

Endfassung

Ökobilanz verschiedener Ausbauvarianten von Güterwegen

**Ökologischer Vergleich von Kiesweg, Schwarzbelagweg und
Betonspurweg im Raum Aargau**

Auftraggeber

VKB Aargau, Jurastrasse 4, 5001 Aarau
IG Betonstrassen c/o cemsuisse, Marktgasse 53, 3011 Bern

Verfasser

Thomas Kägi
Emil Franov

Anzahl Seiten: 29
Basel, 31. Mai 2017

Impressum

Titel

Ökobilanz verschiedener Ausbauvarianten von Güterwegen

Auftraggeber

VKB Aargau, Jurastrasse 4, 5001 Aarau

IG Betonstrassen c/o cemsuisse, Marktgasse 53, 3011 Bern

Begleitgruppe

Andreas Röthlisberger, VKB Aargau

Ruedi Amsler, Samuel Amsler AG

Jörg Berli, Holcim (Schweiz) AG

Robert Wernli, Ackermann+Wernli AG

Auftragnehmer

Carbotech AG, Basel

Autoren

Thomas Kägi, Emil Franov

Beratendes Ingenieurbüro

Ackermann+Wernli AG

Projektleitung/ Kontakt

Emil Franov

+41 61 206 95 32

e.franov@carbotech.ch

Hinweis

Für den Inhalt ist ausschliesslich der Auftragnehmer verantwortlich.

Version

1.01 Schlussbericht Ökobilanz Güterwege Aargau (v1.01.docx)

Datum

31. Mai 2017

—

Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmittel und Grundlagen, dies im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. Die Grundlagen der Bewertungsmethode, auf welcher dieser Bericht basiert, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Auftraggeber nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder der Carbotech AG hergestellt werden können. Für Forderungen ausserhalb des oben genannten Rahmens lehnen wir jegliche Verantwortung gegenüber dem Auftraggeber sowie Dritten ab. Dieser Bericht ist ausschliesslich für den Auftraggeber erstellt worden und wir übernehmen keine Verantwortung gegenüber Dritten, welche Kenntnis erlangen über diesen Bericht oder Teile davon.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Ausgangslage und Zielsetzung	5
1.1 Einleitung	5
1.2 Zielsetzung	5
2 Vorgehen und Methodik	7
2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung	7
2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	7
2.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	8
2.3.1 Zielsetzung	9
2.3.2 Funktionelle Einheit (Vergleichsgrösse)	9
2.3.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie	9
2.3.4 Systemgrenzen	9
2.4 Sachbilanz	11
2.4.1 Modellierung des Produktsystems	11
2.4.2 Berechnungsgrundlagen und -entscheide	11
2.5 Wirkbilanz	12
2.6 Bewertung der Umweltbelastungen	12
2.7 Umgang mit Datenunsicherheit	13
3 Verwendete Daten	15
3.1 Primärdaten	15
3.1.1 Herstellung der Güterwege	15
3.1.2 Unterhalt der Güterwege	18
3.1.3 Rückbau der Güterwege	18
3.1.5 Kostenübersicht der Güterwege	19
3.2 Sekundärdaten	20
4 Resultate und Diskussion	21
4.1 Vergleich der Umweltfussabdrücke der Güterwege	21
4.2 Prozessbezogene Relevanzanalyse	22
4.3 Effektbezogene Relevanzanalyse	23
4.4 Lebenszykluskosten der verglichenen Güterwege	23
4.5 Gegenüberstellung Umweltfussabdruck und Kosten	24
4.6 Vergleich der Umweltrelevanz von Weginfrastruktur versus Verkehrsemissionen	25
5 Schlussfolgerungen	27
6 Literatur	29

Anhang: Resultate in Tabellenform

Zusammenfassung

Diese Studie ermittelte den Umweltfussabdruck von drei verschiedenen Wegtypen über deren gesamten Lebenszyklus im Auftrag vom VKB Aargau und der IG Betonstrassen. Die Zielsetzungen sind die folgenden:

- Es soll der Umweltfussabdruck der drei Güterwege Betonspur-, Kies- und Schwarzbelagweg ermittelt werden mittels der Methode der Ökobilanzierung.
- Nebst der Ermittlung des Umweltfussabdrucks sollen auch die Lebenszykluskosten der drei Güterwege ermittelt werden.

Da in steilerem Gelände der Unterhalt von Wegen aufgrund von Erosion steigen kann, berücksichtigt diese Studie nebst einer Variante für eher flaches Gelände eine Variante für steileres Gelände mit einer höheren Erosionsklasse. Für einen sinnvollen Vergleich der betrachteten Güterwege wurde als funktionelle Einheit 1 Laufmeter (1fm) Weg mit 3 Meter Nutzbreite über 60 Jahre definiert.

Der Ökobilanzvergleich der drei Güterwege zeigt, dass der Betonspurweg die umweltfreundlichste Option ist sowohl in der Erosionsklasse 2 wie auch in der Erosionsklasse 4. Dabei erweist sich die lange Lebensdauer und die damit einhergehenden geringen Unterhaltsarbeiten als wesentlicher Vorteil im Vergleich zu den anderen beiden Güterwegen. Zwischen dem Kiesweg und dem Schwarzbelagweg besteht kein Unterschied hinsichtlich des Umweltfussabdrucks. Der Betonspurweg weist ähnliche tiefe Lebenszykluskosten auf wie der Kiesweg. Die Herstellung ist zwar wesentlich teurer. Dies wird jedoch wieder wettgemacht mit relativ tiefen Unterhaltskosten. Merklich höher sind die Kosten für einen Schwarzbelagweg.

Trotz der aufwändigen Herstellung ist der Betonspurweg dank seiner Langlebigkeit und der damit verbundenen geringen Unterhaltsarbeiten somit eine aus Umwelt- und Kostensicht sinnvolle Variante bei der Erstellung von Erschliessungswegen sowohl in der Erosionsklasse 2 wie auch in der Erosionsklasse 4.

Für schwach befahrene Güterwege ist der Umweltfussabdruck der Weginfrastruktur etwa eineinhalb bis drei Mal höher als der Umweltfussabdruck durch den eigentlichen Verkehr. Für umweltbewusste Auftraggeber ist die Wahl der Ausbauvariante von Güterwegen also ein relevanter Entscheid.

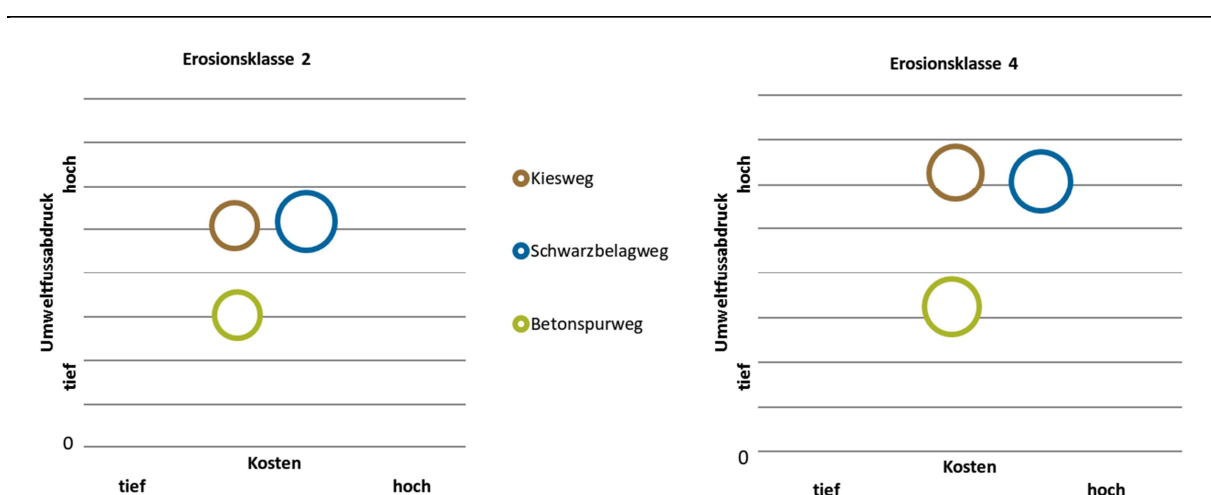


Abbildung 1: Gegenüberstellung Umweltfussabdruck und Kosten der verglichenen Güterwege

Die Grösse der Kreise indiziert approximativ die Unsicherheiten in beiden Dimensionen.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Betonspurwege werden verschiedentlich als Alternative zu den konventionellen Güterwegen erwähnt (Kieswege, Schwarzbelagwege). Der Verband der Kies- und Betonproduzenten VKB Aargau sowie die IG Betonstrassen möchten daher wissen, wie sich Herstellung und Unterhalt von verschiedenen landwirtschaftlichen Güterwegen bezüglich Umweltbilanz verhalten. Insbesondere interessiert, inwiefern sich die zusätzlichen Aufwände bei der Herstellung des Materials für den Betonspurweg bei geringerem Unterhaltsbedarf und längerer Lebensdauer ökologisch lohnen. Zusätzlich sollen anhand einer Umfrage bei Tiefbauingenieurbüros die verschiedenen Lebenszykluskosten ermittelt und mit den Umweltbelastungen ins Verhältnis gesetzt werden. Die erarbeitete Studie soll als Grundlage für die Entscheidungsfindung und die Diskussion der betrachteten Güterwege mit involvierten Stakeholdern verwendet werden.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Studie ist die Ermittlung des Umweltfussabdrucks der drei Güterwege Betonspur-, Kies- und Schwarzbelagweg mit der Methode der Ökobilanzierung.

