Informationspapier Vergleichende Ökobilanz

Bericht

Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten

Fassung Juni 2024
(überarbeitet Februar 2025)

Betonstein
NATÜRLICH, NUR BESSER.

Impressum

Herausgeber:
Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG)

erstellt von:

LifeCycle-Competence GmbH

Dansenberger Straße 50

67661 Kaiserslautern

Fassung Juni 2024
(überarbeitet Februar 2025)
Diese überarbeitete Fassung ersetzt die Fassung aus Juni 2024.

Zitierung:
Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. – SLG (Hrsg.) (2024): *Informationspapier Vergleichende Ökobilanz – Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten*. Bonn.

Vorbemerkungen

Die vorliegende Ökobilanzstudie wurde von der LifeCycle-Competence GmbH (LCC) im Auftrag des Betonverbands Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG) erstellt.

Sie wurde entsprechend den Anforderungen für Ökobilanzen gemäß den dafür gültigen Normen angefertigt. Es wurden ausschließlich öffentlich verfügbare Daten für diese Studie verwendet. Die ermittelten Ergebnisse sind transparent und nachvollziehbar.

Die in dieser Studie ökobilanziell miteinander verglichenen Verkehrsflächenbefestigungen Sammelstraße, Fußgängerzone mit Lieferverkehr und Gehweg sind im städtischen und kommunalen Umfeld typisch und häufig vorkommend. Die dafür beispielhaft gewählten Bauweisen und Oberbaukonstruktionen entsprechen den Anforderungen der einschlägigen Technischen Regelwerke des Straßenbaus.

Die in dieser Studie veröffentlichten Angaben wurden nach bestem Wissen erstellt und mit größter Sorgfalt überprüft. Inhaltliche Fehler sind dennoch nicht vollständig auszuschließen. Eine Haftung für etwaige Unrichtigkeiten kann daher nicht übernommen werden.

Alle Rechte bleiben vorbehalten. Die Verbreitung und Vervielfältigung, auch auszugsweise, oder eine sonstige Teilnutzung ist nur nach vorheriger Genehmigung durch den Herausgeber und nur unter Angabe der Quelle gestattet.

Bonn, Juni 2024

© 2024 Betonverband Straße, Landschaft und Garten e. V. (SLG), Bonn

Inhalt

1 Grundsätze einer Ökobilanz 9

2 Allgemeines zur Ökobilanz 9

3 Ziel und Umfang dieser Studie 12

3.1 Ziel 12

3.2 Umfang und Untersuchungsrahmen 12

4.1 Gleichwertigkeit der Vergleichssysteme 14

4.2 Deklarierte Einheit 16

4.3 Beschreibung der untersuchten Befestigungen 17

4.3.1 Beispiel 1 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter 17

4.3.2 Beispiel 2 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter 18

4.3.3 Beispiel 3 – Oberbau für Gehweg 19

4.3.4 Beschreibung der einzelnen Schichten 20

4.4 Transporte 25

4.5 Annahme und Abschätzungen 27

4.6 Datenquelle und Datenqualität 29

4.7 Annahmen und Einschränungen 30

4.8 Bewertungsrahmen für die Datenqualität 30

4.9 Beurteilung der Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung 32

5 Sachbilanz 34

5.1 Allgemeines 34

5.2 Beschreibung der Datensätze und deren Anwendung 34

5.2.1 Allgemeines 34

5.2.2 Module A1-A3 – Materialien der Schichten 34

5.2.3 Modul A4 – Transport zum Einbauort 37

5.2.4 Modul A5 – Einbau der einzelnen Schichten 37

5.2.5 Modul B – Nutzungsphase 37

5.2.6 Module C und D – Rückbau und End of Life-Szenario 38

5.3 Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung 38

5.4 Auswerteindikatoren der Sachbilanz nach DIN EN 15804 39

5.5 Auswerteindikatoren der Wirkungsabschätzung nach DIN EN 15804 40
5.6 Unsicherheiten bei Ergebnissen einer Wirkungsabschätzung 41
5.7 Ergebnisse der ökobilanziellen Ermittlungen 43
5.7.1 Beispiel 1 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter 43
5.7.2 Beispiel 2 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter 46
5.7.3 Beispiel 3 – Oberbau für Gehweg 49
5.8 Interpretation der Ergebnisse 52
Anhang A Berechnungsgrundlagen für die Sachbilanz 54
Anhang B Beschreibung der Auswertegrößen 55
Anhang C Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zum Modul A4 58
Anhang D Critical Review 62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Oberbaukonstruktionen zu Beispiel 1 – Sammelstraße 17

Abbildung 2: Oberbaukonstruktionen zu Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr 18

Abbildung 3: Oberbaukonstruktionen zu Beispiel 3 – Gehweg 19

Abbildung 4: Treibhauspotenzial für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 1 – Sammelstraße 43

Abbildung 5: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 1 – Sammelstraße 43

Abbildung 6: Treibhauspotenzial für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr 46

Abbildung 7: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr 46

Abbildung 8: Treibhauspotenzial für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 3 – Gehweg 49

Abbildung 9: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 3 – Gehweg 49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systemgrenzen (Module) der Ökobilanzberechnungen 15

Tabelle 2: Abmessungen der Pflastersteine und Großformate sowie Fugenanteile der Pflasterdecken 23

Tabelle 3: Herkunftsmix-Szenarien für die Natursteinprodukte mit Herkunftsland, Transportmittel und Transportentfernung 25

Tabelle 4: Transportentfernungen der in Abschnitt 3.4.4 beschriebenen Materialien zum Einbauort (Modul A4) 27

Tabelle 5: Verwendete Datensätze mit Angaben, u. a. zur Identifikation, Quelle und Gültigkeit 33

Tabelle 6: Umweltindikatoren der Sachbilanz 39

Tabelle 7: Umweltwirkungen der Sachbilanz 40

Tabelle 8: Beispiel 1 – Sammelstraße, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Asphaltbauweise 44

Tabelle 9: Beispiel 1 – Sammelstraße, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Betonpflasterbauweise, d = 10 cm 44

Tabelle 10: Beispiel 1 – Sammelstraße, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Betonpflasterbauweise, d = 12 cm 45

Tabelle 11: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Beton-Großformatbelag 47

Tabelle 12: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Naturstein-Großformatbelag (Herkunftsmix 1) 47

Tabelle 13: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Naturstein-Großformatbelag (Herkunftsmix 2) 48

Tabelle 14: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Klinkerpflasterdecke, hochkant verlegt 48

Tabelle 15: Beispiel 3 -Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Asphaltbauweise 50

Tabelle 16: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Betonpflasterbauweise 50

Tabelle 17: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Klinkerpflasterbauweise, flach verlegt 51

Tabelle 18: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Natursteinpflasterbauweise (Herkunftsmix 1) 51

Tabelle 19: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Natursteinpflasterbauweise (Herkunftsmix 2) 52

Tabelle 20: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit überwiegend funktionalem Charakter mit 10 cm Asphaltdeckschicht 58

Tabelle 21: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit überwiegend funktionalem Charakter mit 10 cm Betonpflasterstein 58

Tabelle 22: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit überwiegend funktionalem Charakter mit 12 cm Betonpflasterstein 59

Tabelle 23: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit funktionalem und gestalterischem Charakter mit Betonplatten 60/40/16 59

Tabelle 24: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit funktionalem und gestalterischem Charakter mit Klinkerpflastersteinen 240/118/80, hochkant verlegt 60

Tabelle 25: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau für Gehweg mit 10 cm Aphalt-Tragdecksicht 60

Tabelle 26: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau für Gehweg mit Betonpflastersteinen 10/20/8 61

Tabelle 27: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau für Gehweg mit Klinkerpflastersteinen 240/118/71, flach verlegt 61

1 Grundsätze einer Ökobilanz

Die Ökobilanz betrachtet den gesamten Lebensweg eines Produktes, von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung. Durch einen systematischen Überblick und eine Vorausschau kann die Verlagerung einer möglichen Umweltbelastung zwischen den Abschnitten oder einzelnen Prozessen des Lebensweges identifiziert und möglicherweise vermieden werden.

Eine Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und -wirkungen eines Produktsystems. Üblicherweise liegen ökonomische und soziale Aspekte und Wirkungen außerhalb des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz. Für eine umfassendere Einschätzung können auch andere Instrumente mit der Ökobilanz kombiniert werden.

Die Ökobilanz ist ein relativer Ansatz, der um eine funktionelle Einheit aufgebaut ist. Diese funktionelle Einheit legt fest, was zu untersuchen ist. Sämtliche nachfolgenden Analysen sind dann auf diese funktionelle Einheit bezogen, da alle Inputs und Outputs in der Sachbilanz und demzufolge auch das Wirkungsabschätzungsprofil auf die funktionelle Einheit bezogen sind.

Die Ökobilanz ist eine iterative Methode. In den einzelnen Phasen einer Ökobilanz werden die Ergebnisse der anderen Phasen verwendet. Der iterative Ansatz innerhalb der und zwischen den Phasen trägt zur Ganzheitlichkeit und Konsistenz der Studie und der im Bericht angegebenen Ergebnisse bei.

Wegen der einer Ökobilanz eigenen Komplexität ist die Transparenz ein wichtiges Leitprinzip bei der Erstellung von Ökobilanzen, um eine angemessene Auswertung der Ergebnisse sicherzustellen. Die hier verwendeten Daten sind öffentlich verfügbar. Die im Rahmen dieser Studie ermittelten Ergebnisse sind transparent und nachvollziehbar.

2 Allgemeines zur Ökobilanz

In der hier vorliegenden Studie werden verschiedene Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten untersucht, dabei wird die Nutzung nicht betrachtet.

Hierzu werden alle Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen sowie die Kernindikatoren für die Umweltwirkung auf 1 m^2 hergestellte Fläche bezogen.

Innerörtliche Verkehrsflächenbefestigungen, z. B. Straßen, Wege, Plätze, Aufenthaltsflächen und Abstellflächen, werden in Abhängigkeit der zu erwartenden Verkehrsbelastung in der Regel in einer Asphaltbauweise, einer Betonbauweise oder einer Elementbauweise erstellt. Bei Elementbauweisen wird nach Pflasterdecken und Plattenbelägen unterschieden. Das heißt, innerhalb der vorgegebenen Funktion einer Verkehrsfläche, z. B. Sammelstraße oder Stellplatz, und ihrer prognostizierten Verkehrsbelastung können die vorgenannten Bauweisen alternativ angewendet werden.

Die unterschiedlichen Bauweisen erfordern den Einsatz unterschiedlicher Baustoffe und Bauverfahren. Für zahlreiche Anwendungsfälle, insbesondere im innerörtlichen

Verkehrswegebau, können prinzipiell alle der vorgenannten Bauweisen ausgewählt werden. Die Entscheidung für eine bestimmte Bauweise wird oftmals anhand der zu erwartenden Baukosten getroffen, aber auch regionale Belange und gestalterische Aspekte haben Einfluss.

Bei der Entscheidung für eine Bauweise für eine Verkehrsflächenbefestigung wird zukünftig selbstverständlich auch eine Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus relevant sein. Daher hat der Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG) die vorliegende Studie initiiert und beauftragt.

Diese Studie beschreibt die Ökobilanz für die Herstellung von Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten und Szenarien für deren Nachnutzungsphase. Innerhalb der Studie wird in Anlehnung an eine frühere Studie des Auftraggebers (SLG, 2014) der Lebenszyklus der Oberbaukonstruktionen untersucht (cradle to grave), der die Herstellungs- und Recycling- und Entsorgungsphase umfasst.

Es werden die Umweltwirkungen von typischen Oberbaukonstruktionen für Verkehrsflächen, für welche unter anderem die „*Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen*“ (RStO 12/24) zugrunde gelegt werden. Untersucht werden die folgenden drei beispielhaft gewählten Varianten:

- Beispiel 1: Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter, z. B. Sammelstraße, für die Befestigungsarten Asphalt und Betonpflaster
- Beispiel 2: Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter, z. B. Fußgängerzone mit Lieferverkehr, für die Befestigungsarten Betonplatten (Großformat), Natursteinplatten (Großformat) und Klinker (Hochkantverlegung)
- Beispiel 3: Oberbau für Gehweg mit den Befestigungsarten Asphalt, Betonpflaster, Klinkerpflaster und Natursteinpflaster.

Es werden typische Bauweisen und Baustoffe für jede der genannten Oberbaukonstruktionen gemäß den Anforderungen des Technischen Regelwerks festgelegt.

Die Studie beschreibt die Methodik und Rechenregeln, die für die Erstellung der Ökobilanz verwendet wurden. Sie entsprechen den Rechenregeln der (DIN EN ISO 14040) und der (DIN EN ISO 14044).

Die vorliegende Ökobilanzstudie wurde im Auftrag des Betonverbands Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG) durch die Life-Cycle-Competence GmbH (LCC) entsprechend den Anforderungen für Ökobilanzen gemäß (DIN EN ISO 14040, 2021) und (DIN EN ISO 14044, 2021) erstellt.

Die Studie berücksichtigt folgende nach DIN EN 15804 geforderten Umweltindikatoren:

- Globales Erwärmungspotenzial - total (GWP-total)
- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)
- Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)

- Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung (AP)
- Eutrophierungspotenzial - Süßwasser (EP-freshwater)
- Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen nicht fossile Ressourcen (ADPE)
- Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen fossile Brennstoffe (ADPF)
- Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)
- Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)
- Total erneuerbare Primärenergie (PERT)
- Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)
- Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)
- Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)
- Einsatz von Sekundärstoffen (SM)
- Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)
- Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen (FW)

Die vorliegende Ökobilanz wird mit öffentlich verfügbaren Daten (siehe Abschnitt 4.6) durchgeführt. Als Referenzgröße wird ein Quadratmeter Oberbaukonstruktion inklusive des Bodenaushubs (Modul A5 Bau-/Einbauprozess) gewählt.

Grundsätzlich muss jede Oberbaukonstruktion so gestaltet sein, dass sie die geforderten Qualitäten gemäß den Technischen Regeln erfüllt, wie beispielsweise Frostsicherheit, Ebenheit und Tragfähigkeit.

Im ersten Beispiel wird eine Oberbaukonstruktion für eine Sammelstraße der Belastungsklasse Bk3,2 betrachtet. Diese Art der Verkehrsfläche zeichnet sich durch ihren überwiegend funktionalen Charakter aus. Daher werden nur die Befestigungsarten Asphalt und Betonpflaster gegenübergestellt.

Im zweiten Beispiel wird eine Oberbaukonstruktion für eine Fußgängerzone mit Lieferverkehr der Belastungsklasse Bk3,2 betrachtet. Diese Art der Verkehrsfläche zeichnet sich durch ihren gleichermaßen gestalterischen, wie funktionalen Charakter aus. Daher werden die Befestigungsarten mit Betonplatten und Natursteinplatten (jeweils als sogenannte Großformate) sowie mit Klinkerpflaster (hochkant verlegt) gegenübergestellt.

Im dritten Beispiel wird eine Oberbaukonstruktion für einen Gehweg betrachtet. Diese Art der Verkehrsfläche zeichnet sich oftmals durch einen gleichermaßen gestalterischen, wie funktionalen Charakter aus, jedoch ohne eine Belastung durch Kraftfahrzeuge zu erfahren. Daher werden die Befestigungsarten Asphalt, Betonpflaster, Klinkerpflaster und Natursteinpflaster gegenübergestellt.

Für die Beispiele 1 und 2 entsprechen die gewählten Aufbauten grundsätzlich den RStO 12/24, Tafel 1 (Asphaltbauweisen), bzw. Tafel 3 (Pflasterbauweisen). Für das Beispiel 3 entsprechen die gewählten Aufbauten grundsätzlich den RStO 12/24, Tafel 6.

Weitere herangezogene Regelwerke sind die (ZTV Pflaster-StB) sowie das (M FG).

Die untersuchten Oberbaukonstruktionen sind im Abschnitt 4.3 näher beschrieben und bildlich dargestellt.

Die gewählten Beispiele entsprechen erfahrungsgemäß regelmäßig in der Praxis anzutreffenden Aufbauten und haben somit repräsentativen Charakter.

3 Ziel und Umfang dieser Studie

3.1 Ziel

Die durchgeführte Studie dient der Ermittlung der Umweltwirkungen und des Ressourceneinsatzes für die beschriebenen Verkehrsflächenbefestigungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufbauten und Materialien. Die Ermittlung der Umweltwirkungen erfolgt mit Datensätzen (EPD) die nach (DIN EN 15804) erstellt wurden.

Die untersuchten Oberbaukonstruktionen wurden vom Auftraggeber festgelegt.

Die Studie ist für eine Veröffentlichung vorgesehen und kann sowohl zur Kommunikation als zum Beispiel auch zur Anwendung und Auswertung der untersuchten Oberbaukonstruktionen genutzt werden.

Die vorliegende Studie richtet sich an Planer, Bauherren und Entscheidungsträger im Bereich des Straßen-, Garten- und Landschaftsbaus. Sie ermöglicht die Festlegung einer spezifischen Bauweise für Verkehrsflächen unter ökobilanziellen Aspekten. Dabei können für verschiedene Umweltwirkungen sowie den Ressourceneinsatz entsprechende Prioritäten festgelegt werden. Die Studie trägt somit dazu bei, schädliche Umweltwirkungen und den Energieverbrauch zu minimieren, Phasen mit erhöhten Emissionen zu identifizieren und gegebenenfalls in die Ursachenforschung und Optimierung einzusteigen. Eine ökobilanziell vorteilhafte Bauweise erfordert in der Regel keine Abstriche in Bezug auf Funktionalität, Nutzungskomfort, Nutzungssicherheit und Dauerhaftigkeit der Verkehrsfläche.

3.2 Umfang und Untersuchungsrahmen

Die funktionelle Einheit ist auf 1m^2 festgelegt. Bei den verglichenen Systemen handelt es sich um Verkehrsflächenbefestigungen. Die Systemgrenzen reichen von Modul A bis Modul D unter Ausschluss des Moduls B. Der Grund hierfür liegt in dem Umstand, dass für die Module B1-B7 in der Realität keine, bzw. nicht in ausreichender Anzahl Daten vorliegen, um das Modul abbilden zu können.

Im Bereich kommunaler Verkehrsflächen gelten die in den RStO genannten Erschwernisse bei der Bauausführung grundsätzlich für alle der möglichen Bauweisen. Deutliche Vor- bzw. Nachteile sind für die beiden grundlegenden Bauweisen „Asphalt“ und „Pflasterdecke bzw. Plattenbelag“ nicht erkennbar. Erfahrungsgemäß sind die Pflasterdecken und Plattenbeläge sogar etwas im Vorteil, weil bei ihnen ohnehin ein hoher Anteil an manueller Tätigkeit erfolgt, der bei Asphaltbauweisen lediglich die Ausnahme darstellt

Gemäß DIN EN ISO 14040/44 (Kapitel 5.2.1.2) wurden die Umweltwirkungen den einzelnen Baumaterialien nach einem physikalischen Allokationsverfahren auf Basis

der Masse zugewiesen. Dabei wurde folgende Vorgehensweise angewandt:

1. Ermittlung der Materialmengen (z. B. Kubikmeter Asphalt, Beton, Frostschutzschicht etc.).
2. Verknüpfung mit spezifischen EPD-Datensätzen, in denen die Umweltindikatoren pro Masseinheit (z. B. kg, m^3 oder t) hinterlegt sind.
3. Multiplikation der Materialmengen mit den Umweltindikatoren aus den EPDs zur Berechnung der Gesamtumweltauswirkungen des betrachteten Straßenaufbaus.

Diese Vorgehensweise entspricht der physikalischen Allokation nach Masse, wie sie in DIN EN ISO 14040/44 empfohlen wird, da:

- Eine direkte physikalische Beziehung zwischen den Baumaterialien und ihren Umweltwirkungen besteht.
- Keine systemübergreifende Allokation oder Marktpreisbasierte Allokation erforderlich ist.
- Die Methode robust und reproduzierbar ist.

Die für diese vergleichende Ökobilanz verwendeten Umweltindikatoren basieren auf extern verifizierten Umweltproduktdeklarationen (EPDs) gemäß EN 15804. EPDs unterliegen einer unabhängigen Verifizierung durch anerkannte Dritte, wodurch sichergestellt wird, dass:

- Die zugrunde liegenden Ökobilanzstudien nach DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt wurden,
- Die angewendeten Berechnungsmethoden den Anforderungen der EN 15804 entsprechen,
- Die Datensätze konsistent und transparent sind.

Da die Umweltwirkungen der Baumaterialien direkt aus diesen geprüften EPDs entnommen und auf die ermittelten Materialmengen angewendet wurden, ist die Validität der Umweltindikatoren durch die externe Verifizierung der EPDs gewährleistet.

4 Nachvollziehbarkeit und Konsistenz

Zusätzlich wurde sichergestellt, dass:

- Ausschließlich EPDs mit gültiger Verifizierung verwendet wurden,
- Die Zuordnung der Umweltindikatoren auf Basis der physikalischen Allokation nach Masse gemäß DIN EN ISO 14040/44 erfolgte,
- Die Berechnungen transparent und anhand reproduzierbarer Methoden durchgeführt wurden.

In der vorliegenden Studie werden folgende Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15804 in Abstimmung mit dem Auftraggeber berücksichtigt.

– Herstellungsphase (A1-A3)
– Bauphase (A4-A5)
– Entsorgungsphase (C1-C4)
– Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen (D)

Die Systemgrenzen der Studie folgen dem modularen Ansatz der DIN EN 15804. die nachfolgende Tabelle 1 in Anlehnung an die

Norm zeigt die in dieser Studie berücksichtigten Systemgrenzen (Module).

