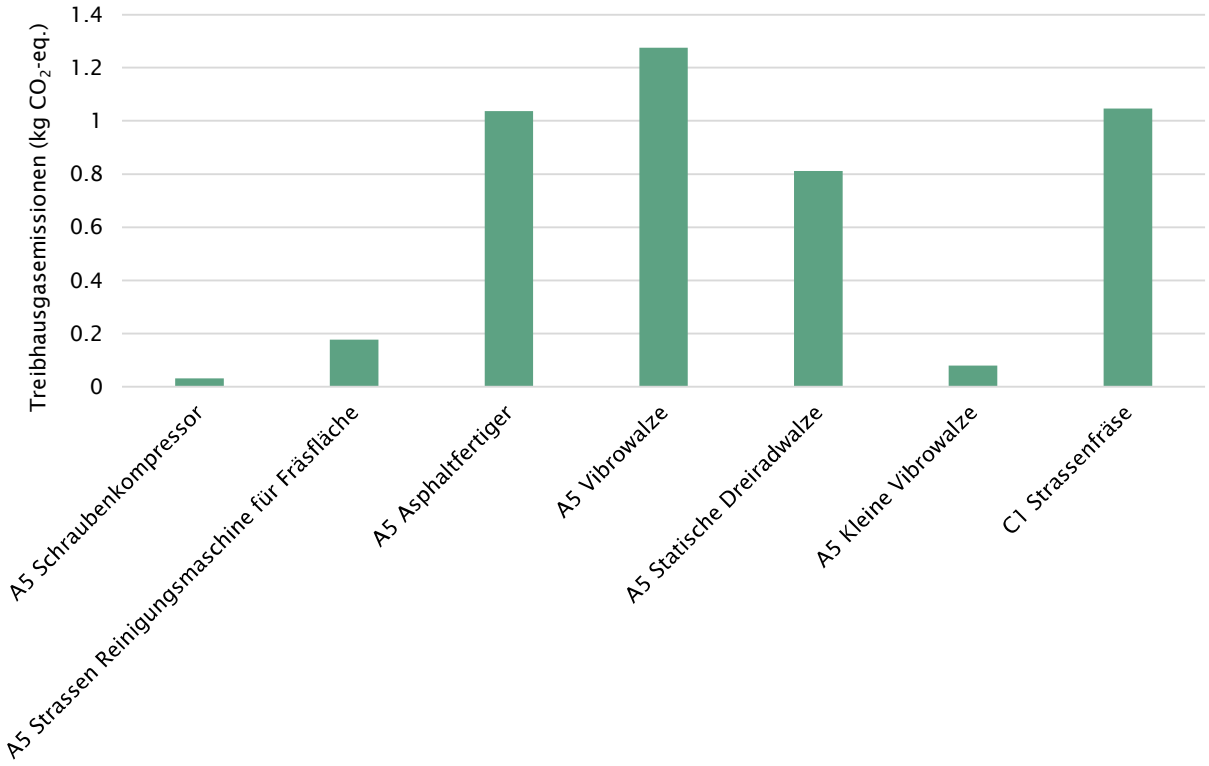

Abbildung 8 : Treibhausgasemissionen der Ein- und Ausbauprozesse (A5 und C1) für 1 m^2 Asphaltschicht (Deck-, Binder- und Tragschicht sind identisch).

Die Lebensdauer der Asphaltschichten respektive die Anzahl der berücksichtigten Ersatz-Zyklen hat einen entscheidenden Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen. Berücksichtigt man die Zeit, so entstehen im «Jahr 0» Treibhausgasmissionen für die Herstellungsphase (A1-A3) und die Bauphase (A4-A5), im «Jahr 10, 20, 30, 40 und 50» Treibhausgasemissionen für den Ersatz (B4) und im «Jahr 60» Treibhausgasemissionen für die Entsorgungsphase (C1-C4). In Abbildung 9 ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den analysierten Schichten hauptsächlich durch den Ersatz (B4) in den «Jahren 10 bis 50» entstehen.

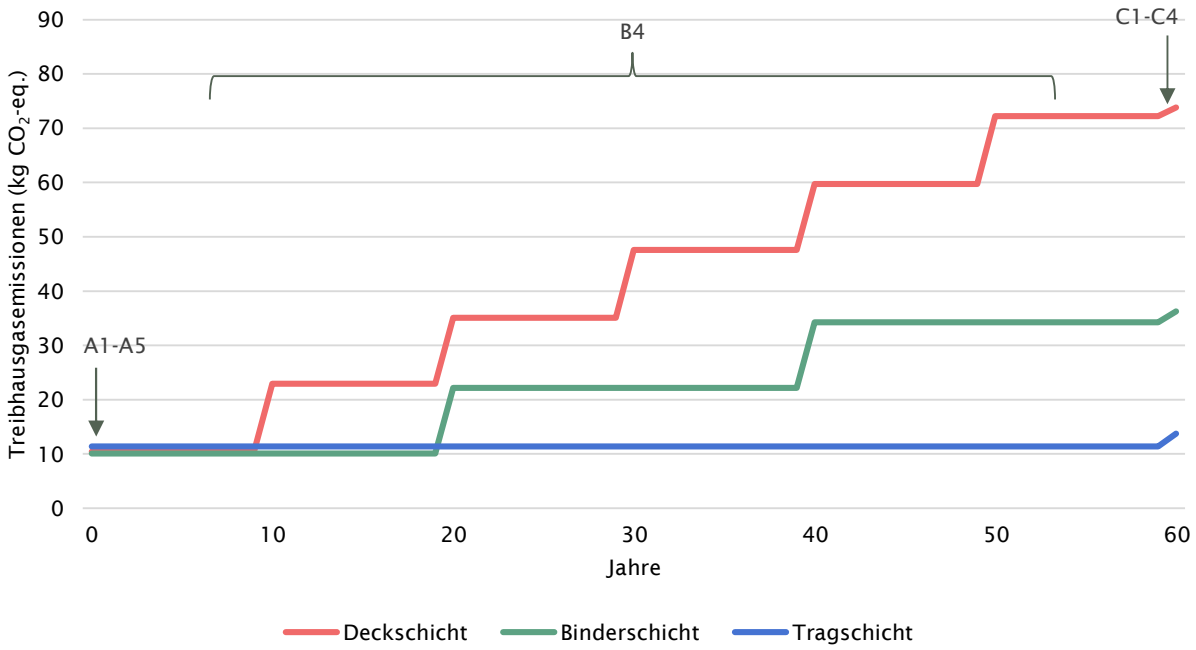

Abbildung 9 : Treibhausgasemissionen der Deck-, Binder- und Tragschicht in Abhängigkeit der Zeit über die betrachtete Referenznutzungsdauer von 60 Jahren.

4.2 Ökologische Knappheit

Der Einfluss der Lebenszyklusphasen auf die betrachtete Umweltauswirkung ist bei der Ökologischen Knappheit vergleichbar mit den Resultaten bei den Treibhausgasemissionen. Auch bei den Resultaten der Ökologischen Knappheit sind die Module Ersatz (B4), Rohstoffbereitstellung (A1), Bau-/Einbauprozess (A5) und Herstellung (A3) zentral. Im Gegensatz zu den Resultaten der Treibhausgasemissionen ist jedoch die Rohstoffbereitstellung (A1) bei der Ökologischen Knappheit etwas mehr gewichtet. Die Rohstoffbereitstellung (A1) macht 23 % bei der Ökologischen Knappheit und 16 % bei den Treibhausgasemissionen aus (am Beispiel der Tragschicht, Abbildung 10).

