Ökobilanzvergleich der Belagsvarianten «Asphalt» und «Kieselwackenpflästerung» eines Platzes in der Basler Altstadt

Verfasser

Thomas Pohl

Umtec Technologie AG (UTech AG)
Eichtalstrasse 54, 8634 Hombrechtikon
Tel: 055 211 02 82

Datum: 02. September 2021

Im Auftrag des Bau- und Verkehrsdepartements des Kantons Basel-Stadt, Dienststelle Städtebau & Architektur, Abteilung Stadtraum, Projektleitung: Friederike Meinhardt

Inhalt

1 Zusammenfassung 4
1.1 Einleitung 4
1.2 Methodik und Vorgehen 4
1.3 Ergebnisse 5
1.4 Fazit 7
2 Einleitung 8
2.1 Ausgangslage und Problemanalyse 8
2.2 Zielsetzung und Inhalt 8
2.3 Berater 9
3 Methodik und Vorgehen 10
3.1 Methodische Grundlagen 10
3.2 Anwendung der Methode 13
4 Fazit Ökobilanz 20
5 Lebenszykluskosten-Betrachtung 22
5.1 Lebenszykluskosten 22
5.2 Ökoeffizienz SEBI 23
Referenzen 27
Verzeichnisse 31
Begriffe und Abkürzungen 31
Abbildungen 32
Tabellen 34
6 Anhang 35

Quelle Titelbild: Foto links stammt von Christian Enz Pflästerungen, Foto rechts stammt von Wikipedia

1 Zusammenfassung

1.1 Einleitung

Das Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Dienststelle Städtebau & Architektur, Abteilung Stadtraum, hat die Umtec Technologie AG (UTech AG) beauftragt einen Ökobilanzvergleich der Belagsvarianten «Asphalt» versus «Kieselwackenpflästerungen» für einen Altstadt-Platz in der Basler Innenstadt zu erstellen. Bei der Planung des Belags des Altstadt-Platzes stehen verschiedene gestalterische / «Convenience»-orientierte Gesichtspunkte im Raum. Einerseits soll das historische charmante Altstadt-Bild durch den Einbau eines neuen Kieselwackenpflästerungsbelags möglichst unverändert erhalten bleiben. Andererseits spielen auch Überlegungen zur Hitzeminderung, gerade im innerstädtischen Bereich, eine zunehmend wichtigere Rolle. Durch den niedrigeren Albedo-Effekt des herkömmlichen dunkeln Asphaltbelags, wird das Sonnenlicht stark absorbiert, was wiederum die Umgebung erwärmt und lokal im Hochsommer zu unangenehm hohen Temperaturen führt. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, den Asphalt mit einer hellen Farbe zu versehen und diesem Effekt dadurch entgegen zu wirken. Im Gegensatz zur Kieselwackenpflästerung gewährleistet der Asphalt durch seine gleichmässige (ebene) Oberfläche für Personen mit einer körperlichen Behinderung oder physischen Beeinträchtigung eine bessere Begehbarkeit als die Kieselwackenpflästerung. Die Begehbarkeit kann jedoch bei dem Kieselwackenpflästerungsbelag durch gezieltes Anschleifen der Oberfläche ebenfalls optimiert werden.

Neben ökonomischen und den eben genannten gestalterischen / «Convenience»-orientieren Aspekten, spielen auch ökologische Gesichtspunkte eine wichtige Rolle und damit steht die zentrale Frage im Raum: Welcher Belag verursacht weniger Umweltbelastung pro Quadratmeter und Jahr? Dabei stellt sich vor allem die Frage des umweltverträglicheren Bindemittels. Bei der Kieselwackenpflästerung ist es der Zement und beim Asphalt das Bitumen. Beide Bindemittel sind ökologisch relevant, da sie in der Herstellung hohe Treibhausgasemissionen verursachen.

Das Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt hat deshalb die UTech AG beauftragt, diese Frage mittels einer umfassenden Ökobilanz zu beantworten.

1.2 Methodik und Vorgehen

Die UTech AG erarbeitete eine vergleichende Ökobilanz gemäss ISO 14040:2006 [1] bzw. ISO 14044:2006 [2]. Auf der Ökobilanz aufbauend, wurde im Rahmen dieser Studie eine Ökoeffizienzanalyse basierend auf der ISO 14045:2012 [3] erstellt.

In dieser Studie wurden die folgenden drei Ökobilanz-Wirkungsmodelle verwendet:

Treibhausgaspotenzial (GWP): Dieses Wirkungsmodell beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO_2.

Umweltbelastungspunkte (UBP): Die Umweltbelastungspunkte 2013 (UBP'13) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Lärm. Ein Vorteil dieser Methode liegt in der Erfassung des Effekts von Schadstoffemissionen in die Umwelt. In der Schweiz gilt die UBP-Methode als Standard bei Ökobilanzen. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt auch besonders hilfreich

als Entscheidungsgrundlage. Mit der Methode der ökologischen Knappheit wird ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen aufgezeigt. Sie basiert auf der Schweizerischen Umweltpolitik.

Speziell an der Ökobilanz der UTech AG ist, dass auch der Lärm der Baumaschinen sowie die hitzemindernde Wirkung der Kieselwackenpflästerung gegenüber dunklem Asphalt miteinbezogen wurden.

1.3 Ergebnisse

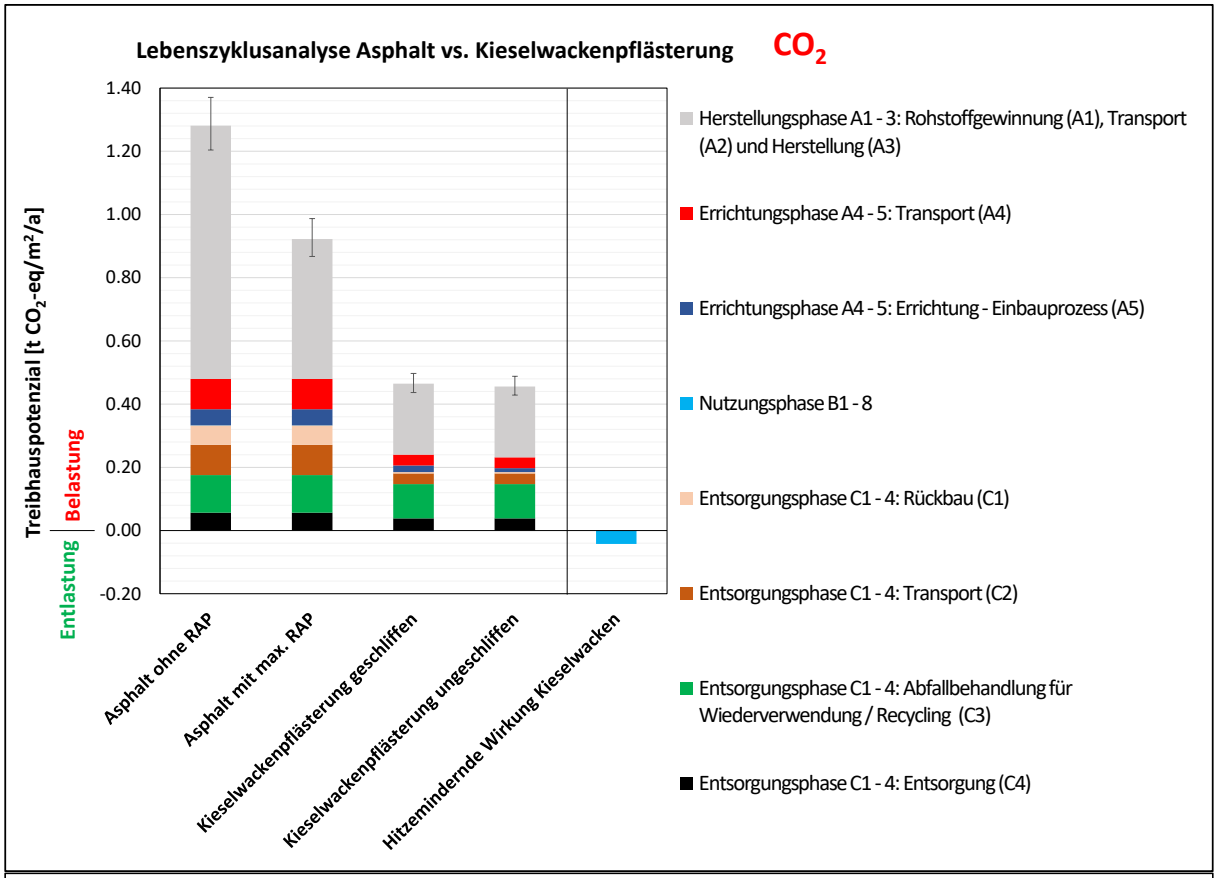
Abb. 4-1 zeigt das Ergebnis der Ökobilanz zweier Belagsvarianten: Asphalt und Kieselwackenpflästerung ausgewertet mittels der Methode der Treibhauspotenziale CO_2 und mittels der Methode der ökologischen Knappheit, Umweltbelastungspunkte UBP. Beide Ökobilanzmethoden zeigen ein vergleichbares Bild: Asphalt schneidet gegenüber der Kieselwackenpflästerung ökologisch schlechter ab. Auch der Asphalt mit maximaler Asphaltgranulat-Zugaberate (max. RAP) schneidet ökologisch nachteilig ab gegenüber der Kieselwackenpflästerung. Der Hauptgrund für den ökologischen Vorteil der Kieselwackenpflästerung liegt in den höheren Liegezeiten von 100 Jahren gegenüber dem Asphalt (25 Jahre Deckschicht und 50 Jahre Tragschicht). Im Betrachtungszeitraum von 100 Jahren müsste beim Asphalt die Deckschicht zweimal erneuert werden (inkl. Ausfräsen). Das Ergebnis wird als signifikant eingestuft, da die Streubereiche (Fehlerindikatoren) sich zwischen den Säulen nicht überlappen.

Beide Abbildungen zeigen auch ein einheitliches Bild bezüglich des Beitrages der einzelnen Lebenszyklusphasen auf die Gesamtumweltwirkung: Die Herstellungsphase A1 – A3 schenkt ökologisch am stärksten ein. Beim Asphalt trägt die Hauptlast das Bitumen während bei der Kieselwackenpflästerung der grösste Beitrag durch den Zement im Mörtel, im Splitt- und Sickerbeton zustande kommt.

Der Beitrag der Baumaschinen im Bereich Lärm wurde der Lebenszyklusphase der Errichtung zugerechnet. Der Effekt der Hitzeminderung der Kieselwackenpflästerung wurde der Nutzungsphase zugerechnet und separat ausgewiesen, da es sich um eine ökologische Gutschrift handelt. Die Hitzeminderung liegt im Bereich von 5-7% (je nach Bewertungsmethode) bezogen auf die Gesamtumweltwirkung.

Die Aufwände des Recyclings der mineralischen Komponenten der beiden Belagsvarianten sind der Entsorgungsphase C3 zu entnehmen. Darunter fallen Aufwände der mechanischen Aufbereitungstechnik: Zerkleinern, Klassieren und Sortieren.

Ein weiterer Aspekt, der genau analysiert wurde, ist wie gross der Einfluss des Schleifens der Steine auf die Ökobilanz ist. Unsere Analyse hat gezeigt, dass die Auswirkung des Schleifens sich im Bereich von 2-12% bewegt (je nach Ökobilanzmethode). Bei der UBP-Methode ist der Unterschied grösser, da dort auch nicht klimawirksame Luftschadstoffe wie Feinstaub bewertet werden.



