

Bericht

Verwertungspflicht des Gleisaushub- bes: Behandlungsverfahren und Ver- wertungspotential

Phase B: Ökobilanz, Kosten und Öko-Effizienz

Auftraggeberin

Bundesamt für Verkehr

Verfasser

Thomas Kägi, Gavin Roberts, Fredy Dinkel, Carbotech AG, Basel

Basel, März 2022

Impressum

Titel

Verwertungspflicht des Gleisaushubes: Behandlungsverfahren und Verwertungspotenzial.
Phase B: Ökobilanz, Kosten und Öko-Effizienz

Auftraggeberin

Bundesamt für Verkehr

Auftragnehmer

Carbotech AG, Basel

Autoren

Thomas Kägi

Gavin Roberts

Dr. Fredy Dinkel

Projektleitung / Kontakt

Thomas Kägi

+41 44 444 20 17

t.kaegi@carbotech.ch

Hinweis

Diese Studie wurde im Auftrag des BAV verfasst. Für den Inhalt ist ausschliesslich der Auftragnehmer verantwortlich.

Version und Datum

v1.4, März 2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Ausgangslage und Zielsetzung	9
2 Methodik und Vorgehen	11
2.1 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	12
2.2 Ziel und Rahmenbedingungen	13
2.2.1 Zielsetzung	13
2.2.2 Funktionelle Einheit	13
2.2.3 Systemgrenzen	13
2.2.3.1 Zeitliche Systemgrenzen	14
2.2.3.2 Systemerweiterung Schotter- und Kiesersatz	14
2.2.4 Zielgruppe	14
2.2.5 Grenzen der Studie	14
2.2.5.1 Inhaltliche Grenzen	14
2.2.5.2 Formale Grenzen	14
2.3 Sachbilanz	15
2.3.1 Modellierung des Produktsystems	15
2.3.2 Vordergrunddaten und Abschätzungen	15
2.3.3 Hintergrunddaten	18
2.4 Unsicherheiten und Sensitivitätsanalysen	18
2.5 Wirkbilanz	18
2.6 Bewertung der Umweltbelastung	19
2.6.1 Die Methode der ökologischen Knappheit	19
2.6.2 Ergänzende Bewertung der Hartstein-Ressourcen	21
2.6.2.1 Charakterisierung	22
2.6.2.2 Normierung	22
2.6.2.3 Gewichtung	22
2.6.2.4 Ökofaktor für Hartstein	22
3 Resultate und Diskussion	23
3.1 Resultate Umweltfussabdruck (MöK 2021)	23
3.1.1 Schotterreinigung vor Ort vs. Schotteraushub	23
3.1.2 Schotteraushub mit Unterbau; getrennt vs. zusammen	27
3.1.3 Unsicherheitsanalyse	30
3.2 Kosten	31
3.3 Öko-Effizienz	32
4 Fazit und Empfehlungen	33
5 Abkürzungen und Glossar	34
6 Literatur	35

Zusammenfassung

Die Studie hat zum Ziel, verschiedene Verwertungswege von Gleisaushub bezüglich der Umweltauswirkungen und Kosten zu bewerten. Insbesondere sollen verschiedene Arten der Reinigung bzw. Aufbereitung von Bahnschotter und Unterbau sowie deren Wiederverwertung bzw. Deponierung untersucht werden. Dabei stehen Fragen im Zentrum wie:

- Lohnt sich der Mehraufwand, um einen möglichst hohen Anteil Bahnschotter wieder als Schotter im Gleisbau einsetzen zu können oder ist die Wiederverwertung von Bahnschotter als Kiesersatz ebenso wünschbar?
- Soll die Reinigung bzw. Aufbereitung von Bahnschotter gleisgebunden oder zentral erfolgen?
- Falls zusätzlich zur Schotterreinigung der Unterbau ersetzt wird, soll im Hinblick auf eine Wiederverwertung der Ausbau getrennt erfolgen?

Diese Fragestellungen sind eng verbunden mit der Bewertung der Knappheit der Hartgesteinsressourcen, welche für den Gleisschotter benötigt werden. Entsprechend wurde diesem Aspekt eine entsprechende Beachtung geschenkt.

Die ökologische Bewertung erfolgte mit der Methode der Ökobilanzierung, welche den gesamten Lebensweg sowie eine Vielzahl von Umweltauswirkungen, wie Beeinträchtigung von Ökosystemen, menschliche Gesundheit, Klimaauswirkungen oder Ressourcennutzungen berücksichtigt und heute als die umfassendste und verlässlichste Methode gilt, um die Umweltauswirkungen menschlicher Tätigkeiten zu analysieren. Bei den Kosten wurden dieselben Systemgrenzen wie bei der ökologischen Analyse betrachtet. Dies bedeutet, dass die gesamten Kosten vom Ausbau über die Transporte, Aufbereitung bis zur Wiederverwertung bzw. Deponierung berücksichtigt wurden. Um zu erkennen, welche Varianten sowohl aus ökologischer wie auch aus ökonomischer Sicht optimal sind, wurde zudem eine Öko-Effizienz-Analyse durchgeführt.

Um die obgenannten Fragen zu beantworten, wurden mit der Auftraggeberin verschiedene zu untersuchende Varianten definiert, siehe Tabelle 1. Bei den Varianten A1, B1, C1 und D1, bei denen das gesamte Material deponiert wird, handelt es sich um Vergleichsvarianten, welche in der Form nicht praktiziert werden. Sickerpackung und Bankettmaterial wurden nach Absprache mit der Auftraggeberin nicht weiter berücksichtigt. Als Vergleichsbasis, funktionelle Einheit, wurde in dieser Studie jeweils 1 Gleislaufmeter (lfm) betrachtet. Das heisst, es wird die Dienstleistung verglichen, um 1 Gleislaufmeter verschmutzten Bahnschotter und teilweise Unterbau auszubauen und einer Wiederverwertung bzw. Deponierung zuzuführen. Um den Nutzen des Recyclings von Bahnschotter in andere Anwendungen zu berücksichtigen, erfolgte eine Systemerweiterung, welche die Bereitstellung der entsprechenden Materialien berücksichtigt, welche dank des Recyclings nicht bereitgestellt werden müssen. Ausgewiesen wird diese Systemerweiterung in Form einer entsprechenden Gutschrift für Kies oder für Gleisschotter.

Im Rahmen dieser Studie wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2021 (MöK 21) (Frischknecht u. a., 2021)) verwendet. Die Bewertung mittels der Methode der ökologischen Knappheit wurde unter Mitarbeit des Bundesamts für Umwelt entwickelt und ist in der Schweiz etabliert. Die Methode der ökologischen Knappheit 2021 enthält zwar einen Ökofaktor für Kies, jedoch deckt dieser nur Kies aus alluvialen Kiesgruben ab. Kies und Sand, welches durch Brechen aus dem Felsen (Steinbrüche, Tunnelbau) gewonnen wird, soll mit diesem Ökofaktor nicht bewertet werden (Frischknecht u. a., 2021). Deshalb wurde für die Auswertung ein Ökofaktor für die mineralische Ressource Hartstein hergeleitet und die Methode damit ergänzt.

Tabelle 1: Untersuchte Varianten

	Schotterersatz			Kiesersatz im Unterbau	Deponie	
	Grobschotter	RC-Schotter	RC-Kies*	RC-Kies	Bahnschotter	Kies
A. Schotterreinigung vor Ort (3t/lfm)						
1 Ausfall in Deponie	60%				40%	
2 Ausfall in externe Aufbereitung	60%		38%		2%	
B. Schotteraushub und zentrale Aufbereitung (3t/lfm)						
1 Aushub in Deponie					100%	
2 Externe Aufbereitung			80%		20%	
3 Externe Aufbereitung, Zukunft: inkl. RC-Schotter **		60%	35%		5%	
C. Aushub Schotter und Unterbau zusammen (6t/lfm, je 3t Schotter und Unterbau)						
1 Aushub in Deponie					50%	50%
2 Externe Aufbereitung			40%	40%	10%	10%
3b Externe Aufbereitung, Zukunft***		30%	17.5%	32.5%	2.5%	17.5%
D. Aushub Schotter und Unterbau getrennt (6t/lfm, je 3t Schotter und Unterbau)						
1 Aushub in Deponie					50%	50%
2 Externe Aufbereitung			47.5%	40%	2.5%	10%
3 Externe Aufbereitung, Einsatz RC-Schotter**		30%	17.5%	40%	2.5%	10%

* in Unterbau oder andere Anwendungen, wie Strassenbau oder Beton

** Aufbereitung zu RC-Schotter, wenn Nachfrage besteht

*** Annahme: es wird in Zukunft möglich sein, innerhalb derselben Korngrösse Bahnschotter und runde Körner zu trennen

Resultate

Die Resultate der ökologischen Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit 2021 sind in Abbildung 1 für die Varianten «Schotterreinigung» und «Schotteraufbereitung» sowie in Abbildung 2 für die Varianten «Schotter und Unterbau Aushub» dargestellt. Die Resultate der Klimaauswirkungen und des energetischen Ressourcenbedarfs (KEA) sind in der Zusammenfassung nicht dargestellt, da sie einerseits nur einzelne Aspekte berücksichtigen und andererseits nicht zu anderen Schlussfolgerungen führen. Abbildung 3 zeigt die Kosten der Schotterreinigungsvarianten. Aus diesen Ergebnissen lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten.

Möglichst hohe Wiederverwendung von Hartsteinschotter ist entscheidend

Aus ökologischer Sicht schneiden diejenigen Varianten, bei denen ein möglichst hoher Anteil an Bahnschotter als gereinigter Grobschotter oder als RC-Schotter wieder verwendet wird, signifikant am besten ab. Der Hauptgrund liegt in der Schonung der Hartsteinressourcen. Diese sind zwar als reine mineralische Ressourcen in ausreichendem Masse vorhanden, jedoch ist deren Abbau aus raumplanerischer Sicht in der Schweiz begrenzt. Daher wird Hartsteinschotter schon heute teilweise aus dem Ausland importiert. Eine teilweise Verwertung des Bahnschotters als Kiesersatz z.B. in der Betonherstellung oder Strassenbaus, kann aus ökologischer Sicht nicht empfohlen werden, da Hartgestein eine wesentlich knappere Ressource ist als Kies, u.a. auch deshalb, weil für Kiesersatz auch Recyclingmaterial verwendet werden kann, welches nicht als Schotter im Gleisbau geeignet ist.

Neben der gesamtökologischen Beurteilung mit der Methode der ökologischen Knappheit wurden auch die Auswirkungen auf das Klima mit der Methode nach IPCC sowie der KEA berechnet. Diese haben gezeigt, dass die Varianten mit Wiederverwendung des Bahnschotters als gereinigter Schotter im Gleisbau, als Kies- oder

RC-Ersatz vergleichbare Klimaauswirkungen bzw. kumulierten Energiebedarf haben. Damit spricht auch aus Sicht Klimaschutz oder KEA nichts gegen eine möglichst hohe Wiederverwendung des Bahnschotters. Bei allen untersuchten Indikatoren schliessen die Varianten mit Entsorgung in einer Deponie am schlechtesten ab.

Gleisgebundene Reinigung ist einer zentralen Aufbereitung vorzuziehen

Falls nur der Schotter gereinigt wird, so kann dies gleisgebunden erfolgen. Dies ist einer zentralen Aufbereitung aus ökologischer wie auch aus ökonomischer Sicht vorzuziehen. Aushub mit externer Aufbereitung, Variante B3, ist aus ökologischer Sicht nur dann eine vergleichbar gute Option wie die gleisgebundene Schotterreinigung, wenn zukünftig die Nachfrage nach RC-Schotter besteht und dieser separat ausgesiebt und als RC-Schotter eingesetzt wird. Da die Variante B3 jedoch teurer ist als die gleisgebunden Variante A2, ist die Variante A2 wesentlich öko-effizienter.