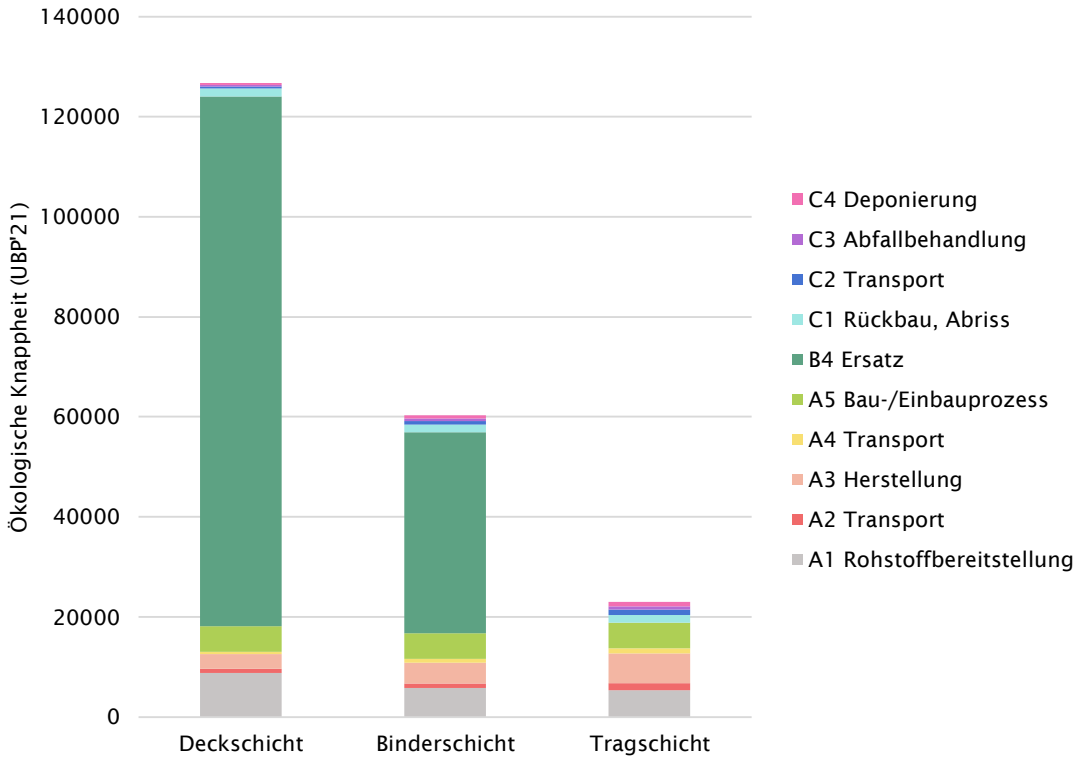

Abbildung 10 : Ökologische Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP'21) von 1 m^2 Deck-, Binder- und Tragschicht in den untersuchten Modulen. In der betrachteten Referenznutzungsdauer von 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal, die Binderschicht 2-mal und die Tragschicht nicht ersetzt.

Die Methodik der Ökologischen Knappheit berechnet die Umweltbelastungspunkte auf Grund einiger gewichteten Wirkungskategorien. Betrachtet man in Abbildung 11 die Resultate auf der Ebene der Wirkungskategorien am Beispiel der Deckschicht, gibt es drei zentrale Kategorien. Die Wirkungskategorie «Climate Change» ist für 58 %, «Energy resources» für 16 % und «Emissions to air» für 15 % der gesamten Umweltbelastungspunkte verantwortlich (alle Resultate der drei Schichten in Anhang B).

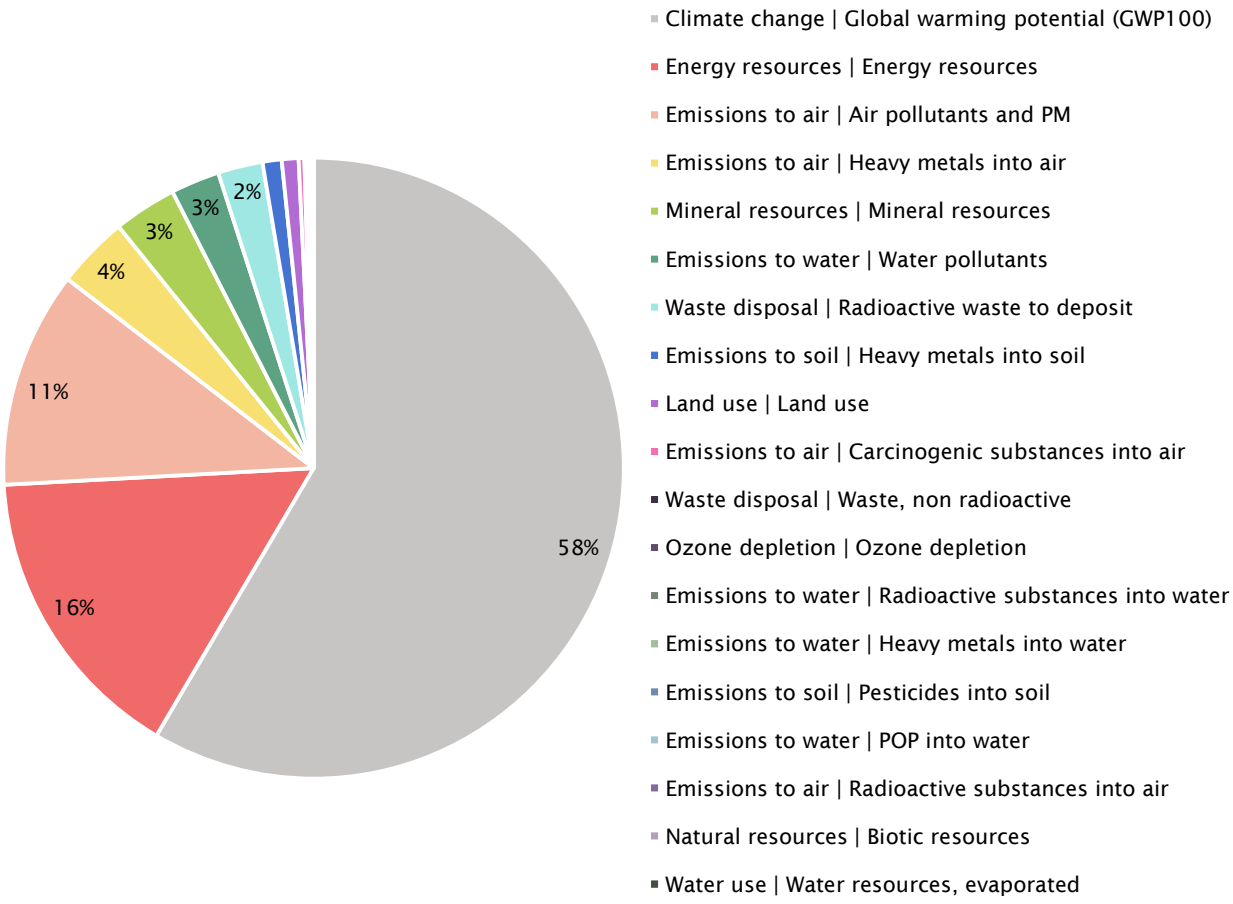

Abbildung 11 : Prozentuale Aufteilung der Umweltbelastungspunkte UBP'21 auf die berücksichtigten Wirkungskategorien von 1 m^2 Deckschicht über alle Module und 60 Jahre Referenznutzungsdauer.

4.3 Primärenergie

Bei der Primärenergie wird in erneuerbare und nicht erneuerbare sowie in stofflich als auch energetisch genutzte Energie unterschieden. Bei den betrachteten Asphaltschichten gibt es keine erneuerbare Energie, welche stofflich genutzt wird – wie es zum Beispiel bei Holzprodukten der Fall wäre (PERM). Hingegen wird die Energie, welche im Bitumen gespeichert ist bei der nicht erneuerbaren Primärenergie, stofflich genutzt ausgewiesen (PENRM). Der Anteil an erneuerbarer Primärenergie (PERE) bei der energetischen Nutzung ist mit 2-3 % deutlich kleiner als der Anteil an nicht erneuerbarer Primärenergie (PENRE).

In Abbildung 12 sind vollständigkeitshalber alle Primärenergiekategorien aufgelistet. Der Fokus liegt dabei aber auf der nicht erneuerbaren Primärenergie, welche energetisch genutzt wird (PENRE). Der Einfluss der Lebenszyklusphasen ist hier vergleichbar mit den Resultaten bei den Treibhausgasemissionen. Daraus leitet sich die Hypothese ab, dass die Bereitstellung der nicht erneuerbaren Primärenergie für energetische Zwecke für die Treibhausgasemissionen verantwortlich ist.

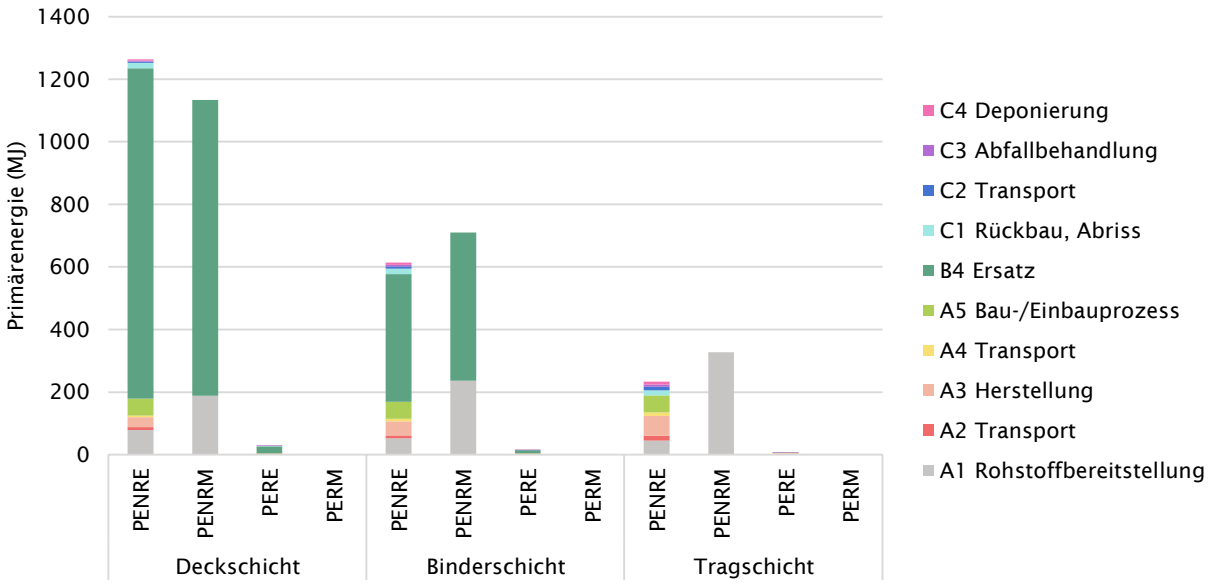

Abbildung 12 : Primärenergie von 1 m^2 Deck-, Binder- und Tragschicht in den untersuchten Modulen. In der betrachteten Referenznutzungsdauer von 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal, die Binderschicht 2-mal und die Tragschicht nicht ersetzt. Aufteilung der Primärenergie in erneuerbare Energie, welche energetisch (PERE) oder stofflich (PERM), und nicht erneuerbare Energie, welche energetisch (PENRE) oder stofflich (PENRM) genutzt wurde. (PERM = 0)