4.1 Gleichwertigkeit der Vergleichssysteme

Die Vergleichbarkeit gemäß DIN 14044, Kapitel 5.3.1 c der betrachteten Bauweisen ergibt sich aus ihrer normativen Einordnung in die standardisierten Oberbaukonstruktionen der RStO (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen). Innerhalb einer Belastungsklasse (vgl. RStO, Tafeln 1 bis 3) kann jedoch nicht zwangsläufig von einer vollständigen Gleichwertigkeit ausgegangen werden, da unterschiedliche Bauweisen innerhalb derselben Belastungskategorie variierende mechanische Eigenschaften aufweisen können. Ein Beispiel hierfür ist die Einstufung von Pflasterbauweisen, bei denen eine Konstruktion mit einer steiferen oberen Tragschicht eine höhere Verformungsbeständigkeit aufweisen kann als eine alternative Bauweise mit einer geringeren Steifigkeit. Diese Unterschiede in der Bauweise können sich auf die funktionale Leistungsfähigkeit sowie auf Bauaufwand und Kosten auswirken.

Bei der Auswahl der Bauweise innerhalb einer Belastungsklasse sind neben normativen Vorgaben weitere Faktoren zu berücksichtigen, darunter die Verfügbarkeit geeigneter Baustoffe, die Größe und örtliche Lage des Bauvorhabens sowie die Erfahrungen der beteiligten Akteure (Planer, Auftraggeber und potenzielle Auftragnehmer). Diese Kriterien beeinflussen maßgeblich die Entscheidung für eine spezifische Bauweise und damit die Vergleichbarkeit der betrachteten Konstruktionen.

Die Auswahl der untersuchten Bauweisen basiert auf einer langjährigen Markterfahrung und orientiert sich an gängigen Anwendungsszenarien. So werden für Wohnsammelstraßen in der Regel Asphalt oder Betonpflaster als Deckenbeläge verwendet, da diese sowohl hinsichtlich Funktionalität als auch Wirtschaftlichkeit bevorzugt werden. Andere Materialien wie Klinkerpflaster oder Natursteinpflaster haben hingegen meist eine regionale Bedeutung oder werden nur in Ausnahmefällen eingesetzt.

In Fußgängerzonen hingegen spielen gestalterische Aspekte eine wesentliche Rolle, wodurch hier verstärkt Pflaster- oder Großformatbeläge aus Beton, Klinker oder Naturstein zum Einsatz kommen. Asphaltbauweisen sind in diesem Bereich eher unüblich. Auch bei Gehwegen sind neben funktionalen Anforderungen gestalterische Aspekte von Bedeutung. Besonders in verkehrsberuhigten Zonen wird häufig eine höhengleiche Bauweise mit angrenzenden Fahrbahnen realisiert, wodurch sich optische Abgrenzungen in Form von Pflasterbelägen etablieren.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Konstruktionsansätze in der vergleichenden Ökobilanz objektiv bewerten zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese Analyse untersucht die Auswirkungen variierender Schichtdicken und Bauweisen auf die Umweltindikatoren und stellt sicher, dass Unterschiede in der Materialwahl angemessen berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Systemgrenzen (Module) der Ökobilanzberechnungen

A1 - A3 Herstellungs-phase			A4 - A5 Bau-phase		B1 - B7 Nutzungsphase							C1 - C4 Entsorgungsphase				D Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau-/Einbauprozess	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau/Erneuerung	betrieblicher Energieeinsatz	betreiblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Deponierung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial
✓			✓	✓	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓

✓ in Ökobilanz enthalten × Modul nicht deklariert

Die Ermittlung der Kernindikatoren für die Umweltwirkung und der Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen umfasst folgende Phasen:

Herstellungsphase A1 – A3: Die Herstellungsphase umfasst A1, Rohstoffgewinnung und -verarbeitung und Verarbeitungsprozesse von als Input dienenden Sekundärstoffen, (z. B. Recyclingprozesse), A2, Transport zum Hersteller und A3, Herstellung, einschließlich der Bereitstellung von allen Stoffen, Produkten und Energie sowie die vollständige Abfallbehandlung bis zum Ende des Abfallstatus oder die Beseitigung der Restabfälle während der Herstellungsphase. Die Module A1, A2 und A3 dürfen als ein aggregiertes Modul A1-3 ausgewiesen werden. Der Bodenaushub wird gemäß DIN EN 15804 dem Modul A5 Einbau zugeordnet.

Transport A4: In Modul A4 sind die Transporte der Materialien und Vorprodukte zur Herstellung des Oberbaus zur Baustelle berücksichtigt.

Bau-/Einbauprozess A5: Modul A5 beinhaltet den Einbau und die Verdichtung der Schichten sowie den notwendigen Bodenaushub zur Erstellung der Verkehrsfläche.

Rückbau/Abriss C1: Der Rückbau der einzelnen Schichten des Oberbaus erfolgt teilweise maschinell und teilweise manuell. Eine genauere Differenzierung zu welchen Teilen der Ausbau manuell oder maschinell

erfolgt ist aus den Daten nicht ersichtlich und auch nicht weiter aufgeschlüsselt. Im Modul C1 sind nur die maschinellen Aufwendungen aus ökobilanzieller Sicht bewertbar. Die Tragschichten und die Frostschutzschicht werden nicht zurückgebaut, sondern verbleiben an Ort und Stelle.

Transport zur Abfallbehandlung C2: In Modul C2 sind die Transporte der Schichten des Oberbaus zum Ort der Nachnutzung berücksichtigt. Eine Ausnahme bilden die ungebundenen Tragschichten, da diese nicht zurückgebaut werden.

Abfallbehandlung C3: Modul C3 beinhaltet Aufwendungen für die Aufbereitung des ausgebauten Deckschichtmaterials. Die ausgebauten Pflastersteine bzw. Großformate können entweder gewaschen und wiederverwendet werden, oder sie werden im Rahmen einer Bauschuttaufbereitung zu wiederverwertbaren Gesteinskörnungen aufgearbeitet. Für Asphalttrag- und -Asphaltdeckschichten wird ein Asphaltrecycling angenommen.

Deponierung/Beseitigung C4: Prozesse zur Abfallbeseitigung sind dem Modul C4 zugeordnet, einschließlich der Bereitstellung aller Stoffe, Produkte und des dazugehörigen Energie- und Wasserverbrauchs.

Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze D: Gutschriften für rezyklierte Gesteinskörnungen oder direkt wiederverwendbares Deckschichtmaterial sind in Modul D adressiert. Einflüsse von Abfällen werden in den Modulen berücksichtigt, in denen diese anfallen. Innerhalb der Nutzungsphase wird davon ausgegangen, dass an den regelgerecht hergestellten Verkehrsflächenbefestigungen keine Erhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Eine Betrachtung der Nutzungsphase im Rahmen der B-Module nach DIN EN 15804 erfolgt deshalb nicht.

4.2 Deklarierte Einheit

Wie zum Beispiel in der Studie (SLG, 2014), wird auch hier als Referenzgröße 1 m^2 Oberbaukonstruktion angegeben.

Die Arbeiten zur Vorbereitung des Einbaus der Schichten des Oberbaus (Vorbereitung des Untergrundes) werden nicht berücksichtigt. Generell muss der Untergrund so beschaffen sein, dass er für die darüber zu bauende Befestigung und für die Nutzung der Befestigung geeignet ist. Der Aufwand für die Vorbereitung des Untergrundes ist bei den in dieser Studie gewählten Aufbauten gleich und hat daher keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Nutzungsbedingter Verschleiß, z. B. aus dem Kraftfahrzeugverkehr, und andere nutzungsbedingten Veränderungen der Verkehrsflächenbefestigung sowie Maßnahmen der baulichen Straßenerhaltung werden nicht berücksichtigt.

Für das End of Life-Szenario wird kein vollständiger Rückbau der Oberbaukonstruktionen zu Grunde gelegt. Die ungebundenen Tragschichten (Frostschutzschicht und Schottertragschicht) werden nicht rückgebaut.

Der Vergleich der Ökobilanzen erfolgt jeweils innerhalb der nachfolgend beschriebenen Varianten bzw. definierten Beispiele, d. h. innerhalb vergleichbarer Befestigungen und funktionaler Ansprüche.

4.3 Beschreibung der untersuchten Befestigungen

4.3.1 Beispiel 1 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter

Für das Beispiel 1 wird eine Sammelstraße (siehe (RASt) bzw. RStO) gewählt.

Die Befestigungen sind für eine Nutzung als Sammelstraße mit einer Belastung gemäß der Belastungsklasse Bk3,2 gemäß den RStO über einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren konzipiert (siehe RStO 12/24, Abschnitt 2.7). Die Bauweisen unterscheiden sich hinsichtlich der Dicke des Gesamtaufbaus, bedingt durch die gewählte Bauweise bzw. die Dicke der Pflastersteine und die Art der Decke. Alle Varianten beinhalten eine Frostschutzschicht mit einer Dicke von 30 cm.

Im Rahmen der Untersuchung wird eine Asphaltbefestigung jeweils mit einer Alternative zur Betonpflasterdecke verglichen. Die Asphaltvariante besteht aus einer 12 cm dicken Asphalttragschicht und einer 10 cm dicken Asphaltdecke, die sich aus einer 6,5 cm dicken Binderschicht und einer 3,5 cm dicken Deckschicht zusammensetzt.

Als Alternativen zur Asphaltbauweise werden zwei Varianten mit einer Betonpflasterdecke untersucht, die sich in ihrer Dicke unterscheiden. Beide Varianten weisen auf der Frostschutzschicht eine 25 cm dicke Schottertragschicht auf. Darauf folgt die Pflasterdecke, bestehend aus einer 4 cm dicken Bettungsschicht, Beton-Verbundpflastersteinen (z. B. Doppel-T oder Uni) mit einer Dicke von entweder 10 cm oder 12 cm sowie der Fugenfüllung.

Die betrachteten Oberbaukonstruktionen sind der Abbildung 1 zu entnehmen.

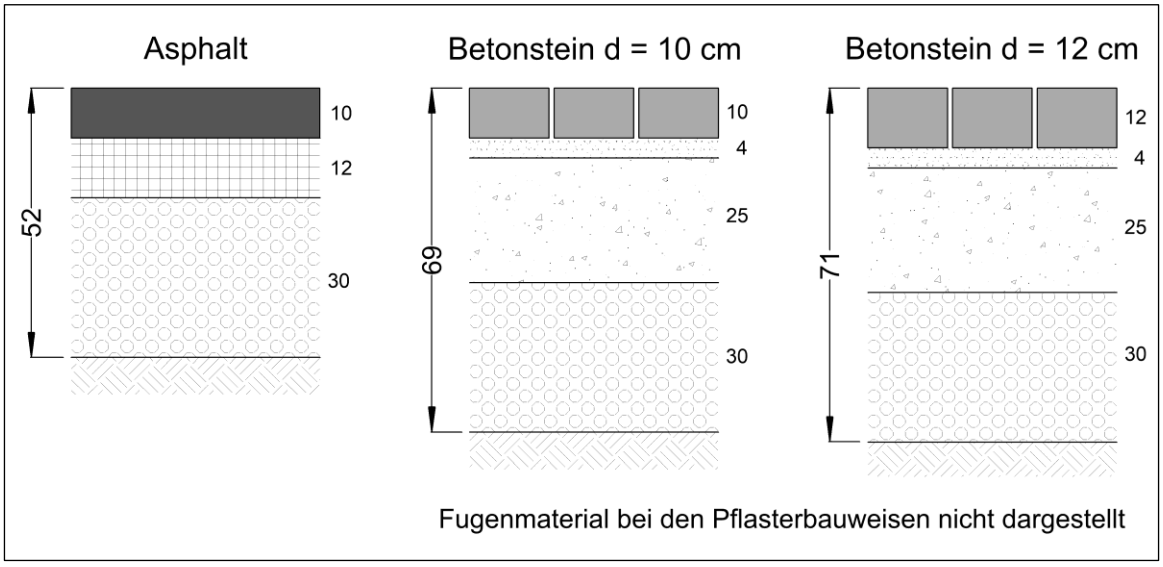

Abbildung 1: Oberbaukonstruktionen zu Beispiel 1 – Sammelstraße

4.3.2 Beispiel 2 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter

Für das Beispiel 2 wird eine Fußgängerzone mit Lieferverkehr (Hinweis gemäß RStO, Abschnitt 2.5.1: „Fußgängerzonen, in denen Lieferverkehr mit Fahrzeugen des Schwerverkehrs stattfindet, sind den Entwurfssituationen „Hauptgeschäftsstraße“ oder „Örtliche Geschäftsstraße“ zuzuordnen“. Welche der beiden Entwurfssituationen in der vergleichenden Ökobilanz gewählt wird, ist von eher untergeordneter Bedeutung. Für beide gilt, dass eine Einordnung in die Bk1,8 bis Bk10 möglich ist.) gewählt.

Die Befestigungen sind für eine Nutzung als Fußgängerzone mit Lieferverkehr mit einer Belastung gemäß der Belastungsklasse Bk3,2 gemäß den RStO über einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren konzipiert (siehe RStO 12/24, Abschnitt 2.7). Die Oberbaukonstruktionen variieren geringfügig hinsichtlich ihrer Dicke bedingt durch die Dicke der Befestigungselemente. Die Dicke der Frostschutzschicht beträgt bei allen Varianten 30 cm, die der Schottertragschicht 25 cm. Die Bettungsdicke ist bei allen Varianten mit 4 cm angenommen. Es werden drei Befestigungsarten betrachtet.

Die Formate der Großformate aus Beton und Naturstein wurden nach marktüblichen Gesichtspunkten ausgewählt. Sie betragen Länge 600 mm, Breite 400 mm und Dicke 160 mm (jeweils Nennmaß). Der Fugenanteil beträgt bei den beiden Großformatbelägen jeweils 4,1 %. Die seit Jahren hohe Importrelevanz bei Natursteinprodukten wurde berücksichtigt, indem zwei unterschiedliche Herkunftsmix-Szenarien beispielhaft gewählt wurden.

Die Klinkerpflasterdecke besteht aus Klinkerpflastersteinen 240/118/80 (jeweils Nennmaß in mm), die hochkant verlegt werden. Der Fugenanteil beträgt bei diesem Belag 6,3 %.

Die betrachteten Oberbaukonstruktionen sind der Abbildung 2 zu entnehmen.

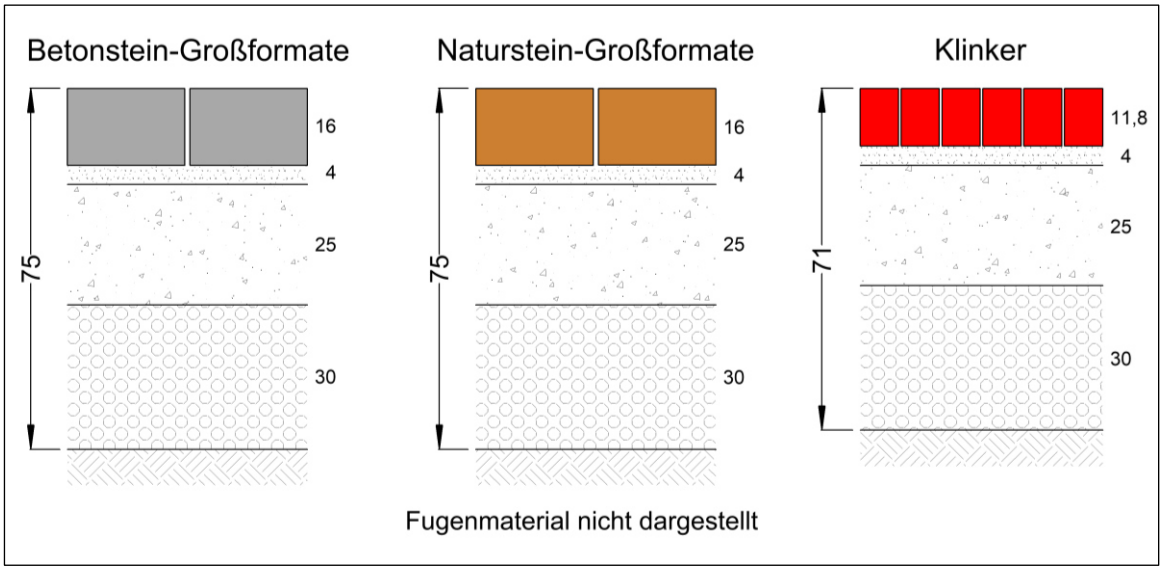

Abbildung 2: Oberbaukonstruktionen zu Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr

4.3.3 Beispiel 3 – Oberbau für Gehweg

Für das Beispiel 3 wird ein Gehweg (siehe RStO) gewählt. Hier beschreibt die Richtlinie zwei Entwurfssituationen, welche aber bzgl. Der Belastungsklasse identisch sind. Dies hat keine technischen Auswirkungen auf die Bilanzierung.

Die Befestigungen sind für eine Nutzung als Gehweg gemäß den RStO 12/24, Tafel 6, Zeile 2, über einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren konzipiert. Es werden vier Befestigungsarten betrachtet. Sie weisen eine Gesamtdicke von jeweils 30 cm auf.

Die Asphaltbefestigung besteht aus einer Asphalttragdeckschicht von 10 cm Dicke und einer Tragschicht von 20 cm Dicke (RStO Tafel 6 Zeile 2).

Die Pflasterbefestigungen unterscheiden sich durch die Art der Pflastersteine. Die Formate der Pflastersteine wurden nach marktüblichen Gesichtspunkten ausgewählt. Die Dicke der Bettung beträgt jeweils 4 cm.

Betrachtet werden zum einen Betonpflastersteine 100/200/80 (jeweils Rastermaß in mm), grau, mit Vorsatzbeton und unbehandelter Oberfläche. Der Fugenanteil beträgt 5,9 %. Die Dicke der Tragschicht der Betonpflasterbauweise beträgt 18 cm.

Betrachtet werden zum anderen Kleinpflastersteine aus Naturstein100/100/100 (jeweils Rastermaß in mm), mit den in Tabelle 3 erwähnten Herkunftsmix-Szenarien. Damit wird die seit Jahren hohe Importrelevanz für diese Produkte berücksichtigt. Der Fugenanteil beträgt 15,4 %, das entspricht einer durchschnittlichen Fugenbreite von 8 mm. Die Tragschicht bei der Natursteinpflasterbauweise hat eine Dicke von 16 cm.

Betrachtet werden zudem Klinkerpflastersteine 240/118/71 (jeweils Nennmaß in mm), flach verlegt. Die Dicke der Tragschicht beträgt 19 cm. Der Fugenanteil beträgt 4,9 %.

Die betrachteten Oberbaukonstruktionen sind der Abbildung 3 zu entnehmen.

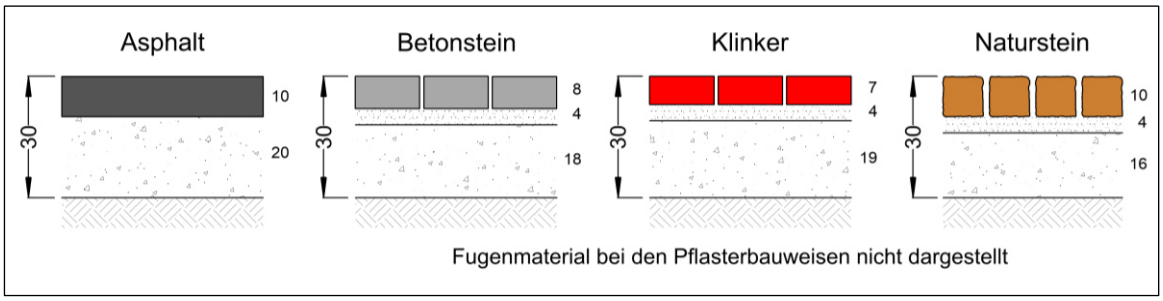

Abbildung 3: Oberbaukonstruktionen zu Beispiel 3 – Gehweg

4.3.4 Beschreibung der einzelnen Schichten

Da die untersuchten Oberbaukonstruktionen einen ähnlichen Schichtenaufbau aufweisen, erfolgt die ausführliche Beschreibung der verschiedenen Befestigungsarten basierend auf den einzelnen Schichten. Die Zuordnung von spezifischen Prozess- und Fertigungsschritten zu den Modulen gemäß DIN EN 15804 ist in jedem Textabschnitt verzeichnet.

Frostschutzschicht

Die Frostschutzschicht besteht aus überwiegend gebrochenem Material (Schotter, Splitt) (Module A1-A3). Für alle Beispiele wird angenommen, dass das Material 20 km mittels Lkw zum Einbauort transportiert (Modul A4) wird. Für den Einbau und die Verdichtung kommen Baumaschinen auf Dieselbasis zum Einsatz.

Die Lebenszyklusanalyse von Schotter umfasst den Prozess der Kalksteingewinnung im Steinbruch, die Reinigung und die Vorzerkleinerung. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Schotter am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Bagger bilanziert. Der Transport in Modul C2 zur Aufbereitungsanlage erfolgt mit einem Lkw (50 km). In Modul C3 wird das Material aufbereitet. Es wurde ein Aufbereitungsverlust von 25 % angenommen. Dieser Verlust wird einer Inertstoffdeponie innerhalb von Modul C3 zugeführt (durchschnittliche Deponieemissionen). In Modul D erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution von natürlichem Kies als Verfüllmaterial (z. B. im Straßen- oder Deponiebau).

Schottertragschicht

Die Schottertragschicht besteht aus überwiegend gebrochenen Gesteinskörnungen (Brechsand, Splitt, Schotter) (Module A1-A3), welche 20 km mittels Lkw zum Einbauort transportiert werden (Modul A4). Für den Einbau und die Verdichtung werden Baumaschinen auf Dieselbasis eingesetzt.