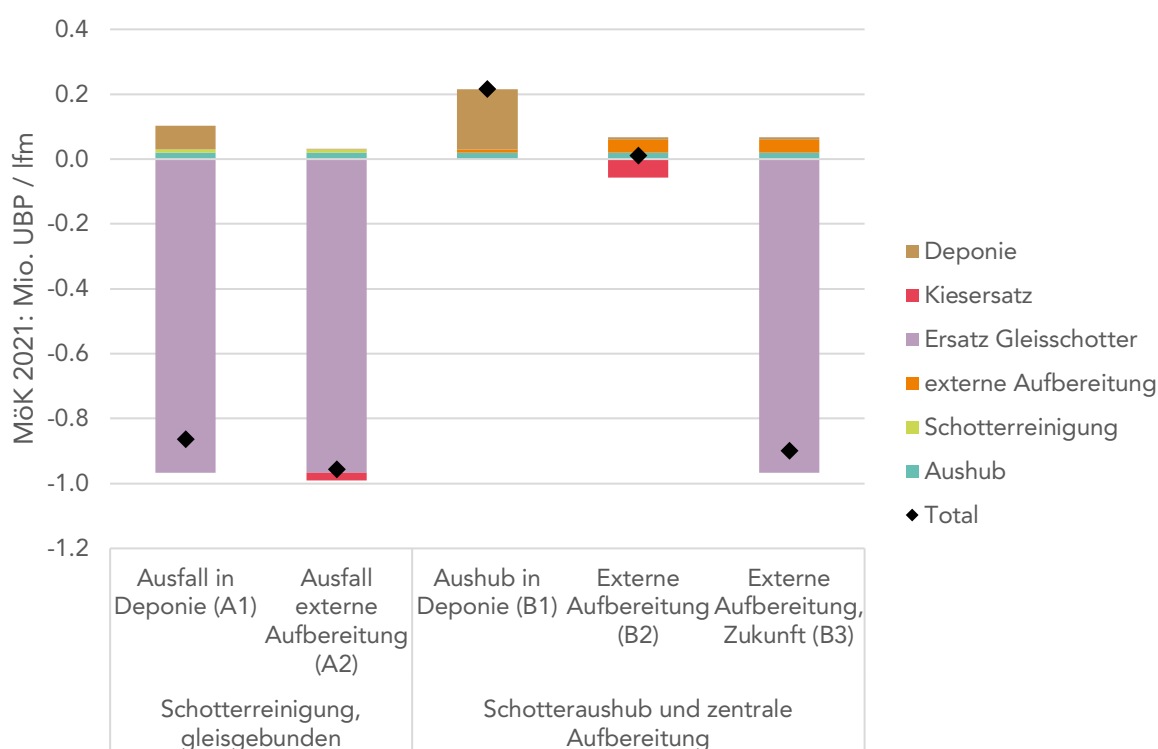


Abbildung 1: Umweltbelastung der Schotterreinigung vor Ort gegenüber Schotteraushub (Methode der ökologischen Knappheit 2021)

Aufbereitung von Bahnschotter und Unterbau besser getrennt als zusammen

Falls auch der Unterbau ersetzt werden muss, so ist aus ökologischer Sicht der getrennte Aushub von Schotter und Unterbau dem gemeinsamen Aushub vorzuziehen. Da beim getrennten Aushub der RC-Schotter separat ausgesiebt werden kann, sofern die Nachfrage dazu besteht, ist dies beim gemeinsamen Aushub nicht möglich. Der Grund ist, dass der früher eingebaute Unterbau vergleichbare Korngössen wie der Bahnschotter enthält und daher eine Trennung von RC-Schotter und runderen Korngrößen aus dem Unterbau nicht möglich ist. Somit kann zwar beim gemeinsamen Aushub das Material zu 80% wiederverwertet werden, jedoch nur als Kiesersatz. Betreffend den Kosten können dazu keine Aussagen gemacht werden, da die entsprechenden Daten nicht zur Verfügung standen.

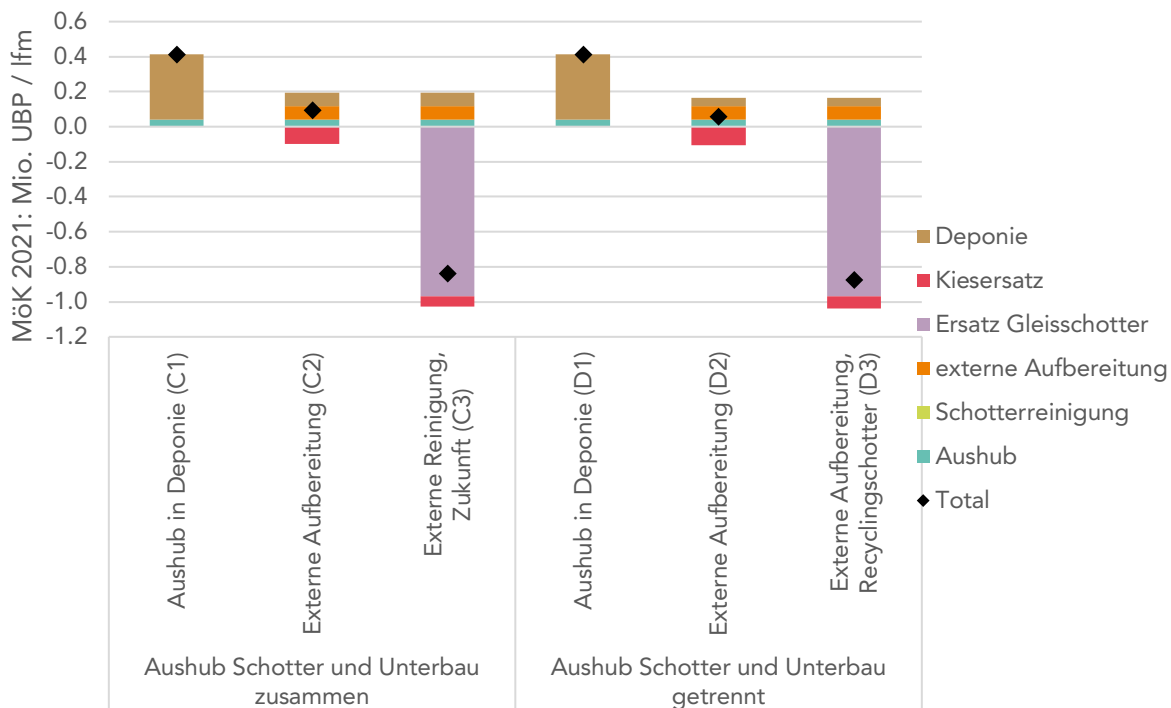


Abbildung 2: Umweltbelastung von Schotteraushub mit Unterbau zusammen oder Unterbau getrennt (Methode der ökologischen Knappheit 2021)

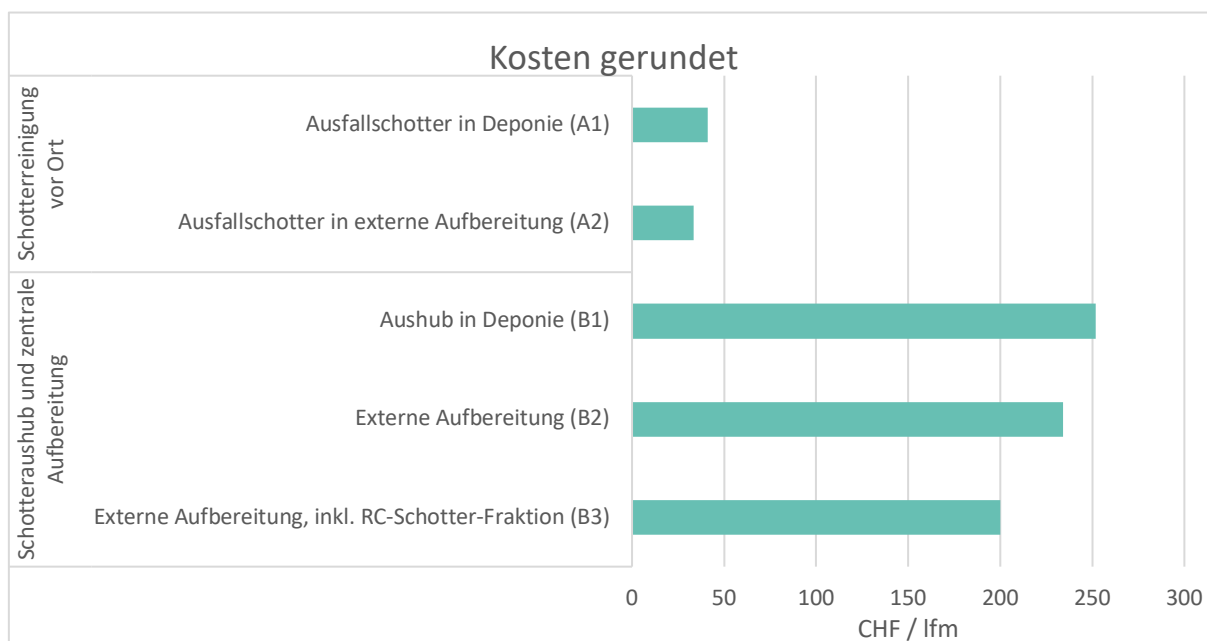


Abbildung 3: Kostenvergleich der Varianten A und B

Empfehlung

Eine Öko-Effizienz-Analyse hat gezeigt, dass aus ökonomisch und ökologischer Sicht die gleisgebundene Schotterreinigung am effizientesten ist, falls der Ausfall in einer zentralen Aufbereitungsanlage aufbereitet wird. Da die Unterschiede zur zentralen Aufbereitung sehr gross sind, wird empfohlen, wenn möglich diese zu realisieren. Der Unterschied zwischen den Varianten A1 und A2 sind eher klein, dennoch ist Variante A2 signifikant besser, wie eine Unsicherheitsanalyse gezeigt hat. Variante A2 kann daher empfohlen werden, dadurch können Deponievolumina gespart und Kiesressourcen geschont werden.

In jedem Fall soll eine möglichst hohe Wiederverwendung des Bahnschotters als Grobschotter oder RC-Schotter angestrebt werden. Eine Verwertung als Kiesersatz z.B. in Beton kann nicht empfohlen werden. Dies kommt einem Downcycling der knappen Ressource Hartstein gleich.

Heute erlauben die Normen den Einsatz von RC-Schotter nur bei Nebengeleisen. Eine diesbezügliche Anpassung der Norm, welche sich auf die Qualität des Schotters abstützt und nicht auf deren Herkunft (Recycling oder Neu), wird empfohlen, damit der notwendige Absatzmarkt gegeben ist.

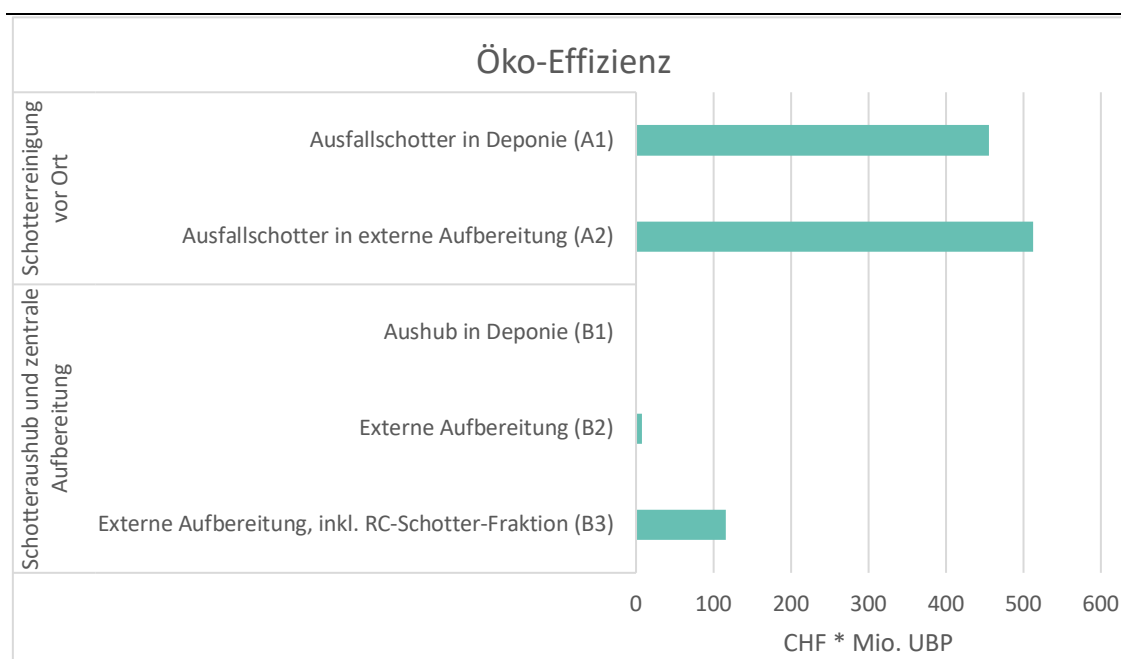


Abbildung 4: Öko-Effizienz der Schotterreinigungsvarianten A und Schotteraufbereitungsvarianten B.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Im Laufe des Jahres 2020 wurde bei gewissen Eisenbahnprojekten eine unsachgemässe Materialbewirtschaftung festgestellt. Dabei wurde deutlich, dass die Entsorgung des Gleisaushubs in der Gleisaushubrichtlinie mit einem generellen Verweis auf die Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) zu oberflächlich ist. Die Verwertungspflicht nach dem Stand der Technik (Art. 12 VVEA) muss für den Gleisaushub konkretisiert werden. Die Entsorgungswege von Gleisaushub sollten spezifisch geregelt werden und die Richtlinie wird momentan in diesem Sinne überarbeitet.