4.4 Modul D

In Modul D werden die Vorteile und Lasten ausserhalb der Systemgrenze informativ festgehalten (siehe Kapital 3.9). In diesem Kapitel werden die Vorteile für den Export von RAP (Sekundärrohstoff) beschrieben. Die Berechnungen zeigen, dass die Rohstoffbereitstellung für Primär-Asphalt deutlich mehr Treibhausgasemissionen verursacht als für RAP. Demensprechend können bei der Substitution von Primär-Asphalt mit RAP, Treibhausgasemissionen eingespart werden. Das Ausmass dieses Vorteils hängt bei der Betrachtung von 1 m^2 Asphaltschicht vom Volumen und der Anzahl der Ersatz-Zyklen ab. So wird im Modul D eine Asphalt-Menge von 366 kg bei der Deckschicht, 127 kg bei der Binderschicht und 42 kg bei der Tragschicht berücksichtigt (Berechnung und Beispiel gemäss Kapitel 3.9). Dementsprechend wird der grösste Vorteil bei der Deckschicht mit -15,4 kg CO_2-eq., der zweitgrösste bei der Binderschicht mit -4.1 kg CO_2-eq. und der kleinste bei der Tragschicht mit -1.3 kg CO_2-eq. bilanziert (Abbildung 13).

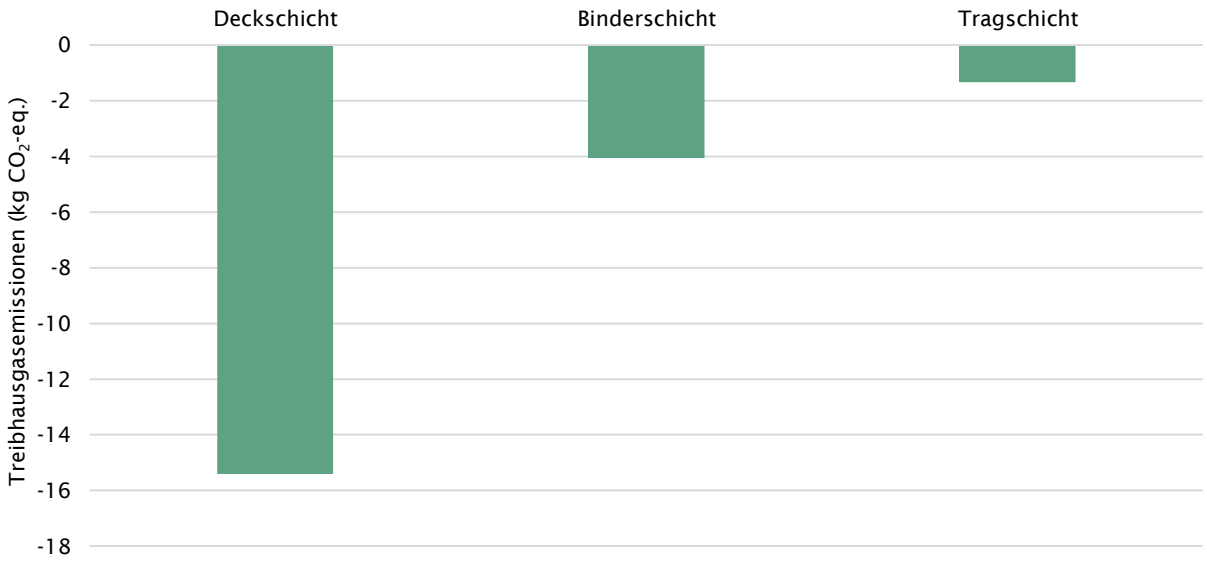

Abbildung 13 : Vorteile ausserhalb der Systemgrenze bezogen auf den Export von RAP für 1 m^2 Deck-, Binder- und Tragschicht über die Referenznutzungsdauer von 60 Jahren.

In Abbildung 14 zeigt sich der zuvor erwähnte Vorteil von RAP im Vergleich mit Primär-Asphalt bei der Betrachtung der Rohstoffbereitstellung für eine Tonne Asphalt. Die Rohstoffbereitstellung (A1) einer Tonne RAP verursacht 0.5 kg CO_2-eq. und einer Tonne Primär-Asphalt (0 % RAP) 42.5 kg CO_2-eq. Die Treibhausgasemissionen für RAP erscheinen hier sehr tief. Dabei gilt es zu beachten, dass die Umweltwirkungen für den Recyclingprozess zu 81 % der Abfallbehandlung (C3) innerhalb der Systemgrenzen und nur zu 19 % dem Modul D zugeschrieben werden (ökonomische Allokation). Zudem benötigt der Recyclingprozess von ausgebautem Asphalt deutlich weniger Energie als der Herstellungsprozess von Primär-Asphalt.

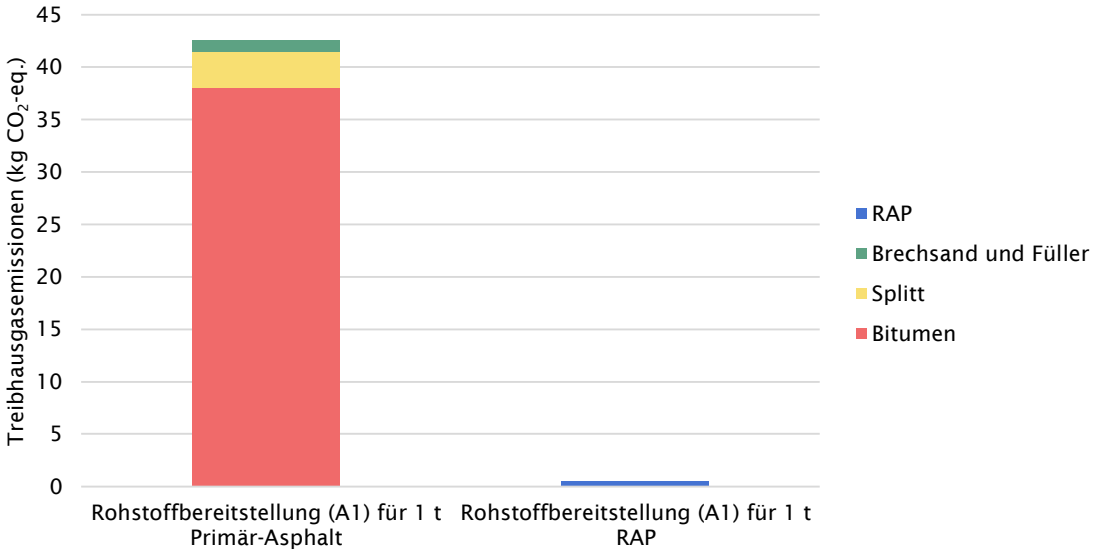

Abbildung 14 : Angenommener Vergleich in Modul D mit den Treibhausgasemissionen der Rohstoffbereitstellung (A1) von einer Tonne Primär-Asphalt und einer Tonne RAP.

5 Schlussfolgerung

In dieser Studie wurde eine umfassende Methodik zur Ökobilanzierung von Asphaltbelägen entwickelt, angewendet und extern validiert. Basierend auf den Standards ISO 14040/44 und EN 15804+A2 lag der Fokus auf der Analyse unterschiedlicher Lebenszyklusphasen und Modulen wie der Rohstoffbereitstellung, der Asphaltherstellung und dem Einbauprozess. Die Bewertung der Umweltwirkungen erfolgte mit den Indikatoren Treibhausgasemissionen, Primärenergie und ökologische Knappheit.

Durch die kürzere Lebensdauer der Deckschicht und die damit verbundenen Ersatz-Zyklen, weist diese Schicht deutlich höhere Umweltwirkungen im Vergleich zur Binder- oder Tragschicht auf. Damit zeigt sich auch das Potential zur Senkung der Umweltwirkungen durch eine längere Lebensdauer von Asphaltschichten. Weitere zentrale Module sind die Rohstoffbereitstellung, wo die Umweltwirkungen hauptsächlich durch die Bereitstellung von Bitumen verursacht werden, sowie die Asphaltherstellung und der Bau-/Einbauprozess.