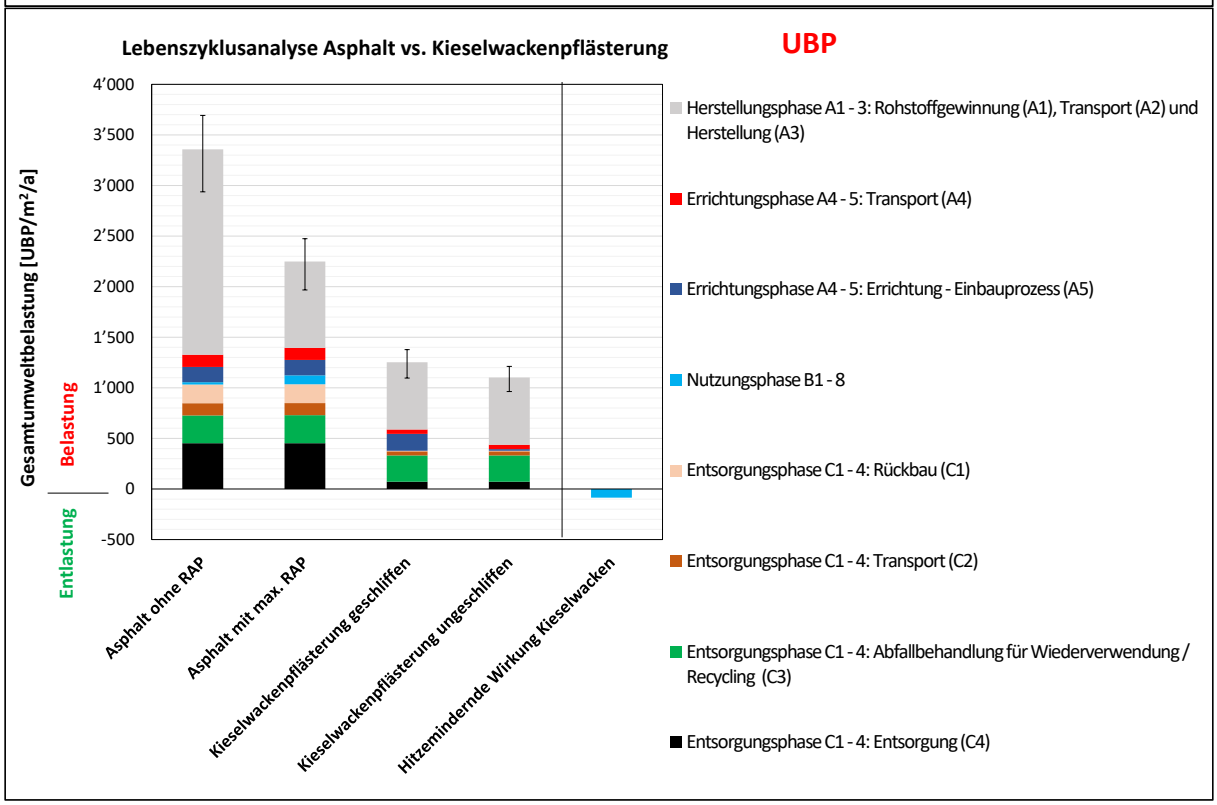


Abb. 1-1: Oben: Treibhauspotenzial in kg CO_2-eq pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg, unten: Umweltbelastungspunkte pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg. Der senkrechte Strich im oberen Teil der Säulen zeigt die Streuung der Ergebnisse infolge von Datenunsicherheiten.

Nach der Betrachtung der Ökobilanz pro Quadratmeter und Jahr Belag und stellt sich die Frage der Umweltwirkung des gesamten Rümelinsplatzes in der Basler Altstadt. Ausgehend von Abb. 4-1 ergibt der Einbau des Kieselwackenpflästerungsbelags gegenüber Asphalt (ohne RAP) einen Umweltnutzen von 2'110 vermiedenen Umweltbelastungspunkte pro m^2 und pro Jahr. Dieser Wert wird mit dem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren und mit dem Flächenausmass von 1 m^2 multipliziert. Daraus ergibt sich ein Umweltnutzen von 211'000 vermiedenen UBP. Dieser Umweltnutzen entspricht der Umweltwirkung von:

- 630 km Autofahren mit einem durchschnittlichen PW oder an
- 10 Grillsteaks oder
- dem jährlichen Wärmebedarf von 0.2 Haushalten

Neben der Ökobilanz wurde im vorliegenden Bericht auch eine Lebenszykluskostenbetrachtung und eine Ökoeffizienzanalyse erstellt. Da dies jedoch nicht der Hauptauftrag der UTech AG war, sind diese Kapitel nicht in der Zusammenfassung enthalten, sondern im Hauptbericht zu finden (siehe Kap. 4 und 5).

1.4 Fazit

Die Ökobilanz hat gezeigt, dass sich der Einsatz von Kieselwackenpflästerungen anstelle der konventionellen Asphalt-Bauweise ökologisch lohnt. Die ökologische Belastung des Zements wird durch die höhere Liegezeit gegenüber des Asphalts überkompensiert. Das Ergebnis ist signifikant und gilt auch beim Einsatz von Asphalt mit hohen Asphaltgranulat-Zugaberaten (RAP).

2 Einleitung

2.1 Ausgangslage und Problemanalyse

Das Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Dienststelle Städtebau & Architektur, Abteilung Stadtraum, hat die Umtec Technologie AG (UTech AG) beauftragt einen Ökobilanzvergleich der Belagsvarianten «Asphalt» versus «Kieselwackenpflästerungen» für einen Altstadt-Platz in der Basler Innenstadt zu erstellen. Bei der Planung des Belags des Altstadt-Platzes stehen verschiedene gestalterische / «Convenience»-orientierte Gesichtspunkte im Raum. Einerseits soll das historische charmante Altstadt-Bild durch den Einbau eines neuen Kieselwackenpflästerungsbelags möglichst unverändert erhalten bleiben. Andererseits spielen auch Überlegungen zur Hitzeminderung, gerade im innerstädtischen Bereich, eine zunehmend wichtigere Rolle. Durch den niedrigeren Albedo-Effekt des herkömmlichen dunkeln Asphaltbelags, wird das Sonnenlicht stark absorbiert, was wiederum die Umgebung erwärmt und lokal im Hochsommer zu unangenehm hohen Temperaturen führt. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, den Asphalt mit einer hellen Farbe zu versehen und diesem Effekt dadurch entgegen zu wirken. Im Gegensatz zur Kieselwackenpflästerung gewährleistet der Asphalt durch seine gleichmässige (ebene) Oberfläche für Personen mit einer körperlichen Behinderung oder physischen Beeinträchtigung eine bessere Begehbarkeit als die Kieselwackenpflästerung. Die Begehbarkeit kann jedoch bei dem Kieselwackenpflästerungsbelag durch gezieltes Anschleifen der Oberfläche ebenfalls optimiert werden.

Neben ökonomischen und den eben genannten gestalterischen / «Convenience»-orientieren Aspekten, spielen auch ökologische Gesichtspunkte eine wichtige Rolle und damit steht die zentrale Frage im Raum: Welcher Belag verursacht weniger Umweltbelastung pro Quadratmeter und Jahr? Dabei stellt sich vor allem die Frage des umweltverträglicheren Bindemittels. Bei der Kieselwackenpflästerung ist es der Zement und beim Asphalt das Bitumen. Beide Bindemittel sind ökologisch relevant, da sie in der Herstellung hohe Treibhausgasemissionen verursachen.

2.2 Zielsetzung und Inhalt

Eine umfassende Ökobilanz soll zeigen, welcher Belag die geringere Umweltwirkung pro Quadratmeter und Jahr aufweist. Zu diesem Zweck wurde anhand eines verkehrsberuhigten Altstadt-Platzes in einer Fussgängerzone (mit Zubringer- und Notfalldiensttauglichen-Befahrung) in der Basler Altstadt eine Ökobilanz für zwei Varianten erstellt und berechnet:

- Variante 1 «Belag aus Asphalt»
- Variante 2 «Belag aus Kieselwackenpflästerung»

In beiden Belagsvarianten wurde von einem identischen Strassen-/Platzunterbau (ungebundene Schicht, Kieskoffer) ausgegangen, wobei in der Ökobilanz nur der Oberbau der Strasse / des Platzes ab Fundationsschicht analysiert und verglichen wurde. Die Daten für die Ökobilanz wurden einerseits vom Bau- und Verkehrsdepartement Basel-Stadt (Städtebau & Architektur, Stadtraum sowie vom Tiefbauamt) und andererseits von der UTech AG eingebracht. Die UTech AG hat in der jüngeren Vergangenheit zahlreiche Ökobilanzen für Asphalte im Auftrag diverser Asphalthersteller und Behörden erstellt sowie eine längere Luftemissionsmessung eines grösseren Asphaltwerkes begleitet und verfügt dadurch über eine ausgezeichnete Datengrundlage für Asphalte.

Die Schichtstärken und die detaillierten Aufbauten der beiden oben genannten Belagsvarianten wurden vom Tiefbauamt Basel-Stadt der UTech AG zur Verfügung gestellt. Ebenfalls wurden der UTech AG die Zusammensetzung des Kieselwackenpflästerungsbelags sowie die zum Einbau benötigten Maschinenstunden mitgeteilt. Die Maschinenstunden für den Asphalteinbau waren bereits vorhanden.

Bei der Ökobilanz kamen die folgenden Wirkungsabschätzungsverfahren (Ökobilanzmethoden) zur Anwendung:

- Treibhauspotenzial (CO_2-Äquivalente)
- Ökologische Knappheit («Umweltbelastungspunkte»)

Die funktionelle Einheit bildete ein Quadratmeter Strasse / Platz pro Jahr. Es wurde bewusst die Liegezeit je Belag mitberücksichtigt, da diese die Ökobilanz massgeblich mitbestimmt. Bei der Systemgrenze wurde der «Cradle-to-grave»-Ansatz gewählt, in dem die gesamte Lebenszyklusphase von der «Wiege bis zur Bahre» berücksichtigt wurde. Dies insbesondere um ökologische Unterschiede im Einbau, Unterschiede der Emissionen während der Nutzungsphase (z.B. Schadstoffemissionen durch Niederschlag) und vor allem auch hinsichtlich des Rückbaus und der Entsorgung / Wiederverwertung herauszustreichen.

Die Analyse erfolgte auf der Grundlage der Daten der Datenbank Ecoinvent (https://www.ecoinvent.org/) sowie auf der Ökobilanzdatenbank im Baubereich KBOB mit Hilfe der Ökobilanzsoftware «SimaPro» (https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/). SimaPro verfügt über direkten Zugang zu genannten Umweltdatenbanken und enthält ebenfalls die genannten Wirkungsbilanzierungsverfahren. Wo notwendig wurden ergänzende Daten in der Software erfasst und zu Händen des Auftraggebers dokumentiert.

In herkömmlichen Ökobilanzen können lokale hitzemindernde Elemente nicht abgebildet werden. In Zusammenarbeit mit der OST Ostschweizer Fachhochschule hat die UTech AG eine Methode entwickelt, wie eine Hitzeminderung anhand innerstädtischen Gestaltungsmitteln in vermiedene Umweltbelastungspunkte umgerechnet werden kann. Diese Methodik wurde in der vorliegenden Studie zur Abschätzung der hitzemindernden Wirkung der Kieselwackenpflästerung oder eines helleren Asphalts verwendet und in die Gesamtökobilanz integriert.

2.3 Berater

Thomas Pohl unterhält zur Dienststelle Städtebau & Architektur des Bau- und Verkehrsdepartements Basel-Stadt keine persönliche Beziehung, Verpflichtung oder finanzielle Abhängigkeit und ist der wissenschaftlichen Neutralität verpflichtet. Thomas Pohl arbeitet als Bereichsleiter Umweltberatung an der UTech AG und als Geschäftsführer am Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC der Ostschweizer Fachhochschule OST. Er greift auf eine langjährige Erfahrung in der Erstellung von Umweltbilanzen und Ökoeffizienzanalysen SEBI im Bereich der Abfalltechnik und Recycling sowie in der Bauwirtschaft zurück. Die UTech AG verfügt über ausgewiesene Kompetenz in den Bereichen der Bauwirtschaft und Ökobilanzierung von Rohstoffkreisläufen. Dies bezieht sich nicht nur auf die wissenschaftlich/technischen Aspekte, sondern auch auf die Einbindung wirtschaftlicher Betrachtungen.

3 Methodik und Vorgehen

3.1 Methodische Grundlagen

Die UTech AG erarbeitet eine vergleichende Ökobilanz gemäss ISO 14040:2006 [1] bzw. ISO 14044:2006 [2]. Nach dieser Norm umfasst eine Ökobilanz die nachfolgenden Schritte. Auf der Ökobilanz aufbauend, wurde im Rahmen dieser Studie eine Ökoeffizienzanalyse basierend auf der ISO 14045:2012 [3] erstellt. Zum Aufbau der Ökobilanz, welche den Kern dieser Studie bildet:

i. Ziel- und Rahmenbedingungen

In diesem Schritt werden die Ziele der Studie festgelegt und die folgenden, wesentlichen Annahmen für die Analyse definiert:

- Auswahl der betrachteten Phasen im Lebenszyklus eines Bauwerks (Herstellung, Bau, Nutzung etc.),
- Auswahl der in diesen Phasen analysierten Prozesse (z.B. Entsorgung),
- Definition der Nutzungsdauer des Bauwerks,
- Definition der funktionalen Anforderungen an das Bauwerk, die von allen betrachteten Varianten erfüllt werden müssen,
- Auswahl der Wirkungsmodelle, die für die Bewertung der Varianten verwendet werden (z.B. Umweltbelastungspunkte).