Weitere Ziele, die in dieser Studie verfolgt werden:

- Lebenszykluskosten (ohne Diskontierung) der drei Güterwegvarianten ermitteln und ins Verhältnis zum Umweltfussabdruck setzen.
- Vergleich des Umweltfussabdrucks der Infrastruktur Güterweg mit dem der Verkehrsemissionen bei tiefem Verkehrsaufkommen.

Im Strassenbau verwendeter Kies besteht im Kanton Aargau zu 80 % aus Wandkies (Kies aus Kiesgruben) und zu 20 % aus Recyclingkies oder Kies aus Steinbrüchen (Wernli, 2016). Gemäss Beschluss der Begleitgruppe soll diese Studie die Normalvariante abbilden und gilt somit explizit für Güterwege, für welche der verwendete Kies aus 100 % Wandkies besteht.

Diese Studie berücksichtigt zwei Erosionsklassen basierend auf der Einteilung aus Salvisberg (2014), da bei höherer Erosion (z.B. aufgrund steileren Geländes) der Unterhalt von Güterwegen aufwändiger sein kann:

- Erosionsklasse 2 (EK 2):
 - tiefes Verkehrsaufkommen (Nebenwege)
 - mittlerer Niederschlag (Mittelland)
 - grosse Besonnung (Flur)
 - < 8 % Längsneigung
- Erosionsklasse 4 (EK 4):
 - tiefes Verkehrsaufkommen (Nebenwege)
 - mittlerer Niederschlag (Mittelland)
 - grosse Besonnung (Flur)
 - 10 % - 12 % Längsneigung

2 Vorgehen und Methodik

Heute besteht Konsens, dass die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz die umfassendste und aussagekräftigste Methode ist, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen. Daher wird diese Methode verwendet, um die Umweltauswirkungen der betrachteten Leistungen zu eruieren.

In diesem Kapitel werden die verwendete Methode, das Vorgehen sowie die getroffenen Annahmen beschrieben.

2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung ("Life Cycle Assessment", LCA) ist eine Methode, um die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt zu erfassen, zu beurteilen und daraus Optimierungspotenziale abzuleiten. Aufgrund der Komplexität der Natur und des globalen Wirtschaftssystems reicht es nicht, nur einzelne Problemstoffe oder lokale Auswirkungen zu betrachten. Aus dem Anspruch an eine umfassende Bewertung ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Methode:

- Möglichst umfassende Berücksichtigung der verschiedenen Umweltauswirkungen
- Berücksichtigung des gesamten Lebensweges
- Quantifizierung der Umweltauswirkungen
- Bewertung der verschiedenen Auswirkungen als Basis für Entscheidungen
- Wissenschaftlich abgestützt, um eine hohe Zuverlässigkeit und Akzeptanz zu erreichen

Die Ökobilanzierung ist diejenige Methode, welche heute diese Anforderungen am besten erfüllt. Die Ergebnisse der Ökobilanz können eingesetzt werden:

- als Entscheidungshilfe, z.B. bei der Auswahl von Produkten
- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen
- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotenzialen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- zur Beurteilung von Massnahmen
- zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nachdem die Fragestellung und die zu untersuchenden Systeme definiert sind, werden die Waren-, Stoff- und Energieflüsse sowie der Ressourcenbedarf erfasst. Anschliessend werden die Auswirkungen auf die Umwelt mit Hilfe von gewählten Indikatoren, welche diese Wirkungen beschreiben, bestimmt. Mit dem Ziel, die Ergebnisse mit einer Kennzahl auszudrücken und damit die Auswertung zu ermöglichen oder zumindest zu erleichtern, kann eine Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen durch eine entsprechende Gewichtung erfolgen.

Nach ISO 14'040/44 (ISO 14'040, 2006; ISO 14'044, 2006) umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen der Zielsetzungen und Systemgrenzen (Rahmenbedingungen)
- Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie des Ressourcenbedarfs (Sachbilanz)
- Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
- Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Bewertung)
- Erarbeiten von Massnahmen (Optimierung)

Wie Abbildung 2 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

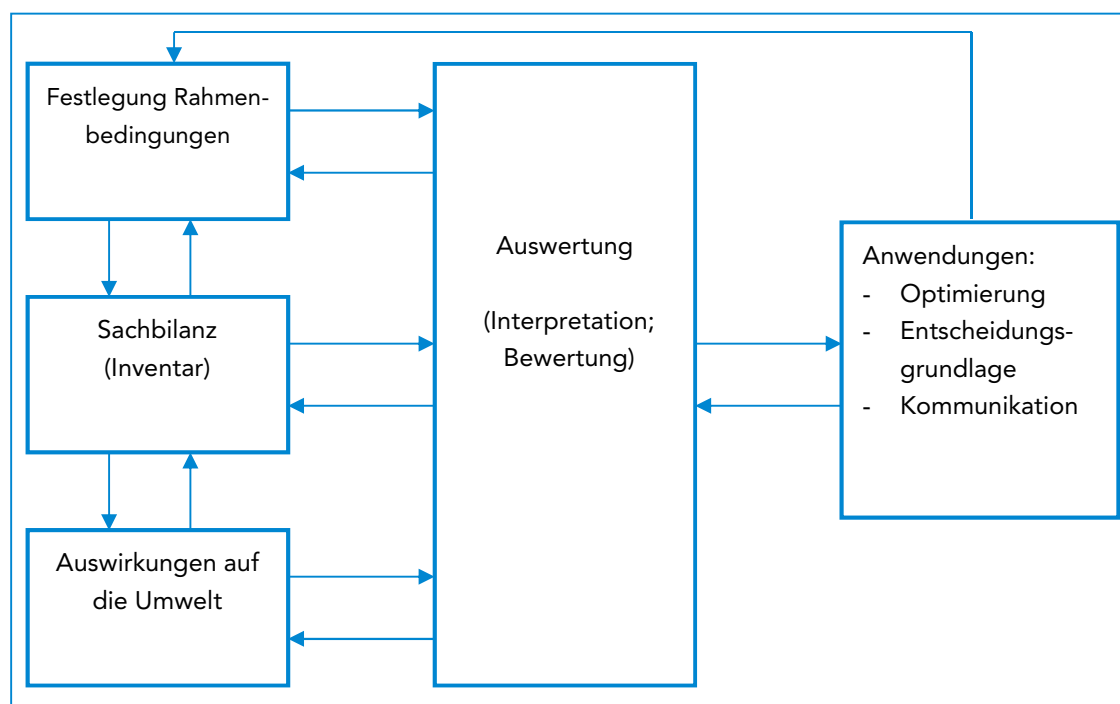


Abbildung 2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040/44

Die vorliegende Studie richtet sich weitgehend nach der Norm ISO 14'040; das Vorgehen entspricht in den wesentlichen Aspekten deren Anforderungen. In gewissen Punkten, wie der Verwendung von gesamt aggregierenden Methoden, geht die vorliegende Studie jedoch über die Norm hinaus.

2.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme hängt von der Zielsetzung bzw. Fragestellung ab. Daraus ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Dabei müssen der zeitliche und geographische Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt werden.

2.3.1 Zielsetzung

Wie in Kapitel 1.2 schon dargelegt, verfolgt diese Studie folgende Ziele:

Das Hauptziel dieser Studie ist die Ermittlung des Umweltfussabdrucks der drei Güterwege Betonspur-, Kies- und Schwarzbelagweg mit der Methode der Ökobilanzierung.

Weitere Ziele, die in dieser Studie verfolgt werden:

- Lebenszykluskosten der drei Güterwegvarianten ermitteln und ins Verhältnis zum Umweltfussabdruck setzen.
- Vergleich des Umweltfussabdrucks der Infrastruktur Güterweg mit dem der Verkehrsemissionen bei tiefem Verkehrsaufkommen.

Dabei berücksichtigt diese Studie zwei verschiedene Erosionsklassen (EK 2 und EK 4).

2.3.2 Funktionelle Einheit (Vergleichsgrösse)

Vergleicht man ein Produkt oder eine Dienstleistung mit Alternativen, müssen diese denselben Nutzen erbringen bzw. dieselbe Funktion erfüllen. Die Grösse, auf welche sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit bezeichnet.

Für einen sinnvollen Vergleich der involvierten Güterwege wurde als funktionelle Einheit 1 Laufmeter (lfm) Weg mit 3 Meter Nutzbreite über 60 Jahre definiert. 60 Jahre entsprechen dabei einer durchschnittlichen Lebensdauer eines Belags-Güterwegs (Speicher, 2016).

2.3.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie

Die Studie richtet sich primär an die Auftraggeber. Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Studie sollen zudem einen sachorientierten Dialog über den Umweltfussabdruck der betrachteten Güterwege fördern. Weitere Zielgruppen sind auch die interessierte Öffentlichkeit, kantonale Fachstellen sowie die zuständigen Gemeindebehörden.