Die Lebenszyklusanalyse von Schotter umfasst den Prozess der Kalksteingewinnung im Steinbruch, die Reinigung und die Vorzerkleinerung. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Schotter am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Bagger bilanziert. Der Transport in Modul C2 zur Aufbereitungsanlage erfolgt mit einem Lkw (50 km). In Modul C3 wird das Material aufbereitet. Es wurde ein Aufbereitungsverlust von 25 % angenommen. Dieser Verlust wird einer Inertstoffdeponie innerhalb von Modul C3 zugeführt (durchschnittliche Deponieemissionen). In Modul D erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution von natürlichem Kies als Verfüllmaterial (z. B. im Straßen- oder Deponiebau). Die Module C1 – C4 fließen nicht in die Ökobilanz mit ein, da sie verbleiben.

Asphalttragschicht

Die Lebenszyklusanalyse der Asphalttragschicht umfasst die Lebenswegabschnitte cradle to gate, d. h. insbesondere die Prozesse der Gewinnung der Zuschläge und der Herstellung von Bitumen. Berücksichtigt wurden die Transporte der Rezepturbestandteile zur Asphaltmischanlage sowie der Herstellungsaufwand. Nach 100 km Transport mittels Lkw (Modul A4) erfolgt der Einbau am Einsatzort. Das Modul A5 beinhaltet eine Maschine und Treibstoff. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Asphaltfräse bilanziert. Sowohl der Meißelverbrauch, als auch der Dieselverbrauch werden dabei berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Ausbauasphalt das Ende der Abfalleigenschaft direkt nach dem Abfräsen erreicht. Das heißt, die Lasten für die Aufbereitung (Erwärmen und Mischen) werden in Modul D ausgewiesen. Der Transport in Modul C2 zur Asphaltmischanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul D wird ein Materialverlust von 3 % angenommen. Mischen und Erwärmen werden ebenfalls in Modul D bilanziert. Es erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (zurückgebaute Menge abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution einer Asphalttragschicht.

Asphaltdeckschicht

Die Lebenszyklusanalyse der Asphaltdeckschicht umfasst die Lebenswegabschnitte cradle to gate, d. h. insbesondere die Prozesse der Gewinnung der Zuschläge und der Herstellung von Bitumen. Berücksichtigt wurden die Transporte der Rezepturbestandteile zur Asphaltmischanlage sowie der Herstellungsaufwand. Nach angenommenen100 km Transport mittels Lkw (Modul A4) erfolgt der Einbau am Einsatzort. Das Modul A5 beinhaltet eine Maschine und Treibstoff. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Asphaltfräse bilanziert. Sowohl der Meißelverbrauch, als auch der Dieselverbrauch werden dabei berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Ausbauasphalt das Ende der Abfalleigenschaft direkt nach dem Abfräsen erreicht. Das heißt, die Lasten für die Aufbereitung (Erwärmen und Mischen) werden in Modul D ausgewiesen. Der Transport in Modul C2 zur Asphaltmischanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul D wird ein Materialverlust von 3 % angenommen. Mischen und Erwärmen werden ebenfalls in Modul D bilanziert. Es erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (zurückgebaute Menge abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution einer Asphalttragschicht.

Bettung der Pflasterdecken

Als ungebundenes Bettungsmaterial für die Pflasterdecken wird ein nach (ATV DIN 18318) grundsätzlich geeigneter Sand 0/2 angenommen, da hierfür valide Datensätze vorliegen (Module A1-A3). Der Sand wird mittels Lkw über 20 km zum Einbauort transportiert (Modul A4), und dort verarbeitet.

Die Lebenszyklusanalyse von Sand umfasst den Prozess der Rohkies-Gewinnung und

die Aufbereitung im Kieswerk. Die Systemgrenze bildet das fertige Produkt Sand 0/2 am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Bagger bilanziert. Der Transport in Modul C2 zur Aufbereitungsanlage erfolgt mittels Lkw (50km). In Modul C3 wird das Material aufbereitet. Es wurde ein Aufbereitungsverlust von 25 % angenommen. Dieser Verlust wird einer Inertstoffdeponie innerhalb von Modul C3 zugeführt (durchschnittliche Deponieemissionen). In Modul D erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution von natürlichem Kies als Verfüllmaterial (z. B. im Straßen- oder Deponiebau).

Fugenfüllung

Als ungebundenes Fugenmaterial für die Pflasterdecken wird ein nach (ATV DIN 18318) grundsätzlich geeigneter Sand 0/2 angenommen, da hierfür valide Datensätze vorliegen (Module A1-A3).

Der prozentuale Fugenanteil der einzelnen Pflasterdecken innerhalb der Beispiele 1 bis 3 ist abhängig von der jeweiligen Fugenbreite und den jeweiligen Abmessungen der verwendeten Pflastersteine bzw. Großformate. Für die Fugenbreiten wurden die einschlägigen Technischen Regeln zugrunde gelegt. Die Abmessungen der Pflastersteine und Großformate sowie der Fugenanteil in der jeweiligen Pflasterdecke ist in Tabelle 2 angegeben.

Der Bedarf an Pflastersteinen zur Errichtung der Referenzfläche von 1 m^2 wird in dieser Studie um den jeweiligen prozentualen Fugenanteil abgemindert.

Das Fugenmaterial wird mittels Lkw über 20 km Entfernung zum Einbauort transportiert (Modul A4) und dort manuell eingebaut (Modul A5).

Tabelle 2: Abmessungen der Pflastersteine und Großformate sowie Fugenanteile der Pflasterdecken

Steine bzw. Großformate	Abmessungen der Steine bzw. Großformate			Fugenanteil in der Decke
	Länge	Breite	Dicke	
	mm	mm	mm	%
Beispiel 1 – Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter, z. B. Sammelstraße				
Beton-Verbundpflastersteine			100	4,0
Beton-Verbundpflastersteine			120	4,0
Beispiel 2 – Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter, z. B. Fußgängerzone mit Lieferverkehr				
Betonplatten (Großformate)	600	400	160	4,1
Natursteinplatten (Großformate)	600	400	160	4,1
Klinkerpflastersteine "hochkant"	244	84	118	6,3
Beispiel 3 – Gehweg				
Betonpflastersteine	100	200	80	5,9
Kleinpflaster aus Naturstein	100	100	100	15,4
Klinkerpflastersteine "flach"	244	122	71	4,9

Pflastersteine aus Beton

Im Rahmen dieser Studie wird als Datengrundlage für die Ermittlung der Umweltwirkungen eine vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte Umweltproduktdeklaration (SLG; EPD-SLG-20210055-CBE1-DE, 2021) verwendet. Diese EPD wurde nach den Vorgaben der (DIN EN 15804) erstellt und gemäß (DIN EN ISO 14025) extern verifiziert. Die Daten werden somit als belastbar eingestuft und können zur Durchführung einer Ökobilanzierung verwendet werden. Die vorgenannte EPD besitzt eine Gültigkeit bis 2026 und bezieht sich auf 1 m^2 Betonpflastersteine, grau, mit Vorsatz, bei einer Dicke von 10 cm mit einem Flächengewicht von 230 kg/m^2. Sollte eine Umrechnung auf andere Formate bzw. Dicken notwendig sein, erfolgt diese über eine Umrechnung der Werte aus der EPD (SLG; EPD-SLG-20210055-CBE1-DE, 2021) auf m^3. Diese EPD bildet die Phasen Herstellung (Modul A1-A3), sowie Entsorgung (Modul C1-C4), wobei bei C1 ein maschineller Ausbau mit einer Baumaschine, bei C2 ein Lkw-Transport von 100 km zur Aufbereitung, bei C3 ein 100 %-Recycling im Zuge einer Bauschuttaufbereitung (Brechen der Betonsteine) und infolgedessen keine weiteren Aufwände in C4 berücksichtigt, und das Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial (Modul D) ab. Das End of Life-Szenario umfasst ein 100 %-Recycling durch Bauschuttaufbereitung mit stofflichen Gutschriften in Modul D aus dem Einbau als Sekundärmaterial im Straßenbau. Die Betonsteine bzw. Betonplatten (Großformate) werden mittels Lkw 100 km

zum Einbauort transportiert (Modul A4). Die Verlegung der Produkte kann von Hand oder maschinell erfolgen. In dieser Studie wird ein Einbau von Hand berücksichtigt.

Pflasterklinker

Im Rahmen dieser Studie wird als Datengrundlage für die Ermittlung der Umweltwirkungen eine vom Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. erstellte Umweltproduktdeklaration (BD Ziegel; EPD-BDZ-20230089-ICG3-DE, 2023) verwendet. Die vorgenannte EPD wurde nach den Vorgaben der (DIN EN 15804, 2022) erstellt und gemäß (DIN EN ISO 14025, 2011) extern verifiziert. Die Daten werden somit als belastbar eingestuft und können zur Durchführung einer Ökobilanzierung verwendet werden. Die vorgenannte EPD besitzt eine Gültigkeit bis 2028 und bezieht sich auf 1 m^2 Klinkerpflaster bei einer Dicke von 5,2 cm mit einem Flächengewicht von 98 kg/m^2. Sollte eine Umrechnung auf andere Formate bzw. Dicken notwendig sein, erfolgt diese über eine Umrechnung der Werte aus der EPD (BD Ziegel; EPD-BDZ-20230089-ICG3-DE, 2023) auf m^3. Der Transport zum Einbauort erfolgt mittels Lkw über 100 km (Modul A4). Die Pflasterklinker werden manuell verlegt (Modul A5). Das End of Life-Szenario umfasst ein ca. 94 %-Recycling durch Bauschuttaufbereitung mit stofflichen Gutschriften in Modul D aus dem Einbau als Sekundärmaterial im Straßenbau.

Pflastersteine aus Naturstein

Im Rahmen dieser Studie wird als Datengrundlage für die Ermittlung der Umweltwirkungen der Datensatz aus der ÖKOBAUDAT bezüglich „Natursteinplatten, hart, Außenbereich, Dicke 80 mm“ verwendet. Dieser Datensatz wurde nach den Vorgaben der (DIN EN 15804, 2022) modelliert. Die Ergebnisse werden in Modulen abgebildet, die den strukturierten Ausdruck von Ergebnissen über den gesamten Lebenszyklus zulassen. Die Daten werden somit als belastbar eingestuft und können zur Durchführung einer Ökobilanzierung verwendet werden. Der vorgenannte Datensatz besitzt eine Gültigkeit bis 2024 und bezieht sich auf 1 m^2 Fläche bei einer Dicke von 8 cm mit einem Flächengewicht von 208 kg/m^2. Sollte eine Umrechnung auf andere Formate bzw. Dicken notwendig sein, erfolgt diese über eine Umrechnung der Werte aus dem Datensatz auf m^3. Die Lebenszyklusanalyse von Naturwerksteinplatten für Anwendungen im Außenbereich umfasst bei dem verwendeten Datensatz die Lebenswegabschnitte Gewinnung von Granit und die weitere Bearbeitung (Gatter, Schleifstraße, Mehrblattsäge), sowie der Transport nach Deutschland (Modul A4). Zwischen Abbauort und Bearbeitungsort wurde eine mittlere Entfernung von 20 km festgelegt. Der Betrachtung liegen die in der Tabelle 3 beschriebenen Herkunftsmix-Szenarien zu Grunde.

Im Herkunftsmix 1 stammen 50 % der Natursteine aus China, 43 % aus Europa (ohne Deutschland) und 7 % aus Deutschland. Im Herkunftsmix 2 stammen 40 % aus China, 30 % aus Europa (ohne Deutschland) und 30 % aus Deutschland. Der Herkunftsmix 1 spiegelt die verwendeten Transportdistanzen des in der ÖKOBAUDAT vorhandenen Datensatzes wider. Der Herkunftsmix 2 ist einer Empfehlung des Auftraggebers für diese Studie folgend und in Anlehnung an die frühere Studie (SLG, 2014) zusätzlich

aufgenommen worden, um einen gegenüber dem Herkunftsmix 1 weniger pessimistischen Ansatz darstellen zu können.

Tabelle 3: Herkunftsmix-Szenarien für die Natursteinprodukte mit Herkunftsland, Transportmittel und Transportentfernung

Herkunftsmix-Szenarien und Transportmittel	**Herkunftsland und Verteilung**		
	China	**Europa**	**Deutschland**
Herkunftsmix 1	50%	43%	7%
Herkunftsmix 2	40%	30%	30%
Transportmittel	**Herkunftsland und Transportentfernung**		
Containerschiff	18880 km		
Bahntransport	500 km	1000 km	
Lkw	60 km	100 km	350 km

In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Bagger bilanziert. Der Transport in Modul C2 zur Aufbereitungsanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul C3 wird das Material aufbereitet. Es wurde ein Aufbereitungsverlust von 25 % angenommen. Dieser Verlust wird einer Inertstoffdeponie innerhalb von Modul C3 zugeführt (durchschnittliche Deponieemissionen). In Modul D erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution von natürlichem Kies als Verfüllmaterial (z. B. im Straßen- oder Deponiebau).

In der Regel können Natursteine nach ihrem Ausbau direkt wiederverwendet werden und gelten somit als relativ wertvolles Pflastermaterial. Die in der ÖKOBAUDAT hinterlegten Daten gehen jedoch davon nicht aus und berücksichtigen das zuvor beschriebene End of Life-Szenario.

4.4 Transporte

Transporte werden sowohl für die wesentlichen Basismaterialien (Ausgangsstoffe), d. h. deren Lieferung zu den Produktionsstätten (innerhalb der Module A1-A3), als auch für die jeweiligen Fertigprodukte zur Baustelle eingerechnet (Modul A4).

Des Weiteren sind Transporte vom Ort der Nutzung zum Ort der Nachnutzung in Form eines Szenarios angenommen.

Alle Transporte, die in den Modulen A1-A3 und C1-C4 stattfinden, sind in den jeweils verwendeten Datensätzen bereits inkludiert.

Für die Transporte zur Baustelle bzw. zum Einbauort sind die in der Tabelle 4 beschriebenen Transportentfernungen zugrunde gelegt worden. Die vorgegebenen Transportentfernungen basieren auf typischen Lieferdistanzen in Deutschland und

spiegeln die übliche Verteilung der Produktionsstätten wider. Asphaltmischanlagen sind deutschlandweit gleichmäßig verteilt, sodass Asphalttragschicht, Binder und Deckschicht in der Regel aus einem Umkreis von etwa 100 km bezogen werden. Diese Entfernung ergibt sich aus logistischen und wirtschaftlichen Überlegungen, da ein längerer Transport aufgrund der begrenzten Verarbeitungszeit von Asphalt ineffizient wäre. Betonpflastersteine hingegen werden häufig in regionalen Werken produziert, weshalb hier eine typische Lieferentfernung von 50 km angesetzt wurde. Bei größeren Formaten wie Betonplatten steigt die Transportentfernung auf etwa 100 km, da spezialisierte Produktionsstätten seltener sind. Natursteinplatten und Natursteinpflaster weisen stark variierende Transportwege auf, weshalb die Transportentfernungen direkt in den Datensätzen berücksichtigt sind. Klinkerpflastersteine haben mit 100 km eine größere angenommene Transportdistanz, da die Produktionsstätten für dieses Material nicht so flächendeckend verfügbar sind wie für Betonprodukte.

Das Gewicht und die Transportkosten spielen eine wesentliche Rolle bei der Wahl der Transportdistanzen. Materialien mit hoher Dichte und großem Volumen, wie Frostschutz- und Tragschichtmaterial oder Sand für Bettung und Fugenfüllung, werden in der Regel aus nahegelegenen Gewinnungsstätten oder Kieswerken bezogen, um Transportkosten und Emissionen zu minimieren. Daher sind hier Transportentfernungen von 20 km realistisch und gut begründet.

Die gewählten Entfernungen basieren zudem auf Markterfahrungen und typischen und in der Praxis beobachteten Transportwegen in Deutschland. Vergleichbare Ökobilanzen und Umweltproduktdeklarationen (EPDs) bestätigen diese Entfernungen als repräsentativ. Ebenso wird Bezug auf bereits veröffentlichte und einer kritischen Prüfung unterzogene Vergleichende Ökobilanzierungen genommen, welche einen identischen ökobilanziellen Vergleich aufgestellt haben. *(vgl. Vergleichende Ökobilanz: Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten (Aktualisierung des Berichts „Vergleichende Ökobilanz: Oberbaukonstruktionen mit unterschiedlichen Deckschichten, Fassung 2009/2011“, bestehend aus Vergleichende Ökobilanz – Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten; Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. – SLG (Hrsg.); Bonn 2009, und Tabellarische Aufstellung von Informationen für die Erstellung modularer Ökobilanzen von Pflastersteinen und Platten aus Beton mit vergleichbaren Lösungen aus Naturstein, Klinker und Asphalt für Oberbaukonstruktionen)*

Da Transportentfernungen je nach Bauvorhaben variieren können, wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Transportdistanzen auf die Umweltwirkungen zu untersuchen. Dies stellt sicher, dass mögliche Abweichungen im realen Baugeschehen berücksichtigt werden und die getroffenen Annahmen robust sind.

Tabelle 4: Transportentfernungen der in Abschnitt 3.4.4 beschriebenen Materialien zum Einbauort (Modul A4)

Material	**Transportentfernung** (Lkw-Transport)
Asphaltbinder	100 km
Asphaltdeckschicht	100 km
Asphalttragschicht	100 km
Material für Frostschutz- und Tragschicht	20 km
Sand für Bettung und Fugenfüllung	20 km
Betonpflastersteine	50 km
Betonplatten (Großformate)	100 km
Natursteinplatten (Großformate) Natursteinpflaster	in Datensatz inkludiert
Klinkerpflastersteine	100 km

4.5 Annahme und Abschätzungen

Innerhalb der Studie soll der Lebenszyklus der einzelnen Oberbaukonstruktionen untersucht werden (cradle to grave), der die Herstellungs- und Recycling-/ Entsorgungsphase umfasst. Folgende Annahmen und Abschätzung liegen der vorliegenden Berechnung zugrunde:

Einbau

Für die Asphaltschichten in Beispiel 1 (Tragschicht und Decke) bzw. in Beispiel 3 (Tragdeckschicht) wird maschineller Einbau angenommen.

Für die Pflasterdecken (Bettungsmaterial und Pflastersteine bzw. Großformate) wird in allen Beispielen manueller Einbau (Modul A5) angenommen. Das gleiche gilt für das Einbringen des Fugenmaterials durch Einkehren und Einschlämmen.

Bodenaushub

Entsprechend der Gesamtdicke der einzelnen Oberbaukonstruktionen wird vor dem Einbau der einzelnen Schichten der Aushub des anstehenden Bodens berücksichtigt. Der anstehende Boden wird üblicherweise mit Hilfe eines Schaufelladers mit einer Leistung von 100 kW bei Verkehrsflächen (Beispiele 1 und 2) oder mit Hilfe eines Minibaggers mit einer Leistung von 15 kW bei Gehwegen (Beispiel 3) ausgebaut.

End of Life

Für die vorliegende Studie wird kein vollständiger Rückbau der Oberbaukonstruktionen zugrunde gelegt. Die ungebundenen Tragschichten (Frostschutzschicht und Schottertragschicht) werden nicht ausgebaut. Für die Deckschicht gelten folgende praxisbezogene Annahmen:

– Asphaltdecke:

  In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Asphaltfräse bilanziert. Sowohl der Meißelverbrauch als auch der Dieselverbrauch werden dabei berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Ausbauasphalt das Ende der Abfalleigenschaft direkt nach dem Abfräsen erreicht. Das heißt, die Lasten für die Aufbereitung (Erwärmen und Mischen) werden in Modul D ausgewiesen. Der Transport in Modul C2 zur Asphaltmischanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul D wird ein Materialverlust von 3 % angenommen. Mischen und Erwärmen werden ebenfalls in Modul D bilanziert. Es erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (zurückgebaute Menge abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution einer Asphalttragschicht.

– Betonsteinpflasterdecke

  Entsorgungsstadium der Betonpflastersteine grau mit Vorsatz (End of Life-Szenario: 100 % Recycling, Bauschuttaufbereitung mit stofflichen Gutschriften in D aus dem Einbau als Sekundärmaterial im Straßenbau) umfasst:

  C1 maschineller Ausbau mit einer Baumaschine, C2 Transport mittels Lkw (100 km) zur Aufbereitung, C3 Aufbereitung der Betonsteine: 100 % Recycling (Bauschuttaufbereitung: Brechen der Betonsteine), C4 keine weiteren Aufwände durch Deponierung/ Entsorgung.

– Klinkerpflasterdecke

  Pflasterziegel und Pflasterklinker, welche ungebunden verlegt wurden, können ausgebaut, sortiert und wieder eingebaut werden. Weiterhin können sortenreine Pflasterziegel und Pflasterklinker von den Ziegelherstellern zurückgenommen und in gemahlener Form als Magerungsmittel in der Produktion wiederverwertet werden. Dies wird mit dem Produktionsbruch bereits seit Jahrzehnten praktiziert.

  Weiterverwendungsmöglichkeiten bestehen als Zuschlagstoff für Ziegelsplittbeton, als Füll- oder Schüttmaterial im Wege- und Tiefbau, als Substrat im Garten und Landschaftsbau, Material für die Wiederverfüllung von Gruben und Brüchen, beim Bau von Lärmschutzwällen sowie als Tennismehl und Tennissand. Auf der Baustelle anfallende Ziegelreste, Ziegelbruch sowie Ziegel aus Abbruch sind, sofern die oben beschriebenen Recyclingmöglichkeiten nicht praktikabel sind, problemlos zu entsorgen und stellen keine außergewöhnliche Belastung für die Umwelt dar. Aufgrund des chemisch neutralen, inerten und immobilen Verhaltens der Ziegel können diese auf Deponien der Deponieklasse I gemäß Deponieverordnung eingelagert bzw. in Gruben und Brüchen nach Z 1.1 verwendet werden.