Die vorliegende Studie orientiert sich an der EN 15643-5 [4] für die Systemdefinition und die Beschreibung der funktionalen Einheit und den Ökobilanzdaten im Baubereich [5] für die Auswahl der Wirkungsmodelle.

ii. **Sachbilanz**

In diesem Schritt werden die Emissionen und der Ressourcenverbrauch bzw. –inanspruchnahme für sämtliche Prozesse der untersuchten Systeme erfasst bzw. abgeschätzt. Grundlagen dafür sind:

- Materialbedarf, Abfallmengen, Inanspruchnahme von Boden, Maschinenstunden der Bauprozesse, im Bauprozess entstehende Emissionen (z.B. durch Baumaschinen) und geplante Transportleistungen in den betrachteten Varianten des Bauprojekts.
- Daten zu den Prozessen der Nutzung, Instandhaltung, Instandsetzung und des Rückbaus der betrachteten Varianten des Bauwerks.
- Daten zu den Prozessen der Rohstoff-/Energiegewinnung, der Herstellung, der Entsorgung oder des Transports, die von Dritten bereitgestellt werden.

In der Sachbilanz werden die Mengen der kumulierten Emissionen und Ressourceninanspruchnahmen über den ganzen Lebensweg des Produkt-/Prozesssystems hinweg berechnet. Dafür werden verschiedene Annahmen getroffen, z.B. bei der Allokation von Emissionen im Falle von Kuppelproduktion.

Die vorliegende Studie orientiert sich an den in der Datenbank Ecoinvent [6]. Davon abweichende Annahmen werden dokumentiert.

iii. Wirkungsbilanz

In der Wirkungsbilanz wird beschrieben wie sehr die verschiedenen Varianten die Umwelt belasten. Nach ISO 14040/44 [1], [2] oder EN 15643-6 [4] geht man dabei von einer Reihe allgemein akzeptierter Umweltprobleme aus – wie beispielsweise dem Treibhauseffekt oder der Zerstörung der Ozonschicht – und zeigt mit Hilfe von Wirkungsmodellen, wie stark die untersuchten Varianten zu diesen Umweltproblemen beitragen. Man erhält so eine mehrdimensionale Bewertung und letztlich muss der Bauherr entscheiden, welchem Umweltproblem er die grösste Bedeutung beimisst. Alternativ dazu wird in der Schweiz seit vielen Jahren ein alternativer Bewertungsansatz propagiert, der zu einem Gesamtindex für alle Umweltbelastungen führt: die «Methode der ökologischen Knappheit» mit der Masseinheit «Umweltbelastungspunkte» (siehe Abb. 3-1) [7]. Bewertungsmassstab ist hier der aktuelle Zielerreichungsgrad der nationalen Umweltpolitik. International bezeichnet man den Ansatz allgemein mit dem Begriff «distance to target»: ein Umweltproblem ist umso schlimmer, je weiter ein Land von der Erreichung seiner problembezogenen Umweltziele ist. Dieser Ansatz ist aber nicht konform zur ISO 14040/44, da für solche Vergleiche keine Gesamtindizes in Ökobilanzen verwendet werden dürfen. In der Schweiz ist die Methode der ökologischen Knappheit jedoch besonders bei Entscheidungsträgern sehr etabliert und akzeptiert [8], [9] und [10].

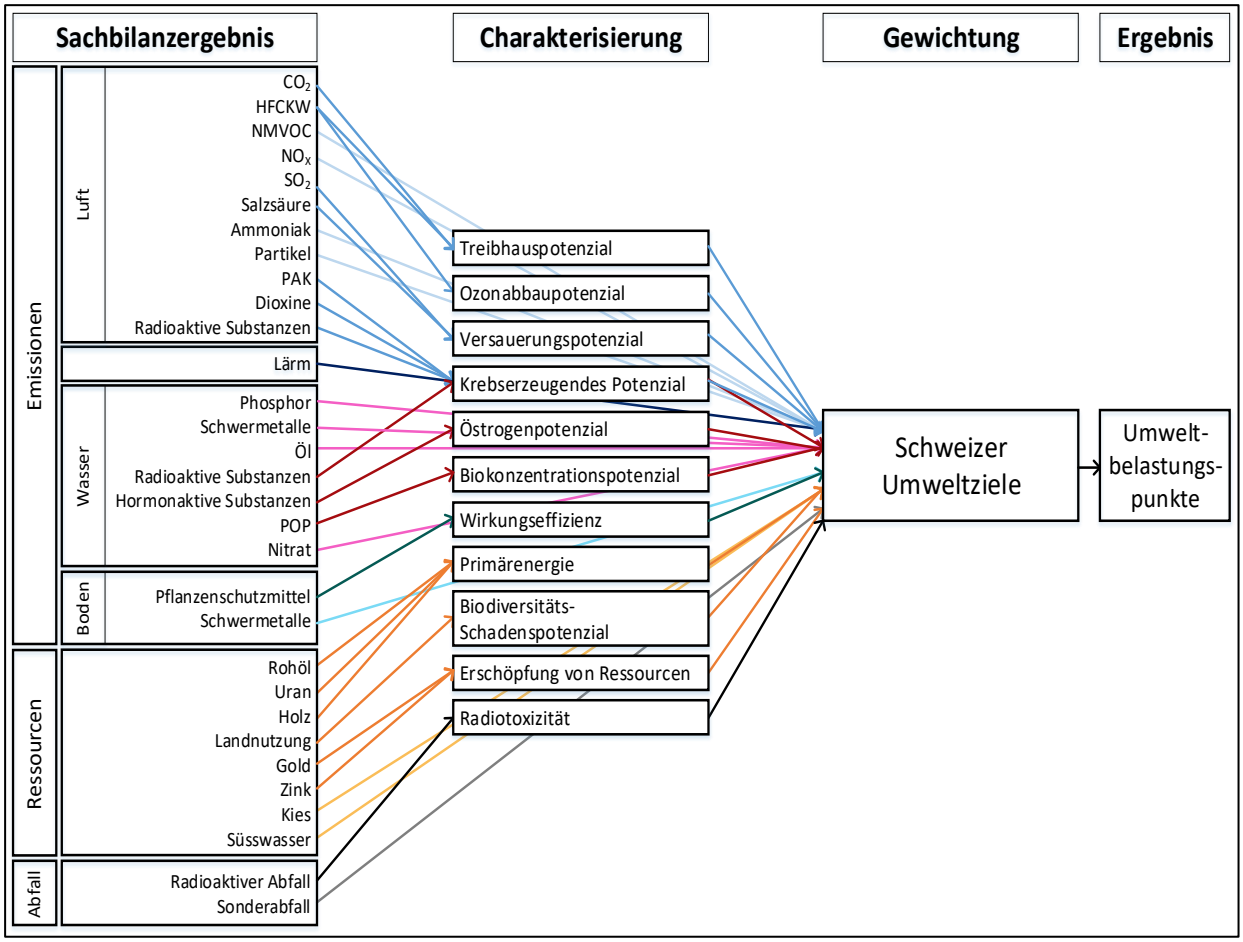


Abb. 3-1: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels der UBP-Methode. Grundschema der Verknüpfung der Sachbilanz mit den Wirkungsmodellen (Charakterisierung) und dem Gesamtindexes der ökologischen Knappheit (Gewichtung und Ergebnis), Quelle: [11], S. 67.

iv. Auswertung und Interpretation

Im letzten Schritt der Anwendung der Methode werden die Ergebnisse der Wirkungsbilanzen der betrachteten Varianten aufgrund der Zielsetzungen der Studie ausgewertet und interpretiert. Dies kann im Verlauf der Untersuchung dazu führen, dass die im ersten Schritt festgelegten Annahmen der Analyse angepasst werden (z.B. die Systemgrenzen oder die Auswahl der Wirkungsmodelle). Dadurch wird die Aussagekraft der Untersuchung in einem iterativen Prozess schrittweise verbessert.

Ein wichtiger Teil von Auswertung und Interpretation ist die Unsicherheitsanalyse. Dabei unterscheidet man zwischen Datenunsicherheiten, die mit Hilfe statistischer Methoden analysiert werden, und Modellunsicherheiten, die man durch Szenarioanalysen abschätzen kann. In der vorliegenden Studie werden beide Methoden angewandt.

Abb. 3-2 fasst die vier Schritte einer Ökobilanz gemäss ISO 14'040:2006 [1], [2] nochmals zusammen.

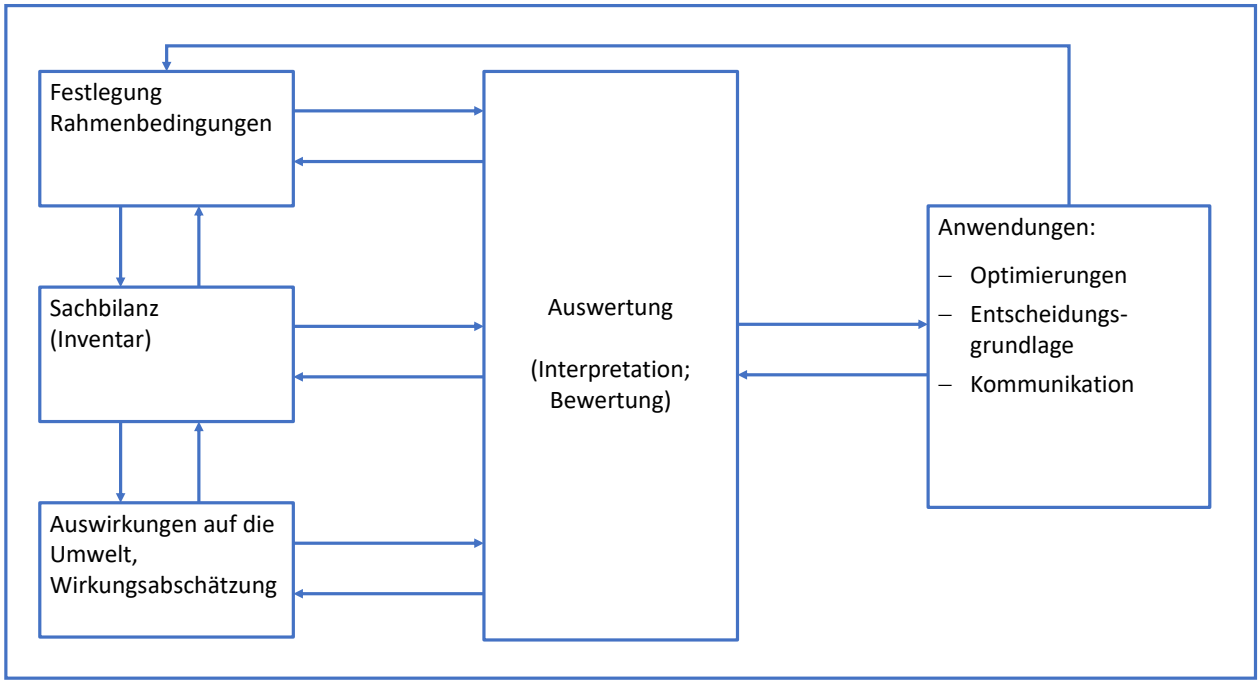


Abb. 3-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14‘040ff [1], [9], [10]. Das Vorgehen zwischen den einzelnen Schritten ist meistens iterativ.

3.2 Anwendung der Methode

3.2.1 Ziele und Rahmenbedingungen

3.2.1.1 Ziel der Studie

Das Ziel der Studie ist der Vergleich der Umweltwirkungen von zwei Belagsvarianten eines Platzes in der Basler Altstadt (Angaben gemäss Tiefbauamt Basel-Stadt):

- Variante 1 «Asphalt»:
  - Deckschicht-Asphalt AC 8 S mit Schichtstärke von 3 cm
  - Tragschicht-Asphalt AC T 22 S mit Schichtstärke von 10 cm
  - Fundationsschicht aus ungebundener Gesteinskörnung mit Schichtstärke von 47 cm
- Variante 2 «Kieselwackenpflästerung»:
  - Kieselwackenpflästerung mit Spezialfugenmörtel mit Schichtstärke von 15 cm (14 bis 16 cm)
  - Bettungsmaterial aus Splittbeton mit Schichtstärke von 4 cm (3-5 cm)
  - Tragschicht aus Sickerbeton mit Schichtstärke von 16 cm
  - Fundationsschicht aus ungebundener Gesteinskörnung mit Schichtstärke von 40 cm

In der vorliegenden Studie wurden folgende Asphalt-Rezepturen aus verwendet, siehe Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Verwendete Asphalt-Rezepturen, Angaben stammen von einem führenden Schweizer Mischgut-Produzenten [12].