Die ökologische Relevanz der analysierten Lebenszyklusphasen spiegelt sich konsistent in allen drei betrachteten Umweltwirkungsindikatoren wider. Auffällig ist das vergleichbare Resultat der nicht erneuerbaren Primärenergie, welche energetisch genutzt wurde, mit den Treibhausgasemissionen. Dies lässt vermuten, dass die Bereitstellung dieser Primärenergie zum Grossteil für die Treibhausgasemissionen verantwortlich ist.

Die Resultate zeigen auch potenzielle Ansatzpunkte zur Reduktion der Umweltwirkungen auf. Ein höherer RAP-Anteil und ein geringerer Bitumenanteil könnten aus ökobilanzieller Sicht positive Effekte haben. Alternativen zu den Rohstoffen Bitumen und Polybutadiene könnten geringere Umweltbelastungen verursachen. Bei den Ein- respektive Ausbaumaschinen wäre die hypothetische Senkung der Umweltwirkungen von elektrisch betriebenen Maschinen im Vergleich zu den heute noch mit Diesel betriebenen Maschinen zu prüfen.

In dieser Studie konnte eine Methodik zur Berechnung von Strassenbelägen aus der Literatur abgeleitet und mit Umtec Technologie AG abgestimmt werden. Nach der Durchführung der Ökobilanz konnte die Methodik zusätzlich in einer externen Prüfung durch Umtec Technologie AG validiert werden. Die kleineren Kritikpunkte aus diesem Prüfbericht konnten alle in der Studie umgesetzt respektive informativ festgehalten werden. Die hier dargestellte Methodik, insbesondere die grundlegenden Elemente im Unterkapitel 3.1, können für zukünftige Ökobilanzierungen von Asphaltbelägen als Grundlage verwendet werden. Je nach Ziel und Art der Ökobilanzierung sollte die Methodik spezifisch angepasst werden. Ebenfalls gilt es die Methodik ständig an die geltenden Normierungen sowie an aktualisierte Datensätze und Softwares anzupassen.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Lebenszyklusphasen und Module einer Ökobilanzierung nach EN 15804+A2. In Gelb hinterlegt sind die in dieser Studie berücksichtigten Module. 7

Abbildung 2 : Beispiele von Ökobilanz-Datenbanken (Bild: openLCA 2024). 10

Abbildung 3: Prozentuale Aufteilung der Rohstoffe Primär-Bitumen, Primär-PmB, RAP, Splitt, Brechsand und Füller für die drei untersuchten Schichten: Deck-, Binder, und Tragschicht. 14

Abbildung 4 : Berechnung der berücksichtigten Mengen in Modul D für die Binderschichten. 19

Abbildung 5 : Treibhausgasemissionen von 1 m² Deck-, Binder- und Tragschicht in den untersuchten Modulen. In der betrachteten Referenznutzungsdauer von 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal, die Binderschicht 2-mal und die Tragschicht nicht ersetzt. 21

Abbildung 6 : Prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Modulen bei der Tragschicht. 21

Abbildung 7 : Treibhausgasemissionen der Rohstoffbereitstellung (A1) von 1 m² Deck-, Binder- und Tragschicht. 22

Abbildung 8 : Treibhausgasemissionen der Ein- und Ausbauprozesse (A5 und C1) für 1 m² Asphaltschicht (Deck-, Binder- und Tragschicht sind identisch). 23

Abbildung 9 : Treibhausgasemissionen der Deck-, Binder- und Tragschicht in Abhängigkeit der Zeit über die betrachtete Referenznutzungsdauer von 60 Jahren. 24

Abbildung 10 : Ökologische Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP'21) von 1 m² Deck-, Binder- und Tragschicht in den untersuchten Modulen. In der betrachteten Referenznutzungsdauer von 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal, die Binderschicht 2-mal und die Tragschicht nicht ersetzt. 25

Abbildung 11 : Prozentuale Aufteilung der Umweltbelastungspunkte UBP'21 auf die berücksichtigten Wirkungskategorien von 1 m² Deckschicht über alle Module und 60 Jahre Referenznutzungsdauer. 26

Abbildung 12 : Primärenergie von 1 m² Deck-, Binder- und Tragschicht in den untersuchten Modulen. In der betrachteten Referenznutzungsdauer von 60 Jahren wird die Deckschicht 5-mal, die Binderschicht 2-mal und die Tragschicht nicht ersetzt. Aufteilung der Primärenergie in erneuerbare Energie, welche energetisch (PERE) oder stofflich (PERM), und nicht erneuerbare Energie, welche energetisch (PENRE) oder stofflich (PENRM) genutzt wurde. (PERM = 0) 27

Abbildung 13 : Vorteile ausserhalb der Systemgrenze bezogen auf den Export von RAP für 1 m² Deck-, Binder- und Tragschicht über die Referenznutzungsdauer von 60 Jahren. 28

Abbildung 14 : Angenommener Vergleich in Modul D mit den Treibhausgasemissionen der Rohstoffbereitstellung (A1) von einer Tonne Primär-Asphalt und einer Tonne RAP. 29

Abbildung 15 : Prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Lebensphasen bei der Binderschicht. 40

Abbildung 16 : Prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Lebensphasen bei der Deckschicht. 40

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Branchenspezifische Tools für Ökobilanzierungen von Strassenbelägen mit den Berechnungsmöglichkeiten der Umweltwirkungsindikatoren. 9

Tabelle 2 : Studien zu Ökobilanzierungen von Asphaltbelägen mit den jeweils berechneten Umweltwirkungsindikatoren. 11

Tabelle 3: Schichtstärke und -dichte der ausgewählten Deck-, Binder und Tragschicht und das daraus berechnete Volumen und die Masse. 15

Tabelle 4: Neue Aufteilung der Füller-Rohstoffe von Famsa gemäss vorhandenen Datensätzen im UVEK-Datenbestand 2018. 16

Tabelle 5: Angenommene Transportwege pro Material unter Angabe der Quelle. 16

Tabelle 6 : Auswertung der Wirkungskategorien bei der Berechnung der Ökologischen Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP21) und in Prozent von 1 m^2 der untersuchten Asphaltschichten und über die gesamte Nutzungsdauer von 60 Jahren. 41

8 Literaturverzeichnis

Bueche, Nicolas, André-Gilles Dumont. «Paquet de recherche PLANET: RS-5: Modèle global d'évaluation,» Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016)

ECO2nstruct. «ECO2nstruct – der Ökobilanzrechner für Infrastrukturbau-Projekte.» besucht 27.06.2024. www.infra-suisse.ch/nachhaltigkeit/eco2nstruct/

ECORCE2. «l'éco-comparateur ECORCE2.» besucht : 27.06.2024. www.ecorce2.ifsttar.fr/

EN 15804:2012+A2:2019. «Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.»

Famsa. «Dossier qualité 2023 - Granulats et filler pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels,» Famsa (2023)

Gauch, Marcel, Cecilia Matasci, Ingrid Hincapié, Raphael Hörler, Heinz Böni. «Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz,» EMPA (2016), Projekt MatCH

Gschösser, Florian, Holger Wallbaum. «Life cycle assessment of representative swiss road pavements for national roads with an accompanying life cycle cost analysis,» Environmental Science and Technology (2013)

ISO 14040:2006. «Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.»

ISO 14044:2006. «Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.»

Kytzia, Susanne, Thomas Pohl. «Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen,» Strasse und Autobahn, Themenheft Asphaltrecycling (2014)

LCA Pave. «LCA Pave Tool.» besucht: 27.06.2024. www.fhwa.dot.gov/pavement/lcatool/

LCA Software. «LCA Software – top 50 overview.» besucht 27.06.2024. www.lca-software.org/lca-top-50-overview/

Lenk, Joel. «Ökobilanz (LCA) von Gussasphalt als Deckschicht auf Schweizer Nationalstrassen,» Masterarbeit Berner Fachhochschule (2023)

Liechti, Jürg, Annina Gaschen, Mathias Breimesser, Christian Angst, Lukas Boesiger, Andrea Bieder. «Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten,» Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016)

Milachowski, Charlotte, Thorsten Strengel, Dirk Lowke, Christoph Gehlen. «Erstellung einer Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts,» Forschungsbericht 20-F-0068, TU München (2010)

openLCA. «lca-data.» besucht 27.06.2024. www.openlca.org/lca-data

PaLATE. «Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects» besucht 27.06.2024. www.faculty.ce.berkeley.edu/horvath/palate.html

Piao, Zhengyin, Kurt Heutschi, Reto Pieren, Peter Mikhailenko, Lily D. Poulikakos, Stefanie Hellweg. «Environmental trade-offs for using low-noise pavements: Life cycle assessment with noise considerations," Science of the Total Environment (2022)

Schindler, Johannes, Arthur Braunschweig, Rolf Huwyler, Erik Bühlmann. «Lärmarme Strassenbeläge – Ökobilanz und Lebenszykluskosten,» Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse (2024)

Anhang A – Prüfbericht Umtec Technologie AG

UTech
Umtec Technologie AG

Ökobilanzierung von Asphaltbelägen

Kritisches Review nach ISO 14040, ISO 14044 und ISO 14071

Autor*innen des geprüften Berichts

Patrick Fuchs, Berner Fachhochschule
Prof. Dr. Aude Chabrelie, Berner Fachhochschule
Paola Catalano, Berner Fachhochschule
Prof. Dr. Aybike Öngel, Berner Fachhochschule