  Nach Ablauf der Nutzungsdauer wird das Produkt mittels Bagger rückgebaut (Modul C1). Nach dem Transport des rückgebauten Produktes (Modul C2) ist für rund 6 % der Pflasterziegel und Pflasterklinker eine Deponierung auf einer Inertstoffdeponie vorgesehen (Modul C4), 94 % können nach der Aufbereitung (Modul C3) weiterverwertet werden. Gutschriften infolge des Recyclings von Ziegelbruch sind in Modul D deklariert.

– Natursteinpflasterdecke

In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Bagger bilanziert. Der Transport in Modul C2 zur Aufbereitungsanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul C3 wird das Material aufbereitet. Es wurde ein Aufbereitungsverlust von 25 % angenommen. Dieser Verlust wird einer Inertstoffdeponie innerhalb von Modul C3 zugeführt (durchschnittliche Deponieemissionen). In Modul D erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution von natürlichem Kies als Verfüllmaterial (z. B. im Straßen- oder Deponiebau).

Wie bereits erwähnt können und werden Natursteine in der Regel direkt wiederverwendet, das verwendete End of Life-Szenario aus der ÖKOBAUDAT sieht jedoch eine Verwendung als Verfüllmaterial vor.

4.6 Datenquelle und Datenqualität

Zur Ermittlung der Umweltindikatoren und des Ressourceneinsatzes der verschiedenen Verkehrsflächen werden in dieser Studie aus Gründen der Transparenz und der Nachvollziehbarkeit ausschließlich öffentlich zugängliche Daten verwendet. Ein Großteil der verwendeten Datensätze entstammt der ÖKOBAUDAT. Wenn in der Datenbank kein passender Datensatz vorhanden ist, wird ein extern verifizierter Datensatz aus einer veröffentlichten Umweltproduktdeklaration (EPD) gewählt. Welche Datensätze für welche Rohstoffe bzw. welchen Prozess in dieser Studie verwendet wurden, kann der Tabelle 5 entnommen werden. Hier sind die Datensätze unter anderem mit Identifikation, Quelle und Gültigkeit aufgelistet.

Da alle in der ÖKOBAUDAT hinterlegten Datensätze sowie auch die verwendeten Umweltproduktdeklarationen nach der (DIN EN 15804, 2022) für Nachhaltiges Bauen modelliert wurden, kann die Datenqualität als gut eingestuft werden.

Die Sachbilanz basiert auf qualitätsgesicherten und extern verifizierten Datenquellen.

Umweltproduktdeklarationen (EPDs): Soweit verfügbar, wurden produktspezifische EPDs gemäß EN 15804+A2 verwendet, da sie die verlässlichste Datenquelle für die Umweltbewertung von Baustoffen darstellen. Falls für einzelne Materialien keine produktspezifischen EPDs vorlagen, wurden generische Datensätze genutzt. Diese bieten standardisierte Durchschnittswerte, können aber zu Unsicherheiten führen.

4.7 Annahmen und Einschränungen

Die Sachbilanz basiert auf qualitätsgesicherten und extern verifizierten Datenquellen, die so weit wie möglich spezifische Umweltproduktdeklarationen (EPDs) gemäß EN 15804+A2 umfassen. Falls für einzelne Materialien keine produktspezifischen EPDs verfügbar waren, wurden generische Datensätze aus der ÖKOBAUDAT herangezogen. Diese bieten standardisierte Durchschnittswerte, können jedoch im Vergleich zu spezifischen Daten zu gewissen Unsicherheiten führen.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Umweltbilanz eines Bauvorhabens sind die Transportdistanzen der eingesetzten Materialien. Da projektspezifische Transportdaten nicht in jedem Fall verfügbar waren, wurden für diese Untersuchung branchenübliche Durchschnittswerte angesetzt. Allerdings können Transportentfernungen je nach Standort der Produktionsstätten und Baustellen erheblich variieren. Um die Auswirkungen dieser Unsicherheiten zu bewerten, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurden alternative Szenarien mit kürzeren und längeren Transportdistanzen berechnet (+/-75% zur Annahme), um deren Einfluss auf die Gesamtergebnisse der Ökobilanz zu quantifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass Transportemissionen in bestimmten Wirkungskategorien, insbesondere beim Treibhauspotenzial (GWP), eine signifikante Rolle spielen, während in anderen Kategorien die Auswirkungen eher gering sind (siehe Anhang C).

Zusätzlich basieren die Annahmen zum End-of-Life-Szenario auf den derzeitigen Wiederverwertungsquoten in Deutschland. Es wurde davon ausgegangen, dass ein Teil der Baumaterialien am Lebensende recycelt wird, wodurch eine Gutschrift im Modul D erfolgt. Einschränkungen ergeben sich insbesondere durch die begrenzte Verfügbarkeit spezifischer Daten für den Rückbau und das Recycling.

Alle verwendeten EPDs waren zum Zeitpunkt der Berechnung entweder noch gültig oder wurden als repräsentativ eingestuft. Sollte eine EPD ihr Gültigkeitsdatum überschritten haben, wurde sie nur verwendet, wenn keine wesentlichen Änderungen in der Produktionsweise oder den zugrunde liegenden Umweltwirkungen zu erwarten waren.

4.8 Bewertungsrahmen für die Datenqualität

Vor der Datenprüfung wurden die Qualitätsanforderungen definiert. Diese orientieren sich an den Zielsetzungen der Studie und der Notwendigkeit, belastbare und konsistente Aussagen über Umweltwirkungen verschiedener Alternativen zu treffen. Die Datengrundlage basiert primär auf verifizierten EPDs sowie auf generic und average Datensätzen aus der ÖKOBAUDAT, sofern keine spezifischen EPDs verfügbar waren.

Die Bewertung der Datenqualität erfolgte anhand der folgenden Kriterien:

- Zeitbezogener Erfassungsbereich: Alle verwendeten Daten sind aktuell und decken den betrachteten Zeitraum ab. Die Gültigkeit der verwendeten EPDs wurde geprüft.
- Geographischer Erfassungsbereich: Die Daten sind auf den regionalen

Kontext abgestimmt, insbesondere durch die Nutzung von ÖKOBAUDAT, die sich auf europäische bzw. deutsche Durchschnittswerte stützt.

- Technologischer Erfassungsbereich: Es wurde sichergestellt, dass die Datensätze den tatsächlich eingesetzten Technologien entsprechen. EPDs werden im Rahmen der Norm EN 15804 erstellt und verifiziert, sodass sie als belastbare Quelle dienen.
- Präzision: Da verifizierte EPDs verwendet wurden, kann von einer hohen Genauigkeit der Daten ausgegangen werden. Allerdings unterliegen generische Datensätze einer gewissen Unsicherheit, da sie Durchschnittswerte repräsentieren und nicht für jedes spezifische Produkt zutreffen müssen.
- Vollständigkeit: Alle relevanten Stoff- und Energieströme sind in den betrachteten EPDs enthalten. Datenlücken wurden identifiziert und, wo erforderlich, durch plausible Abschätzungen oder eine Sensitivitätsanalyse (z. B. für A4 – Transport) geschlossen. Die Module B1–B7 wurden nicht näher betrachtet, da hierzu keine belastbaren Daten verfügbar waren.
- Repräsentativität: Generic- und Average-Datensätze wurden verwendet, wenn keine spezifischen EPDs verfügbar waren. Dies ermöglicht eine realistische Abbildung der durchschnittlichen Umweltwirkungen, kann jedoch in Einzelfällen zu Abweichungen von produktspezifischen Werten führen.
- Konsistenz: Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden für alle Alternativen einheitliche Systemgrenzen und Methodiken angewendet. Wann immer möglich, wurde mit Average-Daten gearbeitet, andernfalls mit Generic-Daten.
- Vergleichspräzision: Da es sich um eine vergleichende Ökobilanz handelt, wurde sichergestellt, dass für alle betrachteten Alternativen einheitliche Datenquellen herangezogen wurden. Die Systemgrenzen sind für alle Szenarien identisch, sodass Verzerrungen durch methodische Unterschiede ausgeschlossen werden können.
- Datenquellen: Die verwendeten Daten stammen aus verifizierten EPDs oder aus öffentlich zugänglichen, anerkannten Datenbanken wie der ÖKOBAUDAT.
- Unsicherheit der Informationen: Generische Datensätze können gewisse Unsicherheiten aufweisen, da sie Durchschnittswerte für eine breite Palette von Produkten und Produktionsprozessen darstellen. Diese Unsicherheiten wurden durch Hinweise in der Dokumentation sowie durch eine Sensitivitätsanalyse adressiert.

Auf Basis der vorgenannten Kriterien wurde eine abschließende Gesamtbewertung der Datenqualität durchgeführt. Die verwendeten Datensätze (Tabelle 5) erfüllen die

Anforderungen an eine vergleichende Ökobilanz, insbesondere hinsichtlich Konsistenz und Transparenz. Die Unsicherheiten generischer Daten wurden erkannt und formuliert.

4.9 Beurteilung der Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung

Die Vollständigkeitsprüfung der verwendeten EPDs zeigt, dass diese weitgehend den Anforderungen entsprechen. EPDs werden gemäß den Standards DIN EN 15804 oder ISO 14025 erstellt und von Dritten verifiziert, was eine hohe Qualität der Daten gewährleistet. Die relevanten Lebenszyklusphasen A1–A5, C1–C4 sowie D sind vollständig abgedeckt, sodass alle wesentlichen Phasen des Produktlebenszyklus berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die Sensitivitätsprüfung kann festgestellt werden, dass die Unsicherheiten innerhalb der EPDs in der Regel gering ausfallen. Dies liegt daran, dass die meisten Daten aus gemessenen oder modellierten Prozessen stammen, die wiederum durch den Einsatz standardisierter Verfahren und eine breite Datenbasis verlässliche Ergebnisse liefern. Darüber hinaus beinhalten viele EPDs Mittelwerte, die auf verschiedenen Produktionsstandorten basieren, wodurch Einzelabweichungen minimiert werden. Eine detaillierte Sensitivitätsanalyse wurde jedoch speziell in Bezug auf die Transportstrecken durchgeführt, da diese in der Regel eine variable Größe darstellen. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im Bericht berücksichtigt und erläutert.

Die Konsistenzprüfung zeigt, dass die verwendeten EPDs größtenteils konsistent sind. Sie folgen einheitlichen Standards, wie etwa der DIN EN 15804, wodurch eine Vergleichbarkeit zwischen den Daten und verschiedenen EPDs gewährleistet wird. Die Methoden zur Datenerhebung und Allokation sind in der Regel innerhalb einer EPD konsistent, was die Zuverlässigkeit der Daten weiter stärkt.

Tabelle 5: Verwendete Datensätze mit Angaben, u. a. zur Identifikation, Quelle und Gültigkeit

Prozess/ Schicht	Name Daten-satz	Identifikation	Quelle	Gültig-keit	Eigentümer
Binderschicht	Asphaltbinder	3d1b480d-243f-4ff2-aa16-428e1a93f5d8	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Deckschicht	Tragdeckschicht	24d554b6-a720-45a3-b80d-17a46e612f26	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Asphalttrag-schicht	Asphalttrag-schicht	f34786e7-0953-4085-9f3d-955481cdd4ea	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Frostschutz-schicht	Schotter 16/32	85fc79d8-ba39-4236-993e-eeb928d9ae6f	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Schottertrag-schicht	Schotter 16/32	85fc79d8-ba39-4236-993e-eeb928d9ae6f	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Bettungs- und Fugenmate-rial	Sand 0/2	8125026b-602d-47d5-9087-7470c457d10a	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Transport (A4)	Lkw	b086b411-019a-4ddc-8fe9-0c264051c24b	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Transport (A4)	Bahntransport	dbd05a45-6ed0-4e8e-9679-434746979544	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Transport (A4)	Containerschiff	62d19bf5-ef5c-4468-b533-e42959fda0f0	OKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Bodenaushub Verkehrs-flä-che (A5)	Bagger 100 kW Aushub	e6d99030-e78c-4aa7-87da-c6a69208b569	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Bodenaushub Gehweg (A5)	Bagger 15 kW Aushub	e6d99030-e78c-4aa7-87da-c6a69208b569	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Betonstein	A2-Betonpflas-ter-Standardstein grau mit Vorsatz	0fdca580-3027-493d-a3c7-815758bac55d	ÖKOBAU-DAT	2026	Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V.
Naturstein	Natursteinplatte, hart, Außenbe-reich	72d8921b-8ac0-471b-943a-47871bd8d76a	ÖKOBAU-DAT	2024	Sphera Solutions GmbH
Klinker	Pflasterziegel und Pflasterklin-ker	EPD-BDZ-20230089-ICG3-DE	EPD (s.l.)	2028	Bundesverband der Deutschen Ziegelin-dustrie e.V.

5 Sachbilanz

5.1 Allgemeines

Die Referenzgröße ist 1 m^2 Oberbaukonstruktion einer Verkehrsfläche, die je nach Anwendungsfall bzw. Belastungsklasse unterschiedlich konzipiert sein kann. Im Abschnitt 4.3 sind die hier analysierten Beispiele mit den jeweils darin zu vergleichenden Varianten und ihrem Schichtenaufbau beschrieben. Die aus der Sachbilanz resultierende Wirkungsabschätzung wird im Abschnitt 5.7 dieser Studie dargestellt.

5.2 Beschreibung der Datensätze und deren Anwendung

5.2.1 Allgemeines

Für die Ermittlung der Umweltwirkung und des Ressourceneinsatzes zur Herstellung der untersuchten Verkehrsflächenbefestigungen werden die vorhandenen Datensätze aus Tabelle 5 verwendet. Soweit vorhanden werden für die jeweiligen Module immer die Daten aus den vorhandenen Datensätzen verwendet. Eine Ausnahme bildet hierbei das Modul A4, da dieses für jede Verkehrsflächenbefestigung individuell gerechnet wird. Hierbei werden die im Abschnitt 4.4 definierten Transportentfernungen zugrunde gelegt. Abweichend von dieser Methodik wird für die Natursteinprodukte der im Modul A4 hinterlegte Wert verwendet, da dieses Modul den Herkunftsmix 1 (siehe Tabelle 3) bereits berücksichtigt. Um einen zweiten, weniger pessimistischen Ansatz für die Transportentfernungen für Natursteinprodukte zu berücksichtigen, wird für alle Befestigungen mit Naturstein der Herkunftsmix 2 (siehe ebenfalls Tabelle 3) berücksichtigt. Dieser wurde bereits auch schon in (SLG, 2014) verwendet.

Die jeweiligen Daten werden durch geeignete mathematische Verfahren aus den benötigten Referenzflüssen umgerechnet.

Diese Daten multipliziert mit den jeweils benötigten relevanten Mengen ergeben somit für jedes Modul die Umweltwirkung und den Ressourceneinsatz für das jeweilige Material und in Summe die Umweltwirkung und den Ressourceneinsatz für die anfangs definierte Referenzmenge von 1 m^2 Verkehrsflächenbefestigung unter der Randbedingung, dass die ungebundenen Tragschichten nicht zurückgebaut werden. Die Module C1-C4 werden also bei der Ökobilanz für die Frostschutzschicht, die Schottertragschicht und die Bettung nicht berücksichtigt. Lediglich die jeweils obere Decke bzw. Deckschicht wird zurückgebaut.

5.2.2 Module A1-A3 – Materialien der Schichten

Die Module A1-A3 umfassen die Berücksichtigung der Vorketten und der Produktion der Materialien der Einzelschichten der Verkehrsflächenbefestigungen.

Der Einbau der einzelnen Schichten wird über ein parametrisiertes Modell eingestellt. Die Tabelle 5 stellt eine Übersicht der verwendeten Dateninventare dar.

Betonsteine

Die für diese Studie verwendete Umweltproduktdeklaration (SLG; EPD-SLG-20210055-CBE1-DE, 2021) bezieht sich auf Betonpflastersteine grau mit Vorsatz, die

von den Mitgliedern des Betonverbands Straße, Landschaft, Garten e. V. (SLG), Bonn hergestellt werden. Sie beruht auf Produktionsdaten mit dem Bezugsjahr 2018, die in Betonsteinwerken verschiedener Regionen und Größe in Deutschland erhoben und nach massenseitiger Produktionsmenge gewichtet wurden. Die Systemgrenzen der (SLG; EPD-SLG-20210055-CBE1-DE, 2021) folgen dem modularen Ansatz der DIN EN 15804 unter der Prämisse „Wiege bis Werkstor“ mit Optionen. In der genannten EPD werden die Herstellung in den Betonsteinwerken der beteiligten SLG-Mitgliedsfirmen und das Lebensende der Pflastersteine betrachtet.

Produktstadium (Modul A1-A3): Das Produktstadium der Betonpflastersteine grau mit Vorsatz umfasst:

- A1 Rohstoffbereitstellung und –verarbeitung und Verarbeitungsprozesse von als Input dienenden Sekundärstoffen, (z. B. Recyclingprozesse)
- A2 Transporte der Rohstoffe zu den Werken (Bezugsraum Deutschland)
- A3 Herstellung der Betonsteine im Werk, (inkl. Bereitstellung von Energie, Wasser, Hilfsstoffen sowie Entsorgung der Produktionsabfälle, Herstellung der Verpackungsmaterialien).

Entsorgungsstadium (Modul C1-C4): Das Entsorgungsstadium der Betonpflastersteine grau mit Vorsatz (End of Life-Szenario: 100 % Recycling, Bauschuttaufbereitung mit stofflichen Gutschriften in D aus dem Einbau als Sekundärmaterial im Straßenbau) umfasst:

- C1 maschineller Ausbau mittels Baumaschine
- C2 Transport mittels Lkw (100 km) zur Aufbereitung
- C3 Aufbereitung der Betonsteine: 100% Recycling (Bauschuttaufbereitung: Brechen der Betonsteine)
- C4 keine weiteren Aufwände durch Deponierung/ Entsorgung Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenzen (D).

Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenzen (Modul D): Modul D der Betonpflastersteine grau mit Vorsatz umfasst:

- Rückgewinnungspotentiale/ stoffliche Gutschriften aus dem Einbau als Sekundärmaterial im Straßenoberbau.

Einflüsse von Abfällen werden in den Modulen berücksichtigt, in denen diese anfallen. Transportaufwendungen werden für alle Basismaterialien einbezogen. In der Herstellung benötigte Maschinen, Anlagen und Infrastruktur werden vernachlässigt. Der Transport der Hilfsstoffe und der Verpackungen wird wegen der geringen Mengen und damit verbundenen geringen Relevanz nicht berücksichtigt. Die Erhebung der Vordergrunddaten bezieht sich auf das Jahr 2018. Es handelt sich in allen Fällen um jährliche Durchschnittszahlen. Alle Produktionsstätten liegen in Deutschland.

Natursteine

Der Datensatz repräsentiert ein Cradle to Gate Inventar. Er kann verwendet werden, um die Lieferkette des jeweiligen Produktes in einer repräsentativen Weise zu charakterisieren. Die Lebenszyklusanalyse von

Naturwerksteinplatten für Anwendungen im Außenbereich umfasst die Lebenswegabschnitte Gewinnung von Granit und die weitere Bearbeitung (Gatter, Schleifstraße, Mehrblattsäge) sowie den Transport nach Deutschland (Modul A4). Zwischen Abbauort und Bearbeitungsort wurde eine mittlere Entfernung von 20 km festgelegt. Der Betrachtung liegt jeweils ein Herkunftsmix 1 und ein Herkunftsmix 2 (siehe auch Tabelle 3) zu Grunde. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Bagger bilanziert. Der Transport in Modul C2 zur Aufbereitungsanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul C3 wird das Material aufbereitet. Es wurde ein Aufbereitungsverlust von 25 % angenommen. Dieser Verlust wird einer Inertstoffdeponie innerhalb von Modul C3 zugeführt (durchschnittliche Deponieemissionen). Der Transport der Hilfsstoffe und der Verpackungen wird wegen der geringen Mengen und damit verbundenen geringen Relevanz nicht berücksichtigt. In Modul D erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution von natürlichem Kies als Verfüllmaterial (z. B. im Straßen- oder Deponiebau).

Asphalt

Der Datensatz repräsentiert ein Cradle to Gate Inventar. Er kann verwendet werden, um die Lieferkette des jeweiligen Produktes in einer repräsentativen Weise zu charakterisieren. Die Lebenszyklusanalyse der Asphalttragschicht, der Asphaltdeckschicht sowie der Tragdeckschicht umfasst die Lebenswegabschnitte Cradle to Gate, d. h. insbesondere die Prozesse der Gewinnung der Zuschläge und der Herstellung von Bitumen. Berücksichtigt wurden die Transporte der Rezepturbestandteile zur Asphaltmischanlage sowie der Herstellungsaufwand. Das Modul A5 beinhaltet eine Maschine und Treibstoff. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In der Entsorgungsphase wird in Modul C1 ein maschineller Rückbau mittels Asphaltfräse bilanziert. Sowohl der Meißelverbrauch, als auch der Dieselverbrauch werden dabei berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Ausbauasphalt das Ende der Abfalleigenschaft direkt nach dem Abfräsen erreicht. Das heißt die Lasten für die Aufbereitung (Erwärmen und Mischen) werden in Modul D ausgewiesen. Der Transport in Modul C2 zur Asphaltmischanlage erfolgt mittels Lkw (50 km). In Modul D wird ein Materialverlust von 3 % angenommen. Mischen und Erwärmen werden ebenfalls in Modul D bilanziert. Es erfolgt eine Gutschrift für die Netto-Materialmenge (zurückgebaute Menge abzüglich Aufbereitungsverluste) für die Substitution einer Asphalttragschicht.