2.3.4 Systemgrenzen

Die Ökobilanz betrachtet die ökologischen Auswirkungen „von der Wiege bis zur Bahre“, also von der Extraktion der Rohstoffe über deren Verarbeitung bis zur finalen Entsorgung. Entsprechend des Ökobilanzansatzes werden soweit möglich alle umweltrelevanten Prozesse über den gesamten Lebensweg erfasst und bewertet.

Inhaltliche Systemgrenze

In das System der Ökobilanz eingeschlossen sind alle als relevant betrachteten Stoff- und Energieflüsse der Herstellung, des Unterhalts und der Entsorgung der betrachteten Güterwege.

Die vorliegende Studie umfasst im Wesentlichen die folgenden Prozesse und Dienstleistungen (siehe auch Abbildung 3):

- Bereitstellung der verbauten Materialien
- Herstellung der Wege
- Unterhalt der Wege
- Rückbau der Wege. Entsorgung und Recycling der Wertstoffe und damit einhergehende Einsparung von Primärmaterialherstellung. Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes.
- Bereitstellung der Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle oder Strom etc. für die involvierten Prozesse

- Für alle diese Prozesse werden die Auswirkungen durch Emissionen in Boden, Luft und Wasser sowie der Ressourcenbedarf, wie energetische Ressourcen oder Landnutzung, berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wurden folgende Aspekte:

- Infrastruktur für die Bereitstellung der Materialien (aufgrund geringer Relevanz)
 Unterschiedlicher Treibstoffverbrauch je nach Belag: Diverse Quellen weisen darauf hin, dass der Treibstoffverbrauch auf Betonbelag geringer ist als auf Schwarzelag (z. B. Milachowski u. a., 2010). Dies gilt jedoch in erster Linie für stark befahrene Strassen und kann nicht ohne weiteres auf die Bedingungen von Güterwegen angewendet werden.

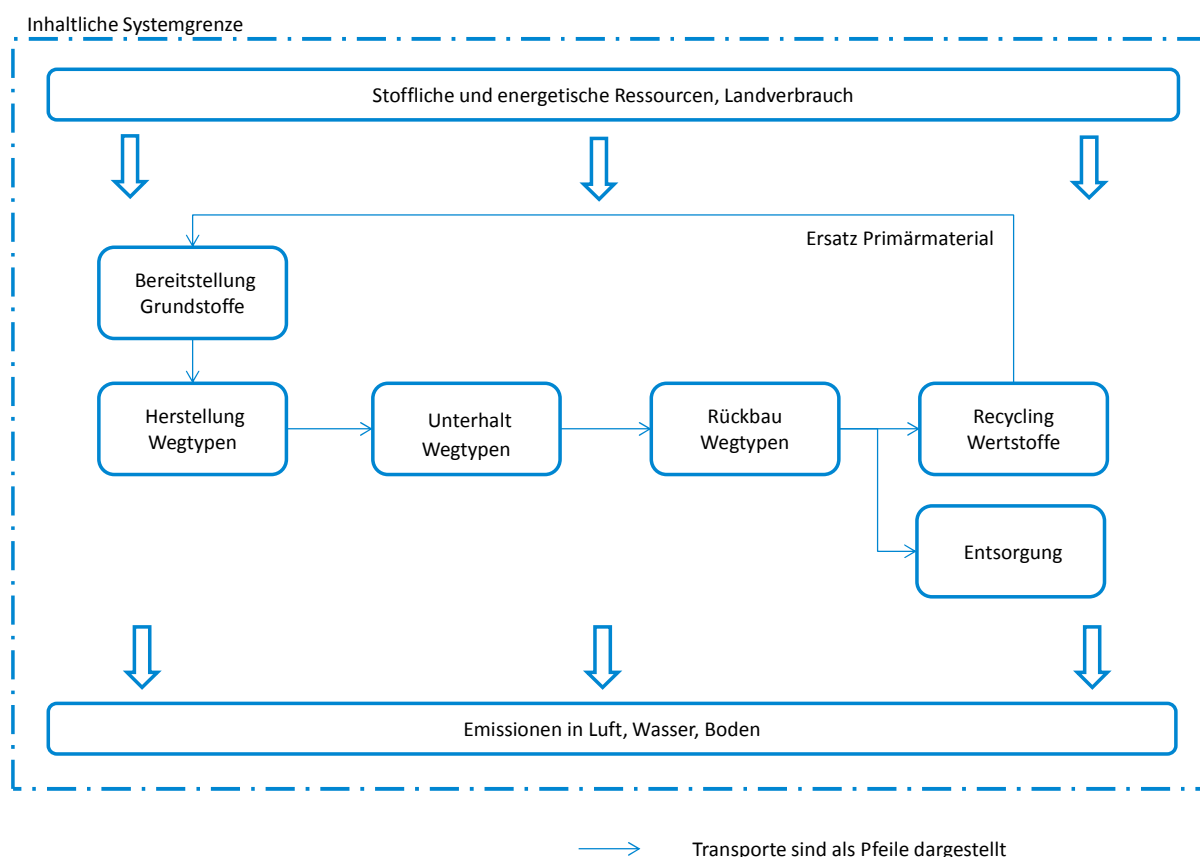


Abbildung 3: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse

Zeitliche Systemgrenze

Die Daten über die Herstellung und den Unterhalt der Güterwege beruhen auf aktuellen Erfahrungswerten von Ingenieurbüros. Die verwendeten Hintergrunddaten stammen aus der Ökoinventardatenbank ecoinvent v3.2 (ecoinvent, 2016).

Geografische Systemgrenze

Die Studie betrachtet Güterwege im Raum Aargau.

2.4 Sachbilanz

2.4.1 Modellierung des Produktsystems

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen und es werden die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

- Die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie Menge an benötigten Rohmaterialien, Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte oder Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme.
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie CO₂, NO_x, SO₂ u. a.

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro v8.0 (PRé Consultants, 2015) berechnet und für die Wirkbilanz verwendet. Die Primärdaten der Güterwege wurden von Ingenieurbüros abgefragt (die detaillierten, verwendeten Daten sind in Kapitel 3.1 dokumentiert). Als Datengrundlage für vorgelagerte und nachgelagerte Prozesse (Sekundärdaten) wurde auf Standarddaten aus ecoinvent v3.2 (ecoinvent, 2016) zurückgegriffen.

2.4.2 Berechnungsgrundlagen und -entscheide

Berechnungsgrundlagen

- Die Güterwege werden erstellt, 60 Jahre benutzt und unterhalten und dann gänzlich rückgebaut.
- Eingesetzter Kies für den Wegbau besteht zu 100 % aus Wandkies. Diese Studie soll die Normalvariante abbilden und gilt somit explizit für Güterwege, für welche der verwendete Kies aus 100 % Wandkies besteht.
- Eingesetzter Asphalt besteht zu 45 % aus Rezyklat.
- Eingesetzter Beton besteht zu 20 % aus Rezyklat.
- Der Aushub des Strassenbaus wird verwertet (vor Ort oder z.B. zur Auffüllung von Kiesabbaustellen).
- Die Verschleisschicht und die Kofferung werden bei einem Rückbau ausgebaut und zu 100 % rezykliert. Dabei ersetzen die rezyklierten Materialien zu 100 % Neumaterialien. Aufgefüllt wird mit Unterboden (B-Horizont) und Oberboden (A-Horizont, Humus, 30 – max. 40 cm).
- Die Änderung der Landnutzung wurde bei allen drei Güterwegen über die gesamte Breite gerechnet. Der Mittelstreifen beim Betonspurweg wurde dabei mit der Nutzung „Strassenrand“ angenähert, um Rechnung zu tragen, dass es sich nicht um eine versiegelte Fläche handelt.
- Bei häufig befahrenen Strassen ist der Umweltfussabdruck des Verkehrs wesentlich relevanter als der der Strasseninfrastruktur (Spielmann u. a., 2007). Bei weniger befahrenen Güterwegen wie Hofzufahrten und Erschliessungswegen wird die Infrastruktur relevanter hinsichtlich des Umweltfussabdruckes. Für den Vergleich des Umweltfussabdrucks der Infrastruktur Weg mit dem der Verkehrsemissionen wurde eine schwache Wegnutzung von 10 Autofahrten pro Tag angenommen.

Umgang mit Rezyklatanteil

Es existieren keine Inventare für Beton oder Asphalt aus Recyclingmaterial in ecoinvent. Daher wurden neue Inventare erstellt, indem basierend auf den passenden ecoinvent Neumaterial-Inventaren dem Rezyklatanteil entsprechend weniger primäre Kiesressourcen zugeordnet wurden. Der Energieverbrauch für die Herstellung von Beton oder Asphalt wurde gleich belassen, da dieser nur geringfügig vom Anteil Sekundärmaterial abhängt.

Umgang mit Entsorgung und Recycling

Für Material, welches rezykliert wird, wird der entsprechende Umweltnutzen gutgeschrieben, da durch die Recyclinganstrengungen die entsprechende Menge Neumaterial wieder eingespart werden kann. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und um negative Zahlen in den Darstellungen zu vermeiden, wurde diese Gutschrift beim Aufwand zur Herstellung der Güterwege angerechnet.