Autor des Reviewberichtes

Dominik Osterwalder
Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon

Zürich, 19.06.2024

1. Einleitung

Die Plattform «Kies für Generationen» ist eine Austausch- und Innovationsplattform. Mitglieder sind der Fachverband der Kies- und Betonwerke Zürich (FKB), der Branchenverband arv Baustoffrecycling Schweiz (neu Baustoff Kreislauf Schweiz) sowie die Baudirektion des Kantons Zürich. Die Plattform besteht aus verschiedenen Arbeitsgruppen, die sich mit den unterschiedlichen Anwendungen von mineralischen Baustoffen befassen. Die Subgruppe Asphalt-Recycling sucht nach praktikablen Ansätzen zur Förderung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt und Niedrigtemperaturasphalt. Bei der Erarbeitung von Grundlagen für eine praxisorientierte technische Unterstützung der Bauherren hat sich jedoch gezeigt, dass in verschiedener Hinsicht weiterer Forschungsbedarf besteht, um den Weg für einen verstärkten Einsatz von Ausbauasphalt zu ebnen. Aus diesem Grund wurde unter anderem das Projekt «Einheitliches Verfahren zur Darstellung der Ökobilanz von Belägen» initiiert, das in diesem Review überprüft wird. Ziel des Projektes ist es, eine einheitliche Methode zur Bewertung von Asphaltbelägen über den gesamten Lebenszyklus mittels Ökobilanzierung zu erarbeiten.

Die Umtec Technologie AG wurde mit einem Review der Studie beauftragt, um die Qualität und Akzeptanz der entwickelten Ökobilanzmethode sicherzustellen, die den Anforderungen der internationalen Standards ISO 14040 und 14044, sowie ISO 14067 und 14071 entsprechen. Diese Normen definieren die Qualitätskriterien, die an eine Ökobilanz gestellt werden, und sichern so die Gültigkeit und Zuverlässigkeit der Studie. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Beantwortung der zentralen Frage, ob die Studie nach dem aktuellen Stand des Wissens durchgeführt wurde und ob die Ergebnisse objektiv genug sind, um verlässliche Schlussfolgerungen für die untersuchten Wildtierbrücken zu ziehen.

In der kritischen Bewertung wurden folgende Schlüsselaspekte geprüft:

- Die Methodik, um sicherzustellen, dass das Vorgehen den Zielen der Studie entspricht und mit den ISO-Normen 14040:2006 und 14044:2006 übereinstimmt.
- Die verwendeten Daten und Annahmen, um zu bewerten, ob sie angemessen und relevant für die Ziele der Studie sind.
- Die Transparenz und Zielkonformität der Unterlagen.
- Ob die Ergebnisse und deren Interpretationen den definierten Zielen und Grenzen der Studie gerecht werden.

Die internationalen Normen dienten dabei als Benchmark, um die methodische Strenge und Aussagekraft der Studienergebnisse zu gewährleisten.

2. Vorgehen

Das Review wurde entsprechend den Anforderungen Abschnitt 6.3 der ISO 14044 bzw. gemäss der Technischen Spezifikation in DIN CEN ISO/TS 14071 als Prüfung durch einen externen, unabhängigen Reviewer vorgenommen. Zusätzlich wurden die Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz v6.0 der Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich als methodische Grundlage in der Prüfung herangezogen.

2.1 Art des Reviews

Es gibt zwei mögliche Vorgehen der kritischen Prüfung einer LCA-Studie:

- Version I:
  kontinuierlich und parallel zur Entwicklung der Ökobilanz.

- Version II:
  separat nach Abschluss der Ökobilanz und getrennt von dieser.

Im vorliegenden Fall wurde die Vorgehensweise gemäss Version II gewählt, d.h. der Reviewer wurde nachträglich um eine kritische Prüfung der Studie gebeten.

2.2 Umfang der Prüfung

Bei der Durchführung einer Ökobilanz müssen einerseits grosse Datenmengen verarbeitet und andererseits Berechnungen der Umweltauswirkungen durchgeführt werden. Eine Überprüfung aller Berechnungen ist für die Reviewer nicht möglich. Entscheidend sind jedoch die Überprüfung und Diskussion des methodischen Vorgehens. Zudem können die verwendeten Daten zumindest stichprobenartig bezüglich ihrer Plausibilität überprüft werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den Vordergrund- und den Hintergrunddaten.

- Als Vordergrunddaten werden diejenigen Angaben bezeichnet, welche direkt erhoben oder vom Auftraggeber der Studie zur Verfügung gestellt werden. Dabei handelt es sich z.B. um die Art und Menge der verwendeten Materialien, der Transporte und der benötigten Energieträger.
- Als Hintergrunddaten werden die Informationen über die Umweltwirkungen bezeichnet, die für die Vordergrunddaten als Emissionen und Ressourcenbedarf für die Bereitstellung der Materialien und Dienstleistungen auftreten. Die Daten stammen meistens aus anerkannten Ökodatenbanken. Im Rahmen des Review Prozesses wurde die Verknüpfung der Vordergrunddaten mit den Hintergrunddaten geprüft. Dazu hatten die Reviewer Einblick in das gesamte Ökobilanzmodell. Die Berechnungen der Sachbilanz und der Wirkbilanz erfolgte durch anerkannte Softwaretools, eine detaillierte Überprüfung war entsprechend nicht notwendig. Zudem wurde die Plausibilität der Daten, die Transparenz und damit die Nachvollziehbarkeit der Studie begutachtet.

Die relevanten Unterlagen der Studie wurden dem Reviewer am 17. Mai 2024 zur Verfügung gestellt. Am 23. Mai 2024 erfolgte die erste Rückmeldung an die Verfasser sowie eine erste gemeinsame Besprechung. In Kapitel 3.5 sind detaillierte Rückmeldungen und Kommentare aufgeführt, welche von den Verfassern der Studie im Verlauf des Reviews nochmals überarbeitet wurden.

3. Kommentare zum Studien-Bericht

In diesem Kapitel wird zuerst die Arbeit als Ganzes kritisch gewürdigt. Anschliessend wird auf die verschiedenen Schritte bei der Erstellung einer Ökobilanz detaillierter eingegangen.

3.1 Allgemeine Kommentare und Würdigung

Die Vordergrunddaten, Berechnungen und Annahmen sind umfassend und nachvollziehbar aufgeführt. Der Detaillierungsgrad der einzelnen Datensätze und Prozesse ist sehr gut und die Sachbilanz wurde übersichtlich dargestellt. Die Herkunft der Daten ist offen nachgewiesen und es wurden aktuelle und passende Quellen verwendet. Die Erfüllung der technischen und gesetzlichen Anforderungen an das Asphaltmischgut wurden innerhalb dieses Reviews nicht geprüft und werden als gegeben betrachtet.

3.2 Methodik

Das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Studie sind klar definiert. Die Methodik richtet sich nach den relevanten Normen ISO 14040/44 und EN 15804+A2. Als funktionelle Einheit wurde 1 m² Kantonsstrasse, bestehend aus Deck-, Binder- und Tragschicht gewählt, wobei die Ökobilanz separat für die einzelnen Belagstypen berechnet wurde. Ebenfalls wird eine Nutzungsdauer von 60 Jahre in der

funktionellen Einheit berücksichtigt. Die Systemgrenze ist sinnvoll gewählt und gut dokumentiert. Sie umfasst nebst den Errichtungsphasen A1-A5 auch die Nutzungsphase B4, die Entsorgungsphasen C1-C4 und das Modul D. Die Nutzungsdauer wurde so gewählt, dass im Modul B4 alle Schichten mindestens einmal ersetzt werden.

Bei der Wirkungsabschätzung wurden verschiedene Methoden angewandt, was die Aussagekraft über die Umweltwirkung der Studie verstärkt. Nebst den Treibhausgasemissionen IPCC 2021 GWP 100a wurden auch die Methode der ökologischen Knappheit 2021 (UBP21) und die Primärenergie (Cumulative Energy Demand) betrachtet. Gerade bei Baumaterialien, bei denen das Thema natürliche Ressourcen eine wesentliche Rolle spielt, erweist sich die Auswertung in UBP als vorteilhaft. Denn die mit dem Land und Ressourcenverbrauch verbundenen Umweltwirkungen, können mit den Methoden der Treibhausgasemissionen und Primärenergie nicht gesamthaft abgebildet werden. Mit den Ökofaktoren der Methode der ökologischen Knappheit ist dies jedoch möglich.

3.3 Daten

Die Sachbilanz ist gut nachvollziehbar anhand der Module der Norm EN 15804+A2 aufgeführt und alle Quellen sind dokumentiert. Die graphische Darstellung, wie die einzelnen Module miteinander verbunden sind, hilft zusätzlich dem Verständnis.