Komponenten Asphalt mit 0% RAP	***AC 8 S 0% RAP [kg/t Asphalt]***	***AC T 22 S 0% RAP [kg/t Asphalt]***
Brechsand	460	363
Splitt	479	602
Bitumen	61	35
RAP	0	0
Total	1’000	1’000
Komponenten Asphalt mit max. RAP	**AC 8 S 20% RAP [kg/t Asphalt]**	**AC T 22 S 60% RAP [kg/t Asphalt]**
Brechsand	328	40
Splitt	450	349
Bitumen	22	11
RAP	200	600
Total	1’000	1’000

Die Kieselwacken werden im südlichen Oberrhein (Raum Koblenz) und aus der Nordwestschweiz gewonnen. Damit sind die Kieselwacken ein Naturprodukt aus dem Rhein. Danach werden sie im oberen Drittel geschnitten und im Kern geflammt angeliefert.

3.2.1.2 Funktionale Äquivalenz

Die funktionale Äquivalenz der beiden Belagsvarianten ergibt sich gemäss EN 15643-5 aus den funktionalen und/oder technischen Anforderungen des Bauwerks. Sie sind wie folgt definiert:

Ein Quadratmeter Belag ab Fundationsschicht bis und mit Deckschicht respektive Kieselwackenpflästerung gemäss VSS SN 640 480a. Die vorliegende Studie betrachtet die Nutzung der Belagsvarianten pro Jahr um Unterschiede der Liegezeiten der beiden Belagsvarianten ökologisch mitzuberücksichtigen. Folgende Liegezeiten (Lebenserwartungen) werden verwendet, siehe Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Liegezeiten der einzelnen Schichten der betrachteten Belagsvarianten.

Asphalt	**Liegezeit in Jahren**
Deckschicht AC 8 S	25
Tragschicht AC T 22 S	50
Fundationsschicht aus ungebundener Gesteinskörnung	100
Kieselwackenpflästerung	
Wackensteine und Spezialfugenmörtel	100
Bettungsmaterial aus Splittbeton	100
Tragschicht aus Sickerbeton	100
Fundationsschicht aus ungebundener Gesteinskörnung	100

Die funktionelle Einheit bildet daher ein Quadratmeter Belag/Altstadt-Platz ab Fundationsschicht im Zeitraum eines Jahres ab.

3.2.1.3 Systemgrenzen

Gemäss EN 15643-5 [4] (siehe dazu Abb. 3-3) umfasst das analysierte System die Herstellungsphase der Baustoffe (Module A1 bis A3), die Errichtungsphase des Bauwerks (Module A4 und A5), einen Teil der Nutzungsphase des Bauwerks (Module B1 bis B5) sowie die Entsorgungsphase (Module C1 bis C4). Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D aus Abb. 3-3) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt, da Recyclinganteile bereits in der Herstellungsphase mitberücksichtigt wurden und dadurch die Gefahr von Doppelzählungen ausgeschlossen wird.

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

In der Errichtungsphase werden der Transport der Baumaterialien bis zur Baustelle und die Bauprozesse betrachtet. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem Einbau des Belags ab Fundationsschicht

in beiden Belagsvarianten. Alle Prozesse und Materialien des übergeordneten Bauprojekts des Basler Altstadt-Platzes die mit dem Platz/Strassen- bzw. sonstigen Leitungsbau verbunden sind, werden nicht berücksichtigt.

In der Nutzungsphase werden nur diejenigen Auswirkungen betrachtet, die sich aus dem Betrieb, dem Unterhalt und der Werterhaltung des Bauwerks ergeben. Die Nutzung des Bauwerks hingegen durch die Verkehrsteilnehmer wird vernachlässigt (z.B. der Energieverbrauch der Fahrzeuge auf dem Platz/ Strasse). Es wird davon ausgegangen, dass die Belagsvariante «Kieselwackenpflästerung» während der Nutzungsdauer von 100 Jahren nicht beschädigt wird und keine Instandsetzungsmassnahmen nötig werden. Beim Asphalt muss nach 25 Jahren die Deckschicht ersetzt werden. Die Tragschicht hält 50 Jahre. In beiden Belagsvarianten hält die Fundationsschicht aus ungebundener Gesteinskörnung 100 Jahre.

In der Entsorgungsphase wird das Bauwerk rückgebaut und die dabei entstehenden Materialien werden wiederverwendet (direkt vor Ort oder auf einem externen Bauperimeter) oder als Abfälle entsorgt in einer Deponie Typ B (Gesteinskörnungen und rückgebauter Asphalt). Es werden alle damit verbundenen Prozesse (inkl. Transporte) betrachtet unter Annahme des aktuellen Stands der Technik. Gemäss EN 15643-5 [4] werden die Prozessketten der Entsorgungsphase soweit betrachtet bis das rückgebaute Material den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht. In der vorliegenden Studie wird dieser Ansatz im verwendeten Softwareprogramm SimaPro [13] umgesetzt durch Wahl der entsprechenden Allokationsmethode (mit «Alloc Rec» bzw. «Cut-off» Bezeichnung) [6], [14]. Sie wird allgemein als «Recycled Content»-Modell bezeichnet [15]. Sie trennt den ersten Lebenszyklus eines Produktes aus Primärrohstoffen (z.B. Stahl aus der Verhüttung von Eisenerz) klar vom zweiten Lebenszyklus, indem Recyclingstahl genutzt wird, der aus dem im ersten Lebenszyklus anfallenden Eisenschrott hergestellt wird. Die Trennung («Cut-off») erfolgt, wenn das Eisen am Ende seiner ersten Gebrauchsphase der Recyclingsammlung zugeführt wird. Dann verliert der Schrott seine «Abfalleigenschaft» und wird als Sekundärrohstoff zum Ausgangspunkt des nächsten Lebenszyklus.

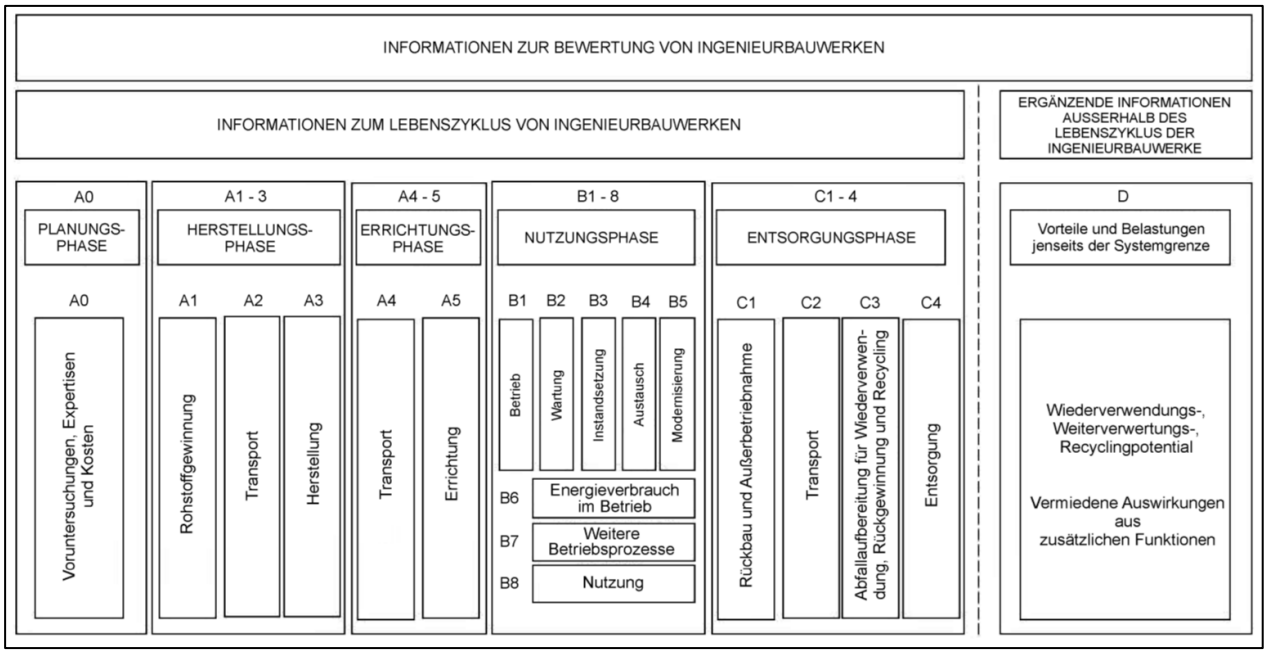


Abb. 3-3: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [4].

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden keine Vorteile und Belastungen jenseits der Systemgrenze vergeben. Vor allem die Vergabe von ökologischen Gutschriften («Vorteile») wird in der

Ökobilanz-Fachwelt kontrovers diskutiert. Denn die Vergabe von Gutschriften ist umstritten, da sie zu Doppelzählungen führen kann und die Gefahr einer intransparenten Darstellung der Ergebnisse befürchtet wird.

3.2.2 Sachbilanz

Die Ökobilanz der beiden Belagsvarianten wurde auf der Grundlage von Angaben des Kantons Basel-Stadt sowie anhand bereits bestehender Asphalt-Daten der UTech AG erstellt (vgl. Kapitel 2.2).

Zu den Asphalt-Daten der UTech AG: Die Grundlagendaten zur Asphalt-Belagsherstellung stammen von der MOAG [12] und wurden von der UTech AG im Rahmen einer begleitenden Messkampagne bei einem grossen Mischgutwerk erfasst. Die Daten zum Asphalteinbau aus der Küsnacht-Studie [16] wurden von der Hüppi AG geliefert. Im Vordergrund der Küsnacht-Studie stand die grosstechnische Realisierung einer Teststrecke in der Gemeinde Küsnacht im Kanton Zürich bei der Mischgut mit erhöhten RAP-Zugaberaten sowohl in der Deck- als auch in der Binderschicht verwendet wurde. Dabei fand die Umsetzung von hohen Recyclingquoten in Asphaltbelägen ohne Einschränkung in der Asphaltperformance statt. Es wurden Asphalte mit hohen Recyclinganteilen systematisch nach technischen und ökologischen Gesichtspunkten bewertet. Wobei zwei konzipierte Asphalte mit hohen RAP-Zugaberaten mit konventionellen Asphalten ohne RAP-Anteilen verglichen wurden.

Dabei wurden die Maschinenstunden und der Energiebedarf der Maschinen (Schwarzbelagsfertiger und Walzen) des Asphalteinbaus angegeben.

Die Daten zur Modellierung der Nutzungsphase stammen aus der Asphalt-Studie vom Bundesamt für Strassen ASTRA [17] (PLANET-Studie). Dabei wurden auch PAK-Emissionen aus dem Leaching des Asphalts mitberücksichtigt, die durch eine Auswaschung durch Regenwasser auftreten können. Die Leaching-Raten von PAK aus Asphalt (mit und ohne RAP) wurden ebenfalls durch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt der Schweiz EMPA in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich ETH experimentell bestimmt [18]. Die Messungen aus der PLANET Studie vom ASTRA [17] decken sich mit den Messungen der Studie der EMPA und der ETH Zürich [18] respektive die PAK-Leaching-Werte lagen in der EMPA/ETH-Studie sogar noch leicht tiefer.

Aus derselben Studie vom Bundesamt für Strassen ASTRA (PLANET-Studie) [17] wurde der Maschinen- und Energiebedarf für den Rückbau verwendet. Gleiches gilt für die Entsorgung / Verwertung des rückgebauten Asphalts. Mehr Details dazu sind im nachfolgenden Kapitel 4 «Methoden».

Die wichtigste Datengrundlage für die Sachbilanzierung ist die Datenbank für Ökobilanzdaten Ecoinvent V3.7 [6]. Für die Modellierung einzelner Prozesse und die Analyse der Szenarien wurden ausserdem ergänzend dazu verschiedene Datenquellen genutzt. Alle verwendeten Daten sind im Anhang in Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, geordnet nach Lebenszyklusphase, aufgeführt.

3.2.3 Wirkungsabschätzung

Es gibt verschiedene Wirkungsabschätzungsmethoden die, je nach Aufgabenstellung, mehr oder weniger geeignet sind, um den Einfluss einer umweltrelevanten Tätigkeit abzubilden.

Indikatoren der Wirkungsbilanz wie z.B. das Treibhauspotential oder der Gesamtenergieaufwand (kumulierte Energieaufwand KEA), decken jeweils nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt jedoch ein umfas-

sendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Die Berechnung dieser Indikatoren basiert auf wissenschaftlichen Modellen, daher haben diese Indikatoren, auch wenn sie nur einen Teil der Wirkungen abbilden, eine hohe Akzeptanz.

Ein Interpretationsproblem besteht, wenn die verschiedenen Auswirkungen unterschiedliche Schlüsse zulassen. So kann zum Beispiel ein untersuchtes Produkt wesentlich geringere Auswirkungen auf das Klima haben als ein anderes, jedoch viel grössere Auswirkungen auf die Gewässer und es stellt sich die Frage, was bei den untersuchten Produkten oder Systemen entscheidend ist. Problematisch dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Wirkkategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Einerseits sind die Einheiten und damit die Dimensionen unterschiedlich und andererseits wird keine Aussage gemacht, wie problematisch die betreffende Wirkung relativ zur anderen ist.