2.5 Wirkbilanz

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich den Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. Um diese Bewertung vorzunehmen, wird folgendermassen vorgegangen:

- **Klassifizierung (Einteilung der Einflüsse bezüglich ihrer Auswirkungen):**
Die Stoffe werden nach ihren unterschiedlichen Wirkungen auf die Umwelt gruppiert.
- **Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt):**
Dabei werden die einzelnen Substanzen entsprechend ihres Schädigungspotenzials bezüglich einer Leitsubstanz gegeneinander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotenziale bezüglich einer bestimmten Umweltauswirkung.

2.6 Bewertung der Umweltbelastungen

Beim Resultat der Wirkbilanz handelt es sich um eine Zusammenstellung von verschiedenen Indikatoren, welche jeweils einen Aspekt der Umweltauswirkungen beschreiben. Um eine fundierte Entscheidungsbasis zu erhalten, können die verschiedenen Auswirkungen gewichtet und zu einer Kennzahl zusammengefasst werden. Die Gewichtung verschiedener Umweltauswirkungen ist ein Prozess, in welchen Werthaltungen einfließen und welcher deshalb für eine hohe Akzeptanz möglichst breit abgestützt wird.

Im Rahmen dieser Studie wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frisknecht & Büsser Knöpfel, 2013) verwendet. Die Bewertung mittels der Methode der ökologischen Knappheit wurde unter Mitarbeit des Bundesamts für Umwelt entwickelt und ist in der Schweiz etabliert. Diese Methode wurde gewählt, weil sie für die Bewertung sowohl die Umweltsituation wie auch die Umweltziele der Schweiz berücksichtigt (vgl. Abbildung 4) und somit bezüglich Werthaltung breit abgestützt ist.

Obwohl diese Methode die schweizerische Umweltpolitik widerspiegelt, hat sie auch international eine hohe Akzeptanz. Die Resultate werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt.

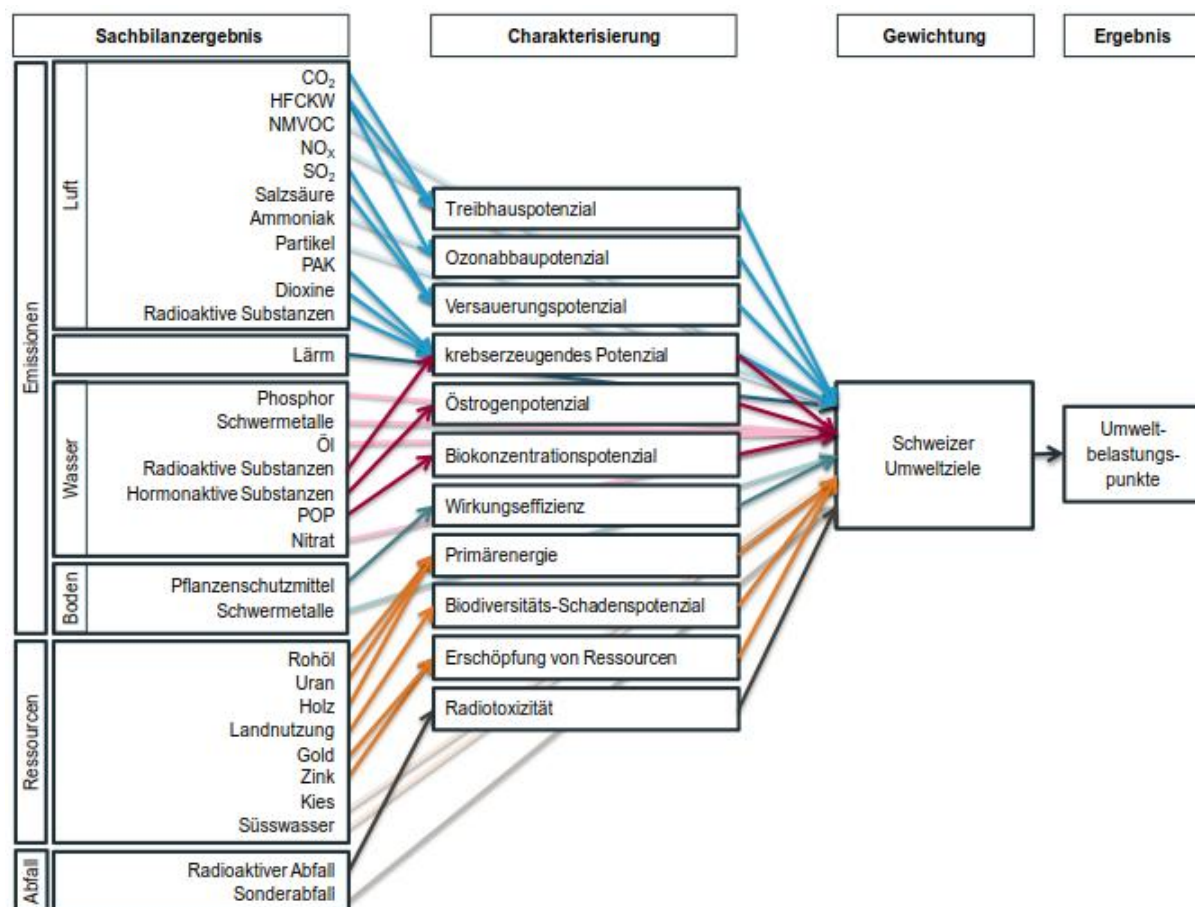


Abbildung 4: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit (Grafik aus Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013)

2.7 Umgang mit Datenunsicherheit

Unsicherheiten der zugrundeliegenden Daten (Annahmen, fehlende Daten etc.) können einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat haben. Die Datenunsicherheit wurde in den Berechnungen berücksichtigt und in Form von Unsicherheitsbalken in den Grafiken dargestellt. Unterschiede gelten als signifikant wenn sich die Unsicherheitsbalken nicht überlappen.

3 Verwendete Daten

3.1 Primärdaten

Bei den Angaben handelt es sich, wenn nicht anders erwähnt, um die Durchschnitte von drei angefragten Ingenieurbüros.

3.1.1 Herstellung der Güterwege

Abbildung 5 zeigt die Querschnitte der drei betrachteten Güterwege (Massangaben in cm).

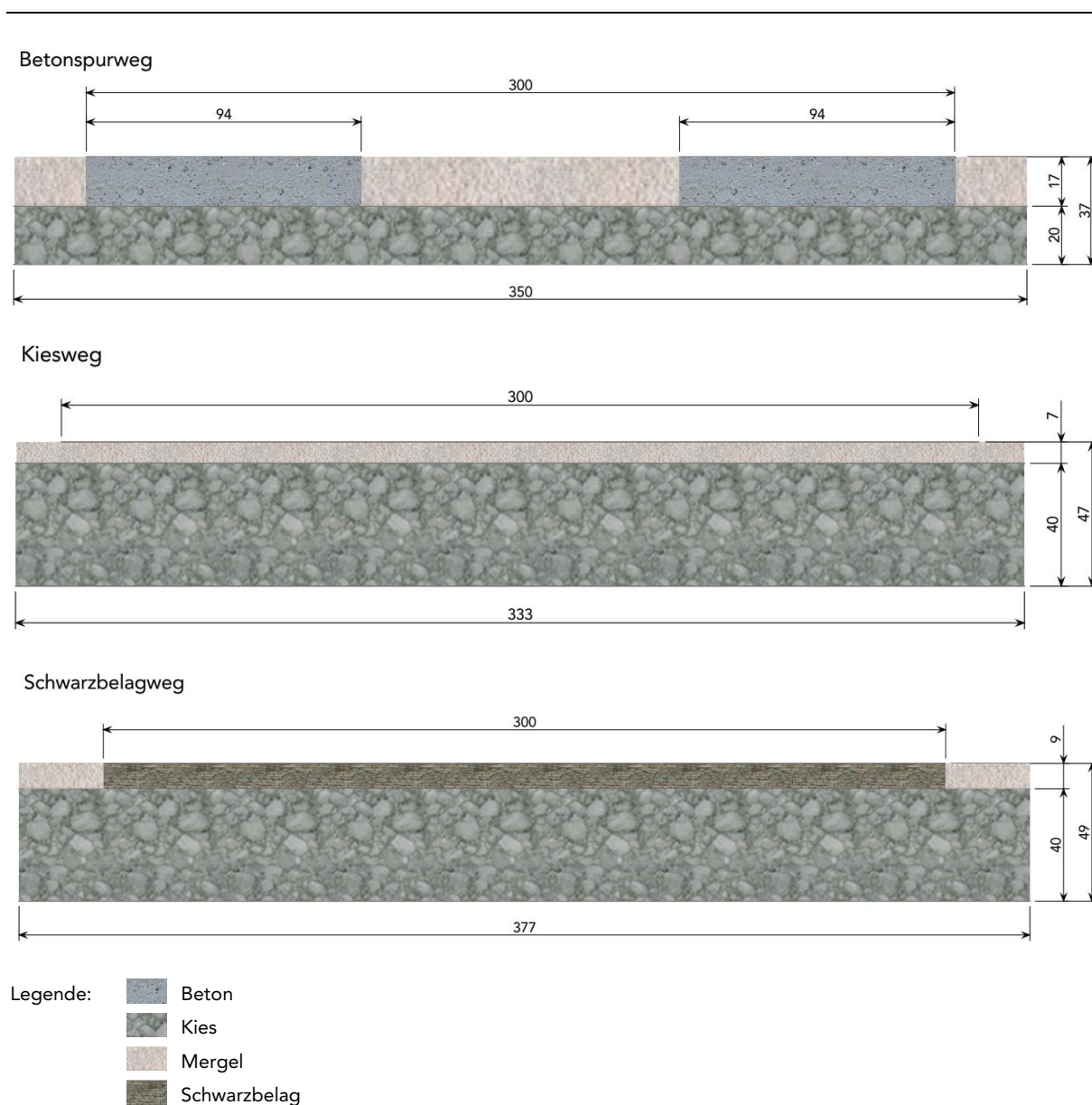


Abbildung 5: Querschnitte der verglichenen Güterwege (Massangaben in cm)

Tabelle 1 fasst die Dimensionen der Güterwege inklusive der Spannweite der erhaltenen Angaben zusammen.