Das Recyclingpotential des Bahnschotters ist zurzeit nicht genau bekannt und muss eruiert werden. Neben den Umweltvorgaben sind auch die technischen Eigenschaften des Gleisaushubs für die Verwertungsmöglichkeiten relevant. Um eine solide Grundlage für die Überarbeitung der Richtlinie zu schaffen, wurde diese Studie zum Thema «Verwertungspflicht des Gleisaushubs: Behandlungsverfahren und Verwertungspotential» durchgeführt.

Die existierenden Behandlungsverfahren der verschiedenen Materialien des Gleisaushubs (Schotter, Unterbau, Sickerpackung und Bankettmaterial) wurden im Rahmen der Phase a) vom geotechnischen Institut detailliert beschrieben. Der vorliegende Bericht der Phase b) bewertet die Verwertungswege des Bahnschotters und des Unterbaus mittels Ökobilanzen, um die ökologische optimalen Verwertungswege zu identifizieren. Zudem wurden die Kosten ermittelt und eine Öko-Effizienz-Analyse durchgeführt. Sickerpackung und Bankettmaterial wurden nach Absprache mit der Auftraggeberin nicht weiter berücksichtigt.

Folgende Verwertungswege wurden untersucht eine Zusammenstellung zeigt Tabelle 2:

A.) Schotterreinigung gleisgebunden

- 1) *Ausfallschotter in Deponie:*
60 % Wiederverwendung vor Ort (Grobschotter).
Entsorgung von 40% Schotter in Deponie
- 2) *Ausfallschotter in externe Aufbereitung:*
60 % Wiederverwendung vor Ort (Grobschotter).
Verwertung als Kiesersatz: 38% und Entsorgung: 2 % in Deponie

B.) Schotteraushub und zentrale Aufbereitung

- 1) *Aushub in Deponie:*
Entsorgung: 100 % in Deponie
- 2) *Externe Aufbereitung:*
Verwertung als Kiesersatz 95 % und Entsorgung: 5 % in Deponie
- 3) *Externe Aufbereitung, inkl. RC-Schotter:*
Verwertung als Kiesersatz: 35 %, als RC-Schotter: 60 % und Entsorgung: 5 % in Deponie

C.) Schotteraushub mit Unterbau zusammen, zentrale Aufbereitung

- 1) *Aushub in Deponie:*
Entsorgung: 100 % in Deponie
- 2) *Externe Aufbereitung:*
Verwertung als Kiesersatz 80 % und Entsorgung: 20 % in Deponie
- 3) *Externe Aufbereitung, Zukunft:*
Verwertung als Kiesersatz: 50 %, als RC-Schotter: 30 % (Annahme: Unterbau besteht aus Kiessand PSS und erlaubt eine Trennung vom Schotter, bei alten Anlagen ist dies meist nicht der Fall) und Entsorgung: 20 % in Deponie

D.)Schotteraushub mit Unterbau getrennt, zentrale Aufbereitung

- 1) *Aushub in Deponie:*
Entsorgung: 100 % in Deponie
- 2) *Externe Aufbereitung:*
Verwertung als Kiesersatz: 82 % und Entsorgung 18 % in Deponie
- 3) *Externe Aufbereitung, inkl. RC-Schotter:*
Verwertung als Kiesersatz: 58%, als RC-Schotter: 30 % und Entsorgung 18 % in Deponie

Tabelle 2: Untersuchte Varianten

	Schotterersatz			Kiesersatz im Unterbau	Deponie	
	Grobschotter	RC-Schotter	RC-Kies*	RC-Kies	Bahnschotter	Kies
A. Schotterreinigung vor Ort (3t/lfm)						
1 Aushub in Deponie	60%				40%	
2 Aushub in externe Aufbereitung	60%		38%		2%	
B. Schotteraushub und zentrale Aufbereitung (3t/lfm)						
1 Aushub in Deponie					100%	
2 Externe Aufbereitung			80%		20%	
3 Externe Aufbereitung, Zukunft: inkl. RC-Schotter **		60%	35%		5%	
C. Aushub Schotter und Unterbau zusammen (6t/lfm, je 3t Schotter und Unterbau)						
1 Aushub in Deponie					50%	50%
2 Externe Aufbereitung			40%	40%	10%	10%
3b Externe Aufbereitung, Zukunft***		30%	17.5%	32.5%	2.5%	17.5%
D. Aushub Schotter und Unterbau getrennt (6t/lfm, je 3t Schotter und Unterbau)						
1 Aushub in Deponie					50%	50%
2 Externe Aufbereitung			47.5%	40%	2.5%	10%
3 Externe Aufbereitung, Einsatz RC-Schotter**		30%	17.5%	40%	2.5%	10%

* in Unterbau oder andere Anwendungen, wie Strassenbau oder Beton

** Aufbereitung zu RC-Schotter, wenn Nachfrage besteht

*** Annahme: es wird in Zukunft möglich sein, innerhalb derselben Korngrösse Bahnschotter und runde Körner zu trennen

2 Methodik und Vorgehen

Bei der Beurteilung der Umweltauswirkungen reicht es aufgrund der Komplexität der Natur und des globalen Wirtschaftssystems nicht, nur einzelne Problemstoffe, lokale Auswirkungen oder die Einhaltung der Umweltauflagen zu betrachten. Aus dem Anspruch an eine umfassende Beurteilung ergeben sich die folgenden Anforderungen an das betrachtete System:

- Möglichst umfassende Berücksichtigung der verschiedenen Umweltauswirkungen, wie z.B. Auswirkungen auf das Klima, die menschliche Gesundheit, Ökosysteme, Ressourcen etc.
- Berücksichtigung des gesamten Lebensweges von der Rohstoffgewinnung über Transporte, Herstellung, Nutzung bis zur Verwertung oder Entsorgung.

Um trotz der Komplexität des betrachteten Systems zu aussagekräftigen Resultaten zu kommen, ergeben sich zudem die folgenden Anforderungen:

- Quantifizierung der Umweltauswirkungen, um fundierte Aussagen zur Relevanz machen zu können.
- Soweit möglich wissenschaftlich abgestützt, um eine hohe Transparenz, Zuverlässigkeit und Akzeptanz zu erreichen.
- Bewertung der verschiedenen Auswirkungen auf der Basis von gesellschaftlichem und wissenschaftlichem Konsens, damit Entscheidungen nicht auf subjektiven Wahrnehmungen oder Interessen erfolgen.

Die Ökobilanzierung respektive Lebenszyklusanalyse („Life Cycle Assessment“, LCA) ist eine Methode, um die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt zu erfassen, zu beurteilen und daraus Optimierungspotentiale abzuleiten. Es ist international anerkannt, dass es sich dabei um diejenige Methode handelt, welche heute die obigen Anforderungen am besten erfüllt. Ökobilanzen werden in der Industrie, der Forschung wie auch der öffentlichen Hand für die unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt:

- als Entscheidungshilfen bei verschiedenen Varianten
- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotentialen
- zur Beurteilung von Massnahmen
- als Grundlage für Eco-Design
- zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

Diese Methode wird in diesem Projekt verwendet, um den Vergleich der ökologischen Auswirkungen der untersuchten Verwertungsvarianten zu machen und damit die Fragestellungen aus Kapitel 1 zu beantworten.

2.1 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.

Die Anforderungen an eine Ökobilanz und das Vorgehen bei deren Erstellung sind in der Norm ISO 14'040/44 (ISO, 2006; ISO/TC, 2006) definiert. Gemäss dieser Norm 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 5 zeigt, ist dies kein linearer Ablauf, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

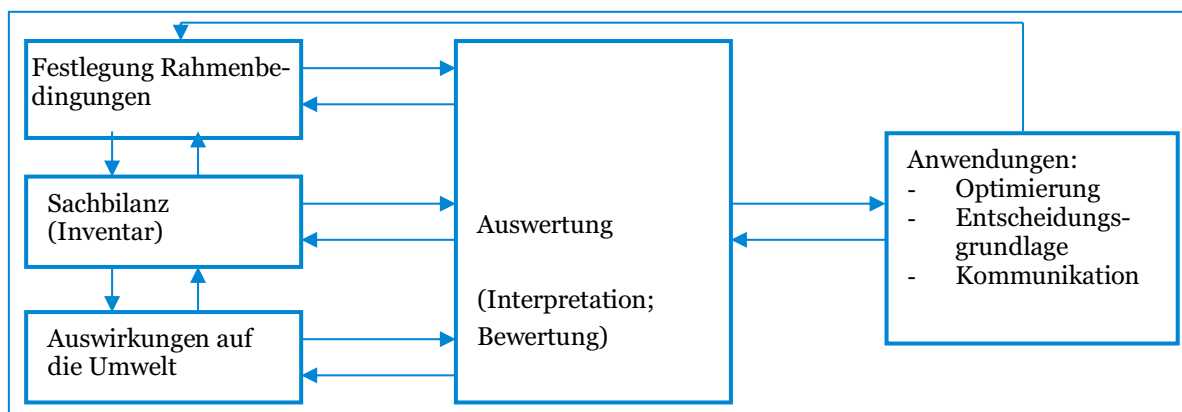


Abbildung 5: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040/44

Die vorliegende Studie richtet sich in den wesentlichen Aspekten nach der Norm ISO 14'040; in einzelnen Punkten, wie der Verwendung von gesamttaggregierenden Methoden, weicht die vorliegende Studie aus den in Kapitel 2.2.5.2 genannten Gründen von der Norm ab. Die Einhaltung der Norm würde verlangen, dass für vergleichende Ökobilanzen, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind, keine gesamttaggregierenden Methoden, welche die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer Kennzahl zusammenfassen, verwendet werden dürfen.

Auf die einzelnen Schritte bei der Erstellung der vorliegenden Ökobilanz wird im Folgenden eingegangen.

2.2 Ziel und Rahmenbedingungen

Aus der Zielsetzung der Studie bzw. deren Fragestellung leitet sich die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme ab. Daraus ergeben sich die Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Zudem wird etwa der zeitliche Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt.

2.2.1 Zielsetzung

Die Studie soll die Umweltauswirkungen von verschiedenen Verwertungswegen von Gleisaushub bewerten. Insbesondere sollen die zentrale Aufbereitung und die gleisgebundene Reinigung vor Ort bewertet werden. Dieser Vergleich soll die Umweltauswirkungen der verschiedenen Varianten aufzeigen und damit die Grundlagen geben, ob und wie eine signifikante Reduktion der Umwelteinflüsse erreicht werden kann.

2.2.2 Funktionelle Einheit

Um ein Produkt oder eine Dienstleistung mit entsprechenden Alternativen zu vergleichen, müssen diese denselben Nutzen erbringen bzw. dieselbe Funktion erfüllen. Die Grösse, auf welche sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit (FE) bezeichnet.

Als funktionelle Einheit wurde in dieser Studie jeweils **1 Gleislaufmeter** (lfm) betrachtet. Das heisst, es wird die Dienstleistung verglichen, um 1 Gleislaufmeter verschmutzten Bahnschotter zu sanieren respektive 1 Gleislaufmeter verschmutzten Bahnschotter inklusive Unterbau zu sanieren.

2.2.3 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der vorliegenden Studie umfassen im Wesentlichen die Stoff- und Energieflüsse der folgenden Prozesse und Dienstleistungen, welche aus der Erfahrung als relevant erachtet werden:

- Bereitstellung der Materialien und Hilfsstoffe
- Aufbereitung
- Transporte
- Abfälle bei der Aufbereitung, bzw. der Bereitstellung der Energien und Hilfsstoffe
- Bereitstellung Energie, Wärme und Strom, Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle, etc. für die involvierten Prozesse
- Herstellung der durchs Recycling ersetzten Primärprodukte und Rohstoffe. Diese werden als Gutschriften ausgewiesen, sofern sie nicht direkt im untersuchten System wieder eingesetzt werden.