Um schlussendlich einen eindimensionalen und aussagekräftigen Wert der Umweltwirkung zu erhalten, muss die Wirkungsbilanz mit einer vollaggregierten Methode durchgeführt werden (siehe dazu Abb. 3-4). Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamtaggregierenden Methoden teilweise abgelehnt, z.B. auch von der ISO Norm 14'040 [1] für Vergleiche, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Dabei ist zu beachten, dass auch die Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z.B. Treibhauspotential betrachtet werden, kommt dies einer Gewichtung der anderen Auswirkungen mit Null gleich. Die Betrachtung der einzelnen Wirkkategorien kann durchaus hilfreich sein, z.B. zur Ermittlung der Ursachen von spezifischen Auswirkungen und Erarbeitung von möglichen Optimierungspotentialen. Als Entscheidungsgrundlage oder für die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen dürfen jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamtaggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich, sondern notwendig [19]. Betreffend der Verwendung der gesamtaggregierenden Methoden richtet sich die vorliegende Studie durch die Verwendung der Methode der ökologischen Knappheit «Umweltbelastungspunkte» nicht nach der ISO Norm 14'040 [1], sondern geht über diese hinaus. Die Verwendung verschiedener Bewertungsmethoden erlaubt es, die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

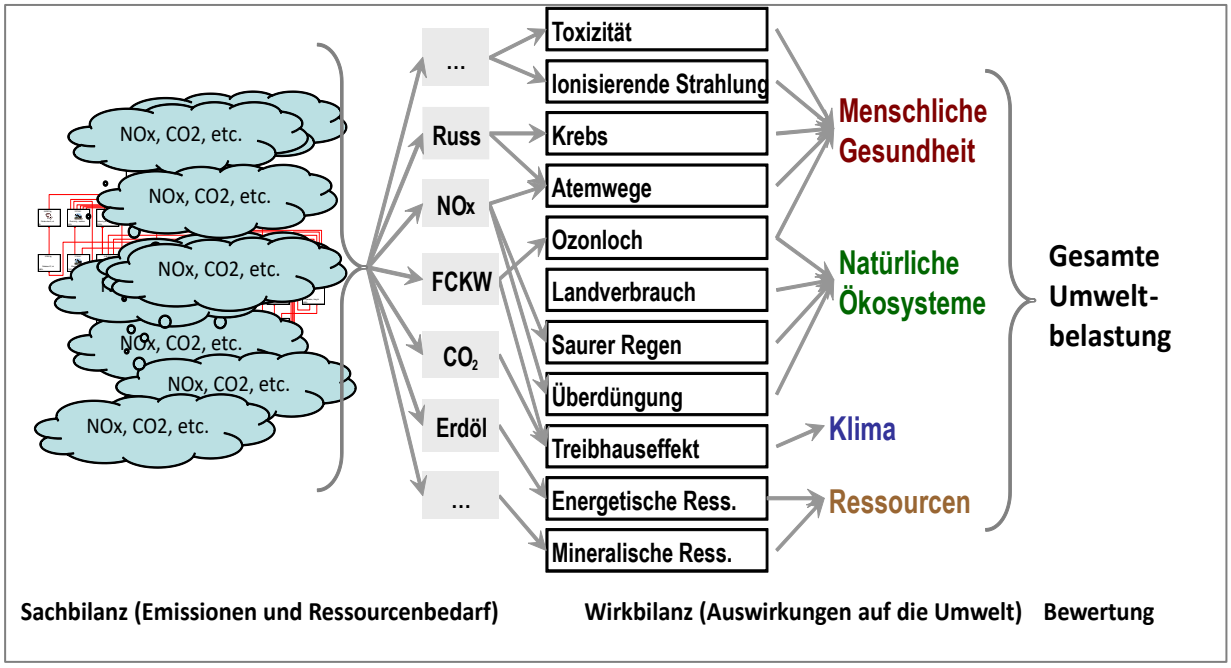


Abb. 3-4: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels gesamtaggregierender Methoden [10].

In dieser Studie werden die folgenden zwei im Baubereich üblichen Wirkungsmodelle verwendet:

Treibhausgaspotenzial (GWP): Dieses Wirkungsmodell beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO_2. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 5. Sachstandberichts des IPCC (2013) quantifiziert [20], [21].

Umweltbelastungspunkte (UBP): Mit der Methode der ökologischen Knappheit wird ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen aufgezeigt [7]. Sie basiert auf der Schweizerischen Umweltpolitik. Die Umweltbelastungspunkte 2013 (UBP'13) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. Ein Vorteil dieser Methode liegt in der Erfassung des Effekts von Schadstoffemissionen in die Umwelt. In der Schweiz gilt die UBP-Methode als Standard bei Ökobilanzen [8], [11], [22]. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt als besonders hilfreich für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen.

Mittels der Methode der ökologischen Knappheit kann auch die Umweltwirkung von Lärm quantifiziert werden. In der vorliegenden Studie ist das Thema der Hitzeminderung in innenstädtischen Bereichen auch ein Thema, welches in die vorliegende Ökobilanz einfliessen soll. Details zur Integration der Umweltwirkung des Lärms der eingesetzten Baumaschinen und der hitzemindernden Wirkung der Kieselwackenpflästerung gegenüber dunklem Asphalt sind dem Anhang Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**.

3.2.4 Auswertung und Interpretation

Die Bedeutung von Datenunsicherheiten wurde durch eine Monte-Carlo-Simulation (Erklärung im Anhang) abgeschätzt. Als Grundlage wurden die Angaben zur Datenunsicherheit aus der Datenbank für Ökobilanzdaten Ecoinvent V3.7 [6] verwendet. Für die Transportdistanzen wurden Bandbreiten für die Streuung der Parameterwerte abgeschätzt (siehe Tabelle 3-3). Als statistische Verteilung wurde für alle Parameter, ausser für die Transportdistanzen, eine Lognormalverteilung angenommen. Bei den Transportdistanzen wurde eine Dreiecksverteilung angenommen. Sie hat die höchste Wahrscheinlichkeit beim Mittelwert und fällt linear zum Minimal- und Maximalwert ab.

Bei der Monte-Carlo-Simulation werden Eingabeparameter einer Ökobilanz anhand einer statistischen Verteilung variiert und die Ökobilanz wird neu berechnet. Der pro Iteration dadurch erhaltene Resultatwert wird zwischengespeichert. Danach wird die Ökobilanz erneut mit variierten Eingabeparametern gerechnet. Dies wurde im vorliegenden Projekte 10'000mal durchgeführt. Je häufiger ein Resultat einen gewissen Zahlenwert ergibt, umso wahrscheinlicher ist dieser Wert. Mit anderen Worten, die Monte-Carlo-Simulation generiert Verteilungen von möglichen Ergebniswerten. Typischerweise wird eine Monte Carlo-Simulation mit jeweils 10‘000 Iterationen und einem Konfidenzintervall von 95% erstellt (wie im vorliegenden Projekt). Das Resultat kann danach direkt in den Ökobilanz-Grafiken als Fehlerindikatoren (oberes und unteres Quantil) angegeben werden (siehe dazu Abb. 4-1). Als Grundlage wurden die Angaben zur Datenunsicherheit aus der Datenbank für Ökobilanzdaten Ecoinvent V3.7 [23] verwendet.

Tabelle 3-3: Transportdistanzen inkl. der angewandten Streuung (jeweils Hin- und Rückfahrt).

Transporte	Transportdistanz	Streuung
Kieselwacken zur Baustelle	20 km	+/- 5 km
Fugenmörtel zur Baustelle	30 km	+/- 10 km
Splittbeton zur Baustelle	30 km	+/- 10 km

Sickerbeton zur Baustelle	30 km	+/- 10 km
Ungebundene Gesteinskörnung zur Baustelle	20 km	+/- 5 km
Baumaschinen zur Baustelle	30 km	+/- 10 km
Entsorgung Deponietyp B	25 km	+/- 10 km
Recycling Kieselwacken	20 km	+/- 5 km
Recycling Asphalt	20 km	+/- 5 km
Recycling ungebundene Gesteinskörnung	20 km	+/- 5 km

4 Fazit Ökobilanz

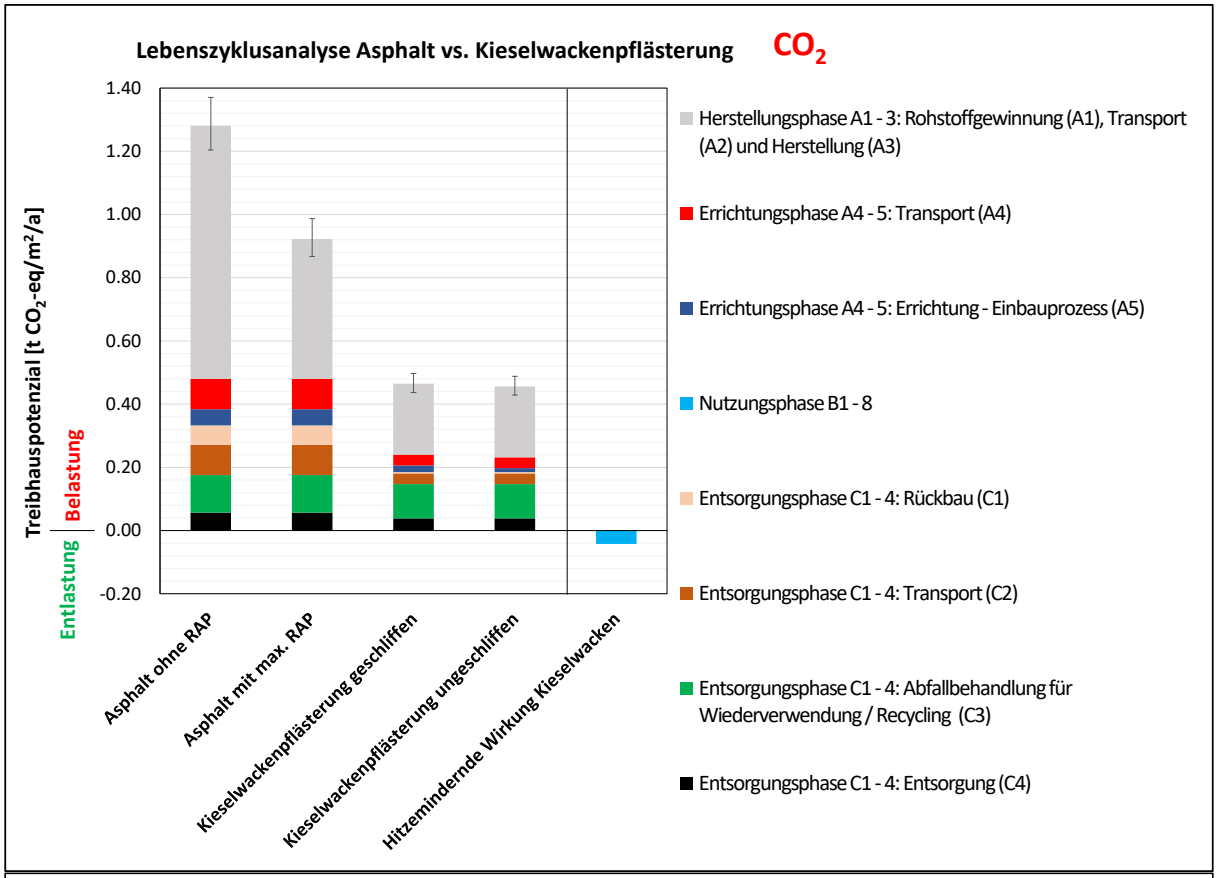
Abb. 4-1 zeigt das Ergebnis der Ökobilanz zweier Belagsvarianten: Asphalt und Kieselwackenpflästerung ausgewertet mittels der Methode der Treibhauspotenziale CO_2 und mittels der Methode der ökologischen Knappheit, Umweltbelastungspunkte UBP. Beide Ökobilanzmethoden zeigen ein vergleichbares Bild: Asphalt schneidet gegenüber der Kieselwackenpflästerung ökologisch schlechter ab. Auch der Asphalt mit maximaler Asphaltgranulat-Zugaberate (max. RAP) schneidet ökologisch nachteilig ab gegenüber der Kieselwackenpflästerung. Der Hauptgrund für den ökologischen Vorteil der Kieselwackenpflästerung liegt in den höheren Liegezeiten von 100 Jahren gegenüber dem Asphalt (25 Jahre Deckschicht und 50 Jahre Tragschicht). Im Betrachtungszeitraum von 100 Jahren müsste beim Asphalt die Deckschicht zweimal erneuert werden (inkl. Ausfräsen). Das Ergebnis wird als signifikant eingestuft, da die Streubereiche (Fehlerindikatoren) sich zwischen den Säulen nicht überlappen.