Tabelle 1: Dimensionen der Güterwege

Mittelwert von drei Ingenieurbüros (inkl. Min. und Max.-Nennung bei Abweichungen)

EK 2: Erosionsklasse 2, EK 4: Erosionsklasse 4

	Betonspurweg		Kiesweg		Schwarzbelagweg	
	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4
Koffierung						
Breite in m						
Mittelwert	3.50	3.50	3.33	3.33	3.77	3.77
Min.			3.00	3.00	3.50	3.50
Max.			3.50	3.50	4.00	4.00
Tiefe in m	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40
Verschleisschicht						
Breite in m			3.00	3.00	3.00	3.00
Mittelwert	1.87	1.87				
Min.	1.80	1.80				
Max.	2.00	2.00				
Tiefe in m						
Mittelwert	0.17	0.17	0.07	0.07	0.09	0.09
Min.	0.16	0.16	0.06	0.06	0.07	0.07
Max.	0.18	0.18	0.08	0.08	0.10	0.10

Die verwendeten Materialien und Ressourcen für die Herstellung der Güterwege sind in Tabelle 2 detailliert aufgelistet.

Tabelle 2: Wichtigste Daten der Herstellung der Güterwege

	Einheit	Betonspurweg		Kiesweg		Schwarzbelagweg		Bemerkung / Quelle
		EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	
Aushubmaterial	m ³ /lfm	1.28	1.28	1.58	1.58	1.66	1.66	
Abtransport Aushubmaterial	km	10	10	10	10	10	10	
Koffering								
Breite	m	3.50	3.50	3.33	3.33	3.77	3.77	Mittelwert Umfrage
Tiefe	m	0.20	0.20	0.40	0.40	0.35	0.35	
Kiesgemisch 0/45, 0% Rezyklatanteil	m ³ /lfm	0.70	0.70	1.33	1.33	1.32	1.32	
Diesel für Walzen Koffering	kWh/lfm	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	(Kloubert, 2009)
Verschleisschicht								
Breite	m	1.87	1.87	3.0	3.0	3.0	3.0	Mittelwert Umfrage
Tiefe	m	0.17	0.17	0.07	0.07	0.09	0.09	
Mergel	m ³ /lfm	0.27	0.27	0.22	0.22	0.07	0.07	
Asphalt ACT 22, 45% Rezyklatanteil	kg/lfm					668.6	668.6	
Normalbeton, 20% Rezyklatanteil	m ³ /lfm	0.31	0.31					
Hartfaserstreifen in Fugen	kg/lfm	0.30	0.30					
Fugendübel aus Stahl	kg/lfm	0.79	0.79					
Anlieferung Material	km	10	10	10	10	10	10	
Diesel für Betonfertiger	kWh/lfm	2.4	2.4					(Wirtgen, 2016)
Diesel für Asphaltierung	kWh/lfm					46.8	46.8	(Gaschen, 2013)
Diesel für Walzen Verschleisschicht	kWh/lfm			0.63	0.63	0.63	0.63	(Kloubert, 2009)
Direkte Emissionen*								
PM >10µm	g/lfm	19.7	19.7	16.9	16.9	15.4	15.4	(Spielmann u. a., 2007)
PM 2.5µm - 10µm	g/lfm	5.1	5.1	4.5	4.5	4.1	4.1	(Spielmann u. a., 2007)
NMVOC	g/lfm					0.39	0.39	(Spielmann u. a., 2007)

* Verbrennungsemissionen der Maschinen werden direkt via Verbrennung von Diesel berücksichtigt und sind hier nicht aufgelistet.

3.1.2 Unterhalt der Güterwege

Tabelle 3 enthält sämtliche Unterhaltsarbeiten und die damit verbundenen Materialaufwände während einer Laufzeit von 60 Jahren. Während dieser Periode fallen beim Betonspurweg zwei periodische Wiederinstandstellungen (PWI) an, bei den anderen beiden Güterwegtypen jeweils vier.

Tabelle 3: Wichtigste Daten der Unterhaltsarbeiten während 60 Jahren der Güterwege

	Einheit	Betonspurweg		Kiesweg		Schwarzbelagweg		Bemerkung / Quelle
		EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	
Laufender Unterhalt								
Mergel	m ³ /lfm	0.12	0.17	0.89	1.51	0.03	0.07	
Periodischer Unterhalt								
Mergel	m ³ /lfm	0.12	0.20	0.44	0.52	0.16	0.24	
Kiesgemisch 0/45, 0% Rezyklatanteil	m ³ /lfm			0.99	1.26	0.48	0.79	
Normalbeton, 20% Rezyklatanteil	m ³ /lfm	0.03	0.07					
Mörtel, Injektionsharz, Bitumen	kg/lfm	0.43	0.85					
Splitt in Bitumenemulsion	kg/lfm					102	162	
Asphalt ACT 22, 40% Rezyklatanteil	kg/lfm					252	356	
Direkte Emissionen*								
PM > 10 µm	g/lfm	7.4	13.8	22.8	31.9	8.9	14.0	(Spielmann u. a., 2007)
PM 2.5 µm - 10µm	g/lfm	1.9	3.4	6.0	8.4	2.3	3.7	(Spielmann u. a., 2007)
NMVOC	g/lfm					0.14	0.21	(Spielmann u. a., 2007)

* Verbrennungsemissionen der Maschinen werden direkt via Verbrennung von Diesel berücksichtigt und sind hier nicht aufgelistet.

3.1.3 Rückbau der Güterwege

Tabelle 4 enthält die wichtigsten Angaben zum Rückbau der Güterwege. Die Verschleisschicht wie auch die Kofferung werdenvollständig rückgebaut und der ursprüngliche Zustand wird wiederhergestellt.

Tabelle 4: Wichtigste Daten zum Rückbau nach 60 Jahren

	Einheit	Betonspurweg		Kiesweg		Schwarzbelagweg	
		EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4
Aushub	m ³ /lfm	1.28	1.28	1.58	1.58	1.66	1.66
Abtransport Aushub	km					10	
Transport Auffüll-Material	km					10	
Verwertungsweg						Recycling	

3.1.5 Kostenübersicht der Güterwege

Tabelle 5 liefert die Kostenangaben zur Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der drei Güterwege sowie die Spannweite der erhaltenen Angaben. Die Herstellungskosten enthalten sämtliche Arbeiten vom Aushub bis zur Fertigstellung des Güterwegs, jedoch ohne Planungskosten. Die Unterhaltskosten berücksichtigen alle jährlichen und periodischen Unterhaltsarbeiten. Bei den Entsorgungskosten wurden die Rückbauarbeiten, Abtransport und allfällige Entsorgungskosten berücksichtigt.

Es wurde keine Diskontierung durchgeführt, da dies bei der Planung und Ausschreibung von Güterwegen gemäss den Erfahrungen der angefragten Ingenieurbüros nicht üblich ist.

Tabelle 5: Lebenszykluskosten der Güterwege über 60 Jahre

Mittelwert von drei Ingenieurbüros (inkl. Min. und Max.-Nennung)

	Betonspurweg		Kiesweg		Schwarzbelagweg	
	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4	EK 2	EK 4
CHF Herstellung						
Mittelwert	280	288	175	185	320	327
Min.	250	275	120	150	260	280
Max.	300	300	225	225	400	400
CHF Unterhalt						
Mittelwert	137	195	239	314	315	410
Min.	80	115	210	273	250	350
Max.	183	210	270	350	390	480
CHF Entsorgung						
Mittelwert	65	65	60	60	62	62
CHF Total						
Mittelwert	482	548	474	559	697	799
Min.	395	458	390	483	572	693
Max.	548	625	555	635	852	942

3.2 Sekundärdaten

Die in Kapitel 3.1 aufgelisteten Materialien und Ressourcen wurden mit den entsprechenden Inventaren aus ecoinvent v3.2 verknüpft (Tabelle 6), um die vollständige Sachbilanz zu berechnen.