Klinker

Die verwendete Umweltproduktdeklaration (BD Ziegel; EPD-BDZ-20230089-ICG3-DE, 2023) bezieht sich auf Pflasterziegel und Pflasterklinker, die von Mitgliedern des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie e. V. hergestellt werden.

Für diese Deklaration wurden von 11 Mitgliedsunternehmen und insgesamt 11 Produktionsstandorten Daten aus dem Jahr 2021 zur Verfügung gestellt. Diese Mitglieder repräsentieren nach Anzahl rund 90 % der im Bundesverband

zusammengeschlossenen Hersteller von Pflasterziegeln und Pflasterklinker. Das Produktionsvolumen dieser Firmen liegt nach Produktionsmenge bei ca. 90 % des deutschen Marktes, und die Daten werden daher als belastbar und repräsentativ betrachtet. Die vorgenannte EPD wurde nach den Vorgaben der DIN EN 15804 erstellt und gemäß (DIN EN ISO 14025) extern verifiziert. Die Ökobilanz berücksichtigt die Rohstoffgewinnung, die Rohstofftransporte und die eigentliche Produktherstellung inklusive der Verpackungsmaterialien (Module A1–A3). Der Transport zur Baustelle (Modul A4) wird separat berechnet. Die Verwertung der Verpackungsmaterialien in Müllverbrennungsanlagen nach dem Einbau des Produktes (Modul A5) sind ebenfalls Teil der Systemgrenzen. Nach Ablauf der Nutzungsdauer wird das Produkt mittels Bagger rückgebaut (Modul C1). Nach dem Transport des rückgebauten Produktes (Modul C2) ist für rund 6 % der Pflasterziegel und Pflasterklinker eine Deponierung auf einer Inertstoffdeponie vorgesehen (Modul C4), 94 % können nach der Aufbereitung (Modul C3) weiterverwertet werden. Gutschriften infolge des Recyclings von Ziegelbruch sind in Modul D deklariert.

5.2.3 Modul A4 – Transport zum Einbauort

In Modul A4 sind die Transporte der Materialien und Vorprodukte zur Fertigung des Oberbaus zur Baustelle berücksichtigt. Die angenommenen Transportdistanzen der einzelnen Schicht-Materialien können der Tabelle 4 entnommen werden.

5.2.4 Modul A5 – Einbau der einzelnen Schichten

Das Modul A5 beinhaltet den Einbau der einzelnen Schichten der untersuchten Verkehrsflächenbefestigungen. Etwaige Umweltwirkungen durch Anpassungs- und Installationsarbeiten bleiben auf Grund fehlender Daten und der Variation in Abhängigkeit vom Bauprojekt unberücksichtigt.

Für den Einbau der Asphaltschichten (muss maschinell erfolgen) werden, die in den jeweiligen Datensätzen vorhandenen Werte verwendet. Für das Verlegen der Pflastersteine bzw. Großformate aus Beton, Naturstein und Klinker wird aus Ermangelung an belastbaren Daten ein manueller Einbau (Modul A5) unterstellt. Dieser ist bei derartigen Produkten üblich und häufig und benachteiligt somit keine der untersuchten Pflasterdecken.

5.2.5 Modul B – Nutzungsphase

Innerhalb der Nutzungsphase wird für diese Studie davon ausgegangen, dass keine Erhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass alle Oberbaukonstruktionen fachgerecht geplant und ausgeführt werden und die ihnen zugedachte Nutzungsdauer von z. B. 30 Jahren erreichen (RStO 5.2.1).

Eine Unterscheidung der Nutzungsdauer der Pflasterbefestigungen nach den für die Decke verwendeten Baustoffen (Beton, Naturstein, Klinker), z. B. in den Beispielen gemäß Abschnitt 4.3.2 bzw. Abschnitt 4.3.3, ist weder üblich noch sachlich gerechtfertigt, da zum einen die Leistungsfähigkeit einer Pflasterbefestigung im Wesentlichen

von den Tragschichten bestimmt wird und zum anderen für die untereinander verglichenen Befestigungen auch gleiche Verkehrsbeanspruchungen über den Nutzungszeitraum angenommen werden. So wird z. B. die theoretische Nutzungsdauer von Pflasterdecken in (ABBV, 2010) unabhängig vom verwendeten Pflastermaterial mit 25 Jahren für Fahrverkehrsflächen und mit 30 Jahren für Gehwege angegeben.

Eine Unterscheidung der Nutzungsdauer der Befestigungen im Beispiel 1, d. h. gemäß Abschnitt 4.3.1, wäre sachlich durchaus gerechtfertigt, da die theoretischen Nutzungsdauern für Asphaltbefestigungen und Pflasterbefestigungen nach (ABBV, 2010) zum Teil verschieden sind. Dies wird in dieser Studie jedoch vernachlässigt, obwohl die Ergebnisse für die Asphaltbefestigung dadurch etwas günstiger ausfallen würden.

Innerhalb der Nutzungsphase im Rahmen der B-Module nach DIN EN 15804 sind demnach keine Auswirkungen auf die Umweltwirkungen zu verzeichnen.

5.2.6 Module C und D – Rückbau und End of Life-Szenario

In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass die Frostschutzschichten und die Schottertragschichten nicht gezielt zurückgebaut werden, sondern an Ort und Stelle verbleiben. Es erfolgt demnach keine Entsorgung aber auch keine Aufbereitung infolgedessen etwaige Gutschriften erfolgen würden.

Ebenfalls wird für das Fugenmaterial kein gezielter Rückbau angenommen. Dieses Material haftet gegebenenfalls an den Pflastersteinen (Pflasterkitt), wird aber nicht aufbereitet.

Demnach umfassen die Module C und D Lasten und Gutschriften infolge der Nachnutzung der Pflastersteine und Großformate aus Beton und Naturstein sowie der Pflasterklinker und der Asphaltdeck- und Asphalttragschichten.

Der Rückbau der benannten Materialien erfolgt teilweise maschinell und teilweise manuell. Im Modul C1 sind nur die maschinellen Aufwendungen aus ökobilanzieller Sicht bewertbar. Der Rückbau erfolgt maschinell mittels Bagger (Modul C1). Der Transport vom Ort der Nutzung zum Ort der Aufbereitung mittels Lkw beträgt durchschnittlich 50 km und wird in Modul C2 adressiert.

Die aus der Nachnutzung resultierenden Gutschriften für die rezyklierten Gesteinskörnungen sind Modul D zugeordnet. Gutschriften für rezyklierte Gesteinskörnungen werden mit dem Datensätzen aus Tabelle 5 berechnet. Direkt nach dem Aufbereitungsvorgang wiederverwendbares Deckschichtmaterial wird ebenfalls in Modul D adressiert.

5.3 Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Die im Abschnitt 5.2 beschriebene Vorgehensweise ermöglicht die Berechnung verschiedener Wirkungskategorien und Umweltindikatoren. Eine Wirkungskategorie beschreibt den potenziellen Effekt eines Produktionsprozesses auf die Umwelt. Der Einfluss unterschiedlicher Ressourcen und Emissionen wird je Umweltwirkungskategorie normalisiert und zu einer spezifischen Ressource/Emission in Form von

„Äquivalenten“ addiert; z. B. werden die Treibhausgase mit der Einheit „kg CO_2-Äquivalente“ ausgewiesen.

Wirkungskategorien werden durch sogenannte „Elementarflüsse“ der Material- und Energiemengen berechnet. Elementarflüsse beschreiben die Menge an Ressourcen, die für die Herstellung der Vorprodukte und der Erzeugung von Energie aus der Umwelt entnommen werden, wie auch die Emissionen in die Umwelt, welche durch das Produktsystem verursacht werden.

Innerhalb der Studie werden die nach DIN EN 15804 geforderten Wirkungskategorien und Umweltindikatoren betrachtet.

5.4 Auswerteindikatoren der Sachbilanz nach DIN EN 15804

Die folgenden Indikatoren zur Primärenergie und dem Bedarf an Ressourcen werden aus der Sachbilanz ermittelt.

Tabelle 6: Umweltindikatoren der Sachbilanz

Umweltindikator	**Einheit**
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	MJ
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	MJ
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	MJ
Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	MJ
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	kg
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	MJ
Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen (FW)	m^3

5.5 Auswerteindikatoren der Wirkungsabschätzung nach DIN EN 15804

Die folgenden Indikatoren zu den Umweltwirkungen werden in dieser Studie berücksichtigt.

Die Auswahl dieser Umweltindikatoren und Wirkungen orientiert sich an den relevanten Umweltbelastungen, die durch den Bau und Betrieb von Infrastruktur und Produkten wie Straßenaufbauten entstehen können. Sie decken die wesentlichen Kategorien ab, die zur Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit eines Produkts oder Prozesses notwendig sind, und entsprechen den Anforderungen der einschlägigen DIN-Normen sowie internationalen Standards für die Ökobilanzierung. Die Berücksichtigung dieser Indikatoren ermöglicht eine umfassende und differenzierte Bewertung der Umweltwirkungen und trägt dazu bei, fundierte Entscheidungen in der Planung und Umsetzung von Bauprojekten zu treffen.

Tabelle 7: Umweltwirkungen der Sachbilanz

Umweltwirkung	**Einheit**
Globales Erwärmungspotenzial - total (GWP-total)	kg CO_2 eq.
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	kg CFC-11 eq.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	kg NMVOC eq.
Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung (AP)	mol H+ eq.
Eutrophierungspotenzial - Süßwasser (EP-freshwater)	kg P eq.
Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen nicht fossile Ressourcen (ADPE)	kg Sb eq.
Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen fossile Brennstoffe (ADPF)	MJ

Die Indikatoren Treibhauspotential, Primärenergiebedarf und Abiotisches Ressourcenpotential lassen Aussagen im Hinblick auf Klimawandel und Energie- und Ressourceneffizienz zu, die von hohem politischem Interesse sind und zu den drängendsten Umweltfragen unserer heutigen Zeit gehören.

Überdüngung, Versauerung und Sommersmog (photochemisches Ozonbildungspotential) stehen im Zusammenhang mit Umweltwirkungen, die die Luft, den Boden und die Wasserqualität beeinflussen.

Das Ozonabbaupotential hat eine politische Relevanz im Hinblick auf das weltweite Verbot von Ozon-zerstörenden Substanzen.

Der Wasserverbrauch, d. h. durch den Menschen verursachter Rückgang der Wasserverfügbarkeit durch Verfrachtung oder Verdunstung, ist von hoher politischer Relevanz. 2022 hatten 2,2 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sicher bewirtschaftetem

Trinkwasser (UNESCO, 2024). Im Zuge des Klimawandels wird Wasser immer knapper werden, sowohl in Gebieten, in denen heute noch ausreichend Wasser vorhanden ist als auch verstärkt an Orten, an denen es heute schon zu wenig Wasser gibt. Dies führt zu einer Vielzahl von Problemen in den Ökosystemen, der Gesundheit und der Ernährung.

Es wird betont, dass die genannten Kategorien Wirkungspotentiale darstellen, d. h. die Zahlenwerte sind Annäherungen an die Umwelteffekte, die auftreten können, wenn die emittierten Stoffe erstens dem im Modell hinterlegten Übertragungswegen folgen und zweitens auf bestimmte Bedingungen in der Umwelt treffen.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung stellen relative Angaben bzw. Potentiale dar, die keine Information zu konkreten Umweltwirkung abbilden; daraus können keine Grenzwertüberschreitungen oder Risikoanalysen abgeleitet werden (SLG, 2014).

5.6 Unsicherheiten bei Ergebnissen einer Wirkungsabschätzung

Datenqualität und Unsicherheit der Ergebnisse bedingen sich gegenseitig. Die Genauigkeit von Daten hängt ab von Messtoleranzen, Annahmen, Vollständigkeit, Detailtiefe des betrachteten Systems und der Repräsentativität der verwendeten Daten.

Unsicherheiten werden zudem über die Methoden und Modelle der Wirkungsabschätzung verursacht – und diese variieren zwischen den ausgewiesenen Wirkungskategorien.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung unterliegen verschiedenen Unsicherheiten, die sich aus der Datenqualität, Modellierungsannahmen und methodischen Grenzen der Ökobilanz ergeben. Eine zentrale Quelle der Unsicherheit liegt in der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen. Während spezifische EPDs auf produktspezifischen Messungen beruhen, sind generische oder durchschnittliche Datensätze oft auf Mittelwertbildungen angewiesen, was zu Abweichungen führen kann.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind Modellierungsannahmen. Beispielsweise erfordert die Berücksichtigung des End-of-Life-Szenarios Abschätzungen über zukünftige Entsorgungs- und Recyclingraten. Solche Annahmen sind mit Unsicherheiten behaftet, da technologische Entwicklungen oder politische Rahmenbedingungen Änderungen bewirken können.

Auch die Systemgrenze beeinflusst die Unsicherheit der Ergebnisse. So kann die Vernachlässigung bestimmter Module (z. B. B1–B7) in dieser Studie dazu führen, dass nicht alle Umweltwirkungen vollständig abgebildet sind. Die Wahl der Allokationsmethoden kann ebenfalls zu Unsicherheiten führen, insbesondere wenn Umweltauswirkungen zwischen verschiedenen Produkten oder Lebenszyklusphasen aufgeteilt werden müssen.

Zusätzlich spielen Wirkungsmodelle und Charakterisierungsfaktoren eine Rolle. Die Zuordnung von Emissionen zu Umweltwirkungen, beispielsweise über Global Warming Potential (GWP) oder Eutrophierungspotenzial (EP), basiert auf wissenschaftlichen Modellen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Einige Wirkungsmechanismen

sind noch nicht vollständig erforscht, was zu Abweichungen zwischen verschiedenen Datenbanken oder Methoden führen kann.

Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die insbesondere auf die Variabilität der Transportentfernungen eingeht. Dadurch konnte überprüft werden, wie stark sich Schwankungen einzelner Parameter auf das Gesamtergebnis auswirken. Insgesamt zeigt die Analyse, dass die getroffenen Annahmen robust sind und die Ergebnisse eine ausreichende Vergleichbarkeit der untersuchten Alternativen ermöglichen.

5.7 Ergebnisse der ökobilanziellen Ermittlungen

5.7.1 Beispiel 1 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter

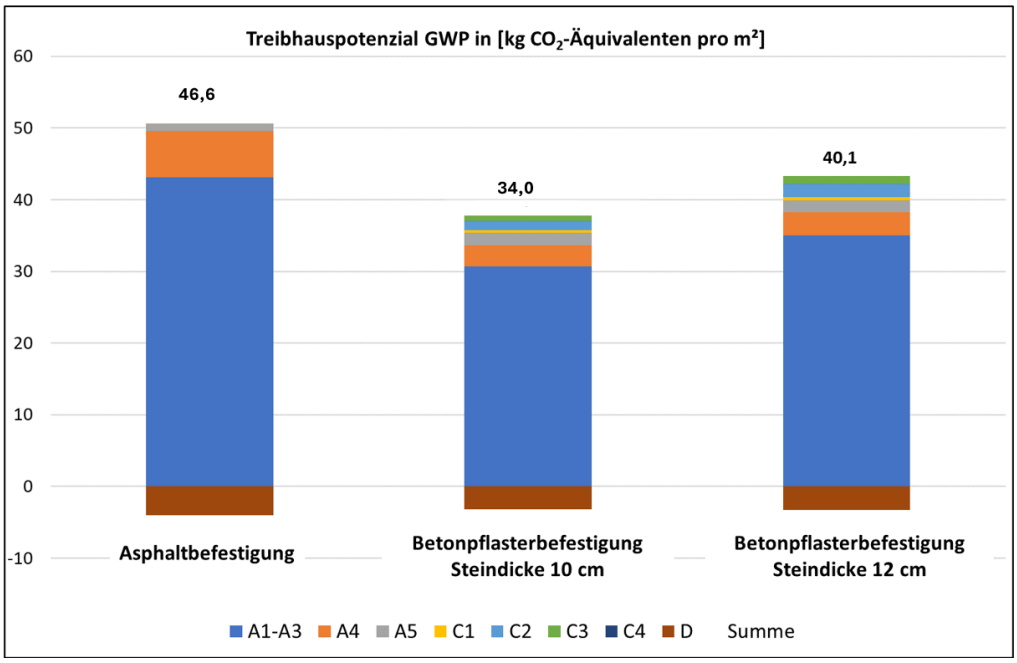

Abbildung 4: Treibhauspotenzial für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 1 – Sammelstraße

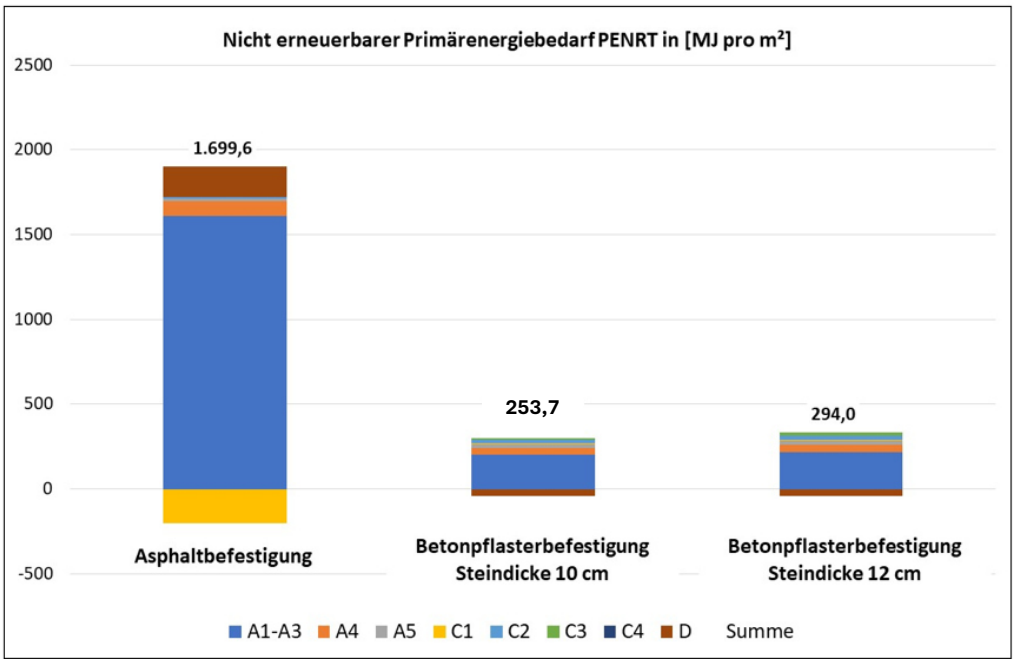

Abbildung 5: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 1 – Sammelstraße

Tabelle 8: Beispiel 1 – Sammelstraße, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Asphaltbauweise

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	4,31E+01	6,45E+00	1,07E+00	4,67E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,05E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,31E-10	1,57E-12	1,84E-13	6,12E-14	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,50E-11
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	7,80E-02	2,22E-02	2,30E-01	1,37E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,75E-02
AP	[kg mol H+-Äq.]	8,02E-02	2,43E-02	3,90E-03	3,27E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-8,28E-03
EP	[kg P-Äq.]	6,07E-05	1,50E-05	2,45E-06	5,99E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,02E-04
ADPE	[kg Sb Äq.]	2,61E-06	4,60E-07	7,43E-08	3,38E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,94E-07
ADPF	[MJ]	1,82E+03	8,68E+01	1,42E+01	3,61E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,67E+02

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	7,06E+01	5,82E+00	9,20E-01	2,21E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,80E+00
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	7,06E+01	5,82E+00	9,20E-01	2,21E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,80E+00
PENRE	[MJ]	5,82E+02	8,69E+01	1,42E+01	3,61E+00	0,00E+00	2,27E+02	0,00E+00	-3,67E+02
PENRM	[MJ]	1,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	-2,06E+02	0,00E+00	-2,27E+02	0,00E+00	5,48E+02
PENRT	[MJ]	1,61E+03	8,69E+01	1,42E+01	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,81E+02
SM	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	7,28E-02	5,18E-03	8,38E-04	2,44E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-9,15E-03

Tabelle 9: Beispiel 1 – Sammelstraße, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Betonpflasterbauweise, d = 10 cm

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	3,02E+01	3,00E+00	1,64E+00	3,55E-01	1,36E+00	6,61E-01	0,00E+00	-3,18E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,04E-10	7,33E-13	2,79E-13	4,29E-16	4,14E-15	1,30E-13	0,00E+00	-1,67E-13
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	4,48E-02	1,03E-02	2,01E-02	5,88E-03	3,45E-03	8,49E-03	0,00E+00	-5,12E-03
AP	[kg mol H+ -Äq.]	4,46E-02	1,13E-02	1,41E-02	4,00E-03	3,89E-03	6,04E-03	0,00E+00	-5,98E-03
EP	[kg P-Äq.]	4,59E-05	7,00E-06	3,71E-06	7,79E-07	2,93E-06	1,57E-06	0,00E+00	-1,18E-05
ADPE	[kg Sb Äq.]	6,81E-06	2,14E-07	1,13E-07	2,97E-08	1,12E-07	6,95E-07	0,00E+00	-9,99E-07
ADPF	[MJ]	1,97E+02	4,04E+01	2,16E+01	4,75E+00	1,79E+01	1,23E+01	0,00E+00	-4,01E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	7,72E+01	2,71E+00	1,40E+00	2,77E-01	1,04E+00	1,07E+00	0,00E+00	-1,86E+01
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	7,72E+01	2,71E+00	1,40E+00	2,77E-01	1,04E+00	1,07E+00	0,00E+00	-1,86E+01
PENRE	[MJ]	1,95E+02	4,05E+01	2,16E+01	4,75E+00	1,79E+01	1,23E+01	0,00E+00	-4,01E+01
PENRM	[MJ]	1,64E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	1,97E+02	4,05E+01	2,16E+01	4,75E+00	1,79E+01	1,23E+01	0,00E+00	-4,01E+01
SM	[kg]	3,63E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	1,05E-01	2,41E-03	1,27E-03	2,48E-04	9,34E-04	3,21E-03	0,00E+00	-2,15E-02