Beide Abbildungen zeigen auch ein einheitliches Bild bezüglich des Beitrages der einzelnen Lebenszyklusphasen auf die Gesamtumweltwirkung: Die Herstellungsphase A1 – A3 schenkt ökologisch am stärksten ein. Beim Asphalt trägt die Hauptlast das Bitumen während bei der Kieselwackenpflästerung der grösste Beitrag durch den Zement im Mörtel, im Splitt- und Sickerbeton zustande kommt.

Der Beitrag der Baumaschinen im Bereich Lärm wurde der Lebenszyklusphase der Errichtung zugerechnet. Der Effekt der Hitzeminderung der Kieselwackenpflästerung wurde der Nutzungsphase zugerechnet und separat ausgewiesen, da es sich um eine ökologische Gutschrift handelt. Die Hitzeminderung liegt im Bereich von 5-7% (je nach Bewertungsmethode) bezogen auf die Gesamtumweltwirkung.

Die Aufwände des Recyclings der mineralischen Komponenten der beiden Belagsvarianten sind der Entsorgungsphase C3 zu entnehmen. Darunter fallen Aufwände der mechanischen Aufbereitungstechnik: Zerkleinern, Klassieren und Sortieren.

Ein weiterer Aspekt, der genau analysiert wurde, ist wie gross der Einfluss des Schleifens der Steine auf die Ökobilanz ist. Unsere Analyse hat gezeigt, dass die Auswirkung des Schleifens sich im Bereich von 2-12% bewegt (je nach Ökobilanzmethode). Bei der UBP-Methode ist der Unterschied grösser, da dort auch nicht klimawirksame Luftschadstoffe wie Feinstaub bewertet werden.



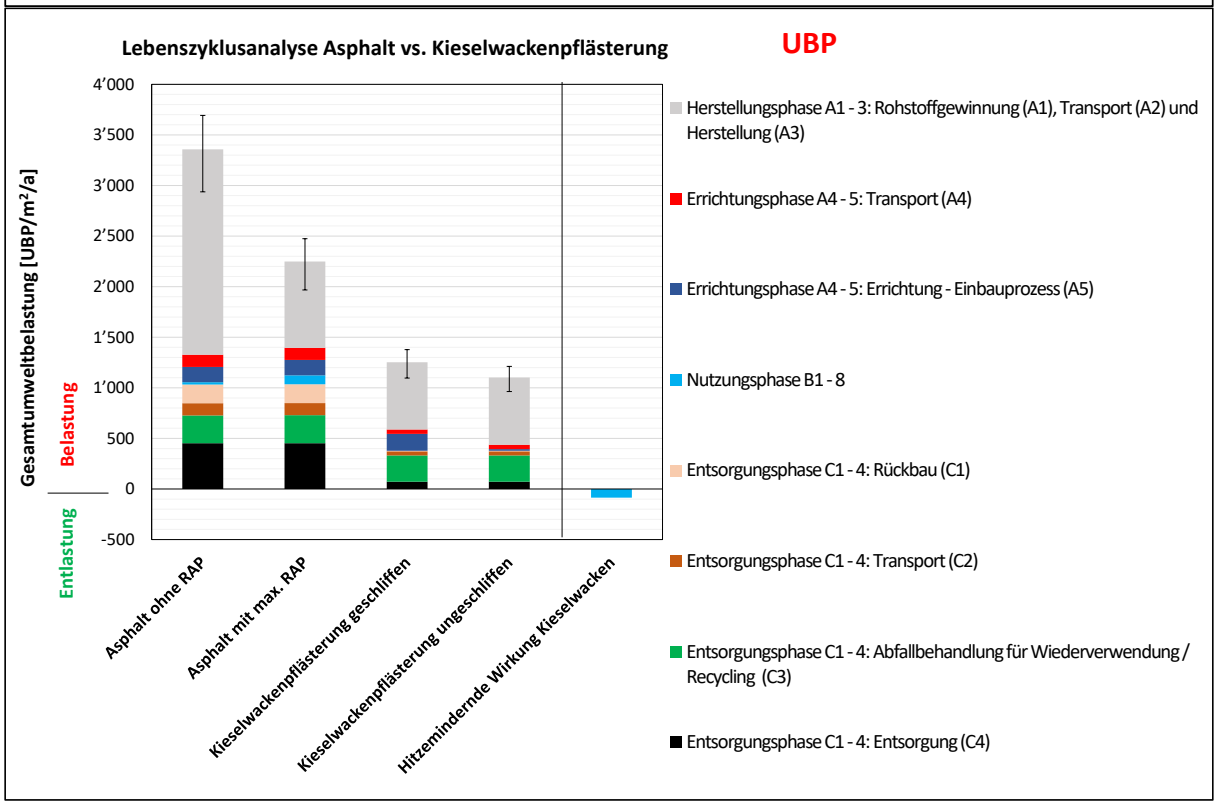


Abb. 4-1: Oben: Treibhauspotenzial in kg CO_2-eq pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg, unten: Umweltbelastungspunkte pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg. Der senkrechte Strich im oberen Teil der Säulen zeigt die Streuung der Ergebnisse infolge von Datenunsicherheiten.

Nach der Betrachtung der Ökobilanz pro Quadratmeter und Jahr Belag und stellt sich die Frage der Umweltwirkung des gesamten Rümelinsplatzes in der Basler Altstadt. Ausgehend von Abb. 4-1 ergibt der Einbau des Kieselwackenpflästerungsbelags gegenüber Asphalt (ohne RAP) einen Umweltnutzen von 2'110 vermiedenen Umweltbelastungspunkte pro m^2 und Jahr. Dieser Wert wird mit dem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren und mit dem Flächenausmass von 1 m^2 multipliziert. Daraus ergibt sich ein Umweltnutzen von 211'000 vermiedenen UBP. Dieser Umweltnutzen entspricht der Umweltwirkung von:

- 630 km Autofahren mit einem durchschnittlichen PW oder an
- 10 Grillsteaks oder
- dem jährlichen Wärmebedarf von 0.2 Haushalten.

Die Ökobilanz hat gezeigt, dass sich der Einsatz von Kieselwackenpflästerungen anstelle der konventionellen Asphalt-Bauweise ökologisch lohnt. Die ökologische Belastung des Zements wird durch die höhere Liegezeit gegenüber des Asphalts überkompensiert. Das Ergebnis ist signifikant und gilt auch beim Einsatz von Asphalt mit hohen Asphaltgranulat-Zugaberaten (RAP).

5 Lebenszykluskosten-Betrachtung

Neben der Ökobilanz wurde auch eine Lebenszykluskostenbetrachtung und eine Ökoeffizienzanalyse erstellt. Bedeutet es wird betrachtet, bei welcher Umweltmassnahme das Geld hinsichtlich ökologischem Nutzen am besten investiert ist. Denn am ökoeffizientesten sind Umweltmassnahmen, die pro ausgegebenen Schweizer Franken am meisten Umweltnutzen abwerfen. Für die Ökoeffizienzanalyse braucht es die Informationen zu den Bereichen Ökologie (Ökobilanz) und Ökonomie (Kostenanalyse). Der Vollständigkeit halber wurde daher diese Betrachtung auch durchgeführt, war jedoch nicht der Hauptauftrag der UTech AG.

Wichtig: Der SEBI kann keine Aussage zu gesellschaftspolitischen Aspekten, sozialen Aspekten oder «Convenience-Aspekten» machen. Es werden einzig die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit bewertet. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Ökobilanz-Studie zur Kieselwackenpflästerung vs. Asphalt wurde der SEBI als Zusatz eingebracht und soll nicht im Kern der Studie stehen. Interessant ist die Anwendung des SEBI vor allem dann, wenn mehrere Umweltmassnahmen um ein vorgegebenes Budget konkurrieren oder aber ein Umweltmassnahmen-Portfolio eines Unternehmens, eines Verbandes oder einer Behörde durchgekämmt werden sollte mittels SEBI-Screening. Ein solches SEBI-Screening zeigt den Entscheidungsträgern konkrete Handlungsoptionen und oft auch die ökologisch «low-hanging-fruits» auf.

5.1 Lebenszykluskosten

Abb. 5-1 zeigt die Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs) der beiden verglichenen Belagsvarianten: Asphalt vs. Kieselwackenpflästerung. Der Betrachtungszeitraum beläuft sich auf 100 Jahre. Wobei die Deckschicht (25 Jahre Liegezeit) im Betrachtungszeitraum zweimal und die Tragschicht (50 Jahre Liegezeit) im Betrachtungszeitraum einmal ersetzt werden muss. Aufgrund dieser Sanierungsmassnahmen beim Asphalt-Belag belaufen sich die Kosten gegenüber der Kieselwackenpflästerung auf einem vergleichbaren Niveau. Der Asphalt kommt auf CHF 995.- pro Quadratmeter wohingegen die

Kieselwackenpflästerung auf CHF 1'150.- pro Quadratmeter kommt. Die Herstellungs- und Errichtungsphase schenkt bei beiden Belagsvarianten am kostenmässig am stärksten ein, wobei die Sanierung der Deck- und Tragschicht beim Asphalt auch wesentlich zu den Lebenszykluskosten beitragen.

Nun stellt sich die Frage, ob die zusätzlichen Kosten durch den ökologische Nutzen der Kieselwackenpflästerung gegenüber dem Asphalt gerechtfertigt sind? Diese Frage kann durch unseren eigens entwickelten Ökoeffizienzindikator (SEBI) beantwortet werden, siehe dazu Kap. 5.2.

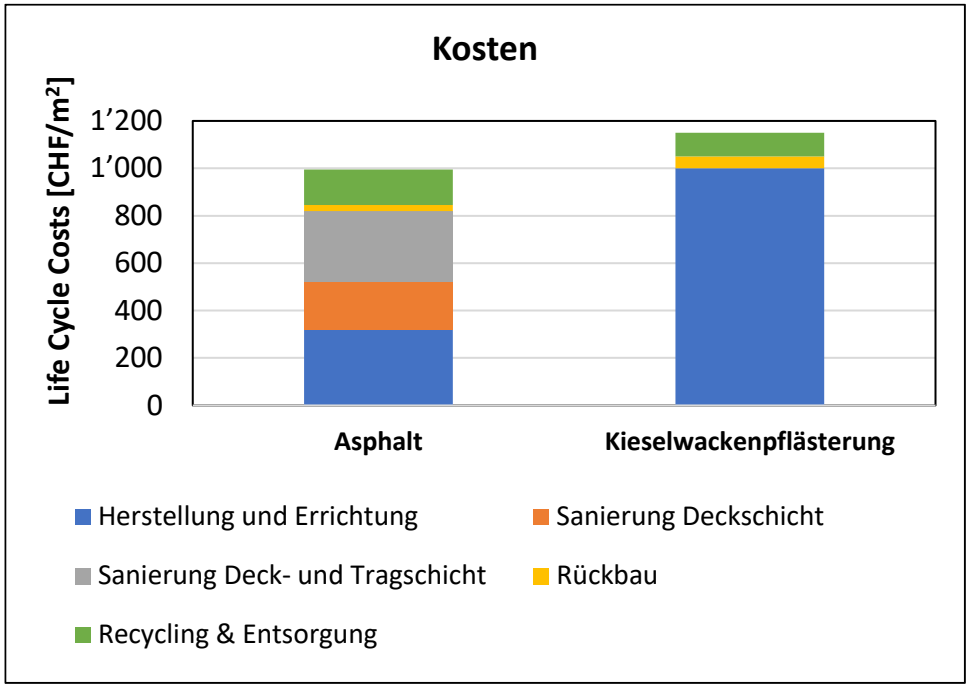


Abb. 5-1: Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs) der beiden Belagsvarianten: Asphalt und Kieselwackenpflästerung. Der Betrachtungszeitraum beläuft sich auf 100 Jahre. Wobei die Deckschicht (25 Jahre Liegezeit) im Betrachtungszeitraum zweimal und die Tragschicht (50 Jahre Liegezeit) im Betrachtungszeitraum einmal ersetzt werden muss. Aufgrund dieser Sanierungsmassnahmen beim Asphalt-Belag belaufen sich die Kosten gegenüber der Kieselwackenpflästerung auf einem vergleichbaren Niveau. Der Asphalt kommt auf CHF 995.- pro Quadratmeter wohingegen die Kieselwackenpflästerung auf CHF 1'150.- pro Quadratmeter kommt.