Tabelle 6: Verknüpfung der Primärdaten mit den entsprechenden Sekundärdaten aus ecoinvent v3.2

Primärdaten	Sekundärdaten	Bemerkung
Direkter Ressourcenverbrauch		
Landnutzung Verschleisssschicht	Occupation, traffic area, road network	
Landnutzung Wegrand, Mittelstreifen	Occupation, traffic area, road embankment	
Inputs aus der Technosphäre		
Kiesgemisch 0/45, 0% Rezyklatanteil	Gravel, crushed {CH}	
Mergel	Limestone, crushed, washed {CH}	
Asphalt ACT 22, 45% Rezyklatanteil Besteht aus 4.8% Bitumen 95.2% Kies	bitumen adhesive comp., hot {RER}, gravel round {CH}	45% Reduktion des Primärkiesbedarfs aufgrund 45% Rezyklatanteil
Normalbeton, 20% Rezyklatanteil	Concrete, normal {CH}	20% Reduktion des Primärkiesbedarfs aufgrund 20% Rezyklatanteil
Hartfaserstreifen in Fugen	Fibre cement corrugated slab {CH}	
Fugendübel aus Stahl	Steel, low alloyed, hot rolled {GLO}	
Mörtel, Injektionsharz, Bitumen	bitumen adhesive compound, hot {RER}	
Splitt in Bitumenemulsion	11% bitumen adhesive compound, hot {RER}, 89% gravel crushed {CH}	
An- und Wegtransport Material	Transport, freight, lorry 7.5-16t EURO4	
Aushub von Material	Excavation, hydraulic digger {RER}	
Dieserverbrauch Baumaschinen	Diesel, burned in building machine {GLO}	
Direkte Emissionen		
PM >10µm	Particulates, >10 um	
PM 2.5µm - 10µm	Particulates, >2.5 um, and < 10 um	
NMVOG	NMVOG, non-methane volatile organic compounds	
Rückbau		
Rückbau Kofferung / Verschleisssschicht in Deponie	Inert waste, to inert material landfill	
Rückbau Kofferung / Verschleisssschicht in Recycling		Gutschrift für Ersatz Primärmaterial (siehe Kapitel 2.4.2)

4 Resultate und Diskussion

4.1 Vergleich der Umweltfussabdrücke der Güterwege

Der Betonspurweg weist sowohl in der Erosionsklasse 2 wie auch in der Erosionsklasse 4 einen um rund 40 % tieferen Umweltfussabdruck auf als die anderen beiden Güterwege (siehe Abbildung 6). Ausschlaggebend für den Unterschied ist dabei weniger die Herstellung, als vielmehr der Unterhalt der Wege. Der Umweltfussabdruck des Unterhalts des Betonspurwegs ist wesentlich tiefer als jener der beiden anderen Güterwege aufgrund der langen Lebensdauer und der damit verbundenen geringeren Unterhaltsarbeiten.

Der Umweltfussabdruck des Kieswegs ist gleich hoch wie der des Schwarzbelagwegs: Der Kiesweg weist zwar einen tieferen Umweltfussabdruck für die Herstellung auf, jedoch ist der Unterhalt entsprechend aufwändiger mit entsprechend höherem Umweltfussabdruck.

Der Umweltfussabdruck der Güterwege in der Erosionsklasse 4 liegt leicht höher als in der Erosionsklasse 2 (23 % beim Kiesweg, 17 % beim Schwarzbelagweg und 7 % beim Betonspurweg). Der Grund liegt im höheren Unterhalt der Güterwege in der Erosionsklasse 4.

Die Unterhaltsarbeiten insbesondere beim Kiesweg können über 60 Jahre betrachtet beträchtlich schwanken je nach Annahmen und Wegsituation. Die Unsicherheitsbalken in der Abbildung 6 basieren hauptsächlich auf diesen Schwankungen der Unterhaltsarbeiten (aber auch der Herstellungsangaben) und repräsentieren den Minimal- respektive Maximalaufwand basierend auf der Umfrage.

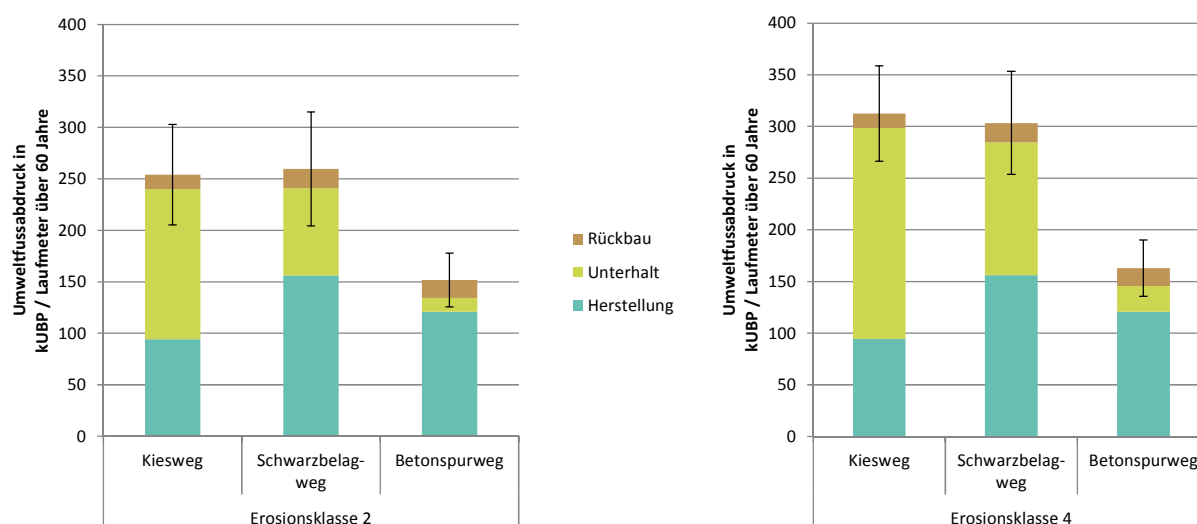


Abbildung 6: Umweltfussabdruck der verglichenen Güterwege

4.2 Prozessbezogene Relevanzanalyse

Die relevanten Prozessbeiträge zum Umweltfussabdruck sind in Abbildung 7 dargestellt und sind für die beiden Erosionsklassen 2 und 4 sehr ähnlich. Die relevanten Beiträge stammen vor allem von der Bereitstellung der eingesetzten Materialien. Kies trägt beim Kiesweg gut ein Drittel zum Umweltfussabdruck bei, beim Schwarzbelagweg noch knapp einen Fünftel und beim Betonspurweg noch etwa einen Zehntel. Mergel führt einzig beim Kiesweg zu einem relevanten Beitrag des Umweltfussabdrucks (etwa ein Viertel). Asphalt ist einzig umweltrelevant beim Schwarzbelagweg (gut ein Viertel Beitrag) und die Herstellung von Beton trägt entscheidend zum Resultat des Betonspurwegs bei (etwa ein Drittel).

Neben den eingesetzten Materialien ist insbesondere die Änderung der Landnutzung relevant für den Umweltfussabdruck. Diese ist beim Betonspurweg absolut gesehen leicht tiefer als bei den anderen beiden Wegen. Der Grund ist, dass der Betonspurweg eine weniger grosse versiegelte Fläche aufweist als die anderen beiden Wege. Die Änderung der Landnutzung macht etwa ein Drittel des Resultates des Betonspurwegs aus (respektive einen Fünftel bis einen Sechstel der Kies- und Schwarzbelagwege, je nach Erosionsklasse).

Materialtransporte verursachen rund ein Sechstel des Umweltfussabdruckes beim Betonspur- und Kiesweg sowie ein Zehntel beim Schwarzbelagweg. Der Maschineneinsatz trägt beim Schwarzbelagweg rund ein Achtel zum Umweltfussabdruck bei. Bei den anderen beiden Güterwegen ist er nicht relevant. Die anderen Materialien sind ebenfalls nicht relevant.