Tabelle 10: Beispiel 1 – Sammelstraße, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Betonpflasterbauweise, d = 12 cm

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	3,50E+01	3,25E+00	1,67E+00	4,42E-01	1,80E+00	1,16E+00	0,00E+00	-3,27E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,05E-10	7,93E-13	2,83E-13	3,25E-15	3,55E-14	1,17E-12	0,00E+00	-9,01E-13
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	5,09E-02	1,12E-02	2,03E-02	7,34E-03	4,62E-03	1,24E-02	0,00E+00	-5,45E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	5,04E-02	1,23E-02	1,42E-02	5,02E-03	5,20E-03	9,56E-03	0,00E+00	-6,33E-03
EP	[kg P-Äq.]	4,97E-05	7,58E-06	3,77E-06	9,66E-07	3,92E-06	2,72E-06	0,00E+00	-1,21E-05
ADPE	[kg Sb Äq.]	8,01E-06	2,32E-07	1,15E-07	3,67E-08	1,46E-07	1,01E-06	0,00E+00	-1,01E-06
ADPF	[MJ]	2,19E+02	4,37E+01	2,20E+01	5,89E+00	2,38E+01	2,06E+01	0,00E+00	-4,13E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	8,29E+01	2,93E+00	1,42E+00	2,91E-01	1,20E+00	1,89E+00	0,00E+00	-1,90E+01
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	8,29E+01	2,93E+00	1,42E+00	3,45E-01	1,40E+00	2,08E+00	0,00E+00	-1,90E+01
PENRE	[MJ]	2,17E+02	4,38E+01	2,20E+01	4,97E+00	2,03E+01	1,83E+01	0,00E+00	-4,13E+01
PENRM	[MJ]	1,96E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	2,19E+02	4,38E+01	2,20E+01	5,93E+00	2,38E+01	2,05E+01	0,00E+00	-4,13E+01
SM	[kg]	4,36E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	1,14E-01	2,61E-03	1,29E-03	3,10E-04	1,26E-03	5,36E-03	0,00E+00	-2,17E-02

5.7.2 Beispiel 2 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter

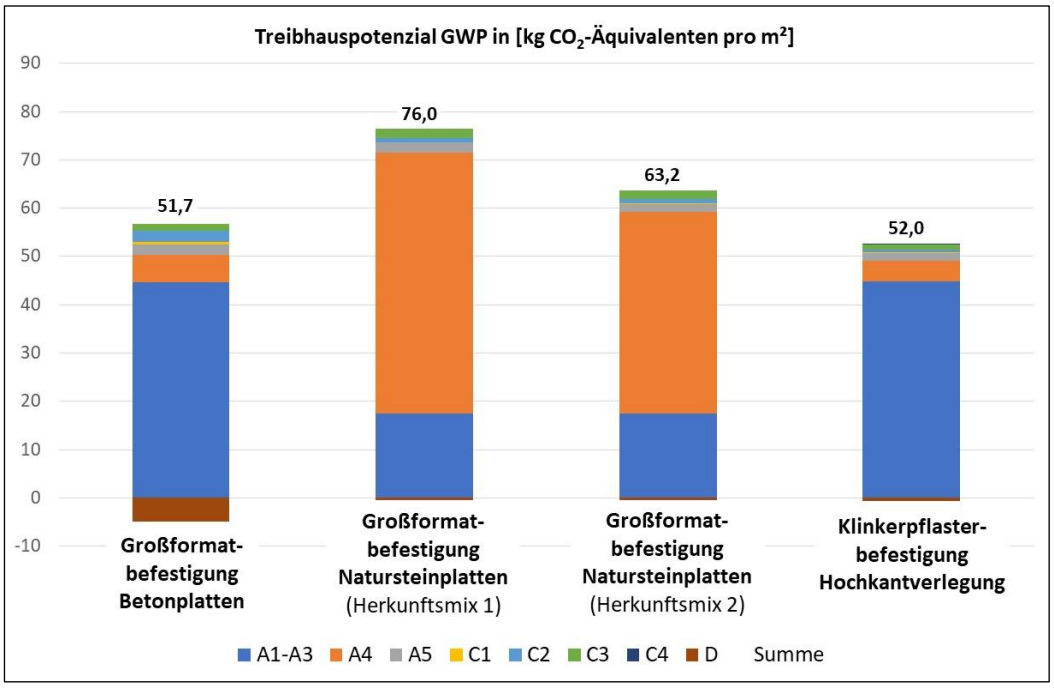

Abbildung 6: Treibhauspotenzial für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr

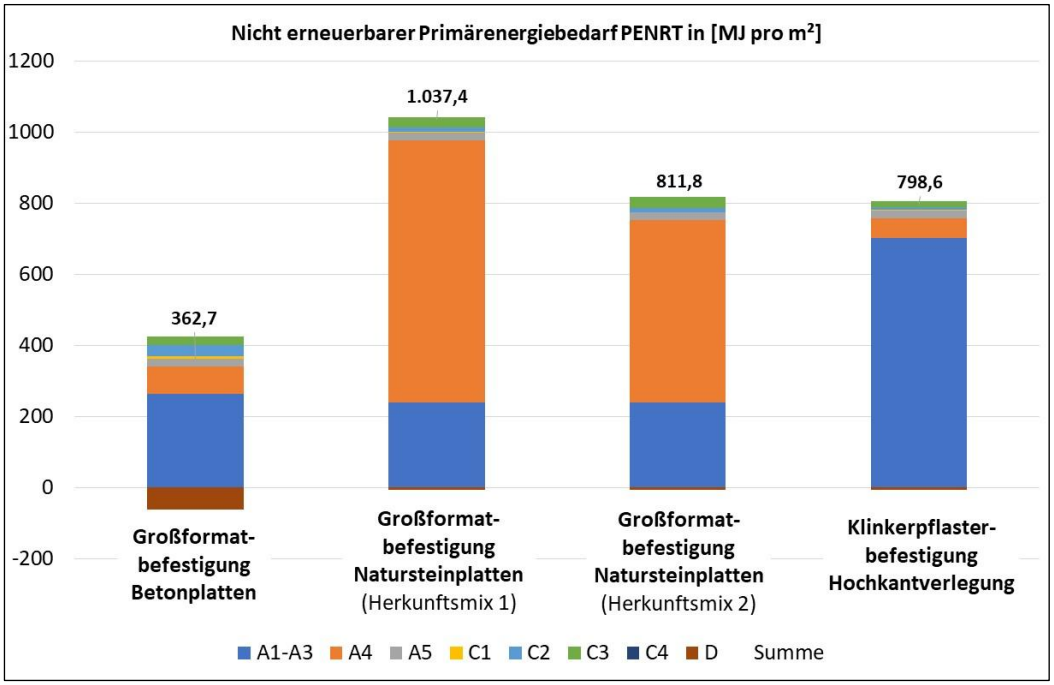

Abbildung 7: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr

Tabelle 11: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Beton-Großformatbelag

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	4,46E+01	5,69E+00	1,72E+00	5,60E-01	2,26E+00	1,38E+00	0,00E+00	-4,97E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,09E-10	1,39E-12	2,92E-13	3,43E-15	3,73E-14	1,23E-12	0,00E+00	-9,82E-13
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	6,29E-02	1,95E-02	2,06E-02	9,32E-03	5,77E-03	1,52E-02	0,00E+00	-8,18E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	6,20E-02	2,15E-02	1,44E-02	6,36E-03	6,50E-03	1,16E-02	0,00E+00	-9,52E-03
EP	[kg P-Äq.]	5,74E-05	1,33E-05	3,89E-06	1,23E-06	4,91E-06	3,26E-06	0,00E+00	-1,83E-05
ADPE	[kg Sb Äq.]	1,04E-05	4,06E-07	1,18E-07	4,66E-08	1,84E-07	1,24E-06	0,00E+00	-1,54E-06
ADPF	[MJ]	2,64E+02	7,65E+01	2,27E+01	7,50E+00	2,98E+01	2,48E+01	0,00E+00	-6,27E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	9,44E+01	5,13E+00	1,47E+00	4,38E-01	1,76E+00	2,45E+00	0,00E+00	-2,89E+01
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	9,44E+01	5,13E+00	1,47E+00	4,38E-01	1,76E+00	2,45E+00	0,00E+00	-2,89E+01
PENRE	[MJ]	2,61E+02	7,67E+01	2,27E+01	7,50E+00	2,98E+01	2,48E+01	0,00E+00	-6,27E+01
PENRM	[MJ]	2,62E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	2,64E+02	7,67E+01	2,27E+01	7,50E+00	2,98E+01	2,48E+01	0,00E+00	-6,27E+01
SM	[kg]	5,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	1,32E-01	4,57E-03	1,33E-03	3,93E-04	1,57E-03	6,45E-03	0,00E+00	-3,32E-02

Tabelle 12: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Naturstein-Großformatbelag (Herkunftsmix 1)

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	1,75E+01	5,39E+01	1,72E+00	8,01E-02	8,89E-01	1,85E+00	0,00E+00	-4,30E-01
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,04E-10	1,44E-10	2,92E-13	1,38E-14	1,54E-13	5,15E-12	0,00E+00	-3,62E-12
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	4,59E-02	9,87E-01	2,06E-02	1,47E-03	2,39E-03	1,10E-02	0,00E+00	-1,61E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	4,49E-02	8,66E-01	1,44E-02	1,08E-03	2,64E-03	1,17E-02	0,00E+00	-1,73E-03
EP	[kg P-Äq.]	4,69E-05	5,65E-05	3,89E-06	1,84E-07	2,06E-06	4,24E-06	0,00E+00	-1,44E-06
ADPE	[kg Sb Äq.]	1,27E-06	1,80E-06	1,18E-07	5,60E-09	6,25E-08	8,82E-07	0,00E+00	-4,28E-08
ADPF	[MJ]	2,39E+02	7,37E+02	2,27E+01	1,07E+00	1,20E+01	2,95E+01	0,00E+00	-5,89E+00

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	5,87E+01	7,60E+01	1,47E+00	6,93E-02	7,74E-01	4,03E+00	0,00E+00	-2,00E+00
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	5,87E+01	7,60E+01	1,47E+00	6,93E-02	7,74E-01	4,03E+00	0,00E+00	-2,00E+00
PENRE	[MJ]	2,39E+02	7,39E+02	2,27E+01	1,07E+00	1,20E+01	2,95E+01	0,00E+00	-5,90E+00
PENRM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	2,39E+02	7,39E+02	2,27E+01	1,07E+00	1,20E+01	2,95E+01	0,00E+00	-5,90E+00
SM	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	7,45E-02	3,25E-02	1,33E-03	6,32E-05	7,05E-04	7,63E-03	0,00E+00	-9,69E-04

Tabelle 13: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Natursteine-Großformatbelag (Herkunftsmix 2)

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	1,75E+01	4,16E+01	1,72E+00	8,01E-02	8,89E-01	1,85E+00	0,00E+00	-4,30E-01
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,04E-10	8,71E-11	2,92E-13	1,38E-14	1,54E-13	5,15E-12	0,00E+00	-3,62E-12
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	4,59E-02	7,43E-01	2,06E-02	1,47E-03	2,39E-03	1,10E-02	0,00E+00	-1,61E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	4,49E-02	6,50E-01	1,44E-02	1,08E-03	2,64E-03	1,17E-02	0,00E+00	-1,73E-03
EP	[kg P-Äq.]	4,69E-05	3,96E-05	3,89E-06	1,84E-07	2,06E-06	4,24E-06	0,00E+00	-1,44E-06
ADPE	[kg Sb Äq.]	1,27E-06	1,31E-06	1,18E-07	5,60E-09	6,25E-08	8,82E-07	0,00E+00	-4,28E-08
ADPF	[MJ]	2,39E+02	5,13E+02	2,27E+01	1,07E+00	1,20E+01	2,95E+01	0,00E+00	-5,89E+00

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	5,87E+01	4,76E+01	1,47E+00	6,93E-02	7,74E-01	4,03E+00	0,00E+00	-2,00E+00
PERT	[MJ]	5,87E+01	4,76E+01	1,47E+00	6,93E-02	7,74E-01	4,03E+00	0,00E+00	-2,00E+00
PENRE	[MJ]	2,39E+02	5,13E+02	2,27E+01	1,07E+00	1,20E+01	2,95E+01	0,00E+00	-5,90E+00
PENRM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	2,39E+02	5,13E+02	2,27E+01	1,07E+00	1,20E+01	2,95E+01	0,00E+00	-5,90E+00
SM	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	7,45E-02	2,08E-02	1,33E-03	6,32E-05	7,05E-04	7,63E-03	0,00E+00	-9,69E-04

Tabelle 14: Beispiel 2 – Fußgängerzone mit Lieferverkehr, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion mit Klinkerpflasterdecke, hochkant verlegt

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	4,49E+01	4,14E+00	1,67E+00	1,48E-01	5,61E-01	9,71E-01	1,85E-01	-5,62E-01
ODP	[kg CFC11-Äq.]	2,43E-09	1,01E-12	2,83E-13	2,16E-14	8,65E-14	2,66E-12	0,00E+00	-4,52E-12
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	4,75E-02	1,42E-02	2,02E-02	1,19E-03	8,45E-04	5,88E-03	0,00E+00	-1,79E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	4,38E-02	1,56E-02	1,42E-02	8,88E-04	9,47E-04	5,39E-03	0,00E+00	-1,94E-03
EP	[kg P-Äq.]	5,74E-05	9,67E-06	3,77E-06	3,09E-07	1,21E-06	2,22E-06	0,00E+00	-1,64E-06
ADPE	[kg Sb Äq.]	4,84E-06	2,96E-07	1,15E-07	1,46E-08	5,05E-08	8,04E-07	0,00E+00	-1,14E-07
ADPF	[MJ]	7,02E+02	5,58E+01	2,19E+01	1,96E+00	7,47E+00	1,70E+01	0,00E+00	-7,45E+00

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	9,60E+01	3,74E+00	1,42E+00	1,19E-01	4,59E-01	1,94E+00	0,00E+00	-2,40E+00
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	9,75E+01	3,74E+00	1,42E+00	1,19E-01	4,59E-01	1,94E+00	0,00E+00	-2,40E+00
PENRE	[MJ]	7,02E+02	5,59E+01	2,19E+01	1,96E+00	7,47E+00	1,70E+01	0,00E+00	-7,45E+00
PENRM	[MJ]	1,88E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	7,02E+02	5,59E+01	2,19E+01	1,96E+00	7,47E+00	1,70E+01	0,00E+00	-7,45E+00
SM	[kg]	6,57E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,96E+02	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	9,57E-02	3,33E-03	1,29E-03	1,04E-04	4,06E-04	4,41E-03	0,00E+00	-1,24E-03

5.7.3 Beispiel 3 – Oberbau für Gehweg

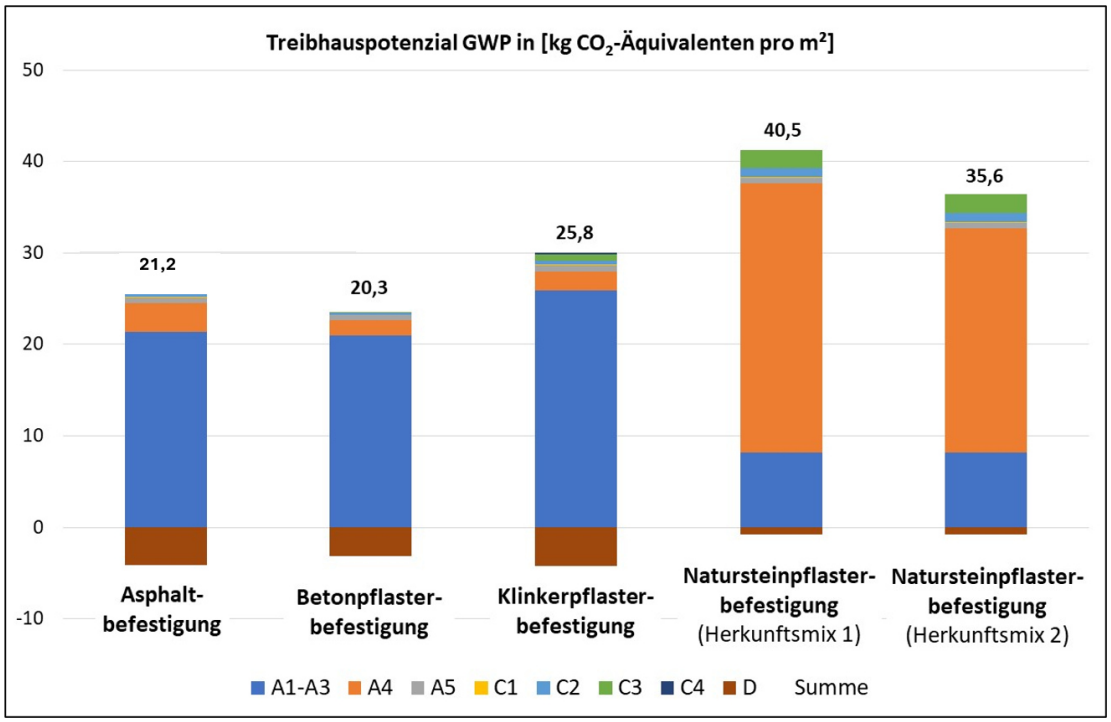

Abbildung 8: Treibhauspotenzial für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 3 – Gehweg

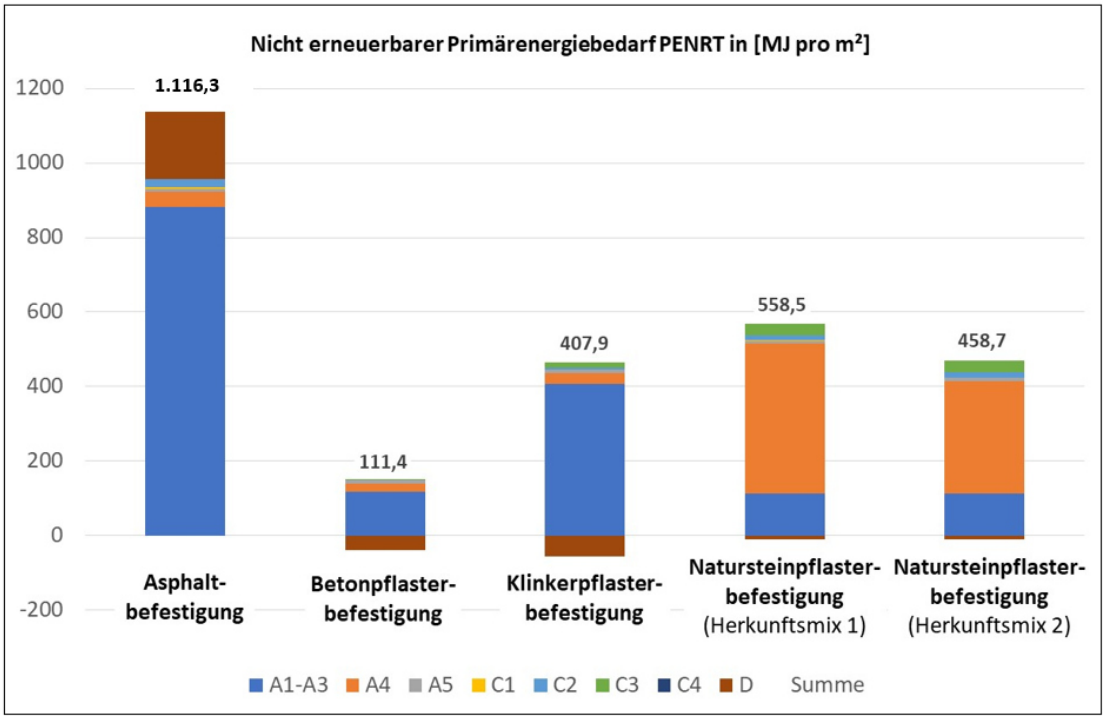

Abbildung 9: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die untersuchten Oberbaukonstruktionen, Beispiel 3 – Gehweg

Tabelle 15: Beispiel 3 -Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Asphaltbauweise

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	2,13E+01	3,16E+00	6,04E-01	1,36E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,08E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	7,26E-11	7,71E-13	1,03E-13	1,79E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,51E-11
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	4,06E-02	1,09E-02	1,12E-01	4,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,80E-02
AP	[kg mol H+-Äq.]	4,21E-02	1,19E-02	5,53E-03	9,53E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-8,34E-03
EP	[kg P-Äq.]	3,26E-05	7,37E-06	1,37E-06	1,75E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E-04
ADPE	[kg Sb Äq.]	1,42E-06	2,25E-07	4,16E-08	9,86E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,97E-07
ADPF	[MJ]	1,00E+03	4,25E+01	7,97E+00	1,05E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,70E+02

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	3,89E+01	2,85E+00	5,15E-01	1,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,86E+00
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	3,89E+01	2,85E+00	5,15E-01	1,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,86E+00
PENRE	[MJ]	2,81E+02	4,26E+01	7,97E+00	2,78E+00	0,00E+00	7,20E+02	0,00E+00	-3,70E+02
PENRM	[MJ]	6,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,20E+02	0,00E+00	5,52E+02
PENRT	[MJ]	8,81E+02	4,26E+01	7,97E+00	2,78E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,82E+02
SM	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	4,09E-02	2,54E-03	4,69E-04	7,12E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-9,22E-03

Tabelle 16: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Betonpflasterbauweise