Für alle diese Prozesse werden die Auswirkungen durch Emissionen in Boden, Luft und Wasser sowie der Ressourcennutzung (z.B. energetische Ressourcen, Wasser oder Landnutzung) berücksichtigt.

2.2.3.1 Zeitliche Systemgrenzen

Für die Aufbereitung und die daraus resultierenden Gutschriften sowie die Entsorgungsvarianten wird die heutige Situation betrachtet. Das heisst, es werden die aktuellsten Ökoinventare für die Material- und Energiebereitstellung verwendet. Zudem werden Varianten untersucht, welche Verwertungen betrachten, welche heute noch nicht möglich oder aufgrund von normativen Anforderungen nicht zulässig sind.

2.2.3.2 Systemerweiterung Schotter- und Kiesersatz

Bei verschiedenen Varianten wird ein Teil des Gleisaushubs als Grob- bzw. RC-Schotter wieder verwendet oder als Kiesersatz im Strassenbau oder in der Betonherstellung eingesetzt. Dadurch können sowohl die entsprechenden Ressourcen geschont werden wie auch die Bereitstellung dieser Materialien. Um diese ökologische Gutschrift abbilden zu können, wurde in den entsprechenden Varianten das System erweitert. Dabei wird die entsprechende Menge Gleisschotter bzw. Kies, inkl. Transporte und Herstellung, als vermiedenes Produkt berücksichtigt.

Dieses Vorgehen ist nicht nur für Gleisschotter, sondern auch für Kies gerechtfertigt, da es sich bei Kies, ähnlich wie bei Hartstein für die Schotterherstellung, um eine endliche Ressource handelt, mit der schonend umgegangen werden soll.

2.2.4 Zielgruppe

Die Studie richtet sich in erster Linie an den Auftraggeber sowie an die interessierten Behörden und die Öffentlichkeit.

2.2.5 Grenzen der Studie

2.2.5.1 Inhaltliche Grenzen

Folgende Grenzen hat diese Studie:

- Es werden nur ökologische und ökonomische Auswirkungen der Verwertung von Gleisaushub betrachtet. Die sozialen Auswirkungen als zusätzliche Dimensionen der Nachhaltigkeit werden nicht berücksichtigt.
- Die Studie basiert weitgehend auf Durchschnittsdaten, z.B. bezüglich der Transporte oder des Einsatzes von Recyclingmaterial. In spezifischen Fällen können sich ggf. abweichende Resultate ergeben.
- Die Studie basiert auf schweizerischen Verhältnissen z.B. bezüglich der Art der Entsorgung, der Knappheit der Hartgesteinsressourcen oder der Transportdistanzen.
- Die Studie geht im Einzelfall nicht auf technische Anforderungen im Gleisbau ein, welche möglicherweise den Einsatz von RC-Schotter einschränken und berücksichtigt in dem Sinne das theoretische Potential.
- Es wird mit durchschnittlichen Schadstoffbelastungen des Gleisaushubs gerechnet.
- Die Resultate gelten für die getroffenen Annahmen. Bei anderen Rahmenbedingungen können sich andere Resultate ergeben, welche mit den in diesem Bericht erarbeiteten, nicht übereinstimmen müssen.

Bei der Interpretation der Resultate müssen diese Grenzen berücksichtigt werden.

2.2.5.2 Formale Grenzen

Das Vorgehen der Ökobilanz richtete sich bezüglich der Erstellung der Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen nach der Norm ISO 14'040/44 (ISO 14'040 2006). Bezüglich der Verwendung zur Bewertung und Interpretation von gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, wie dies bspw. die Methode der ökologischen Knappheit ist, welche die verschiedenen Umweltauswirkungen gewichtet und zu einem Indikator den Umweltbelastungspunkten (UBP) zusammenfasst, steht die Studie nur so lange in Übereinstimmung mit der

Norm, als sie nicht veröffentlicht wird.¹ Die Autoren der Studie sind jedoch der Überzeugung, dass es für die Entscheidungsfindung wesentlich sinnvoller ist, sich auf Methoden zu stützen, deren Gewichtung auf gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Konsensprozessen beruht, als dem Leser diese Gewichtung zu überlassen. Da Letzteres in vielen Fällen dazu führt, dass die Gewichtung nach Interesse oder Wissensstand subjektiv gemacht wird oder nur einzelne Aspekte herausgegriffen werden, welche vom Leser als wichtig erachtet werden. Mit dieser Einschätzung stehen die Autoren nicht alleine da. Dieses Thema wurde schon an internationalen, wissenschaftlichen Kongressen diskutiert und dabei wurde die Verwendung solcher Methoden ebenfalls als sinnvoll und teilweise sogar als notwendig erachtet, siehe z.B. (Kägi u. a., 2016).

2.3 Sachbilanz

2.3.1 Modellierung des Produktsystems

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende System 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 z. B. Menge an benötigten Rohmaterialien, Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte oder Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme.
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO₂, VOC, Methan, Stickoxide etc.

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V9.2 ([PRé Consultants, 2021](#)) berechnet und als Basis für die Wirkbilanz verwendet.

Für die Vordergrunddaten wurden Daten von der SBB und der Firma Eberhard, Spezialistin für Baustoffrecycling, verwendet. Diese Daten wurden ergänzt mit eigenen Datenrecherchen und Datenabfragen zu den verschiedenen Verwertungswegen. Diese Daten widerspiegeln im Wesentlichen die Situation in der Schweiz.

2.3.2 Vordergrunddaten und Abschätzungen

Im Laufe der Zeit sammeln sich Verunreinigungen im Schotterbett ab (z.B. Humus). Diese Verunreinigungen können u.a. dazu führen, dass das Regenwasser nicht mehr ausreichend schnell versickern kann. Dadurch kann es zu einer Destabilisierung des Schotterbetts kommen. Entsprechend ist es das Ziel der Schotterreinigung, diese Verschmutzungen aus dem Bahnschotter zu entfernen. Dazu muss sämtlicher Schotter entfernt, gereinigt und wieder eingebaut werden. Ist ein Schotterkorn zu stark verschmutzt oder aufgrund der Abnutzung zu klein geworden, muss es durch Gleisschotter ersetzt werden. Für die Schottersanierung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung.

¹ In Abschnitt 4.1.8 von ISO 14'040:2006 (Version SN, deutsch) wird die "Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes" postuliert. Die Ökofaktoren für die Schweiz gemäss der UBP-Methode basieren auf den wissenschaftlich begründeten und politisch legitimierte Zielen der Umweltgesetzgebung sowie des Umweltzustandes in der Schweiz. Die Anwendung der UBP genügt dieser ISO-Anforderung, steht jedoch in Widerspruch zu einer Bestimmung der Norm, sobald die Studie nicht allein zu internen Zwecken dient, sondern veröffentlicht wird. Damit steht diese Bestimmung jedoch im Widerspruch zum in der Schweiz gesetzlich verankerten Öffentlichkeitsprinzip für die Behörden. Deshalb verwenden die Bundesbehörden bei Ihren Ökobilanzstudien die sinngemässe Formulierung: «Sachbilanzen, Wirkungsabschätzungen und Gewichtungen erfolgten gemäss ISO 14'040/14'044, stehen bezüglich Veröffentlichung jedoch nicht in Einklang mit ISO 14'044, Ziffer 4.4.5, weil diese Bestimmung eine an den geltenden Gesetzen orientierte Anwendung der Ökobilanzierung durch schweizerische Amtsstellen nicht zulassen würde.»

Schotterreinigung, gleisgebunden

Bei der gleisgebundenen Schotterreinigung wird der Schotter mit einer Gleisbaumaschine vor Ort ausgehoben und gereinigt. Dabei wird das Gleis mit derselben Maschine angehoben, der Schotter entnommen, gesiebt, gereinigt und mit Gleisschotter vermischt wieder eingebracht (gestopft). Der Ausfallschotter wird abtransportiert. Währenddessen bewegt sich die Maschine auf dem Gleis vorwärts. Auf diese Weise kann pro Stunde der Schotter auf mehreren hundert Metern Gleis erneuert werden. Allerdings kann mit dieser Variante der Unterbau nicht gleichzeitig saniert werden.

Daneben existiert noch die gleisungebundene Schotterreinigung. Hierbei wird der Schotter in einer mobilen Anlage gereinigt, die auf einem gleisnahen Installationsplatz temporär aufgestellt wird. Dieses Verfahren wird jedoch selten angewendet (< 5 %). Weiter sind die uns vorliegenden Daten hinsichtlich des Energiebedarfs und der Ausfallmengen identisch mit der gleisgebundenen Schotterreinigung. Daher ist diese Variante aus ökobilanzieller Sicht identisch zur gleisgebundenen Variante und wird in der vorliegenden Studie nicht separat behandelt.

Pro Gleislaufmeter werden rund 3 Tonnen Schotter gereinigt. Der Energieaufwand in Form von Diesel für die eigentliche Schotterreinigung beträgt gemäss Informationen der SBB rund 3.0 MJ/t Material (0.25 Liter Diesel pro Gleislaufmeter). Der Energieaufwand für das Anheben der Gleise und Ausheben des Schotters und Einfüllen des frischen Materials wurde mangels besserer Daten auf das 10fache der Schotterreinigung geschätzt. Da dieser Aufwand für alle Varianten (Schotterreinigung bzw. -aufbereitung und Aushub) derselbe ist, spielt er für den Vergleich keine Rolle.

Gemäss Aussagen SBB können bei der Schotterreinigung vor Ort 60 % bis 80 % des Schottermaterials wieder eingesetzt werden (Grob- und Feinschotter). Nach Absprache mit der SBB rechnen wir hier konservativ mit 60 % Grobschotter und mit 40 % Ausfallschotter. Die 40 % Ausfallmaterial mit einer kleineren Korngrösse gelangen im Normalfall in eine externe Aufbereitung, Zusätzlich wurde als Referenzszenario angenommen, dass alles Ausfallmaterial in die Deponie gelangt.

Schotterersatz

Bei diesem Verfahren wird der gesamte Schotter ausgehoben und abtransportiert. Dieser wird in einer zentralen Anlage gesiebt, gereinigt (Nasswäsche), teilweise weiterverwendet als RC-Schotter oder RC-Kies und teilweise entsorgt. Vor Ort wird Neu- oder RC-Schotter verbaut.

Pro Gleislaufmeter werden rund 3 Tonnen Schotter ausgehoben. Der Energieaufwand für das Anheben der Gleise und Ausheben des Schotters und Einfüllen des frischen Materials wurde mangels besserer Daten auf das 10fache der Schotterreinigung geschätzt. Da dieser Aufwand für alle Varianten (Schotterreinigung und Aushub) derselbe ist, spielt er für den Vergleich keine Rolle.

Der gesamte Aushub gelangt im Normalfall in eine externe Aufbereitung. Zusätzlich wurde als Referenzszenario angenommen, dass alles Aushubmaterial in die Deponie gelangt.

Schotterersatz mit Unterbausaniierung

Muss der Unterbau saniert werden, wird auch der darüber liegende Schotter abgetragen und durch Neuschotter ersetzt. Neben den 3 Tonnen Schotter pro Gleislaufmeter werden so zusätzliche 3 Tonnen Unterbau mit ausgehoben.

Zentrale Aufbereitung – Nasswäsche

Wird Bahnschotter angeliefert, so kann gemäss der befragten Firma 95 % des Materials wieder als RC-Schotter oder als Kiesersatz im Strassenbau oder in der Betonindustrie eingesetzt werden. Rund 5 % fallen als Feinmaterial an. Das Feinmaterial wird grösstenteils deponiert. Je nach Schadstoffgehalt wird das deponierte Feinmaterial in einer Deponie Typ B oder E abgelagert. Der Anteil Deponie Typ B oder E konnte nicht ermittelt werden. Annahme Carbotech: Deponie Typ E, da in der Feinfraktion i.d.R. eine Anreicherung der Schadstoffe stattfindet und diese daher verschmutzter ist als das Inputmaterial. Ein weiterer möglicher Einsatz des Feinmaterials ist der Rohmehlersatz in Zementwerken, welcher in dieser Studie nicht weiter einbezogen wurde. Aufgrund des geringen Masseanteils dürfte das nicht zu anderen Aussagen führen.

Wird Bahnschotter mit Unterbau zusammen angeliefert, können ca. 80 % des Materials als Kiesersatz im Strassenbau oder in der Betonindustrie eingesetzt werden. Rund 20 % können nicht weiterverwendet werden und gelangen auf die Deponie.