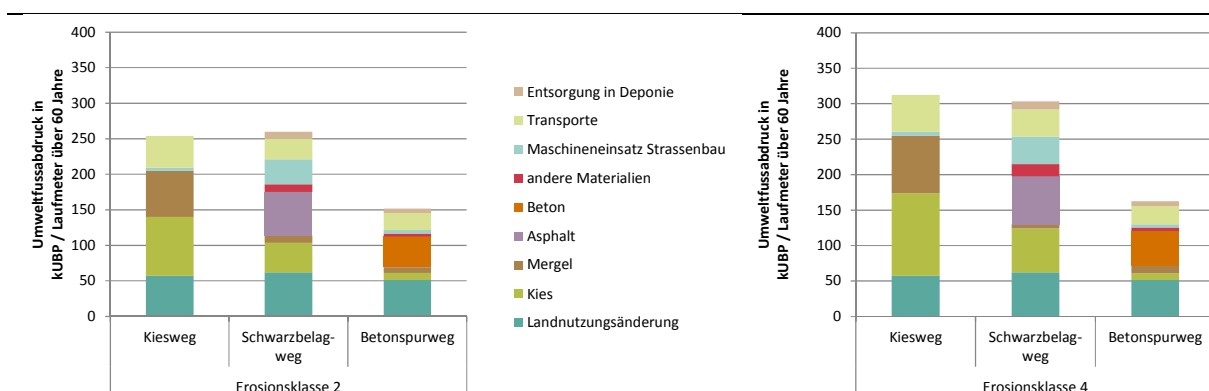


Abbildung 7: Prozessbezogene Relevanzanalyse der verglichenen Güterwege

4.3 Effektbezogene Relevanzanalyse

Die Ressourcen- und Emissionsbeiträge zum Umweltfussabdruck sind in Abbildung 8 dargestellt. Auch hier zeigen sich zwischen den beiden Erosionsklassen 2 und 4 relativ gesehen kaum Unterschiede. Der Verbrauch an mineralischen Ressourcen (insbesondere der Ressource Wandkies)¹ ist beim Kiesweg mit etwa 50 % der grösste Beitrag zum Umweltfussabdruck. Ansonsten sind bei allen drei Güterwegen die folgenden weiteren Ressourcen- und Emissionsbeiträge – in Abhängigkeit vom Wegtyp – mehr oder weniger von Bedeutung für den gesamten Umweltfussabdruck:

- Landnutzungsänderung von Grünfläche zu befestigter Fläche mit Auswirkung auf die lokale Ökologie
- Emission von Luftschadstoffen wie NO_x und Partikel
- Emission von Treibhausgasen, hier hauptsächlich CO₂

Die erwähnten Emissionen werden hauptsächlich durch die Transporte, den Einsatz der Strassenmaschinen und – im Falle des Betonspurweges – durch die Betonherstellung generiert.

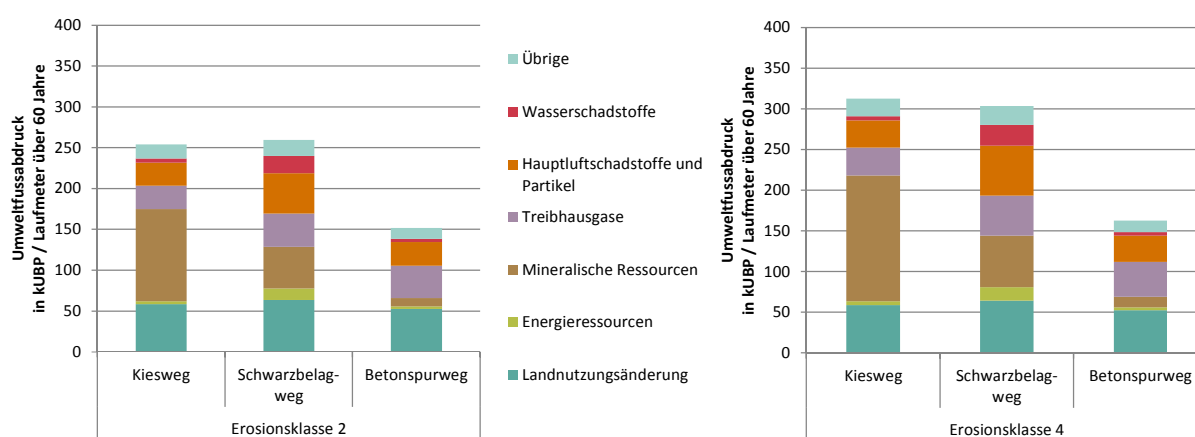


Abbildung 8: Emissions- und Ressourcenbeiträge zum Umweltfussabdruck der verglichenen Güterwege

4.4 Lebenszykluskosten der verglichenen Güterwege

Die Lebenszykluskosten über 60 Jahre sind beim Kiesweg in etwa gleich hoch wie beim Betonspurweg, dies bei beiden betrachteten Erosionsklassen. Der Kiesweg weist zwar die tieferen Herstellungskosten auf, jedoch sind die Unterhaltskosten höher als beim Betonspurweg. Der Schwarzbelagweg ist für beide Erosionsklassen etwa 45 % teurer als die beiden anderen Wege. Einerseits hat er die höchsten Herstellungskosten und andererseits auch die höchsten Unterhaltskosten.

Die in der Umfrage erhaltenen Kostenangaben variieren zum Teil beachtlich. Die Unsicherheitsbalken in der Abbildung 9 widerspiegeln die Minimal- respektive Maximalkostenangaben der Umfrage.

¹ Die Methode der ökologischen Knappheit 2013 berücksichtigt nicht nur Emissionen, sondern auch den Verbrauch von Ressourcen per se. Der Verbrauch von Wandkies wird dabei mit rund 30 UBP pro kg Kies bewertet im Vergleich zu beispielsweise CO₂-Emissionen mit rund 460 UBP pro kg CO₂. Aufgrund der hohen Menge Wandkies, welche insbesondere für Kieswege in der einen oder anderen Form verwendet wird, spielt der mineralische Ressourcenverbrauch eine viel wichtigere Rolle als in Ökobilanzen herkömmlicher Produkte.

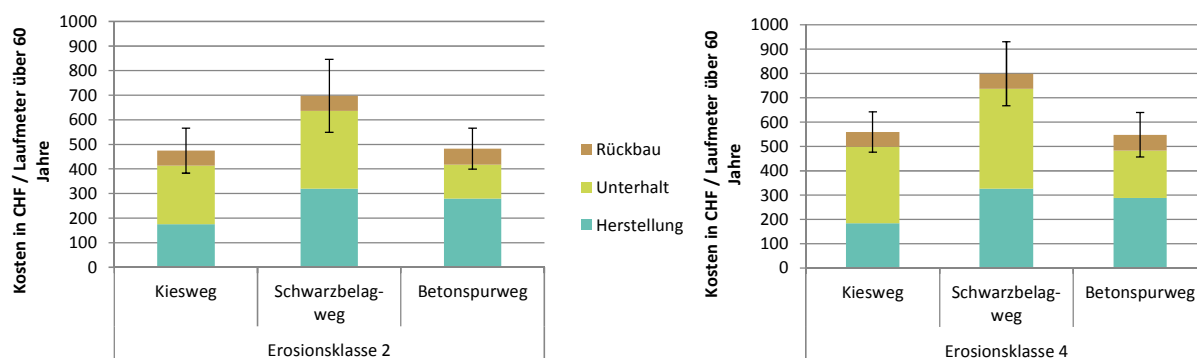


Abbildung 9: Kosten der verglichenen Güterwege

4.5 Gegenüberstellung Umweltfussabdruck und Kosten

Der Betonspurweg hat den tiefsten Umweltfussabdruck und ist auch bei den Kosten nicht teurer als die anderen Güterwege. Das gilt sowohl für die Erosionsklasse 2 wie auch für die Erosionsklasse 4 (Abbildung 10). Werden der Umweltfussabdruck und die Kosten gleichermaßen als Grundlage für die Entscheidungsfindung einbezogen, ist der Betonspurweg die beste Option, d. h. er weist die beste Ökoeffizienz auf.

Der Kiesweg weist einen ähnlich hohen Umweltfussabdruck auf wie der Schwarzbelagweg. Er ist jedoch über die ganzen Lebenszykluskosten betrachtet wesentlich günstiger als der Schwarzbelagweg. Das gilt sowohl für die Erosionsklasse 2 wie auch für die Erosionsklasse 4 (Abbildung 10). Werden der Umweltfussabdruck und die Kosten gleichermaßen als Grundlage für die Entscheidungsfindung einbezogen, ist der Kiesweg dem Schwarzbelagweg vorzuziehen.

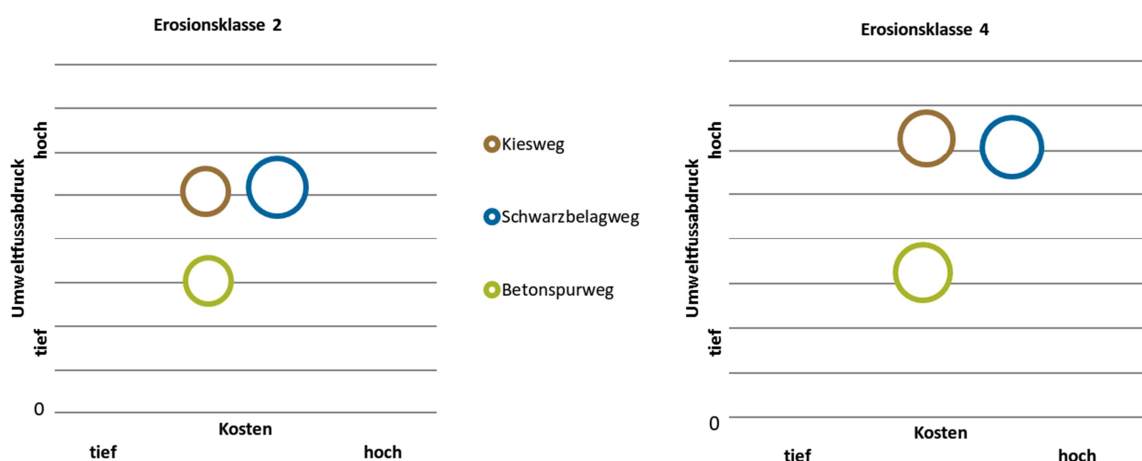


Abbildung 10: Gegenüberstellung Umweltfussabdruck und Kosten der verglichenen Güterwege

Die Grösse der Kreise indiziert approximativ die Unsicherheiten in beiden Dimensionen.