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	2,10E+01	1,65E+00	6,35E-01	2,89E-02	1,26E-01	1,00E-01	0,00E+00	-3,19E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	3,85E-11	4,03E-13	1,08E-13	4,10E-16	4,53E-15	1,50E-13	0,00E+00	-1,83E-13
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	2,88E-02	5,68E-03	7,21E-03	4,83E-04	3,25E-04	9,38E-04	0,00E+00	-5,13E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	2,83E-02	6,23E-03	5,08E-03	3,31E-04	3,65E-04	7,73E-04	0,00E+00	-5,98E-03
EP	[kg P-Äq.]	2,41E-05	3,85E-06	1,44E-06	6,36E-08	2,77E-07	2,34E-07	0,00E+00	-1,18E-05
ADPE	[kg Sb Äq.]	4,97E-06	1,18E-07	4,37E-08	2,39E-09	1,01E-08	7,64E-08	0,00E+00	-9,99E-07
ADPF	[MJ]	1,17E+02	2,22E+01	8,37E+00	3,87E-01	1,67E+00	1,73E+00	0,00E+00	-4,01E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	3,89E+01	1,49E+00	5,41E-01	2,27E-02	9,96E-02	1,91E-01	0,00E+00	-1,86E+01
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	3,89E+01	1,49E+00	5,41E-01	2,27E-02	9,96E-02	1,91E-01	0,00E+00	-1,86E+01
PENRE	[MJ]	1,16E+02	2,23E+01	8,38E+00	3,87E-01	1,67E+00	1,73E+00	0,00E+00	-4,01E+01
PENRM	[MJ]	1,28E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	1,17E+02	2,23E+01	8,38E+00	3,87E-01	1,67E+00	1,73E+00	0,00E+00	-4,01E+01
SM	[kg]	2,85E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	5,50E-02	1,33E-03	4,93E-04	2,04E-05	8,96E-05	4,50E-04	0,00E+00	-2,15E-02

Tabelle 17: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Klinkerpflasterbauweise, flach verlegt

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	2,59E+01	2,13E+00	6,50E-01	9,58E-02	4,01E-01	7,15E-01	1,13E-01	-4,23E+00
ODP	[kg CFC11-Äq.]	1,46E-09	5,21E-13	1,10E-13	1,41E-14	6,31E-14	1,96E-12	0,00E+00	-3,37E-11
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	2,54E-02	7,33E-03	7,48E-03	8,24E-04	6,74E-04	4,31E-03	0,00E+00	-1,30E-02
AP	[kg mol H+-Äq.]	2,30E-02	8,05E-03	5,26E-03	6,14E-04	7,53E-04	4,06E-03	0,00E+00	-1,41E-02
EP	[kg P-Äq.]	2,83E-05	4,98E-06	1,47E-06	2,01E-07	8,73E-07	1,63E-06	0,00E+00	-1,19E-05
ADPE	[kg Sb Äq.]	2,74E-06	1,52E-07	4,47E-08	9,28E-09	3,50E-08	5,49E-07	0,00E+00	-9,44E-07
ADPF	[MJ]	4,07E+02	2,87E+01	8,56E+00	1,27E+00	5,35E+00	1,23E+01	0,00E+00	-5,57E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	4,62E+01	1,93E+00	5,54E-01	7,72E-02	3,31E-01	1,45E+00	0,00E+00	-1,77E+01
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	4,71E+01	1,93E+00	5,54E-01	7,72E-02	3,31E-01	1,45E+00	0,00E+00	-1,77E+01
PENRE	[MJ]	4,07E+02	2,88E+01	8,57E+00	1,27E+00	5,35E+00	1,24E+01	0,00E+00	-5,57E+01
PENRM	[MJ]	1,15E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	4,07E+02	2,88E+01	8,57E+00	1,27E+00	5,35E+00	1,24E+01	0,00E+00	-5,57E+01
SM	[kg]	4,01E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	4,24E-02	1,71E-03	5,04E-04	6,75E-05	2,94E-04	3,20E-03	0,00E+00	-9,32E-03

Tabelle 18: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Natursteinpflasterbauweise (Herkunftsmix 1)

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	8,21E+00	2,94E+01	6,09E-01	8,80E-02	9,76E-01	2,03E+00	0,00E+00	-8,06E-01
ODP	[kg CFC11-Äq.]	3,39E-11	7,94E-11	1,04E-13	1,52E-14	1,70E-13	5,66E-12	0,00E+00	-6,79E-12
POCP	[kg NMVOC-Äq.]	2,21E-02	5,43E-01	6,70E-03	1,62E-03	2,62E-03	1,20E-02	0,00E+00	-3,01E-03
AP	[kg mol H+-Äq.]	2,13E-02	4,76E-01	4,73E-03	1,18E-03	2,90E-03	1,28E-02	0,00E+00	-3,25E-03
EP	[kg P-Äq.]	1,94E-05	3,03E-05	1,38E-06	2,02E-07	2,26E-06	4,65E-06	0,00E+00	-2,70E-06
ADPE	[kg Sb Äq.]	4,99E-07	9,68E-07	4,19E-08	6,15E-09	6,87E-08	9,69E-07	0,00E+00	-8,03E-08
ADPF	[MJ]	1,12E+02	4,02E+02	8,03E+00	1,18E+00	1,31E+01	3,24E+01	0,00E+00	-1,10E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	2,05E+01	4,16E+01	5,19E-01	7,62E-02	8,50E-01	4,42E+00	0,00E+00	-3,75E+00
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	2,05E+01	4,16E+01	5,19E-01	7,62E-02	8,50E-01	4,42E+00	0,00E+00	-3,75E+00
PENRE	[MJ]	1,12E+02	4,03E+02	8,03E+00	1,18E+00	1,32E+01	3,25E+01	0,00E+00	-1,11E+01
PENRM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	1,12E+02	4,03E+02	8,03E+00	1,18E+00	1,32E+01	3,25E+01	0,00E+00	-1,11E+01
SM	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	2,55E-02	1,76E-02	4,73E-04	6,94E-05	7,74E-04	8,38E-03	0,00E+00	-1,82E-03

Tabelle 19: Beispiel 3 – Gehweg, Ergebnisse für 1 m² Oberbaukonstruktion in Natursteinpflasterbauweise (Herkunftsmix 2)

Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
GWP	[kg CO2-Äq.]	8,21E+00	2,45E+01	6,09E-01	8,80E-02	9,76E-01	2,03E+00	0,00E+00	-8,06E-01
ODP	[kg CFC11-Äq.]	3,39E-11	5,01E-11	1,04E-13	1,52E-14	1,70E-13	5,66E-12	0,00E+00	-6,79E-12
POCP	[kg Ethen-Äq.]	2,21E-02	4,28E-01	6,70E-03	1,62E-03	2,62E-03	1,20E-02	0,00E+00	-3,01E-03
AP	[kg SO2-Äq.]	2,13E-02	3,75E-01	4,73E-03	1,18E-03	2,90E-03	1,28E-02	0,00E+00	-3,25E-03
EP	[kg (PO4)3-Äq.]	1,94E-05	2,42E-05	1,38E-06	2,02E-07	2,26E-06	4,65E-06	0,00E+00	-2,70E-06
ADPE	[kg Sb Äq.]	4,99E-07	7,96E-07	4,19E-08	6,15E-09	6,87E-08	9,69E-07	0,00E+00	-8,03E-08
ADPF	[MJ]	1,12E+02	3,03E+02	8,03E+00	1,18E+00	1,31E+01	3,24E+01	0,00E+00	-1,10E+01

Ergebnisse der Bilanz Ressourceneinsatz									
Parameter	**Einheit**	**A1-A3**	**A4**	**A5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**D**
PERE	[MJ]	2,05E+01	2,79E+01	5,19E-01	7,62E-02	8,50E-01	4,42E+00	0,00E+00	-3,75E+00
PERM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PERT	[MJ]	2,05E+01	2,79E+01	5,19E-01	7,62E-02	8,50E-01	4,42E+00	0,00E+00	-3,75E+00
PENRE	[MJ]	1,12E+02	3,03E+02	8,03E+00	1,18E+00	1,32E+01	3,25E+01	0,00E+00	-1,11E+01
PENRM	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PENRT	[MJ]	1,12E+02	3,03E+02	8,03E+00	1,18E+00	1,32E+01	3,25E+01	0,00E+00	-1,11E+01
SM	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NRSF	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
FW	[m³]	2,55E-02	1,25E-02	4,73E-04	6,94E-05	7,74E-04	8,38E-03	0,00E+00	-1,82E-03

5.8 Interpretation der Ergebnisse

Die Methode der Ökobilanzierung ist vielseitig nutzbar. Sie erlaubt sowohl einen systemischen Vergleich von baulichen Lösungen wie beispielsweise Fahrbahnaufbauten, als auch die Analyse der Herstellung von Bauprodukten, wie Pflastersteine aus Beton oder anderen Produkten für die Verkehrsflächenbefestigung. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ökobilanz neben objektiven Sachverhalten auch auf Werthaltungen und Annahmen beruht und somit die Ergebnisse als relativ anzusehen sind.

Die verwendeten Daten für Pflastersteine bzw. Großformate aus Beton wurden aus der EPD des Betonverbands SLG (SLG; EPD-SLG-20210055-CBE1-DE, 2021) entnommen bzw. aus dieser errechnet, welche auf Produktionsdaten aus dem Jahr 2018 basiert und deren Werte einen Querschnitt aus Betonsteinwerken verschiedener Regionen und Größen in Deutschland repräsentieren.

Mit Hilfe der erhobenen Daten konnte die Umweltperformance, wie beispielsweise der Primärenergiebedarf oder das Treibhauspotenzial, der Herstellungskette von Pflastersteinen aus Beton ermittelt werden.

Ein Vergleich der in dieser Studie untersuchten Oberbaukonstruktionen zeigt, dass mit Bauweisen unter Verwendung von Betonprodukten aus Sicht der Ökobilanz vorteilhafte Gesamtlösungen zu erzielen sind. Der Fokus lag dabei auf dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf sowie auf den Treibhausgasemissionen. Die in dieser Studie veröffentlichten Zahlen lassen aber auch die Auswertung aller anderen, gemäß der DIN EN 15804 ermittelten Ökobilanzergebnisse zu.

Bei Betrachtung der dargestellten Ergebnisse der Module des Lebenszyklus fällt auf, dass die Oberbaukonstruktionen unter Verwendung von Naturstein- und Betonsteinprodukten aufgrund der sehr guten Wiederverwendbarkeit im End-of-Life-

Szenario, Aufwendungen in der Herstellungsphase gut kompensieren können.

Natursteinpflaster und Naturstein-Großformate können nahezu vollständig wiederverwendet werden, wodurch erneute Aufwendungen in der Herstellungsphase sowie teilweise lange Transportwege entfallen. Zusammenfassend ergeben sich bei der Betrachtung „cradle to grave“ für die Betonsteinvarianten innerhalb der miteinander verglichenen Befestigungen vorteilhafte Bilanzergebnisse.

Um bei Natursteinprodukten den Einfluss von Transporten bzw. Importen in Bezug auf die Umweltwirkungen der Herstellung herauszuarbeiten, wurden innerhalb der betrachteten Beispiele zwei Herkunftsmix-Szenarien (siehe auch Tabelle 3) angelegt, wobei für Naturstein typische Transportentfernungen bilanziert wurden. Die Auswertung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs macht deutlich, dass selbst bei Natursteintransporten innerhalb Europas allein durch den Transport dieselbe Größenordnung an nicht erneuerbarer Primärenergie erreicht wird, wie durch die Herstellung der Natursteine selbst. Die Natursteintransporte aus Übersee zeigen am Beispiel China deutlich, dass diese Bezugsform ökobilanziell erheblich nachteilig ist. Auch das Treibhauspotential zeigt für einen Natursteintransport aus Übersee höhere Werte als für die alleinige Herstellung. Ein lokaler Bezug von Baustoffen für Verkehrsflächenbefestigungen ist daher in jedem Fall vorzuziehen. Dies gilt prinzipiell für alle in Frage kommenden Baustoffe.

Abschließend lässt sich sagen, dass für die hier untersuchten Beispiele von Verkehrsflächenbefestigungen unter dem Gesichtspunkt der Umweltwirkung und des Ressourceneinsatzes die Bauweisen mit Betonelementen (Pflastersteine und Großformate) in den untersuchten Wirkkategorien (vgl. Abschnitt 5.4) unter den beschriebenen End of Life-Szenarien und Annahmen am besten abschneiden.

Insgesamt betrachtet, zeigt die Bauweise mit Betonstein eine aus Umweltsicht zu empfehlende Bauweise innerhalb des Variantenvergleichs.

Zusammenfassend zeigt sich, dass bei Entscheidungsfindungen zunächst der Bezugsort entscheidend für die Umweltperformance ist. Regionalem Bezug ist der Vorzug zu geben, um Transportwege klein zu halten. Definierte Transportszenarien haben entscheidenden Einfluss auf den Vergleich der Natursteinvarianten gegenüber der Betonsteinvarianten.

Kaiserlautern im Februar 2025

Anhang A Berechnungsgrundlagen für die Sachbilanz

	Bezeichnung	Phase	Referenzfluss	Dicke [m]		Länge [m]		Breite [m]	Volumen [m³]	Gewicht [kg] bzw. [kg/m²]		[t]	Dichte [kg/m³]	Mehrmenge/ Mindermenge	Transportweg [km]	Bedarf für 1,00 m² (Bezugseinheit)	jeweiliger Umweltindikator pro deklarierter Einheit aus entsprechender EPD (LCA-Indic. pro dE)
Beispiel 1 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit überwiegend funktionalem Charakter, z. B. Sammelstraße																	
Allgemein	Frostschutzschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,300	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 420 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4	t*km	0,300	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 8,4 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5	m³	0,300	x	1,00	x	1,00								= 0,3 m³	x LCA-Indic. pro dE
Asphalt																	
1.1	Asphalttragschicht	A1-A3, A5, C1-C4, D	kg	0,120	x	1,00	x	1,00					x 2.350			= 282 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: KLW	t*km	0,120	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 2.350		x 100	= 28,2 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,120	x	1,00	x	1,00								= 0,12 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Binderschicht	A1-A3, A5, **C1**, D	kg	0,035	x	1,00	x	1,00					x 2.350			= 82,25 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4	t*km	0,035	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 2.350		x 100	= 8,225 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,035	x	1,00	x	1,00								= 0,035 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Deckschicht	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,065	x	1,00	x	1,00					x 2.400			= 156 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4	t*km	0,065	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 2.400		x 100	= 15,6 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,065	x	1,00	x	1,00								= 0,065 m³	x LCA-Indic. pro dE
Betonsteine																	
Allgemein	Schottertragschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,250	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 350,00 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,250	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 7,00 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,250	x	1,00	x	1,00								= 0,25 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Bettung	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,040	x	1,00	x	1,00					x 1.350			= 54 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,040	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.350		x 20	= 1,08 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,040	x	1,00	x	1,00								= 0,04 m³	x LCA-Indic. pro dE
1.2	**Betonstein (d = 10 cm)**	A1-A3, C1-C4, D	m²	0,100	x	1,00	x	1,00						x 0,96		= 0,096 m²	x LCA-Indic. pro dE
		A4:	t*km							230	x	0,001			x 50	= 11,50 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,100	x	1,00	x	1,00								= 0,10 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Fugenfüllung	A1-A3, C1-C3, D	kg	(0,01	x	1,00	x	1)	- 0,096))					x 1,25		= 0,005 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	(0,01	x	1,00	x	1)	- 0,096))		x	0,001	x 1.350	x 1,25	x 20	= 0,135 t*km	x LCA-Indic. pro dE
1.3	**Betonstein (d = 12 cm)**	A1-A3, C1-C4, D	m²	0,120	x	1,00	x	1,00						x 0,96		= 0,1152 m²	x LCA-Indic. pro dE
		A4:	t*km							230	x	0,001		x 1,2	x 50	= 13,80 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,120	x	1,00	x	1,00								= 0,12 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Fugenfüllung	A1-A3, C1-C3, D	kg	(0,12	x	1,00	x	1)	- 0,1152))					x 1,25		= 0,006 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	(0,12	x	1,00	x	1)	- 0,1152))		x	0,001	x 1.350	x 1,25	x 20	= 0,162 t*km	x LCA-Indic. pro dE
Beispiel 2 – Oberbau Bk3,2 für Verkehrsfläche mit funktionalem und gestalterischem Charakter, z. B. Fußgängerzone mit Lieferverkehr																	
Allgemein	Frostschutzschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,300	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 420 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4	t*km	0,300	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 8,4 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5	m³	0,300	x	1,00	x	1,00								= 0,3 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Schottertragschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,250	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 350,00 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,250	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 7,00 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Bagger 15 kW	m³	0,250	x	1,00	x	1,00								= 0,25 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Bettungsschicht	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,040	x	1,00	x	1,00					x 1.350			= 54 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,040	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.350		x 20	= 1,08 t*km	x LCA-Indic. pro dE
2.1	**Betonstein**	A1-A3, C1-C4, D	m³	0,160	x	1,00	x	1,00						x 0,959		= 0,15344 m³	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km							366	x	0,001			x 100	= 0,366 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Bagger 100 kW	m³	0,160	x	1,00	x	1,00								= 0,16 m³	x LCA-Indic. pro dE
2.2	**Naturstein**	A1-A3, A4, C1-C3, D	kg	0,160	x	1,000	x	1,000						x 0,959		0,153 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: Schiff, Bahn, LKW	t*km							siehe Herkunftsmix							x LCA-Indic. pro dE
		A5: Bagger 100 kW	m³ (Aushub)	0,160	x	1,00	x	1,00								= 0,16 m³	x LCA-Indic. pro dE
2.3	**Klinker**	A1-A3; C1-C3, D	m³	0,118	x	1,00	x	1,00						x 0,937		= 0,110566 m³	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km							221,13	x	0,001			x 100	= 22,113 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Bagger 100 kW	m³ (Aushub)	0,118	x	1,00	x	1,00								= 0,118 m³	x LCA-Indic. pro dE
Beispiel 3 – Oberbau für Gehweg																	
Asphaltbefestigung																	
3.1	Asphalttragdeckschicht	A1-A3, A5, C1, D	kg	0,100	x	1,00	x	1,00					2.400			= 240 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,100							x	0,001	2.400		100	= 24 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,100	x	1,00	x	1,00								= 0,1 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Tragschicht	A1-A3, A5, C1, D	kg	0,200									1.400			= 280 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,200							x	0,001	1.400		20	= 5,6 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,200	x	1,00	x	1,00								= 0,2 m³	x LCA-Indic. pro dE
Betonpflasterbauweise																	
3.2	Tragschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,180	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 252 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,180	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 5,04 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,180	x	1,00	x	1,00								= 0,18 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Bettung	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,040									x 1.350			= 54 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,400							x	0,001	x 1.350		x 20	= 10,8 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,040	x	1,00	x	1,00								= 0,04 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Betonpflasterdeckschicht	A1-A3, C1-C4, D	m²	0,080	x	1,00	x	1,00						x 0,941		= 0,07528 m³	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,080						x 230	x	0,001			x 50	= 0,92 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,080	x	1,00	x	1,00								= 0,08 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Fugenfüllung	A1-A3, C1-C3, D	kg	(0,08	x	1,00	x	1,00)	- 0,07528))					x 1,25		= 0,0059 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	(0,08	x	1,00	x	1,00)	- 0,07528))		x	0,001	x 1.350	x 1,25	x 20	= 24,4593 t*km	x LCA-Indic. pro dE
Klinker																	
3.3	Tragschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,190	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 266 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,190	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 5,32 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,190	x	1,00	x	1,00								= 0,19 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Bettung	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,040									x 1.350			= 54 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,400							x	0,001	x 1.350		x 20	= 10,8 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,040	x	1,00	x	1,00								= 0,04 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Klinkerpflastersteine		m³	0,071	x	1,00	x	1,00						0,951		= 0,067521 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,071	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 2.000	x 0,951	x 100	= 13,5042 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,071	x	1,00	x	1,00								= 0,071 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Fugenfüllung	A1-A3, C1-C3, D	kg	(0,71	x	1,00	x	1,00)		- 0,067521						= 0,003479 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	(0,071	x	1,00	x	1,00)		- 0,067521))	x	0,001	x 1.350	x 1,25	x 20	= 0,00469665 t*km	x LCA-Indic. pro dE
Naturstein																	
3.4	Tragschicht	A1-A3, C1-C3, D	kg	0,190	x	1,00	x	1,00					x 1.400			= 266 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,190	x	1,00	x	1,00			x	0,001	x 1.400		x 20	= 5,32 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,190	x	1,00	x	1,00								= 0,19 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Bettung	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,040									x 1.350			= 54 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	0,400							x	0,001	x 1.350		x 20	= 10,8 t*km	x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,040	x	1,00	x	1,00								= 0,04 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Natursteindeckschicht	A1-A3, C1-C4, D	kg	0,100	x	1,00	x	1,00					x 2.600	x 0,846		= 219,96 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4:	t*km							siehe Herkunftsmix							x LCA-Indic. pro dE
		A5: Aushub	m³	0,100	x	1,00	x	1,00								= 0,1 m³	x LCA-Indic. pro dE
	Fugenfüllung	A1-A3, C1-C3, D	kg	(0,1	x	1,00	x	1,00)	- 0,08406))					x 1,25		= 0,019925 kg	x LCA-Indic. pro dE
		A4: LKW	t*km	(0,1	x	1,00	x	1,00)	- 0,08406))		x	0,001	x 1.350	x 1,25	x 20	= 0,537975 t*km	x LCA-Indic. pro dE

Anhang B Beschreibung der Auswertegrößen

Global Warming Potential (GWP) – Treibhauspotential

Der **Global Warming Potential** (GWP) beschreibt die Klimawirkung eines Stoffes basierend auf seiner Fähigkeit, Wärme in der Atmosphäre zu absorbieren und die Erderwärmung zu verstärken. Ein hoher GWP-Wert bedeutet, dass der Stoff in der Lage ist, mehr Wärme zu speichern und somit den Klimawandel stärker zu beeinflussen. Der GWP wird oft über einen Zeitraum von 100 Jahren berechnet. Emissionen von CO_2 haben ein GWP von 1, während andere Gase wie Methan oder Lachgas ein höheres GWP aufweisen.