Der Energieverbrauch, Wasserbedarf sowie der Einsatz von Chemikalien wurden pro Tonne Material angegeben. Da es sich hierbei um vertrauliche Betriebsdaten handelt, können diese hier nicht angegeben werden.

Gleisschotter – neuer Schotter aus Hartstein

Gemäss dem Bericht der Landesgeologie (swisstopo, 2021) wird in der Schweiz Hartstein für Gleisschotter im Tagebau durch Bohren und Sprengen gewonnen. Es existieren zurzeit nur acht Hartsteinwerke, welche Material für Gleisschotter herstellen. Aus geologischer Sicht kommen in der Schweiz nur Kieselkalk und Flyschsandstein in ausreichender Menge und Qualität für den Einsatz im Gleisbau in Frage.

Für die Modellierung der Umweltauswirkungen wurde das Inventar für gebrochenen Kalkstein aus der Schweiz verwendet (Limestone, crushed CH). Dieses Inventar umfasst sowohl den Abbau, als auch das Brechen des Gesteins. Die Ressource Calcit wurde jedoch mit Hartstein angepasst (siehe Kapitel 2.6.2).

RC-Schotter

Für die Modellierung von Recyclingschotter wurde der Output der Schotteraufbereitung verwendet. Das heisst, dass der Aufwand für den Transport, Sortierung und Aufbereitung des Altschotters dem RC-Schotter angerechnet wird.

Weitere Verarbeitung von Schotter zu Kiesersatz

Für die Nutzung des Bahnschotters als Kiesersatz wurde berücksichtigt, dass der Schotter noch einmal gebrochen werden muss. Dazu wurde als Annäherung das Inventar „Disposal, building, concrete gravel, to recycling/CH U“ verwendet. Dieses deckt den Energieaufwand und die Feinstaubemissionen, die durch das Brechen von Beton zu Kies entstehen ab. Für den Ersatz von Kies im Strassenbau oder in der Betonindustrie wurde das Inventar gravel, crushet, at mine/CH verwendet

Transportdistanzen

Für die Entsorgung in die Deponie wurde ein Transport von 30 km mit einem durchschnittlich ausgelasteten LKW (16–32 t) angenommen.

Für die Anfahrtswege zur Aufbereitung wurde ein Transport von 100 km per Bahn angenommen. Ebenfalls mit 100 km Bahntransport wurde der Weg von den Hartstein-Steinbrüchen zur Einbaustelle modelliert.

Kostenangaben

Kosten zu den involvierten Prozessen waren nur schwer erhältlich. Die SBB hat uns freundlicherweise ihre Kostenkalkulation verschiedener Varianten vertraulich zur Verfügung gestellt. Die detaillierten Kosten

dürfen aus Vertraulichkeitsgründen hier nicht weiter erläutert werden. Die Kostenschätzung wurde nur für gewisse Schottersanierungsvarianten ohne Unterbau durchgeführt, da nur für diese Varianten Kostenkalkulationen vorlagen.

2.3.3 Hintergrunddaten

Die Vordergrunddaten wurden mit den Hintergrunddaten der Ökoinventardatenbank UVEK 2018 verknüpft. Diese Datenbank basiert auf der ecoinvent Version 2.2+ und wird im Auftrag der schweizerischen Bundesämter weiterentwickelt und deren Verwendung für ökologische Entscheidungsfindungen vor allem im schweizerischen Kontext mit der Methode der Ökobilanzierung empfohlen. Zudem ist die Verwendung einer einheitlichen Hintergrunddatenbank wesentlich, um eine gute Vergleichbarkeit der Resultate zu ermöglichen. Dies garantiert z.B., dass keine Unterschiede z.B. aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen oder Allokationen in den Hintergrunddaten auftreten.

2.4 Unsicherheiten und Sensitivitätsanalysen

Modellierungen von komplexen Systemen, wie dies bei der Ökobilanzierung der Fall ist, sind immer mit Unsicherheiten verbunden. Dabei sind folgende Arten von Unsicherheiten zu unterscheiden:

- Messungengenauigkeit
Diese treten z.B. bei der Datenerfassung auf, aufgrund von Messfehlern, älteren Daten, fehlenden Daten oder der Verwendung von Durchschnittsangaben.
- Systemische Ungenauigkeit
Bei der Modellierung müssen immer wieder Annahmen getroffen werden, z.B. bezüglich durchschnittlicher Transportdistanzen, verwendeter Verfahren etc.
- Unschärfe oder Unsicherheit
Die Berechnung der Umweltauswirkungen basiert auf Modellen, welche nur bis zu einem gewissen Grad überprüft werden können, z.B. weil die Prognosen in der Zukunft liegen oder die Auswirkungen nicht direkt gemessen werden können, z.B. Humantoxizität. Zudem basieren die Gewichtungen der verschiedenen Auswirkungen auf gesellschaftlichen Werten, welche sich verändern können.

Die Ungenauigkeiten in der Sachbilanz sind in den Hintergrunddaten angegeben und wurden bei den Vordergrunddaten soweit möglich erfasst oder zumindest abgeschätzt und ausgewertet. Diese Unsicherheiten werden in den Übersichtsgrafiken als Spannbreiten der Ergebnisse entsprechend ausgewiesen (1 σ Standardabweichung). Bei diesen Spannbreiten handelt es sich um berechnete Werte der Monte Carlo Analyse mit 2'000 Durchläufen. Zu beachten ist, dass diese nur die Unsicherheiten der Sachbilanz berücksichtigen.

Auf die Unschärfe und Unsicherheit wird nicht weiter eingegangen, da sie nicht quantifiziert werden können. Dennoch ist das Bewusstsein dieser Unsicherheiten bei der Interpretation der Resultate wichtig.

2.5 Wirkbilanz

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich der Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. Die Berechnung der Wirkbilanz beinhaltet die folgenden zwei Teilschritte:

- Klassifizierung (Einteilung der Stoffe und Ressourcennutzungen aus der Sachbilanz bezüglich ihrer Auswirkungen)
- Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt):
Dabei werden die verschiedenen Substanzen oder Ressourcennutzungen entsprechend ihres

Schädigungspotenzials relativ zu einander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotenziale bezüglich einer bestimmten Umweltauswirkung. So wird z.B. beim Treibhauspotential CO₂ als Leitsubstanz verwendet und Beiträge von weiteren Treibhausgasen wie Methan und Lachgas in CO₂-Äquivalenten (CO₂-eq.) umgerechnet, welche die Auswirkungen auf das Klima charakterisieren.

Auf Wunsch der Auftraggeberin werden die folgenden beiden Umweltwirkungen separat ausgewiesen.

Treibhausgasemissionen nach IPCC 2021 (IPCC, 2021)

In dieser Methode wird nur die Umweltwirkung der Klimaerwärmung berücksichtigt. Dabei wird für jede klimarelevante Substanz das Treibhauspotential über 100 Jahre bestimmt. Aus dem Verhältnis zum Treibhauspotential von CO₂ kann damit für jede Emission deren Auswirkungen auf das Klima als entsprechende Menge CO₂ angegeben werden. Daraus resultieren Angaben in sogenannten CO₂-Äquivalenten (CO₂eq).

Primärenergiefaktoren bzw. kumulierter Energieaufwand

Die Bereitstellung von Endenergie ist selbst mit Energieaufwänden verbunden. Energie wird benötigt, um die Energie zu gewinnen, umzuwandeln, zu raffinieren, zu transportieren und zu verteilen, sowie bei allen Vorgängen, die erforderlich sind, um die Energie dem Gebäude oder dem Fahrzeug, das sie benötigt, bis zum Bilanzperimeter zuzuführen.

Der Primärenergieaufwand (auch kumulierter Energieaufwand, KEA) widerspiegelt den energetischen Input an Primärenergieressourcen (Erdgas, Rohöl, Steinkohle, Braunkohle, Uran, Biomasse, Wasserkraft etc.), welche für die Bereitstellung der Endenergie (Brennstoffe, Treibstoffe, Strom, Fernwärme) nötig sind, inklusive Energieinhalt der Brenn- und Treibstoffe. In dieser Studie wird der nicht erneuerbare (fossile und nukleare Energieträger) Primärenergieaufwand berechnet und gezeigt, gemäss Hirschler u.a. (2010).

2.6 Bewertung der Umweltbelastung

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 sein muss.

2.6.1 Die Methode der ökologischen Knappheit

Im Rahmen dieser Studie wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2021 (Frischknecht u. a., 2021)) 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 6) und somit bezüglich Werthaltung breit abgestützt ist. Betreffend der Verwendung der gesamttaggrierenden Methoden richtet sich die vorliegende Studie nicht nach der ISO Norm 14'040, sondern geht über diese hinaus².

² Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamttaggrierenden Methoden teilweise abgelehnt, z. B. auch von der ISO Norm 14'044. Dabei ist zu beachten, dass auch eine Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z. B. nur der CO₂-Fussabdruck betrachtet wird, 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

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

Bei der Methode der ökologischen Knappheit (MöK 2021) (Frischknecht u. a., 2021) (Frischknecht u. a., 2021) basiert die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen auf der Abweichung zwischen der heutigen Situation (Aktueller Fluss) und den umweltpolitischen Zielen (Kritischer Fluss), wie Grenzwerten oder internationalen Verpflichtungen, z.B. das Paris Abkommen bezüglich dem Klima.

Wie die folgende Formel zeigt, wird der Ökofaktor aus den folgenden drei charakteristischen Grössen hergeleitet: Charakterisierung, Normierung und Gewichtung.

$$\text{Ökofaktor} = \underbrace{K}_{\substack{\text{Charakterisierung} \\ \text{(optional)}}} \cdot \underbrace{\frac{1 \cdot \text{UBP}}{F_n}}_{\text{Normierung}} \cdot \underbrace{\left(\frac{F}{F_k}\right)^2}_{\text{Gewichtung}} \cdot \underbrace{c}_{\text{Konstante}}$$

Formel 1 Ökofaktoren bei der Methode der ökologischen Knappheit

mit:

K = Charakterisierungsfaktor eines Schadstoffs beziehungsweise einer Ressource

Fluss = Fracht eines Schadstoffs, Verbrauchsmenge einer Ressource oder Menge einer charakterisierten Umwelteinwirkung

F_n = Normierungsfluss:
Aktuelle jährliche Emissionen (oder Umweltwirkung), bezogen auf die Schweiz

F = Aktueller Fluss:
Aktueller jährliche Emissionen, bezogen auf das Referenzgebiet (meist die Schweiz)

F_k = Kritischer Fluss:
Jährliche Emissionen nach Erreichen des Umweltziels, bezogen auf das Referenzgebiet (meist die Schweiz); teilweise definiert über ein Reduktionsziel;

c = Konstante (10¹²/a)

UBP = Umweltbelastungspunkt: die Einheit des Ökofaktors

Die Charakterisierung wird benötigt, um die Schädlichkeit verschiedener Substanzen oder Ressourcennutzungen, welche eine bestimmte Umweltauswirkung verursachen, relativ zueinander zu charakterisieren. Der Normierungsfluss zeigt die gesamte Belastung im betrachteten Gebiet (Referenzgebiet) während einem Jahr durch die betreffende Umwelteinwirkung. Also z.B. die gesamte Menge einer bestimmten Emission oder im Falle der Deponierung das beanspruchte Deponievolumen pro Jahr in der Schweiz. Entsprechend zeigt die Normierung (1 / Normierungsfluss) den Beitrag zur gesamten aktuellen Belastung in der Schweiz an. Die Gewichtung wird über das Verhältnis des aktuellen Flusses der betreffenden Umwelteinwirkung zum kritischen Fluss gebildet. Dieses Verhältnis fliesst quadratisch in die Formel ein.

jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamt aggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich sondern notwendig (Kägi u. a., 2016) und die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