4.6 Vergleich der Umweltrelevanz von Weginfrastruktur versus Verkehrsemissionen

Während bei häufig befahrenen Strassen die Verkehrsemissionen wesentlich relevanter sind als die Strasseninfrastruktur, welche höchstens ein Zehntel zum Umweltfussabdruck beiträgt (Spielmann u. a., 2007), ist dies bei wenig befahrenen Strassen wie Hofzufahrten und Erschliessungswegen gerade umgekehrt (siehe Abbildung 11 am Beispiel EK2). Unter der Annahme, dass zehn Autofahrten pro Tag stattfinden, trägt die Weginfrastruktur etwa eineinhalb (Betonspurweg) bis drei (Kies- und Schwarzbelagweg) Mal so viel zum Umweltfussabdruck bei.

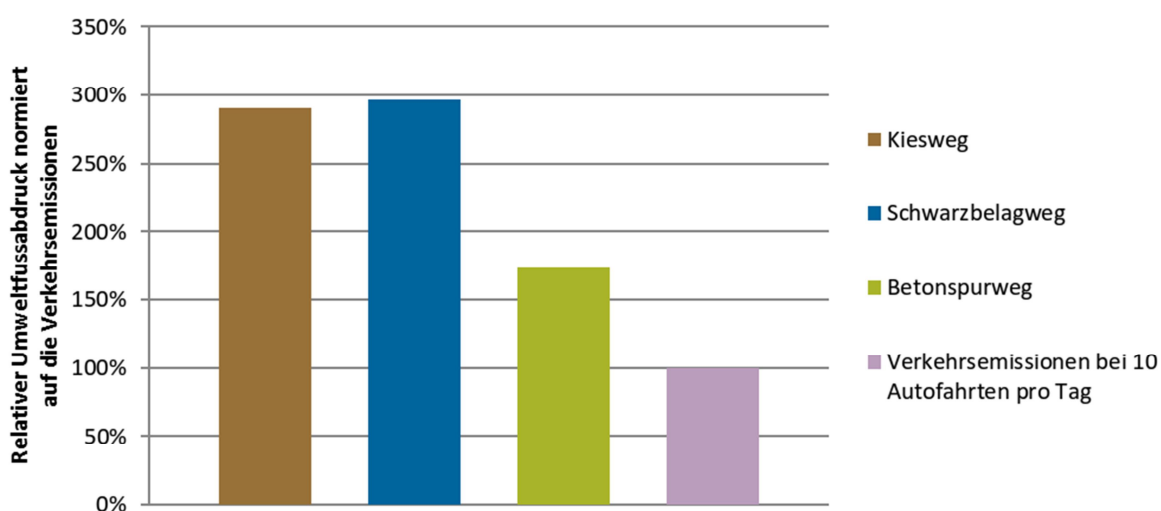


Abbildung 11: Einfluss der Weginfrastruktur (Erosionsklasse 2) im Vergleich zu den Verkehrsemissionen von zehn Autofahrten pro Tag auf den Umweltfussabdruck eines befahrenen Güterwegs.

5 Schlussfolgerungen

Der Vergleich der drei Güterwege hat aus Umweltsicht gezeigt, dass der Betonspurweg sowohl in der Erosionsklasse 2 wie auch in der Erosionsklasse 4 die umweltfreundlichste Option ist. Dabei erweist sich die lange Lebensdauer und die damit einhergehenden geringen Unterhaltsarbeiten als wesentlicher Vorteil im Vergleich zu den anderen beiden Güterwegen. Zwischen dem Kiesweg und dem Schwarzbelagweg besteht kein Unterschied hinsichtlich des Umweltfußabdrucks. Das gilt für beide betrachteten Erosionsklassen.

Der Betonspurweg weist ähnliche hohe Lebenszykluskosten auf wie der Kiesweg. Die Herstellung ist zwar wesentlich teurer. Dies wird jedoch wieder wettgemacht mit relativ tiefen Unterhaltskosten. Merkllich höher sind die Kosten für einen Schwarzbelagweg.

Trotz der aufwändigen Herstellung ist der Betonspurweg dank seiner Langlebigkeit und der damit verbundenen geringen Unterhaltsarbeiten eine aus Umwelt- und Kostensicht sinnvolle Variante bei der Erstellung von Erschliessungswegen sowohl in der Erosionsklasse 2 wie auch in der Erosionsklasse 4.

Für schwach befahrene Güterwege ist der Umweltfußabdruck der Weginfrastruktur etwa eineinhalb bis drei Mal höher als der Umweltfußabdruck durch den eigentlichen Verkehr. Für umweltbewusste Auftraggeber ist die Wahl der Ausbauvariante von Güterwegen also ein relevanter Entscheid.

6 Literatur

ecoinvent. (2016). *ecoinvent 2016: Version 3.2*. Swiss Center for Life Cycle Inventories.

Frischknecht, R., & Büsser Knöpfel, S. (2013). *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (No. 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt.

Gaschen, A. (2013). Vergleichende Ökobilanz von Niedertemperatur-Asphaltbelägen - Energiebilanz und Emissionen unter der Lupe. *Umwelt Perspektiven*, 2.

ISO 14040. (2006). *Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines*. Geneva.

ISO 14044. (2006). *Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework*. Geneva.

Kloubert, H.-J. (2009). *Grundlagen der Asphaltverdichtung Verdichtungsverfahren, Verdichtungsgeräte, Walztechnik*. Boppard, Deutschland: BOMAG GmbH, Fayat Group.

Milachowski, C., Stengel, T., & Gehlen, C. (2010). Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts. *Aktuelles zum Thema Betonstrassen - update 2/10*.

PRé Consultants. (2015). *SimaPro 8 (Version 8.0.5)*. PRé Consultants.

Salvisberg, U. (2014). *Güterwege in der Landwirtschaft - Grundsätze für Subventionierungsvorhaben*. Bern: Bundesamt für Landwirtschaft. Abgerufen von http://www.suissemelio.ch/files/kreisschreiben/de/2014/2_2014_B1.pdf

Speicher, J. (2016). *Unterhaltsarbeiten an Güterstrassen*. Sursee: Bau, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement, Kanton Luzern. Abgerufen von https://lawa.lu.ch/-/media/LAWA/Dokumente/Landwirtschaft/strukturverbesserungen_und_PRE/Handbuch_Unterhaltarbeiten_Gueterstrassen.pdf?la=de-CH

Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R., & Tuchschnid, M. (2007). Transport services: Ecoinvent report no. 14. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf*. Abgerufen von http://db.ecoinvent.org/reports/14_Transport.pdf

Wernli, R. (2016, August). Materialzusammensetzung der Koffierung von Güterwegen, pers. Mitteilung, Ackermann + Wernli.

Wirtgen. (2016). *Handbuch für den Betoneinbau mit Gleitschalungsfertigern - Teil 1: Monolithische Profile und schmale Wege*. Wirtgen Group.

Anhang: Resultate in Tabellenform

Tabelle 7: Übersicht Umweltfussabdruck (in kUBP) der drei Güterwege

	Erosionsklasse 2			Erosionsklasse 4		
	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg
Herstellung	94	156	121	94	156	121
Unterhalt	146	85	14	204	129	24
Rückbau	14	19	17	14	19	17
Total	254	260	152	312	303	163
Unsicherheit in %	19%	21%	17%	15%	16%	17%

Tabelle 8: Beitrag der Inputs zum Umweltfussabdruck (in kUBP) der drei Güterwege

Strasstyp	Erosionsklasse 2			Erosionsklasse 4		
	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg
Landnutzungsänderung	57	62	51	57	62	51
Kies	83	41	10	116	62	10
Mergel	65	10	8	81	6	10
Asphalt	-	61	-	-	68	-
Beton	-	-	43	-	-	49
andere Materialien	-	11	4	-	17	5
Maschineneinsatz Strassenbau	5	35	5	5	39	5
Transporte	44	29	24	52	39	25
Entsorgung in Deponie	-	9	6	-	11	7
Total	254	260	152	312	303	163

Tabelle 9: Beitrag der Ressourcen und Emissionen zum Umweltfussabdruck (in kUBP) der drei Güterwege

Strassentyp	Erosionsklasse 2			Erosionsklasse 4		
	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg
Landnutzungsänderung	58	64	52	59	64	52
Energieressourcen	4	14	3	5	17	4
Mineralische Ressourcen	113	51	10	155	63	13
Treibhausgase	29	41	40	34	49	43
Hauptluftschadstoffe und Partikel	28	49	29	33	61	32
Wasserschadstoffe	5	21	4	6	26	4
Übrige	17	20	13	21	23	14
Total	254	260	152	312	303	163

Tabelle 10: Übersicht Lebenszykluskosten (in CHF) der drei Güterwege

	Erosionsklasse 2			Erosionsklasse 4		
	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg	Kiesweg	Schwarzbelagweg	Betonspurweg
Herstellung	175	320	280	185	327	288
Unterhalt	239	315	137	314	410	195
Entsorgung	60	62	65	60	62	65
Total	474	697	482	559	799	548
Unsicherheit in %	19%	21%	17%	15%	16%	17%