Ozone Depletion Potential (ODP) – Ozonabbaupotenzial

Das **Ozone Depletion Potential** (ODP) gibt an, wie stark ein Stoff zur Zerstörung der Ozonschicht beiträgt, die die Erde vor schädlicher UV-Strahlung schützt. Ozonabbauende Substanzen wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) oder Stickoxide können das Ozon in der Stratosphäre abbauen. Ein hoher ODP-Wert bedeutet, dass ein Stoff die Ozonschicht erheblich beeinträchtigt.

Photooxidant Creation Potential (POCP) – Photooxidantienbildung

Der **POCP** misst die Fähigkeit eines Stoffes, in der Atmosphäre bodennahes Ozon zu bilden, das für den sogenannten Sommersmog verantwortlich ist. Hohe Ozonwerte in der Troposphäre sind schädlich für Menschen und Pflanzen und können zu Atemwegserkrankungen und Schädigungen der Vegetation führen. Der POCP bewertet, wie sehr eine Substanz zur Bildung von Ozon beiträgt, das als Photooxidant schädlich wirkt.

Acidification Potential (AP) – Versauerungspotenzial

Das **Acidification Potential** (AP) gibt an, wie stark eine Substanz zur Versauerung von Böden und Gewässern beiträgt. Versauerung kann durch Emissionen von Stickstoffoxiden (NOx), Schwefeldioxid (SO_2) und Ammoniak (NH_3) verursacht werden. Ein hoher AP-Wert bedeutet, dass die betreffende Substanz die Versauerung von Ökosystemen fördert, was negative Auswirkungen auf die Biodiversität und die Bodenfruchtbarkeit hat.

Eutrophication Potential (EP) – Eutrophierungspotenzial

Das **Eutrophierungspotenzial** (EP) beschreibt, wie stark eine Substanz zur Überdüngung von Gewässern beiträgt, was das Algenwachstum fördert und zu Sauerstoffmangel führt. Dies kann die Lebensqualität aquatischer Organismen beeinträchtigen und die Wasserqualität verringern. Der EP-Wert berücksichtigt die Emissionen von Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor, die in Gewässern das Wachstum von Algen begünstigen.

Abiotic Depletion Potential, Elements (ADPE) – Abbaupotenzial von Nicht-Energie-Rohstoffen (Elemente)

Das **Abiotic Depletion Potential, Elements** (ADPE) bewertet, wie stark die Gewinnung von Materialien aus nicht erneuerbaren Rohstoffen wie Metallen und Mineralien die Vorräte

dieser Rohstoffe erschöpft. Ein hoher ADPE-Wert bedeutet, dass ein Produkt oder ein Prozess zu einer stärkeren Erschöpfung von nicht-energetischen, nicht erneuerbaren Ressourcen beiträgt.

Abiotic Depletion Potential, Fossil Fuels (ADPF) – Abbaupotenzial von fossilen Brennstoffen

Das **Abiotic Depletion Potential, Fossil Fuels** (ADPF) beschreibt, wie stark ein Prozess zur Erschöpfung fossiler Brennstoffe beiträgt. Fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas sind nicht erneuerbar und ihre Verwendung führt zu einer langfristigen Verringerung der globalen Energiequelle. Der ADPF-Wert hilft zu verstehen, wie ressourcenintensiv eine Aktivität oder ein Produkt im Hinblick auf fossile Energiequellen ist.

Primary Energy Renewable (PERE) – Erneuerbare Primärenergie

Das **PERE** beschreibt die Menge an erneuerbarer Primärenergie, die während des Lebenszyklus eines Produkts oder einer Dienstleistung verwendet wird. Hierbei handelt es sich um Energiequellen wie Wind, Sonne, Wasser und Biomasse. Der PERE-Wert gibt an, wie stark ein Prozess auf nachhaltige Energiequellen angewiesen ist.

Primary Energy Renewable Material (PERM) – Erneuerbare Primärenergie für Materialien

Der **PERM** zeigt, wie viel erneuerbare Primärenergie in Materialien enthalten ist, die für die Herstellung eines Produkts verwendet werden. Dies bezieht sich auf Materialien, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Ein hoher PERM-Wert bedeutet, dass das Produkt stärker auf nachhaltige und erneuerbare Materialien angewiesen ist.

Primary Energy Renewable Total (PERT) – Gesamt erneuerbare Primärenergie

Der **PERT** gibt an, wie viel erneuerbare Primärenergie insgesamt für die Herstellung eines Produkts, einschließlich Materialien und Energie, benötigt wird. Der Wert zeigt, wie sehr der gesamte Lebenszyklus eines Produkts auf erneuerbare Energiequellen angewiesen ist.

Primary Energy Non-Renewable (PENRE) – Nicht-erneuerbare Primärenergie

Das **PENRE** beschreibt die Menge an nicht-erneuerbarer Primärenergie, die im Lebenszyklus eines Produkts verwendet wird. Dies umfasst fossile Brennstoffe sowie nuklearen Brennstoff. Der PENRE-Wert ist ein Maß für die Umweltbelastung, da fossile Brennstoffe begrenzt sind und ihre Nutzung zur Erderwärmung beiträgt.

Primary Energy Non-Renewable Material (PENRM) – Nicht-erneuerbare Primärenergie für Materialien

Das **PENRM** gibt an, wie viel nicht-erneuerbare Primärenergie in den verwendeten Materialien eines Produkts enthalten ist. Dies bezieht sich auf Rohstoffe wie Metalle, die für die Herstellung von Produkten benötigt werden und deren Vorkommen begrenzt ist.

Primary Energy Non-Renewable Total (PENRT) – Gesamt nicht-erneuerbare Primärenergie

Der **PENRT** gibt an, wie viel nicht-erneuerbare Primärenergie insgesamt für die Herstellung eines Produkts und seiner Materialien verwendet wird. Der Wert zeigt die Gesamtmenge an nicht erneuerbarer Energie, die über den Lebenszyklus eines Produkts verbraucht wird.

Scrap (SM) – Abfall

Der **Scrap** (SM) zeigt, wie viel Abfallmaterial während des Produktionsprozesses anfällt. Abfall, der nicht wiederverwendet oder recycelt wird, trägt zur Belastung der Deponien und zur Verschmutzung bei. Der SM-Wert zeigt, wie effizient der Produktionsprozess Abfälle minimiert und recycelt.

Net Regional Soil Fertility (NRSF) – Nettoregionale Bodenfruchtbarkeit

Der **NRSF** bewertet den Einfluss eines Produkts oder Prozesses auf die Bodenfruchtbarkeit in einem bestimmten geografischen Gebiet. Ein negativer Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit könnte durch intensive Landwirtschaft oder industrielle Abfälle verursacht werden, was langfristige Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktivität und Ökosysteme hat.

Freshwater Use (FW) – Nutzung von Süßwasser

Der **Freshwater Use** (FW) beschreibt, wie viel Süßwasser für die Herstellung eines Produkts verwendet wird. Die Nutzung von Süßwasser ist kritisch, da in vielen Regionen der Welt Wasserknappheit herrscht. Ein hoher FW-Wert kann auf eine hohe Belastung der regionalen Wasserressourcen hinweisen und auf den Bedarf an nachhaltigen Wassermanagementpraktiken hinweisen.

Anhang C Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zum Modul A4

Tabelle 20: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit überwiegend funktionalem Charakter mit 10 cm Asphaltdeckschicht

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+10,25%	-10,25%
ODP	+01,00%	-01,00%
POCP	+06,59%	-06,59%
AP	+17,93%	-17,93%
EP	+02,31%	-02,31%
ADPE	+12,20%	-12,20%
ADPF	+04,17%	-04,17%
PERE	+06,21%	-06,21%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+06,21%	-06,21%
PENRE	+11,77%	-11,77%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+03,84%	-03,84%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+05,52%	-05,52%

Tabelle 21: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit überwiegend funktionalem Charakter mit 10 cm Betonpflasterstein

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	Werte für Umweltwirkung für 1 m²	Werte für Umweltwirkung für 1 m²
ODP	+06,61%	-06,61%
POCP	+00,52%	-00,52%
AP	+08,80%	-08,80%
EP	+10,89%	-10,89%
ADPE	+02,30%	-02,30%
ADPF	+11,94%	-11,94%
PERE	+03,12%	-03,12%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+03,12%	-03,12%
PENRE	+12,04%	-12,04%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+11,96%	-11,96%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+01,96%	-01,96%

Tabelle 22: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit überwiegend funktionalem Charakter mit 12 cm Betonpflasterstein

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+06,08%	-06,08%
ODP	+00,56%	-00,56%
POCP	+08,28%	-08,28%
AP	+10,18%	-10,18%
EP	+10,04%	-10,04%
ADPE	+02,04%	-02,04%
ADPF	+11,16%	-11,16%
PERE	+03,07%	-03,07%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+03,05%	-03,05%
PENRE	+11,51%	-11,51%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+11,17%	-11,17%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+01,89%	-01,89%

Tabelle 23: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit funktionalem und gestalterischem Charakter mit Betonplatten 60/40/16

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+08,33%	-08,33%
ODP	+00,94%	-00,94%
POCP	+11,71%	-11,71%
AP	+14,26%	-14,26%
EP	+15,17%	-15,17%
ADPE	+02,81%	-02,81%
ADPF	+15,84%	-15,84%
PERE	+05,02%	-05,02%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+05,02%	-05,02%
PENRE	+15,97%	-15,97%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+15,86%	-15,86%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+03,03%	-03,03%

Tabelle 24: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau Bk3,2 für Verkehrsflächen mit funktionalem und gestalterischem Charakter mit Klinkerpflastersteinen 240/118/80, hochkant verlegt

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+05,97%	-05,97%
ODP	+00,03%	-00,03%
POCP	+12,13%	-12,13%
AP	+14,86%	-14,86%
EP	+09,95%	-09,95%
ADPE	+03,69%	-03,69%
ADPF	+05,24%	-05,24%
PERE	+02,77%	-02,77%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+02,73%	-02,73%
PENRE	+05,25%	-05,25%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+05,25%	-05,25%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+02,40%	-02,40%

Tabelle 25: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau für Gehweg mit 10 cm Aphalt-Tragdecksicht

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+10,37%	-10,37%
ODP	+00,99%	-00,99%
POCP	+09,64%	-09,64%
AP	+15,99%	-15,99%
EP	+00,53%	-00,53%
ADPE	+11,08%	-11,08%
ADPF	+04,46%	-04,46%
PERE	+05,96%	-05,96%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+05,96%	-05,96%
PENRE	+04,52%	-04,52%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+02,81%	-02,81%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+05,20%	-05,20%

Tabelle 26: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau für Gehweg mit Betonpflastersteinen 10/20/8

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+06,09%	-06,09%
ODP	+00,78%	-00,78%
POCP	+11,10%	-11,10%
AP	+13,33%	-13,33%
EP	+15,85%	-15,85%
ADPE	+02,09%	-02,09%
ADPF	+14,98%	-14,98%
PERE	+04,94%	-04,94%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+04,94%	-04,94%
PENRE	+15,17%	-15,17%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+15,00%	-15,00%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+02,78%	-02,78%

Tabelle 27: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Oberbau für Gehweg mit Klinkerpflastersteinen 240/118/71, flach verlegt

Umweltindikator	Pessimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz + 75%)	Optimistisches Szenario für Modul A4 (Transportdistanz - 75%)
GWP	+06,21%	-06,21%
ODP	+00,03%	-00,03%
POCP	+16,64%	-16,64%
AP	+21,88%	-21,88%
EP	+14,66%	-14,66%
ADPE	+04,41%	-04,41%
ADPF	+05,28%	-05,28%
PERE	+04,40%	-04,40%
PERM	+00,00%	-00,00%
PERT	+04,28%	-04,28%
PENRE	+05,29%	-05,29%
PENRM	+00,00%	-00,00%
PENRT	+05,29%	-05,29%
SM	+00,00%	-00,00%
NRSF	+00,00%	-00,00%
FW	+03,31%	-03,31%

Anhang D Critical Review

UGB P L A N Ingenieurgesellschaft mbH
Entenmühlstraße 57, 66424 Homburg/ Saar

Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V.
Mittelstraße 2-10

53157 Bonn

Ihre Zeichen :
Unser Schreiben vom :
Unser Zeichen :
Datum : 24. Februar 2025

Bericht zum kritischen Prüfungsverfahren in Anlehnung an DIN EN ISO 14071:2023-12 (Entwurf) zur vergleichenden Ökobilanzierung von Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten
hier: Prüfaussage des Ausschusses interessierter Kreise

Sehr geehrte Damen und Herren,
sehr geehrter Herr Winzer,

in den Normen DIN EN ISO 14040:2021 und DIN EN ISO 14044:2021 werden Anforderungen beschrieben, denen eine Ökobilanz (LCA) gemäß DIN EN ISO 14040:2021 zu folgen hat. Insbesondere im Falle veröffentlichter vergleichender Studien müssen diese eine Reihe von Kriterien erfüllen und es werden Anforderungen an den Bericht der Studie gestellt. Das sogenannte Critical Review dient der Sicherstellung der Erfüllung der genannten Anforderungen und ist in den Normen DIN EN ISO 14071:2023 sowie der DIN EN ISO 14044:2021 geregelt.

Gegenstand unseres Reviews ist der Bericht "Vergleichende Ökobilanz: Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten":

- vorläufige Fassung vom Juni 2024 (Version 1.2)
- endgültige Fassung vom Februar 2025 (Version 1.6).

Die Erstellung des Berichts erfolgte durch die UGB PLAN Ingenieurgesellschaft mbH im Auftrag der Betonverbands Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG). Gegenstand der kritischen Prüfung ist eine vom SLG in Auftrag gegebene Ökobilanz (SLG, 2024), die von der LifeCycle-Competence GmbH (LCC) nach den geltenden Normen und methodischen Anforderungen erstellt wurde.

Mitglieder des Prüfungsausschuss: 🗁

Mit der Zusammenstellung eines Review Panels und der Durchführung des Critical Review wurde die UGB PLAN Ingenieurgesellschaft mbH beauftragt.

Auftraggeber des Critical Review:

- Betonverbands Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG).

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

- Externer, unabhängiger Sachverständiger (Vorsitz):
  Dipl.-Ing. Atiq-Ur Rehman,
- Unabhängiger, qualifizierter Sachverständiger: Karim Sedki, M. Sc.,
- Unabhängiger, qualifizierter Sachverständiger: Dr.-Ing. Daniel Walter.

Anforderungen: 🗁

Die kritische Prüfung ist ein systematischer Prozess zur Überprüfung, ob eine Ökobilanz die methodischen, datenbezogenen, analytischen und berichtsrelevanten Anforderungen erfüllt und mit den in der DIN EN ISO 14040:2021 und DIN EN ISO 14044:2021 definierten Grundsätzen übereinstimmt. Das kritische Prüfungsverfahren stellt sicher, dass

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewandten Methoden den Vorgaben der internationalen Normen entsprechen,
- die angewandten Methoden wissenschaftlich fundiert und technisch valide sind,
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind,
- die Auswertungen, die identifizierten Einschränkungen sowie die Zielsetzung der Studie angemessen berücksichtigen, und
- die Berichterstattung transparent, konsistent und in sich schlüssig ist.

Im Rahmen der kritischen Prüfung wird besonderer Wert darauf gelegt, dass die getroffenen Annahmen und Abgrenzungen für alle untersuchten Alternativen einheitlich und konsistent formuliert sind. Sollte eine vollständige Konsistenz nicht gewährleistet werden können, müssen die Annahmen und Abgrenzungen fair, nachvollziehbar und ergebnisneutral getroffen werden, sodass keine methodische Verzerrung zugunsten einer spezifischen Lösung entsteht.

Vorgehensweise bei der kritischen Prüfung: 🗁

Die vorliegende Ökobilanz-Studie stellt eine Aktualisierung einer bereits veröffentlichten vergleichenden Ökobilanz dar. Im Zuge dieser Aktualisierung wurden insbesondere:

- die Konstruktionslösungen an aktuelle Regelwerke angepasst,
- die Datenbasis aktualisiert, und
- neue Umweltindikatoren in die Analyse integriert.

Dem Prüfungsausschuss wurde eine Vorabversion des Endberichts zur Verfügung gestellt, auf deren Grundlage die kritische Prüfung durchgeführt wurde. Die dabei identifizierten Fragen und Anmerkungen wurden anschließend in direktem Austausch mit dem Ersteller der Studie, der LifeCycle-Competence GmbH (LCC), erläutert.

Im Rahmen der Prüfung wurde der Bericht überarbeitet, dass die durch den Ausschuss interessierter Kreise geäußerten Fragen und Anmerkungen durch ergänzende Erläuterungen im Bericht präziser adressiert wurden. Diese inhaltlichen Klarstellungen tragen dazu bei, dass auch für externe Leser eine bessere Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsergebnisse gewährleistet ist.

Ein besonderer Fokus der Prüfung lag auf der methodischen Konsistenz der Ökobilanzierung sowie der Transparenz-fördernden Darstellung der Ergebnisse. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass:

- die modellierten Unterschiede und Szenarien in der Analyse der betrachteten Lösungen neutral und methodisch ausgewogen dargestellt sind,
- keine systematischen Vorteils- oder Nachteilswirkungen durch die getroffenen Modellierungsentscheidungen entstehen,
- die Methodik und Ergebnisse der Ökobilanz für externe Leser nachvollziehbar erläutert sind.

Die vom Ausschuss interessierter Kreise formulierten Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge wurden von den Autoren angenommen. Zudem wurde zugesichert, dass die gewünschten Anpassungen im finalen Bericht entsprechend umgesetzt werden, um die Prüfanforderungen vollständig zu erfüllen. Es wird darauf hingewiesen, dass der vollständige Prüfbericht vom Auftraggeber der Studie aufzubewahren ist und auf Anfrage Einsicht zu gewähren ist. An dieser Stelle wird lediglich das Ergebnis der Prüfung festgehalten.

Wirkungsbilanz: 🗁

Entsprechend der Struktur der DIN EN 15804:2022-03 werden neben den Umweltindikatoren auch die Umweltwirkungen angegeben.

- Umweltindikatoren der Sachbilanz:
  - Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)
  - Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)
  - Total erneuerbare Primärenergie (PERT)

- Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)
- Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)
- Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)
- Einsatz von Sekundärstoffen (SM)
- Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)
- Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen (FW)

– Umweltwirkungen der Sachbilanz:

- Globales Erwärmungspotenzial - total (GWP-total)
- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)
- Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)
- Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung (AP)
- Eutrophierungspotenzial - Süßwasser (EP-freshwater)
- für die Verknappung abiotischer Ressourcen nicht fossile Ressourcen (ADPE)
- Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen fossile Brenn-stoffe (ADPF)

Zusammenfassung der kritischen Prüfung: 🗁

Die überarbeitete Studie sowie der zugehörige Bericht entsprechen nach der erfolgten Überarbeitung den Anforderungen der DIN EN ISO 14040:2021. Die analysierten Oberbaukonstruktionen basieren auf den standardisierten Konstruktionsvorgaben der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO, 2012). Dadurch ist sichergestellt, dass die betrachteten Bauweisen für die vorgesehenen Anwendungsbereiche methodisch vergleichbar sind.

Die verwendeten Datenquellen umfassen die aktuelle ÖKOBAUDAT-Datenbank sowie bereits publizierte Umweltproduktdeklarationen (EPD). Zur Modellierung, Charakterisierung und Bewertung der Umweltwirkungen wurde eine Auswahl relevanter Indikatoren aus den Normen DIN EN ISO 14040:2021, DIN EN ISO 14044:2021 sowie DIN EN 15804:2022-03 herangezogen. Diese Auswahl basiert auf einer fundierten methodischen Begründung.

Die Ergebnisse werden differenziert interpretiert und es wird aufgezeigt, unter welchen Rahmenbedingungen eine bestimmte Materialwahl aus ökologischer Sicht vorteilhaft ist. Sensitivitätsanalysen wurden gezielt eingesetzt, um die Auswirkungen zentraler Annahmen und Modellierungsparameter auf die Ergebnisse zu prüfen. Dabei wird explizit darauf hingewiesen, dass die in der Studie definierten Szenarien und Annahmen von potenziellen Entscheidungsträgern auf ihre Eignung für konkrete Anwendungen überprüft werden sollten, da sie einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Umweltbewertungen haben können.

Die Studie erfüllt die wesentlichen methodischen und datentechnischen Anforderungen und gewährleistet eine nachvollziehbare und transparente Berichterstattung. Die getroffenen Annahmen, die Auswahl der Indikatoren sowie die Ableitungen aus den Ergebnissen sind schlüssig dokumentiert und ermöglichen eine fundierte Entscheidungsfindung im Kontext nachhaltiger Bauweisen.

Der Ausschuss stellt daher einstimmig fest:

Es kann von einer Konformität mit den geltenden internationalen Normen DIN EN ISO 14040:202, DIN EN ISO 14044:2021, DIN EN ISO 14071:2023-Entwurf ausgegangen werden. Die Studie ist zudem als wissenschaftlich und technisch korrekt einzuordnen.

Für den Ausschuss:

Homburg, Februar 2025

Dipl.-Ing. Atiq-Ur Rehman

UGB PLAN Ingenieurgesellschaft mbH

Entenmühlstraße 57, 66424 Homburg