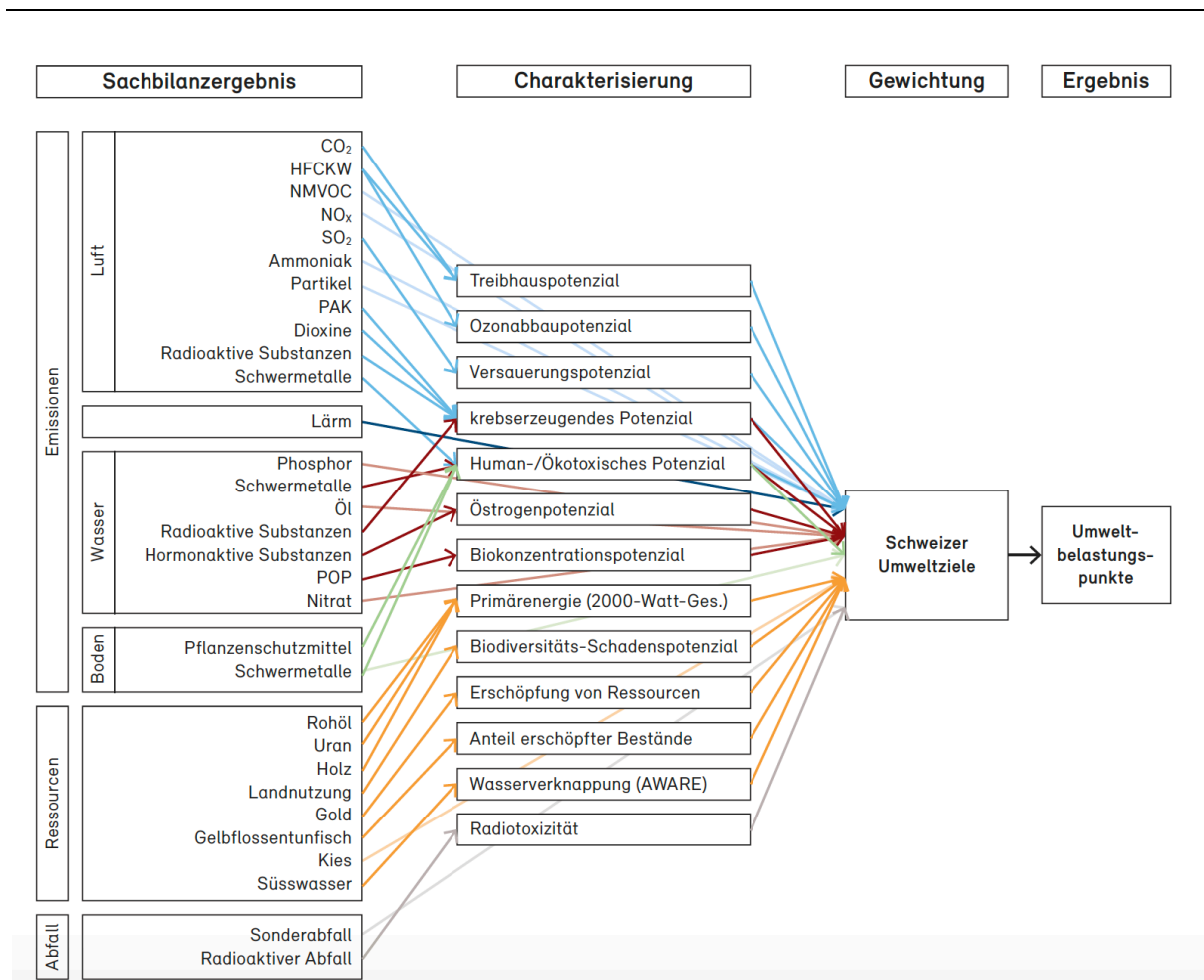


Abbildung 6: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit (Grafik aus Frischknecht u. a., 2021)

2.6.2 Ergänzende Bewertung der Hartstein-Ressourcen

Die Methode der ökologischen Knappheit 2021 enthält zwar einen Ökofaktor für Kies, jedoch deckt dieser nur Kies aus alluvialen Kiesgruben ab: „Kies und Sand, welches durch Brechen aus dem Felsen (Steinbrüche, Tunnelbau) [...] gewonnen wird, soll mit diesem Ökofaktor nicht bewertet werden“ (Frischknecht u. a., 2021).

Für Gleisschotter ist Schotter aus Hartstein notwendig. Grundsätzlich sind die mineralischen Ressourcen dafür in der Schweiz in ausreichendem Umfang vorhanden. Jedoch sind dem Abbau insbesondere raumplanerische Grenzen gesetzt. So konnten bereits 2018 nur 74 % des Gleisschotterbedarfs durch inländisches Hartstein gedeckt werden. (swisstopo, 2021) Aufgrund des hohen Gewichts kommen Importe aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen nur bedingt in Frage. Entsprechend handelt es sich bei Hartstein in der Schweiz um eine knapper werdende Ressource, mit der sorgsam umgegangen werden sollte, z.B. indem möglichst viel davon wiederverwendet wird.

Aus diesen Gründen wurde für die Auswertung ein Ökofaktor für die mineralische Ressource Hartstein abgeleitet. Für die Ermittlung des Öko-Faktors müssen alle drei Faktoren der

$$\text{Ökofaktor} = \underbrace{K}_{\substack{\text{Charakterisierung} \\ \text{(optional)}}} \cdot \underbrace{\frac{1 \cdot \text{UBP}}{F_n}}_{\text{Normierung}} \cdot \underbrace{\left(\frac{F}{F_k}\right)^2}_{\text{Gewichtung}} \cdot \underbrace{c}_{\text{Konstante}}$$

Formel 1 bestimmt werden. Dies wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

2.6.2.1 Charakterisierung

Bei dem Ökofaktor für Hartstein geht es nur um den Umfang dieser mineralischen Ressource in der Schweiz. Aus diesem Grund ist eine Charakterisierung nicht angebracht und es wird der Wert 1 verwendet. Mögliche Umweltbelastungen durch Emissionen in Boden und Grundwasser, z.B. durch den Abbau werden mit anderen Faktoren berücksichtigt.

2.6.2.2 Normierung

Für die Bestimmung der Stoffflüsse wurden Angaben aus dem Bericht von swisstopo verwendet. Zwischen 2016 und 2019 lag der jährliche Verbrauch an Hartsteinprodukten bei 2.41 Mio. Tonnen. Davon wurde etwa die Hälfte im Gleisbau und die andere im Strassenbau verwendet (swisstopo, 2021). Für den Normierungsfluss wurde der Gesamtverbrauch von 2.41 Mio. Tonnen pro Jahr verwendet. Damit wird die gesamte mineralische Ressource Hartstein bewertet – und nicht nur der Anteil, der im Gleisbau verwendet wird.

2.6.2.3 Gewichtung

Für die Bestimmung des aktuellen Flusses wurde der Normierungsfluss, d.h. der Gesamtverbrauch an Hartstein, verwendet.

Für die Bestimmung des kritischen Flusses wurde hingegen die jährliche Produktion in der Schweiz verwendet. Dies mit folgender Begründung: Aus raumplanerischen Gründen ist der Abbau beschränkt, da kein numerischer Wert für die Abbaumenge festgelegt ist, wird der Mittelwert der Abbaumengen der letzten vier Jahre verwendet. Zudem besteht das Ziel den Bedarf mit inländischer Produktion zu decken und damit die aufwändigen Importe zu vermeiden.

2.6.2.4 Ökofaktor für Hartstein

Der daraus resultierende Ökofaktor für Hartstein beläuft sich auf 520 UBP/kg. Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Kenngrösse und Herleitung des Ökofaktors.

Tabelle 3: Ökofaktor für die mineralische Ressource Hartstein in UBP/kg

		Bemerkungen
Normierung (t Hartstein/a)	2.41 Mio.	Verbrauch in der Schweiz (swisstopo 2021)
Aktueller Fluss (t Hartstein/a)	2.41 Mio.	Verbrauch in der Schweiz (swisstopo 2021)
Kritischer Fluss (t Hartstein/a)	2.15 Mio.	Abbau in der Schweiz (swisstopo 2021)
Gewichtung (-)	1.27	
Ökofaktor (UBP/kg Hartstein)	520	

3 Resultate und Diskussion

Der Vergleich und die Diskussion in dieser Studie stützen sich auf die umfassendere Bewertung nach MöK 2021. Auf Wunsch der Auftraggeberin erfolgte eine Auswertung mit den Methoden IPCC (Klimafussabdruck) und KEA (kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar), da diese beiden Indikatoren im Baubereich gebräuchlich sind und die Klimaauswirkungen von hoher Aktualität sind. Dabei ist zu beachten, dass die Methode IPCC nur auf die Umweltwirkung «Klima» fokussiert und KEA den energetischen Ressourcenbedarf betrachtet. Insbesondere wird die Begrenztheit der Hartgesteinsproblematik dabei nicht berücksichtigt. Wie die Diskussion in diesem Kapitel zeigt, ist es sinnvoll die Empfehlungen auf die Resultate der umfassenden Methode MöK 2021 abzustützen.

3.1 Resultate Umweltfussabdruck (MöK 2021)

In den folgenden Kapiteln werden die Resultate für die Varianten nur Schotterreinigung bzw. Aufbereitung, Kapitel 3.1.1 und Schotteraushub mit Unterbau, Kapitel 3.1.2, separat diskutiert. Anschliessend folgt in Kapitel 3.1.3 die Unsicherheits-Analyse, welche Auskunft gibt über die Signifikanz der Resultate.

3.1.1 Schotterreinigung vor Ort vs. Schotteraushub

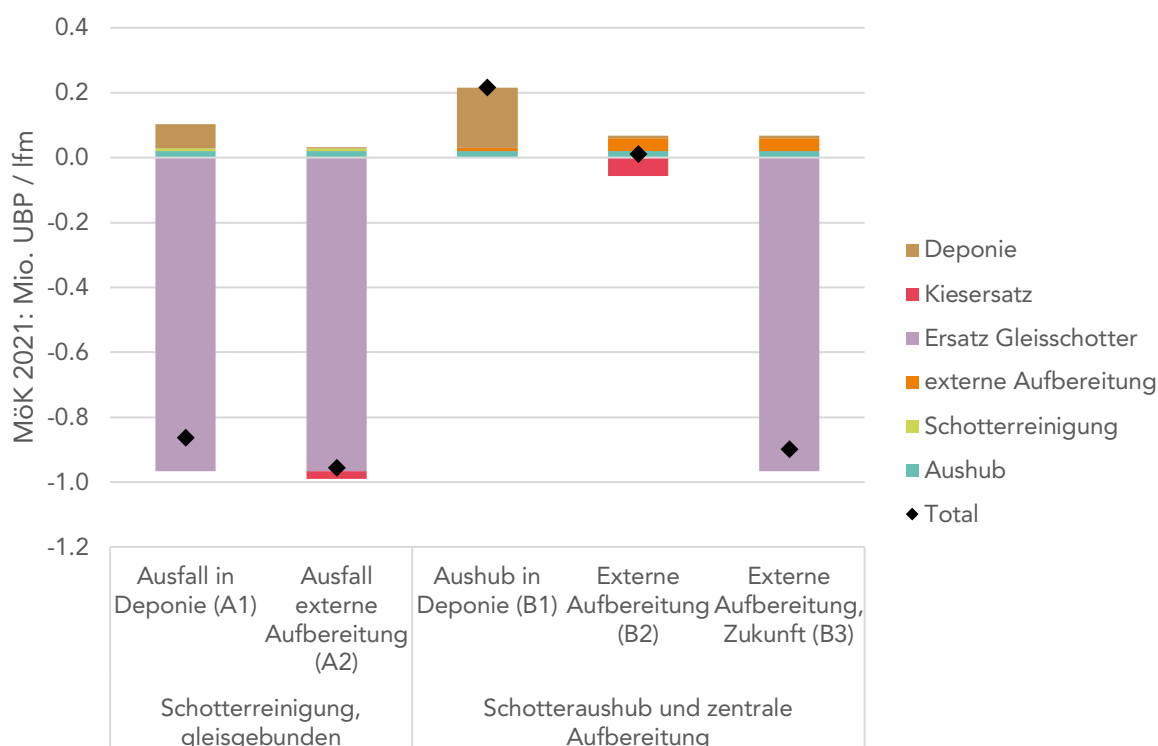


Abbildung 7: Umweltbelastung der Schotterreinigung vor Ort gegenüber Schotteraushub und externe Aufbereitung (Methode der ökologischen Knappheit 2021). Definition der Varianten siehe Kapitel 1.