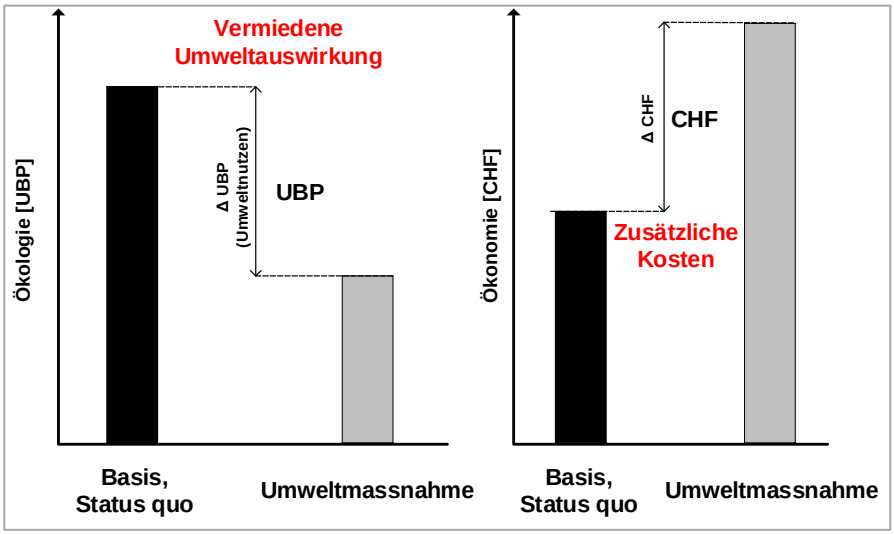
Die Lebenszykluskostenanalyse hat gezeigt, dass die Kieselwackenpflästerung gegenüber dem Asphalt teurer ist.

5.2 Ökoeffizienz SEBI

Nach der Berechnung der Ökobilanz (Lebenszyklusanalyse) und der Lebenszykluskosten, wurde der von Thomas Pohl entwickelte Ökoeffizienz-Indikator SEBI (Specific-Eco-Benefit-Indicator) angewandt. Dieser Ökoeffizienz-Indikator zeigt auf, in welche Umweltmassnahme das Geld hinsichtlich ökologischem Nutzen am besten investiert ist. Wie einleitend erläutert, sind am ökoeffizientesten

die Umweltmassnahmen, die pro ausgegebenen Schweizer Franken am meisten Umweltnutzen abwerfen. Für die Ökoeffizienzanalyse SEBI braucht es Informationen zu den Bereichen Ökologie (Ökobilanz) und Ökonomie (Kostenanalyse).

Auf diese Weise wird der Umweltnutzen einer Massnahme gegenüber der Basis (z.B. Status quo) durch «vermiedene Umweltbelastungspunkte (vUBP)» quantifiziert. Der Quotient vUBP/CHF ist der SEBI. Zur Berechnung des SEBI wird der gegenüber dem Referenzszenario zusätzliche Umweltnutzen (in vUBP) durch die zusätzlichen Kosten dieser Massnahme dividiert. Der SEBI ergibt sich damit in vUBP/CHF. Ein hoher SEBI steht damit für eine besonders ökoeffiziente Massnahme. Abb. 5-2 zeigt das Vorgehen bei der SEBI-Berechnung auf.



$$\boldsymbol{SEBI} = \frac{Umweltnutzen\ gegenüber\ Basisszenario}{Kosten\ gegenüber\ Basisszenario} = \frac{vermiedene\ Umweltauswirkung}{zusätzliche\ Kosten}\ \left[\frac{\text{vUBP}}{\text{CHF}}\right]$$

Abb. 5-2: Der SEBI errechnet sich aus dem Quotienten der vermiedenen Umweltauswirkung und den zusätzlichen Kosten. Links: Ökologie, rechts: Ökonomie.

Mittels SEBI wird ersichtlich, welche Massnahmen die «low-hanging-fruits» darstellen und somit prioritär umgesetzt werden sollten. Was nicht heisst, dass die anderen Massnahmen mit einer tieferen Ökoeffizienz nicht auch umgesetzt werden, sondern einfach zu einem späteren Zeitpunkt, ganz im Sinne «das eine tun und das andere nicht lassen». Gemäss Berechnungen der OST Ostschweizer Fachhochschule (ehemals Hochschule für Technik in Rapperswil HSR) liegt die «Toleranzschwelle» von Umweltmassnahmen bei ca. 2'500 vUBP/CHF.

Die Ökoeffizienzanalyse SEBI zeigt auf in welche Massnahme das verfügbare Geld am effizientesten investiert ist. Die Genauigkeit der berechneten Werte liegt etwa bei +-25%. Dies vor allem, da die Kosten bei einigen Massnahmen nicht ganz sicher waren und teilweise natürlichen Marktschwankungen unterworfen sind. Das SEBI Spektrum bildet sich zwischen 10 und 20'000 vUBP/CHF ab. Denn eine Massnahme mit einem SEBI von über 5'000 vUBP ist auch unter Berücksichtigung der Unsicherheit signifikant besser als eine Massnahme mit einem SEBI von unter 2'500 vUBP/CHF.

Zur Einordnung: Massnahmen mit einem SEBI von mehr als 2'500 vermiedenen Umweltbelastungspunkten pro Schweizer Franken (vUBP/CHF) gelten als ökoeffizient. Massnahmen mit einem SEBI

unter 2'500 vUBP/CHF werden als öko-ineffizient bezeichnet. Massnahmen mit einem SEBI von mehr als 5'000 vUBP/CHF gelten als hochökoeffizient.

Aus Abb. 4-1 geht hervor, dass der Umweltnutzen der Kieselwackenpflästerung gegenüber dem Asphalt ohne RAP (Differenz zwischen erster Säule von links in Abb. 4-1 und der dritten Säule von links) 2'110 vermiedene UBP/m^2/a beträgt. Diese Zahl wird mit den 100 Jahren des Betrachtungszeitraums multipliziert zu einem Umweltnutzen von 211'000 vUBP/m^2. Demgegenüber stehen die Zusatzkosten von CHF 155.-/m^2. Diese beiden Zahlen werden nun miteinander wie folgt verrechnet, um den SEBI zu erhalten:

$$SEBI = \frac{Umweltnutzen}{Zusatzkosten} = \frac{211'000\ vermiedene\ UBP}{155\ CHF} = \mathbf{1'360\ \frac{vUBP}{CHF}}$$

Der SEBI beläuft sich demnach auf 1'360 vermiedene Umweltbelastungspunkte pro Schweizer Franken. Dieser Wert liegt unter der Toleranzschwelle von 2'500 vUBP/CHF und klassiert damit diese Massnahme als öko-ineffizient. Dies wird in Abb. 5-3 verdeutlicht im Abgleich diverser Umweltmassnahmen aus der Schweizer Abfallwirtschaft. Bei diesen Recycling-Massnahmen aus der Abfallwirtschaft bildet entweder die Kehrichtverbrennung oder eine einfache Schrottaufbereitung das Basisszenario. Zusätzlich ist der SEBI eines CO_2-Zertifikats mit einem Marktdurchschnittspreis von CHF 40.- pro Tonne abgebildet. Der SEBI der Kieselwackenpflästerung gegenüber dem Asphalt schneidet in diesem Abgleich im unteren Effizienzbereich ab. SEBI-Analysen der UTech AG für private Unternehmen, Verbände sowie auch für Behörden haben gezeigt, dass das SEBI-Spektrum unabhängig vom betrachteten Themenbereich (Energiesektor, Mobilität, Transport, Abfallwirtschaft, Bauwirtschaft etc.) sich immer im Bereich von einigen Hundert bis einigen Zehntausend SEBI-Punkten abspielt. Daher ist das in Abb. 5-3 dargestellte Effizienzspektrum als repräsentativ betrachtet werden.

Die Lebenszykluskostenanalyse hat gezeigt, dass die Kieselwackenpflästerung gegenüber dem Asphalt teurer ist. Die Ökoeffizienzanalyse SEBI der Kieselwackenpflästerung gegenüber konventioneller Asphaltbauweise hat gezeigt, dass diese Massnahme im vorliegenden Fall öko-ineffizient ist. Wird die Kieselwackenpflästerung als Umweltmassnahme betrachtet, so kann der Einbau der Kieselwackenpflästerung aus Kosten/Umweltnutzen-Sicht nur dann empfohlen werden, wenn keine ökoeffizienteren Umweltmassnahmen um das gleiche Budget konkurrieren.

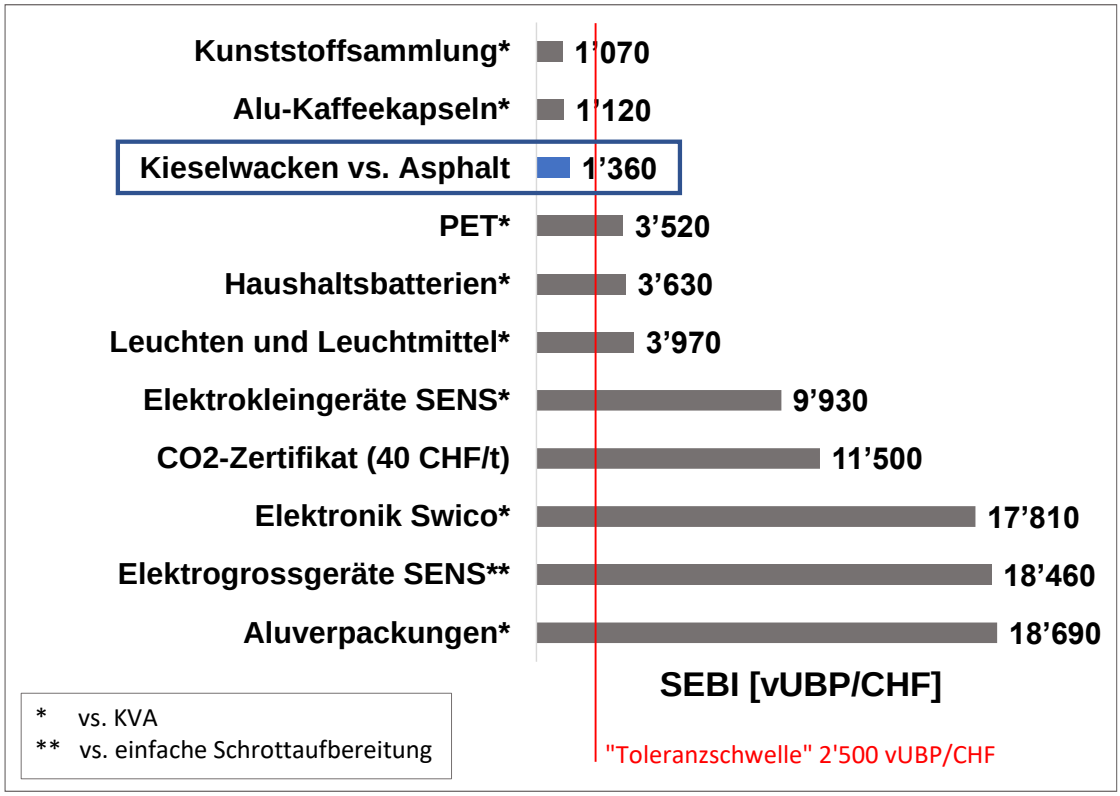


Abb. 5-3: Ökoeffizienz SEBI der Umweltmassnahme «Kieselwackenpflästerung vs. Asphalt» eingebettet in das SEBI-Spektrum der Schweizer Abfallwirtschaft. Zusätzlich ist der SEBI eines CO_2-Zertifikats mit einem Marktdurchschnittspreis von CHF 40.- pro Tonne abgebildet.

Referenzen

[1] I. 14040, „Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines," ISO, Geneva, 2006.

[2] I. 14044, „Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines," ISO, Geneva, 2006.

[3] I. 14045, „Umweltmanagement - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen - Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien," ISO, Genf, 2012.

[4] EN 15643-5:2017, „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Teil 5 Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke," SN EN 15643-5:2017, 2018-11-01.

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

[6] ecoinvent, „ecoinvent 2020: Version 3.7 Swiss Life Cycle Inventories," ecoinvent, 2020.

[7] R. Frischknecht und S. Büsser Knöpfel, „Ökofaktoren Schweiz 2013 gmäss der Methode der ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz," Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2013.

[8] A. Gautschi, „Green Economy - The Method of Ecological Scarcity in Policy Making, in Economics and Environmental Monitoring Division," *Bundesamt für Umwelt (BAFU),* 2013.

[9] S. Hellweg, S. Rubli und R. Juraske, „Vorlesung: Grundzüge "Ökologische Systemanalyse"," ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2017.

[10] F. Dinkel, „Skrip Ökobilanzen der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW," Fachhochschule Nordwestschweiz, Basel, 2013.

[11] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Methode der ökologischen Knappheit," Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2014.