Die Vordergrunddaten (Material- und Energiebedarf und Transporte) basieren auf spezifischen Daten für die betrachteten Asphaltschichten und weisen einen sehr hohen Detailierungsgrad auf. Dabei widerspiegeln die Daten den aktuellen Stand der Technik. Die Massenbilanzen der Herstellungsprozesse stimmen und die Aufwände der Baumaschinen wurden korrekt auf die betroffenen Schichten aufgeteilt. Die Materialmengen und Annahmen erscheinen als eher konservativ abgeschätzt, was eine Unterschätzung der Umweltwirkung verhindert.

Im Hintergrund wurde für diese Studie die Datenbank der Ökoinventare der Bundesverwaltung (BAFU:2018) verwendet. Wo immer möglich, wurden Datensätze verwendet, die für Herstellungs- und Entsorgungsprozesse in der Schweiz repräsentativ sind. Die Vordergrunddaten konnten mit repräsentativen Hintergrunddatensätzen aus der Datenbank oder vertretbaren Proxys verknüpft werden. Die detaillierte Zuordnung der Vordergrund- mit den Hintergrunddaten ist in der Dokumentation einsehbar.

3.4 Resultate und Interpretation

Die Resultate sind klar und logisch strukturiert, für Dritte gut verständlich und gestaltet. Die Auswertung ist separat für jede Schicht und jede Wirkungsabschätzungsmethode graphisch aufgeführt. Erwähnenswert ist die Darstellung der Umweltwirkung in kg CO_2-eq über die gesamte Nutzungsdauer von 60 Jahren. Dabei wird klar ersichtlich, welchen Einfluss Erhaltungsmassnahmen der einzelnen Schichten in Bezug auf die Treibhausgasemissionen haben. Das Modul D wird separat ausgewiesen und nicht mit den Umweltwirkungen der übrigen Module verrechnet. Aus der Studie gehen verschiedene Schlussfolgerungen hervor, welche durch die Resultate unterstützt werden. Es wäre spannend zu sehen, welchen Einfluss die Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer der Schichten auf die Umweltwirkung des gesamten Lebenszyklus hat. Anhand einer Sensitivitätsanalyse könnte dies untersucht werden.

3.5 Detaillierte Rückmeldungen

Im Folgenden werden detaillierte Rückmeldungen und Kommentare des Prüfers aufgeführt und die anschliessende Bearbeitung dokumentiert.

Pos	Rückmeldung und Kommentar	Bearbeitung
1	Die verwendete Datenbank (UVEK 2018) ist veraltet. Es wird empfohlen, die neuste Version aus dem Jahr 2022 zu verwenden.	Aus technischen Gründen war es den Verfassern nicht möglich, die aktuelle Version der Datenbank zu verwenden. Da es sich bei diesem Projekt um eine Methodenentwicklung handelt, genügt der Hinweis, dass für die Anwendung die neueste Version der Datenbank zu verwenden ist.
2	In der Methodik wird angegeben, dass die Methode der ökologischen Knappheit mit dem Gewichtungsset von ecoinvent 3.10 verwendet wird. Generell sollten die Gewichtungssets von Methoden und Datenbanken nicht vermischt werden. Es wird empfohlen, das Gewichtungsset der UVEK zu verwenden.	Das Gewichtungsset wurde angepasst.
3	Es wurde angenommen, dass die Asphaltproduktion für alle Schichten gleich ist. Der Energiebedarf (Wärme und Strom) der Herstellung von Deckschichten unterscheidet sich von Binder- und Tragschichten. Es wird empfohlen, die Asphaltproduktion je nach Schicht zu bilanzieren.	Der Energiebedarf (Wärme) wurde für die einzelnen Schichten angepasst. Neu beträgt der Wärmebedarf für die Binder- und Tragschicht 61.4 kWh/t und für die Deckschicht 75 kWh/t.
4	Bei der RAP- und Asphaltproduktion sollte die Landnutzung («Transformation» und «Occupation») hinzugefügt werden. Ebenfalls fehlen Infrastrukturelemente («conveyor belt» und «industrial machine, heavy»).	Die Landnutzung und fehlende Infrastruktur-prozesse wurden der Asphaltproduktion hinzugefügt.
5	Bei der Asphaltproduktion sollte eine Ressourcenkorrektur für Primär-Material (Sand und Kies) hinzugefügt werden.	Die Ressourcenkorrektur wurde für Kies und Sand hinzugefügt. Die Recyclingrate (83%) wurde von der Publikation «Gauch et al. 2016, MatCH Studie» übernommen.
6	Die Transportdistanz A4 scheint etwas hoch (115 km) und sollte überprüft und allenfalls angepasst werden.	Die Transportdistanz wurde auf 34 km angepasst.
7	Der Aufwand des Recyclings kann anhand einer ökonomischer Allokation aufgeteilt werden (Modul C3).	Die Aufwände des Recyclings wurden anhand einer ökonomischen Allokation aufgeteilt.
8	Wird das Modul D mit den Umweltwirkungen der übrigen Modulen verrechnet oder separat ausgewiesen?	Das Modul D wird separat ausgewiesen.
9	Es sollte in der Dokumentation beschrieben werden, wie mit Sekundärsplitt umgegangen wird.	Die Herstellung von Sekundärsplitt wird in der Methode nicht berücksichtigt. Aus dem Aufbereitungsprozess von Ausbauasphalt geht nur RAP hervor.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die entwickelte Ökobilanzmethode für Asphaltbeläge wurde nach dem heutigen Stand der Technik und Wissenschaft erstellt und transparent dokumentiert. Durch die Einführung eines einheitlichen Verfahrens wird eine konsistente und vergleichbare Analyse der ökologischen Auswirkungen verschiedener Asphaltmischungen und Bauweisen ermöglicht. Die Methode berücksichtigt umfassend alle relevanten Phasen des Lebenszyklus eines Asphaltbelags, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und den Einbau bis hin zur Nutzung und Entsorgung. Es wird empfohlen, die Projektdokumentation in einem technischen Bericht zusammenzufassen. Abschliessend lässt sich sagen, dass die vorliegende Studie den internationalen Standards für Ökobilanzen entspricht.

Name und Unterschrift des unabhängigen, externen Prüfers



Dominik Osterwalder
Umtec Technologie AG

Ort und Datum

Zürich, 19.06.2024

Anhang B – zusätzliche Abbildungen und Tabellen von Resultaten

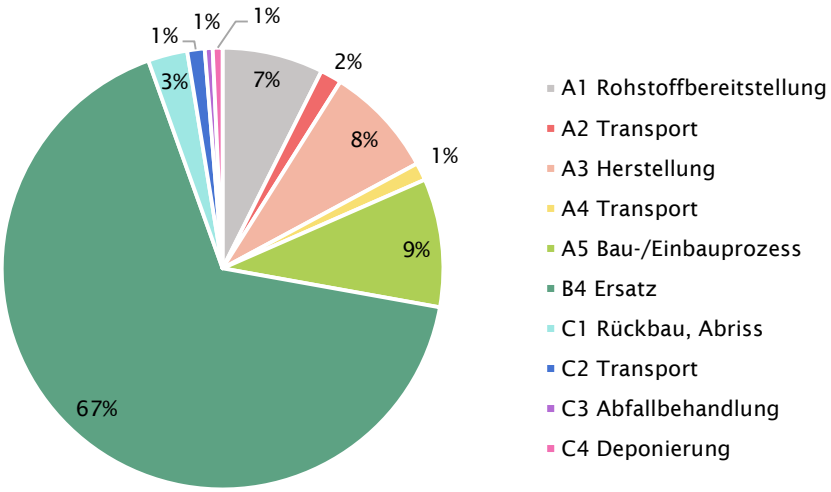

Abbildung 15 : Prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Lebensphasen bei der Binderschicht.

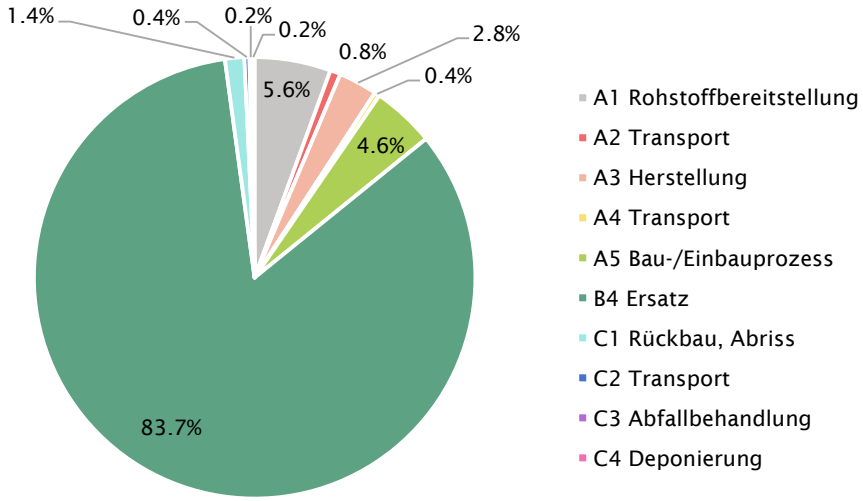

Abbildung 16 : Prozentuale Aufteilung der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Lebensphasen bei der Deckschicht.