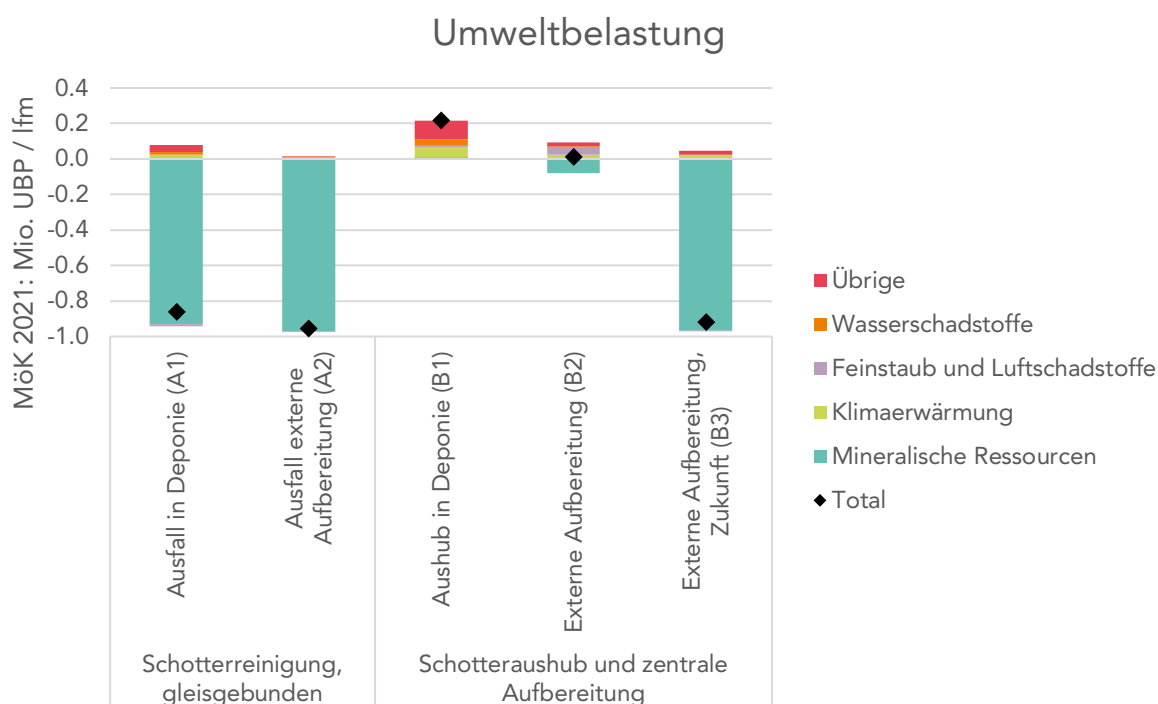


Abbildung 8: Umweltbelastung nach Wirkkategorie (Methode der ökologischen Knappheit 2021)

Innerhalb der gleisgebundenen Schotterreinigungsvarianten schneidet die Variante A2 mit externer Aufbereitung des Ausfallmaterials etwas besser ab als die Referenzvariante mit Ausfallmaterial in Deponie (Variante A1). Dies, weil rund 38 % des Materials nicht deponiert, sondern als Kiesersatz wieder eingesetzt werden kann mit entsprechender Vermeidung der Deponieressourcen und Gutschrift für den Ersatz von primärem Kiesmaterial. Obwohl die Unterschiede relativ gering sind, so hat eine Monte Carlo-Analyse gezeigt, siehe Kapitel 3.1.3, dass Variante A2 signifikant besser ist als Variante A1. Auch bei Schotteraushub mit zentraler Aufbereitung gilt dieselbe Erkenntnis für den Vergleich der Variante mit externer Aufbereitung (B2) im Vergleich zur Referenzvariante Aushub in Deponie (B1).

Die Varianten B1 und auch B2 schneiden deutlich schlechter ab als die Varianten A1 und A2. Der Grund liegt darin, dass bei den Varianten A1 und A2 60 % des Schottermaterials gleich wieder eingesetzt werden kann und somit 60 % Gleisschotter eingespart wird. Bei den Varianten B1 wird kein Gleisschotter eingespart und alles gelangt in eine Deponie. Bei der Variante B2, welche heute üblich ist, kann zwar 95 % des Materials als Kiesersatz wiederverwendet werden. Dies entspricht jedoch einem Downcycling und bringt eine wesentlich tiefere Gutschrift mit sich. Heute ist es unüblich, den RC-Schotteranteil separat auszusieben, da dafür kaum Nachfrage besteht und teilweise die rechtlichen Grundlagen fehlen, da RC-Schotter heute nur bei Nebengleisen wieder eingesetzt werden darf. Technisch wäre es jedoch möglich und falls sich die Rahmenbedingungen in Zukunft ändern, könnte auch via externe Aufbereitung rund 60 % RC-Schotter ausgewiesen und wiederverwendet werden. Dies ist in der Variante B3 (externe Aufbereitung, Zukunft), dargestellt. Die Variante B3, in der der RC-Schotteranteil separat ausgesiebt und wieder als RC-Schotter verwendet wird, weist einen wesentlichen Umweltvorteil auf im Vergleich zu den Varianten B1 und auch B2 und liegt in einem Ähnlichen Bereich wie die Varianten A1 und A2. Die Variante A2 schneidet jedoch etwas besser (+ 100'000 UBP/lfm) ab als die Variante B3. Eine Monte Carlo-Analyse dieser beiden Varianten hat gezeigt, dass die Unterschiede signifikant sind, siehe Kapitel 3.1.3. Die gleisgebundene Schotterreinigung ist daher dem Schotteraushub mit zentraler Aufbereitung heute und in Zukunft vorzuziehen.

Die Auswertung des kumulierten Energieaufwands (KEA) zeigt (siehe Abbildung 9) ähnlich wie die Auswertung des Klimafussabdrucks (siehe Abbildung 9) das beste Resultat für Variante A2: Schotterreinigung vor Ort und externe Aufbereitung des Ausfalls. Das schlechteste Resultat hat die Referenzvariante B1: Deponie nach zentraler Aufbereitung. Die restlichen Varianten (A1, B2 und B3) liegen dazwischen und weisen keine signifikanten Differenzen auf. Der Grund für diese unterschiedliche Bewertung durch die drei Methoden liegt vor allem daran, dass KEA und der Klimafussabdruck die Hartsteinressourcen sowie den Raumbedarf für Deponien nicht berücksichtigen. Da diese Aspekte im Zusammenhang des Untersuchungsgegenstandes dieses Projektes von Bedeutung sind, müssen die umfassenderen Resultate der MÖK für die Schlussfolgerungen und Empfehlungen verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass auch die beiden Indikatoren IPCC und KEA die Variante A2 als diejenige mit den geringsten Auswirkungen bewerten.

Wie auch die Auswertung mit der MÖK nach Wirkkategorien, siehe Abbildung 8, zeigt, wird das Ergebnis vor allem von den mineralischen Ressourcen dominiert. Einen gewissen Einfluss haben die klimawirksamen Luftemissionen sowie Feinstaub und weitere Luftschadstoffe. Weitere Umwelteinflüsse spielen nur eine untergeordnete Rolle. Bei den mineralischen Ressourcen sind es vor allem die Hartgesteinsressourcen, da die verfügbaren Mengen um Faktoren kleiner sind als die Kiesressourcen. Entsprechend ist der Schutz der Hartgesteinsressourcen durchaus wünschbar und hat zudem sowohl klimatische wie auch energetische Vorteile.

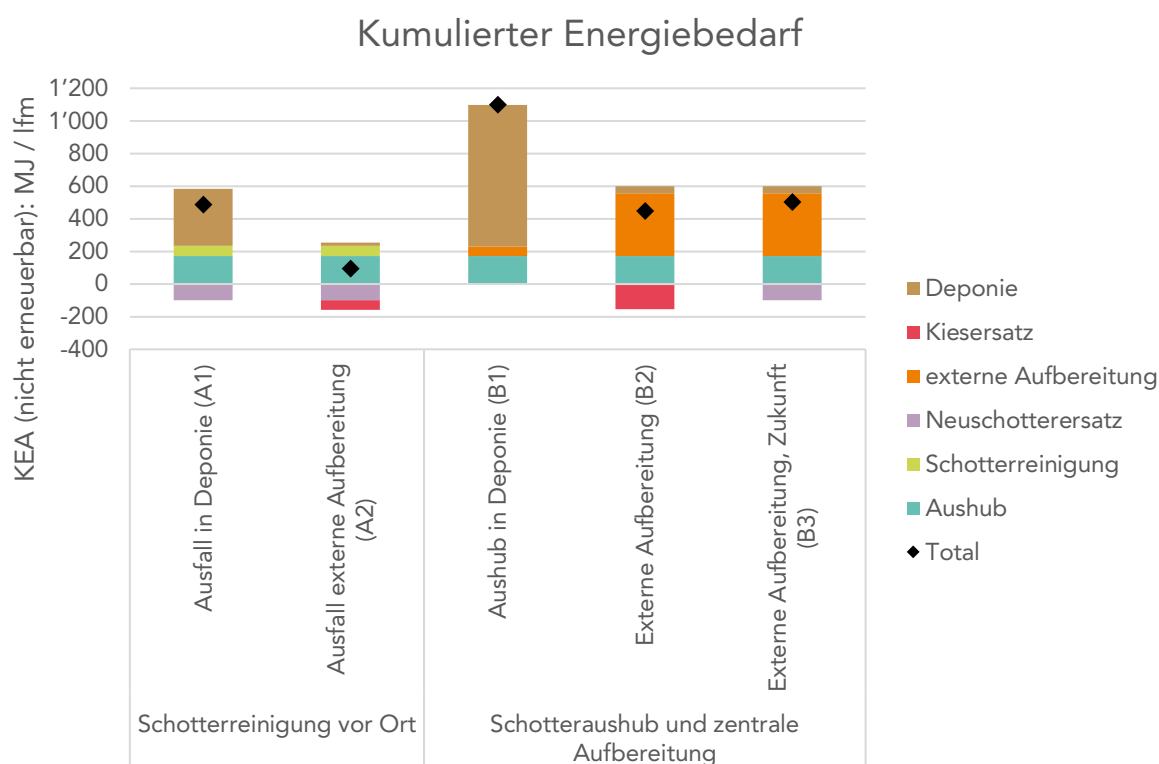


Abbildung 9: Kumulierter Energieaufwand (KEA) der Schotterreinigung vor Ort gegenüber Schotteraushub. Es handelt sich dabei um die Varianten A1 bis A3 und B1 bis B3 definiert in Kapitel 1.

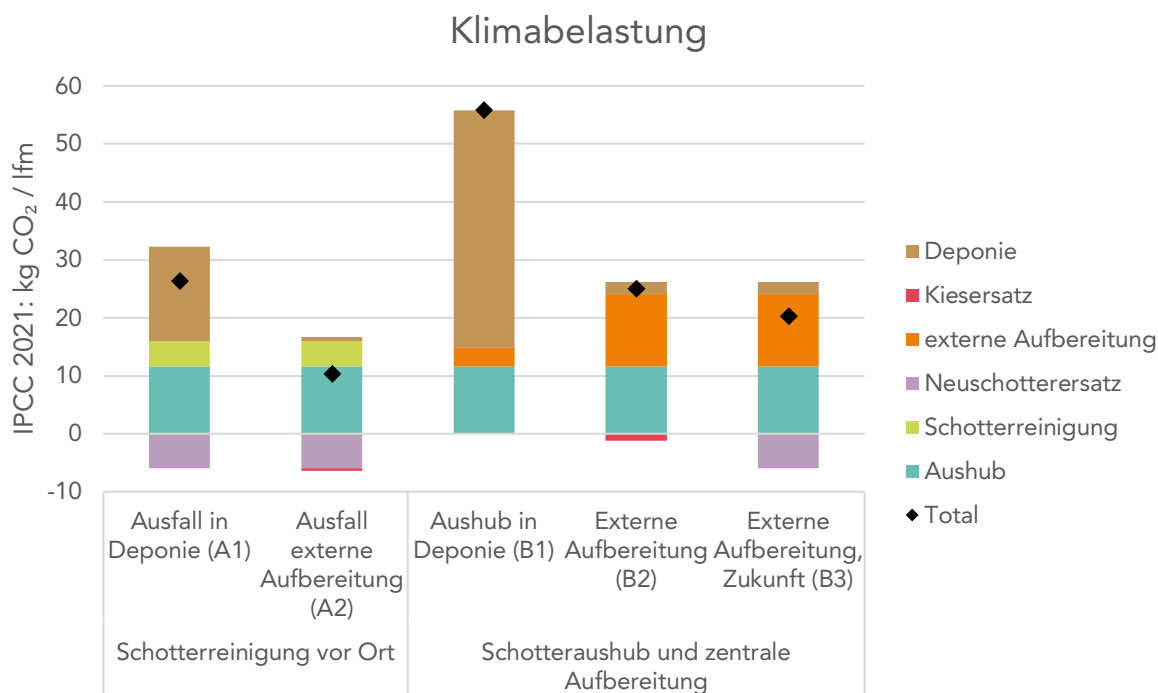


Abbildung 10: Klimafussabdruck der Schotterreinigung vor Ort gegenüber Schotteraushub.
Es handelt sich dabei um die Varianten A1 bis A3 und B1 bis B3 definiert in Kapitel 1.