[12] S. Kytzia und T. Pohl, „Ökobilanzierung der Asphaltproduktion mit Recyclinganteilen," Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC und Institut für Bau und Umwelt IBU, Rapperswil, 2016.

[13] P. Sustainability, „Herausgeber der Ökobilanzsoftware SimaPro," PRé Sustainability, Amersfoort Netherlands, 2020.

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

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

[16] T. Pohl und P. Bodmer, „RC-Plus Küsnacht - Berichtteil Ökobilanz," Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Rapperswil, 2020.

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

[18] M. Muñoz, R. Haag, C. Schreiner, M. Zaumanis, M. C. Cavalli, L. D. Poulikakos und N. V. Heeb, „Environmental impact of rejuvenators in asphalt mixtures containing high reclaimed asphalt content," *Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2021.1891129,* 2021.

[19] T. Kägi, F. Dinkel, R. Frischknecht, S. Humbert, J. Lindberg, S. De Mester, T. Ponsioen, S. Sala und U. W. Schenker, „Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?" - SETAC Europe 25th Annual Meeting," *International Journal of Life Cycle Assessment,* 5 Mai 2015.

[20] IPCC 2013, „Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group + to the Fifth Assessment Report of the Intergeovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom an New York USA, 2013.

[21] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Climate Change 2007: Synthesis Report," Valencia, 2007.

[22] ETH Zürich, Prof. Dr. Stefanie Hellweg, „Vorlesung: Grundzüge "Ökologische Systemanalyse"," in *Methodik Ökobilanz Wirkungsbilanz*, Zürich, 2017.

[23] ecoinvent, „ecoinvent 2019: Version 3.6 Swiss Life Cycle Inventories," ecoinvent, 2019.

[24] ecoinvent, „ecoinvent 2010: Version 2.2 Swiss Life Cycle Inventories," ecoivnent, Zürich, 2010.

[25] ecoinvent, „ecoinvent 2020: Version 3.7 Swiss Life Cycle Inventories," ecoinvent, 2020.

[26] ecoinvent, „Limestone at mine/CH U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 2.2, Zürich, 2010.

[27] ecoinvent, „Tap water {CH} | market for | Cut-off, U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.6, Zürich, 2019.

[28] ecoinvent, „Diesel, market for/GLO U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[29] ecoinvent, „Electricity, medium voltage {CH} | market for | Cut-off, U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[30] ecoinvent, „gravel/sand quarry infrastructure market for/GLO U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[31] ecoinvent, „Natural stone plate, cut, at regional storage/CH U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 2.2, Zürich, 2010.

[32] ecoinvent, „Cement mortar, market for/CH U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[33] ecoinvent, „Concrete normal {CH} | market for concrete normal| Cut-off, U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory, ecoinvent 3.6, Zürich, 2019.

[34] ecoinvent, „Sand from gravel quarry operation/CH U, Cut-off," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[35] Liebherr, „Spritrechner - Liebherr," Liebherr, [Online]. Available: https://www.liebherr.com/de/che/specials/spritsparrechner/tool/kalkulator.html. [Zugriff am 05 03 2021].

[36] ecoinvent, „Excavation, hydraulic digger {RER} | Cut-off, U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[37] ecoinvent, „Life Cycle Inventories of Building Products Data v2.0 - report no. 7," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 2.2, Zürich, 2010.

[38] ecoinvent, „Diesel, burned in building machine, with particle fil-ter/CH U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoivnent 2.2, Zürich, 2010.

[39] S. Mariani, Interviewee, *Geschäftsführer EcoSoil AG: Angaben zum Fahrmischer.* [Interview]. 19 März 2021.

[40] T. Pohl, „Ökobilanz und Ökoeffizienzanalyse für Swiss Golf," Swiss Golf und Umtec Technologie AG, Epalinges, 2021.

[41] Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV, „6. Schweizer Ernähungsbericht," Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 2020.

[42] Ute Imkenberg und Thorsten Mauch Datenverarbeitung GbR, „Gesünder Abnehmen - Kalorienverbrauch Beruf Arbeiten," Datenverarbeitung GbR, [Online]. Available: https://gesuender-abnehmen.com/abnehmen/kalorienverbrauch-beruf-arbeiten.html. [Zugriff am 18 08 2021].

[43] ecoinvent, „Transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6 {RER} | Cut-off, U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[44] R. Ehrnsperger und W. Misch, „Gesundheits- und Umweltkriterien bei der Umsetzung der EG-Bauprodukten-Richtlinie (BPR) - Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes UBA," Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, 2005.

[45] Grün Stadt Zürich, „Programm Klimaanpassung - Fachplanung Hitzeminderung," Stadt Zürich, Zürich, 2020.

[46] R. Bunge und T. Pohl, „Zusammenhang zwischen externen Kosten und Umweltbelastungspunkten gemäss der Methodenkonvention 3.0 des Umweltbundesamtes UBA aus Deutschland," Ostschweizer Fachhochschule OST, Rapperswil, 2018.

[47] ecoinvent, „Inert waste, for final disposal {CH} | treatment of inert waste, inert waste material landfill | Cut-Off, U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 3.7, Zürich, 2020.

[48] ecoinvent, „Disposal, buidling, concrete gravel to recycling CH U," ecoinvent.org, Life Cycle Inventory ecoinvent 2.2, Zürich, 2010.

[49] ecoinvent, „ecoinvent 2020: Version 3.7 Swiss Life Cycle Inventories," ecoinvent, 2020.

[50] A. Matthey und B. Bünger, „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze Stand 02/2019," Umweltbundesamt UBA, Dessau-Rosslau, 2019.

[51] F. Dinkel, „Skript Ökobilanzen der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW," Fachhochschule Nordwestschweiz, Basel, 2013.

[52] G. Doka, „Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Ecoinvent report No. 13 Part II," Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

[53] G. Doka, „Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Ecoinvent report No. 13 Part V," Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

[54] D. Gabor, „Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Ecoinvent report No. 13 Part II," Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

[55] D. Gabor, „Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Ecoinvent report No. 13 Part V," Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

Verzeichnisse

Begriffe und Abkürzungen

AS	Alternativszenario = Wirkszenario
AC	Asphaltconcrete (Asphaltbeton)
CEM	Zement, engl. cement
CO_2-eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente («equivalents»)
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Fahrzeuge pro Tag)
Fzg	Fahrzeuge
FU	Funktionelle Einheit der Ökobilanz, engl. «Functional unit»
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse = Ökobilanz, die Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse oder life cycle assessment (LCA) genannt, ist ein Hilfsmittel zur Analyse der Umweltwirkung. Der Wortteil «Öko» steht dabei für die Umweltwirkung und der Wortteil «Bilanz» für die buchhalterische Erfassung sämtlicher Umweltwirkungen über den ganzen Lebenszyklus eines Produkts oder Prozesses in quantitativer/numerischer Form. Wichtig dabei ist, dass alle Emissionen und Ressourcenverbräuche während der Entstehung, über die eigentliche Lebenszeit bis zur Entsorgung oder Wiederverwertung in die Lebenszyklusanalyse einfliessen – «von der Wiege bis zur Bahre».
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement (Recyclingasphalt)
RS	Referenzszenario = Basisszenario
vUBP	Vermiedene (eingesparte) Umweltbelastungspunkte (Einheit der vollaggregierten Ökobilanz-Methode der ökologischen Knappheit, engl. Ecological Scarcity)

Abbildungen

Abb. 1-1: Oben: Treibhauspotenzial in kg CO_2-eq pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg, unten: Umweltbelastungspunkte pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg. Der senkrechte Strich im oberen Teil der Säulen zeigt die Streuung der Ergebnisse infolge von Datenunsicherheiten. 6

Abb. 3-1: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels der UBP-Methode. Grundschema der Verknüpfung der Sachbilanz mit den Wirkungsmodellen (Charakterisierung) und dem Gesamtindexes der ökologischen Knappheit (Gewichtung und Ergebnis), Quelle: [11], S. 67. 11

Abb. 3-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14‘040ff [1], [9], [10]. Das Vorgehen zwischen den einzelnen Schritten ist meistens iterativ. 12

Abb. 3-3: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [4].....15

Abb. 3-4: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels gesamtaggregierender Methoden [10].....17

Abb. 4-1: Oben: Treibhauspotenzial in kg CO_2-eq pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg, unten: Umweltbelastungspunkte pro m^2 und Jahr Belag im gesamten Lebensweg. Der senkrechte Strich im oberen Teil der Säulen zeigt die Streuung der Ergebnisse infolge von Datenunsicherheiten. 21

Abb. 4-2: Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs) der beiden Belagsvarianten: Asphalt und Kieselwackenpflästerung. Der Betrachtungszeitraum beläuft sich auf 100 Jahre. Wobei die Deckschicht (25 Jahre Liegezeit) im Betrachtungszeitraum zweimal und die Tragschicht (50 Jahre Liegezeit) im Betrachtungszeitraum einmal ersetzt werden muss. Aufgrund dieser Sanierungsmassnahmen beim Asphalt-Belag belaufen sich die Kosten gegenüber der Kieselwackenpflästerung auf einem vergleichbaren Niveau. Der Asphalt kommt auf CHF 995.- pro Quadratmeter wohingegen die Kieselwackenpflästerung auf CHF 1'150.- pro Quadratmeter kommt. 23

Abb. 4-3: Der SEBI errechnet sich aus dem Quotienten der vermiedenen Umweltauswirkung und den zusätzlichen Kosten. Links: Ökologie, rechts: Ökonomie. 24

Abb. 4-4: Ökoeffizienz SEBI der Umweltmassnahme «Kieselwackenpflästerung vs. Asphalt» eingebettet in das SEBI-Spektrum der Schweizer Abfallwirtschaft. Zusätzlich ist der SEBI eines CO_2-Zertifikats mit einem Marktdurchschnittspreis von CHF 40.- pro Tonne abgebildet. 26

Abb. 6-1: Herleitung des Grenz-SEBI anhand einer Korrelation zwischen UBP und externen Kosten. Die UBP-Daten stammen aus Ecoinvent, die Daten zu den externen Kosten stammen aus der Methodenkonvention des Umweltbundesamtes aus Deutschland [50]. Das Verhältnis UBP/eK beträgt etwa 1'000...7'000. Im Mittel gilt UBP/eK=2'500. Angenommen, dass wir einen Umweltschaden von 2'500 UBP (entspricht 1 CHF eK) durch Umweltmassnahmen vermeiden respektive kompensieren möchten. Dies unter folgender Randbedingung: die Kosten für die Umweltmassnahmen dürfen nicht höher sein, also die externen Kosten für die Umwelt. Analogie: es macht wenig Sinn einen Schaden zu versichern, wenn die Versicherungssumme höher ist als die Schadenssumme. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abb. 6-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14‘040ff [51], [1], [9].**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abb. 6-3: Durch 4 Schritte gelangt man von der Sachbilanz (buchhalterischer Erfassung und Zusammenstellung aller Emissionen und Ressourcenverbräuche) zum Umweltindikator. ..**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abb. 6-4: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels gesamtaggregierender Methoden [51]..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabellen

Tabelle 3-1: Verwendete Asphalt-Rezepturen, Angaben stammen von einem führenden Schweizer Mischgut-Produzenten [12]. 13

Tabelle 3-2: Liegezeiten der einzelnen Schichten der betrachteten Belagsvarianten. 14

Tabelle 3-3: Transportdistanzen inkl. der angewandten Streuung (jeweils Hin- und Rückfahrt). .18

Tabelle 6-1: Materialzusammensetzung, Energiebedarf sowie Emissionen der Bereitstellung der Kieselwackenpflästerung. Angaben sind pro 1 m^2 Belag. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-2: Daten zur ökologischen Modellierung des Einbaus der Kieselwackenpflästerung. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-3: Daten zur ökologischen Modellierung des Transports vom Hersteller / Aufbereiter zur Baustelle. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-4: Hitzemindernde Wirkung und Investitions- und Unterhaltskosten der Pflästerung gegenüber Asphalt gemäss [45]. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-5: Umrechnung der Kosten der hitzemindernden Massnahme mit dem Willingness-to-Pay-Prinzip. Der Umrechnungsfaktor von CHF zu vermiedenen Umweltbelastungspunkten vUBP beträgt 1 CHF = 2'500 vUBP [46]. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-6: Daten zur ökologischen Modellierung des Rückbaus der Kieselwackenpflästerung. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-7: Daten zur ökologischen Modellierung der Transportdistanzen Baustelle – Entsorgung / Wiederverwendung. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 6-8: Daten zur ökologischen Modellierung der Entsorgungsprozesse der Kieselwackenpflästerung. ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

6 Anhang

Anfragen betreffend der Daten werden an folgende Adresse gerichtet:

Thomas Pohl
Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon

055 211 02 90
thomas.pohl(at)utechag.ch