Tabelle 6 : Auswertung der Wirkungskategorien bei der Berechnung der Ökologischen Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP21) und in Prozent von 1 m^2 der untersuchten Asphaltschichten und über die gesamte Nutzungsdauer von 60 Jahren.

Wirkungskategorie	Deckschicht (UBP'21)	Deckschicht (%)	Binderschicht (UBP'21)	Binderschicht (%)	Tragschicht (UBP'21)	Tragschicht (%)
Climate change | Global warming potential (GWP100)	74069.55	58.46%	36352.44	60.31%	13787.17	59.89%
Energy resources | Energy resources	19859.37	15.68%	8072.50	13.39%	2949.97	12.82%
Emissions to air | Air pollutants and PM	14302.49	11.29%	6585.24	10.93%	2482.05	10.78%
Emissions to air | Heavy metals into air	4768.87	3.76%	2551.38	4.23%	1034.92	4.50%
Mineral resources | Mineral resources	4163.13	3.29%	2013.05	3.34%	838.83	3.64%
Waste disposal | Radioactive waste to deposit	2959.83	2.34%	1589.30	2.64%	700.99	3.05%
Emissions to water | Water pollutants	3234.80	2.55%	1267.80	2.10%	474.01	2.06%
Land use | Land use	1112.00	0.88%	698.35	1.16%	296.59	1.29%
Emissions to soil | Heavy metals into soil	1253.58	0.99%	662.17	1.10%	264.85	1.15%
Emissions to air | Carcinogenic substances into air	360.28	0.28%	192.02	0.32%	76.57	0.33%
Waste disposal | Waste, non radioactive	228.42	0.18%	116.64	0.19%	44.29	0.19%
Emissions to water | Radioactive substances into water	148.97	0.12%	79.31	0.13%	34.67	0.15%
Ozone depletion | Ozone depletion	194.48	0.15%	74.74	0.12%	27.95	0.12%
Emissions to water | Heavy metals into water	30.16	0.02%	12.63	0.02%	4.78	0.02%
Emissions to soil | Pesticides into soil	7.14	0.01%	3.72	0.01%	1.45	0.01%
Emissions to water | POP into water	0.14	0.00%	0.09	0.00%	0.04	0.00%
Emissions to air | Radioactive substances into air	0.10	0.00%	0.05	0.00%	0.02	0.00%
Natural resources | Biotic resources	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Water use | Water resources, evaporated	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%

Anhang C – Modellierung der Prozesse in openLCA

Flow	Bezeichnung
bitumen, at refinery/kg/CH U	A1 Primär Bitumen
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	C4 Deponie
transport, freight, lorry 32-40 metric ton, fleet average/tkm/CH U	Alle Transporte (A2, A4, C2)

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
Sand, at mine/CH U	1	kg	
Gravel	-0.83	kg	- Ressourcenkorrektur für Recyclinganteil (da dieser am Ende des Lebens noch zur Verfügung steht) - Es wurde hier Splitt als «Elementary Flow» gewählt, weil der Pozess «Sand, at mine/CH U» auch aus Splitt besteht. Falls der Prozess zukünftig anders aufgebaut wird, müsste man dies entsprechend anpassen.
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 Sand	1	kg	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
Gravel, crushed, at mine/CH U	1	kg	
Gravel	-0.83	kg	- Ressourcenkorrektur für Recyclinganteil (da dieser am Ende des Lebens noch zur Verfügung steht) - Ist nur ein «Elementary Flow»
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 Splitt	1	kg	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
Dolomite, at plant/RER U	0.06	kg	Famsa 2023, Dossier qualité 2023, Seite 26 (Berücksichtigung der in der UVEK Datenbank verfügbaren Rohstoffe)
Feldspar, at plant/RER S	0.07	kg	
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	0.3	kg	
Silica sand, at plant/DE U	0.57	kg	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 Füller	1	kg	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
bitumen, at refinery/kg/CH U	960	kg	Angaben Umtec Technologie AG (Nachfrage bei Ingevity und CTS Bitumen AG)
Chemical plant, organics/RER/I U	9.52E-08	Item(s)	
Conveyor belt, at plant/RER/I U	1.95E-06	m	
diesel, burned in building machine, without particle filter/CH U	0.79611	MJ	
electricity, medium voltage, at grid/kWh/DE U	20	kWh	
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER U	100	kWh	
Polybutadiene, at plant/RER U	40	kg	4 % Polybutadiene in PmB (Einigung des Prozentsatzes und des Rohstoffes mit Umtec Technologie AG)
transport, freight, lorry 32-40 metric ton, fleet average/RER U	40*300+960*300	kg*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 PmB	1000	kg	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A1 Füller	2.06	kg	
A1 PmB	4.563	kg	
A1 Sand	14.5	kg	
A1 Splitt	52.47	kg	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 Deckschicht	1	m^2	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A1 PmB	2.894	kg	
A1 Sand	20.62	kg	
A1 Splitt	40.03	kg	
A3 RAP Produktion	60.66*0.19	kg	Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 Binderschicht	1	m^2	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A1 Füller	3.5	kg	
A1 Primary Bitumen	2.92	kg	
A1 Sand	10.31	kg	
A1 Splitt	54.92	kg	
A3 RAP Produktion	104.05*0.19	kg	Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A1 Tragschicht	1	m^2	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
Building, hall, steel construction/CH/I U	6.00E-06	m^2	Lenk 2023 (Annahmen: Fläche 900 m^2, Produktionsmenge 150'000 t/a, Lebensdauer 20 Jahre)
Conveyor belt, at plant/RER/I U	750.0/5000000000	m	aus concrete mixing plant CH, 100'000t/a und 50 Jahre Lebensdauer der Infrastruktur
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.00105056	kWh	Liechti et al. 2016, Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	0.004	kWh	Lenk 2023, Angaben aus dem Asphaltwerk GABAG
Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U	0.0614	kWh	- Milachowski et al. 2010, Erstellung einer Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts - Reduziert gemäss Angaben Umtec Technologie AG
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	160000.0/5000000000	kg	aus concrete mixing plant CH, 100'000t/a und 50 Jahre Lebensdauer der Infrastruktur
Occupation, industrial area	6.00E-06	m^2*a	30x30m, 900 m^2 150'000 t/a Produktion
Occupation, traffic area, rail/road embankment	2.80E-06	m^2*a	Annahme: zweiseitig eine Strasse von 7m Breite, also 60mx7m = 420 m^2 dividiert durch 150'000 t/a
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A3 Asphalt Produktion Binder- und Tragschicht	1	kg	
Anthracene	3.80E-08	g	Liechti et al. 2016, Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten
Benzene	7.13E-04	g	
Benzo(a)pyrene	0	g	
Carbon monoxide	0.2644	g	

Naphthalene	1.17E-05	g	
Nitrogen dioxide	0.02404	g	
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1.64E-05	g	
Particulates	1.67E-04	g	
Phenanthrene	1.14E-06	g	
Sulfur oxides	9.50E-05	g	
Toluene	9.26E-05	g	
VOC, volatile organic compounds	0.01022	g	
Xylenes, unspecified	3.09E-05	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building, hall, steel construction/CH/I U	6.00E-06	m^2	Lenk 2023 (Annahmen: Fläche 900 m^2, Produktionsmenge 150'000 t/a, Lebensdauer 20 Jahre)
Conveyor belt, at plant/RER/I U	750.0/5000000000	m	aus concrete mixing plant CH, 100'000t/a und 50 Jahre Lebensdauer der Infrastruktur
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.00105056	kWh	Liechti et al. 2016, Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	0.004	kWh	Lenk 2023, Angaben aus dem Asphaltwerk GABAG
Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U	0.075	kWh	Milachowski et al. 2010, Erstellung einer Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	160000.0/5000000000	kg	aus concrete mixing plant CH, 100'000t/a und 50 Jahre Lebensdauer der Infrastruktur
Occupation, industrial area	6.00E-06	m^2*a	30x30m, 900 m^2 150'000 t/a Produktion
Occupation, traffic area, rail/road embankment	2.80E-06	m^2*a	Annahme: zweiseitig eine Strasse von 7m Breite, also 60mx7m = 420 m^2 dividiert durch 150'000 t/a
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A3 Asphalt Produktion Deckschicht	1	kg	
Anthracene	3.80E-08	g	Liechti et al. 2016, Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten
Benzene	7.13E-04	g	
Benzo(a)pyrene	0	g	
Carbon monoxide	0.2644	g	
Naphthalene	1.17E-05	g	
Nitrogen dioxide	0.02404	g	
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1.64E-05	g	
Particulates	1.67E-04	g	
Phenanthrene	1.14E-06	g	
Sulfur oxides	9.50E-05	g	
Toluene	9.26E-05	g	
VOC, volatile organic compounds	0.01022	g	
Xylenes, unspecified	3.09E-05	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.0035943	MJ	- Angaben Umtec Technologie AG (Mittelwert diverser Asphaltwerke) - Zukünftig könnte dieser im Bereich der Infrastruktur (siehe auch Modellierung Asphalt Herstellung A3) verbessert werden. Zum Beispiel durch den Prozess «Sorting plant for construction waste/CH/I U».
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.0058407	MJ	
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	0.0052	kWh	
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	3.70E-04	kg	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A3 RAP Produktion	1	kg	

Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	0.05	kg	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building machine/RER/I U	3.61E-06	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG. Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.134867	kg	
Lastwagen Transport	7.92*3.775	t*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Asphaltfertiger	3.775	m^2	
Ammonia	0.00108	g	
Carbon black	0.00108	g	
Carbon dioxide, fossil	424.9434	g	
Carbon monoxide, fossil	1.74769	g	
Dinitrogen monoxide	0.01896	g	
Methane	0.00163	g	
Nitrogen monoxide	0.43507	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.14273	g	
Particulates, < 10 um	0.00813	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.00764	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building machine/RER/I U	8.33E-07	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG. Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.017733	kg	
Lastwagen Transport	0.61*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Kleine Vibrowalze	7.55	m^2	
Ammonia	1.10E-04	g	
Carbon black	0.01707	g	
Carbon dioxide, fossil	55.776	g	
Carbon monoxide, fossil	0.45429	g	
Dinitrogen monoxide	0.00187	g	
Methane	8.50E-04	g	
Nitrogen monoxide	0.65113	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.07351	g	
Particulates, < 10 um	0.02133	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.02005	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building machine/RER/I U	1.11E-06	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG. Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.133933	kg	
Lastwagen Transport	0.20*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Schraubenkompressor	7.55	m^2	
Ammonia	7.30E-04	g	
Carbon black	7.30E-04	g	
Carbon dioxide, fossil	421.806	g	

Carbon monoxide, fossil	1.73514	g	
Dinitrogen monoxide	0.01283	g	
Methane	0.00367	g	
Nitrogen monoxide	2.80518	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.31216	g	
Particulates, < 10 um	0.0055	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.00517	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building machine/RER/I U	3.88E-06	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG. Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.153533	kg	
Lastwagen Transport	5.69*3.775	t*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Statische Dreiradwalze	3.775	m^2	
Ammonia	0.00123	g	
Carbon black	0.00123	g	
Carbon dioxide, fossil	483.6825	g	
Carbon monoxide, fossil	2.91819	g	
Dinitrogen monoxide	0.02158	g	
Methane	0.00185	g	
Nitrogen monoxide	0.49531	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.1625	g	
Particulates, < 10 um	0.00925	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.0087	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building machine/RER/I U	1.11E-06	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG. Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.133933	kg	
Lastwagen Transport	3.25*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	7.55	m^2	
Ammonia	0.00267	g	
Carbon black	0.00267	g	
Carbon dioxide, fossil	1185.24	g	
Carbon monoxide, fossil	4.302	g	
Dinitrogen monoxide	0.04667	g	
Methane	0.004	g	
Nitrogen monoxide	1.07093	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.35135	g	
Particulates, < 10 um	0.02	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.0188	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
Building machine/RER/I U	4.16E-06	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG.
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.157533	kg	

Lastwagen Transport	8.12*1.88 750	t*km	Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Vibrowalze	1.8875	m²	
Ammonia	0.00112	g	
Carbon black	0.00112	g	
Carbon dioxide, fossil	496.4064	g	
Carbon monoxide, fossil	2.64215	g	
Dinitrogen monoxide	0.01954	g	
Methane	0.00168	g	
Nitrogen monoxide	0.44845	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.14713	g	
Particulates, < 10 um	0.00838	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.00787	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
A5 Asphaltfertiger	1	m²	Da beim ersten Einbau sowohl die Deck-, Binder- als auch die Tragschicht neu eingebaut wird, wird die Reinigung der Grundfläche auf alle Prozesse gleich verteilt.
A5 Kleine Vibrowalze	1	m²	
A5 Schraubenkompressor	1/3	m²	
A5 Statische Dreiradwalze	1	m²	
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	1/3	m²	
A5 Vibrowalze	1	m²	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Deckschicht	1	m²	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
A5 Asphaltfertiger	1	m²	Da beim ersten Einbau sowohl die Deck-, Binder- als auch die Tragschicht neu eingebaut wird, wird die Reinigung der Grundfläche auf alle Prozesse gleich verteilt.
A5 Kleine Vibrowalze	1	m²	
A5 Schraubenkompressor	1/3	m²	
A5 Statische Dreiradwalze	1	m²	
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	1/3	m²	
A5 Vibrowalze	1	m²	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Binderschicht	1	m²	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
A5 Asphaltfertiger	1	m²	Da beim ersten Einbau sowohl die Deck-, Binder- als auch die Tragschicht neu eingebaut wird, wird die Reinigung der Grundfläche auf alle Prozesse gleich verteilt.
A5 Kleine Vibrowalze	1	m²	
A5 Schraubenkompressor	1/3	m²	
A5 Statische Dreiradwalze	1	m²	
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	1/3	m²	
A5 Vibrowalze	1	m²	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
A5 Tragschicht	1	m²	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**

Building machine/RER/I U	1.24E-05	Item(s)	Lenk 2023: Anhang Bau einer Teststrecke in Frick (Breite: 7.55 m und Länge: 150 m) mit dem Asphaltwerk GABAG. Lenk hat Luftschadstoffe der Ein- und Ausbaumaschinen selber berechnet basierend auf dem Berechnungsmodell Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.498	kg	
Lastwagen Transport	6.78*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
C1 Strassenfräse	7.55	m²	
Ammonia	0.00572	g	
Carbon black	0.00572	g	
Carbon dioxide, fossil	1568.7	g	
Carbon monoxide, fossil	9.21972	g	
Dinitrogen monoxide	0.10001	g	
Methane	0.00857	g	
Nitrogen monoxide	20.08251	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.75298	g	
Particulates, < 10 um	0.12859	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.12087	g	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
A5 Asphaltfertiger	1	m²	Da im Jahr 20 und 40 sowohl die Deck- als auch die Binderschicht erneuert wird, wird die Reinigung der Grundfläche auf alle Prozesse gleich verteilt.
A5 Kleine Vibrowalze	1	m²	
A5 Schraubenkompressor	0.5	m²	
A5 Statische Dreiradwalze	1	m²	
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	0.5	m²	
A5 Vibrowalze	1	m²	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
B4 Einbau Binderschicht 20a, 40a	1	m²	

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**
A5 Asphaltfertiger	1	m²
A5 Kleine Vibrowalze	1	m²
A5 Schraubenkompressor	1	m²
A5 Statische Dreiradwalze	1	m²
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	1	m²
A5 Vibrowalze	1	m²
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**
B4 Einbau Deckschicht 10a, 30a, 50a	1	m²

Input Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	**Quellen/Bemerkungen**
A5 Asphaltfertiger	1	m²	Da im Jahr 20 und 40 sowohl die Deck- als auch die Binderschicht erneuert wird, wird die Reinigung der Grundfläche auf alle Prozesse gleich verteilt.
A5 Kleine Vibrowalze	1	m²	
A5 Schraubenkompressor	0.5	m²	
A5 Statische Dreiradwalze	1	m²	
A5 Strassen Reinigungsmaschine für Fräsfläche	0.5	m²	
A5 Vibrowalze	1	m²	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
B4 Einbau Deckschicht 20a, 40a	1	m²	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A3 RAP Produktion	61.08*0.81	kg	Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
C3 Deckschicht	1	m²	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A3 RAP Produktion	103.09*0.81	kg	Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
C3 Binderschicht	1	m²	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A3 RAP Produktion	145.83*0.81	kg	Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
C3 Tragschicht	1	m²	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A1 Füller	-10.26	kg	- Füller, Primary Bitumen, Sand und Splitt: Substituierte Produkte - PmB in Recycling Asphalt vernachlässigt und "nur" als Primär Bitumen angenommen. - Aufteilung der Substituierten Produkte gemäss Rohstoffzusammensetzung in A1 - Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
A1 Primary Bitumen	-22.72	kg	
A1 Sand	-72.2	kg	
A1 Splitt	-261.3	kg	
A3 RAP Produktion	366.48*0.19	kg	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
D Recycling Deckschicht	1	m²	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A1 Primary Bitumen	-5.85	kg	- Primary Bitumen, Sand und Splitt: Substituierte Produkte - PmB in Recycling Asphalt vernachlässigt und "nur" als Primär Bitumen angenommen. - Aufteilung der Substituierten Produkte gemäss Rohstoffzusammensetzung in A1 -Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
A1 Sand	-21.13	kg	
A1 Splitt	-100.27	kg	
A3 RAP Produktion	127.28*0.19	kg	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
D Recycling Binderschicht	1	m²	

Input Flow(s)	Menge	Einheit	Quellen/Bemerkungen
A1 Füller	-0.83	kg	- Füller, Primary Bitumen, Sand und Splitt: Substituierte Produkte - Aufteilung der Substituierten Produkte gemäss Rohstoffzusammensetzung in A1 - Ökonomische Allokation 81% C3 und 19% Modul D
A1 Primary Bitumen	-1.88	kg	
A1 Sand	-2.45	kg	
A1 Splitt	-36.61	kg	
A3 RAP Produktion	41.78*0.19	kg	
Output Flow(s)	**Menge**	**Einheit**	
D Recycling Tragschicht	1	m²	