Beim Vergleich der Schotterreinigung (Varianten A) mit dem Schotteraushub (Varianten B) wird deutlich, dass die Schotterreinigung vor Ort bei den vergleichbaren Untervarianten einen tieferen Umweltfussabdruck aufweist als der Schotteraushub mit anschliessender Aufbereitung (oder Deponierung). Die Unsicherheitsanalyse mit Monte Carlo zeigt, dass die Unterschiede zwischen der gleisgebundenen Schotterreinigung A2 und dem Schotteraushub B3 mit zentraler Aufbereitung (Zukunft) signifikant sind (siehe dazu auch Kap 4.1.3).

3.1.2 Schotteraushub mit Unterbau; getrennt vs. zusammen

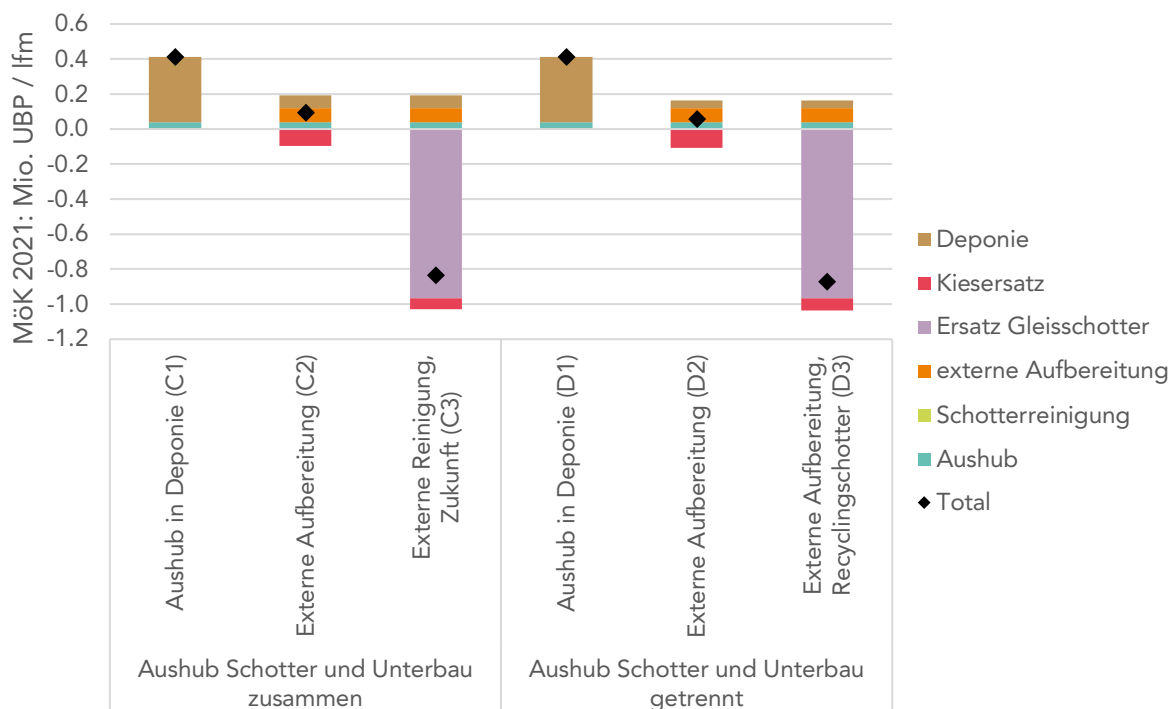


Abbildung 11: Umweltbelastung von Schotteraushub mit Unterbau zusammen oder Unterbau getrennt (Methode der ökologischen Knappheit 2021)

Es gelten dieselben Erkenntnisse für den Vergleich der Schotteraushubvarianten untereinander wie bereits in Kap. 4.1.1 beschrieben: Der Umweltfussabdruck ist wesentlich tiefer, wenn der Bahnschotter zu RC-Schotter aufbereitet und eingesetzt wird, anstatt nur als Kiesersatz verwendet wird. Die Variante mit Deponierung des ganzen Aushubs schneidet am schlechtesten ab.

Der grosse Unterschied zwischen getrenntem Aushub oder Aushub von Schotter und Unterbau zusammen ist, dass beim getrennten Aushub in der externen Aufbereitung (D3) der RC-Schotter schon heute technisch ausgesiebt und wieder eingesetzt werden könnte, wenn Bedarf danach bestünde und es von den Normen erlaubt wäre. Beim gemeinsamen Aushub in der externen Aufbereitung (C3) ist es dann möglich den Schotter vom Unterbau zu trennen, wenn der mitausgehobene Unterbau aus Kiessand PSS besteht, dessen maximaler Korndurchmesser in der Regel unter dem Kleinstkorn von Bahnschotter liegt. Es gibt aber nur sehr vereinzelte Situationen, bei denen eine Unterbausanierung erforderlich ist, wenn die Foundationsschicht bereits aus Kiessand PSS besteht. Sanierungsbedürftige Abschnitte weisen in der Regel einen sehr alten Unterbau aus Wandkies (meist Rundkorn) auf, der das gesamte Kornspektrum bis zu Steinen aufweist. In diesen Fällen ist eine Trennung in Schotterfraktion und anderem Material nicht möglich. In Zukunft ist zu erwarten, dass der Unterbau vermehrt aus Kiessand PSS besteht.

Aus Umweltsicht ist aus heutiger Sicht der getrennte Aushub dem gemeinsamen Aushub vorzuziehen und die Vorschriften so anzupassen, dass RC-Schotter eingesetzt werden darf.

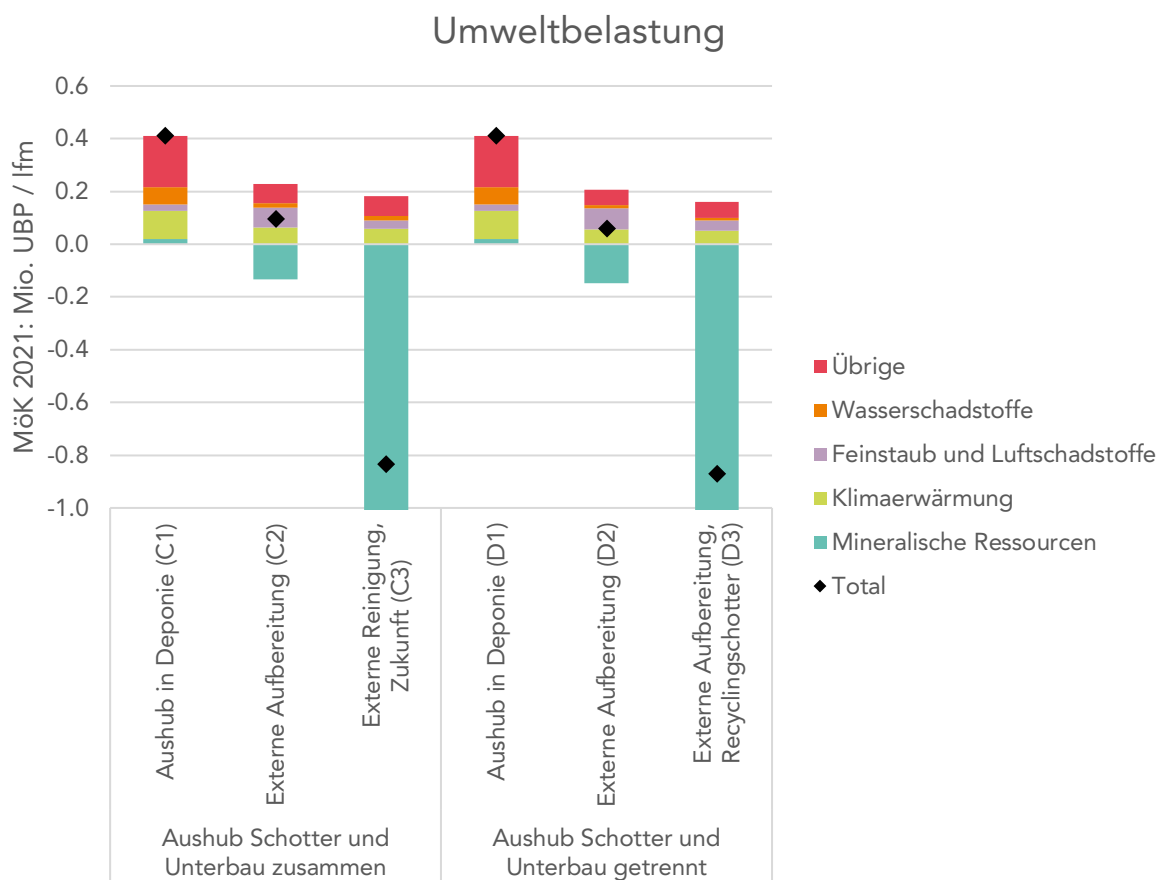


Abbildung 12: Umweltbelastung nach Wirkkategorie (Methode der ökologischen Knappheit 2021)

Auch bei den Varianten mit Unterbau zusammen oder Unterbau getrennt trägt der Faktor für die mineralischen Ressourcen am stärksten zur Umweltbewertung bei. Weiter relevant ist der Einfluss auf das Klima sowie Feinstaub und Luftschadstoffe. Andere Umweltwirkungen haben nur eine geringe Signifikanz für das Resultat.

Bezüglich der Diskussion des Klimafussabdrucks, siehe Abbildung 14 und der energetischen Ressourcen, siehe Abbildung 13, wird auf das Kapitel 3.1.1 verwiesen, da die Resultate vergleichbar sind, wie auch die Gründe warum für eine fundierte Entscheidung in diesem Projekt die umfassende Methode der ökologischen Knappheit verwendet werden soll.

Kumulierter Energiebedarf

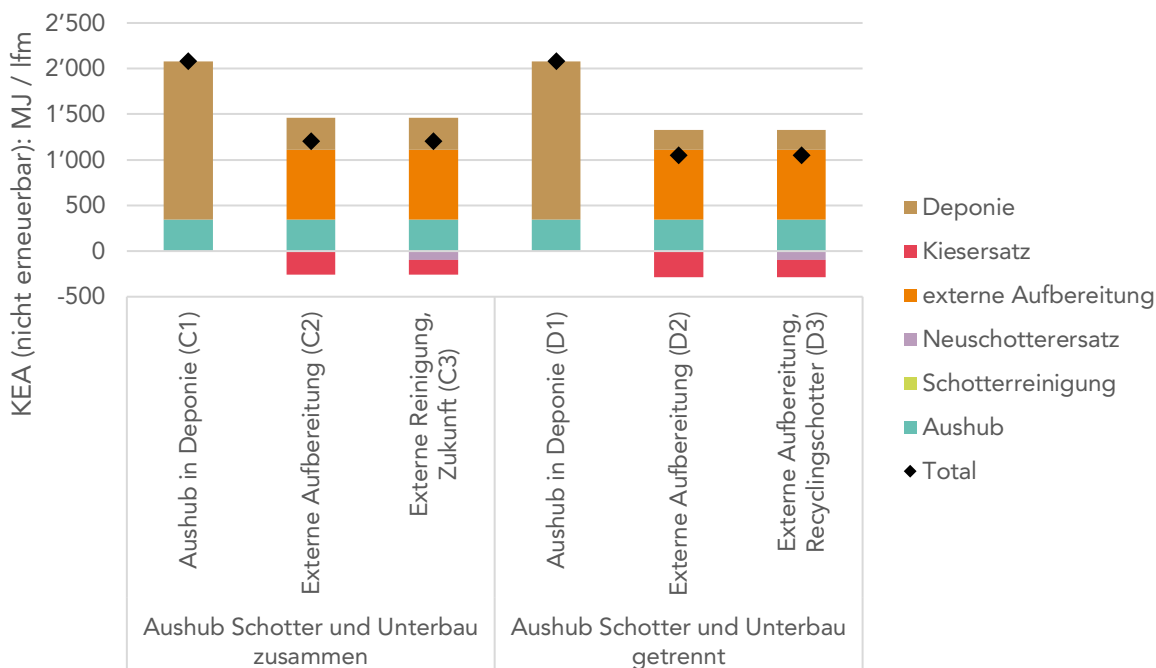


Abbildung 13: Kumulierter Energieaufwand (KEA) der Schotterreinigung vor Ort gegenüber Schotteraushub. Definition der Varianten siehe Kapitel 1.

Klimabelastung

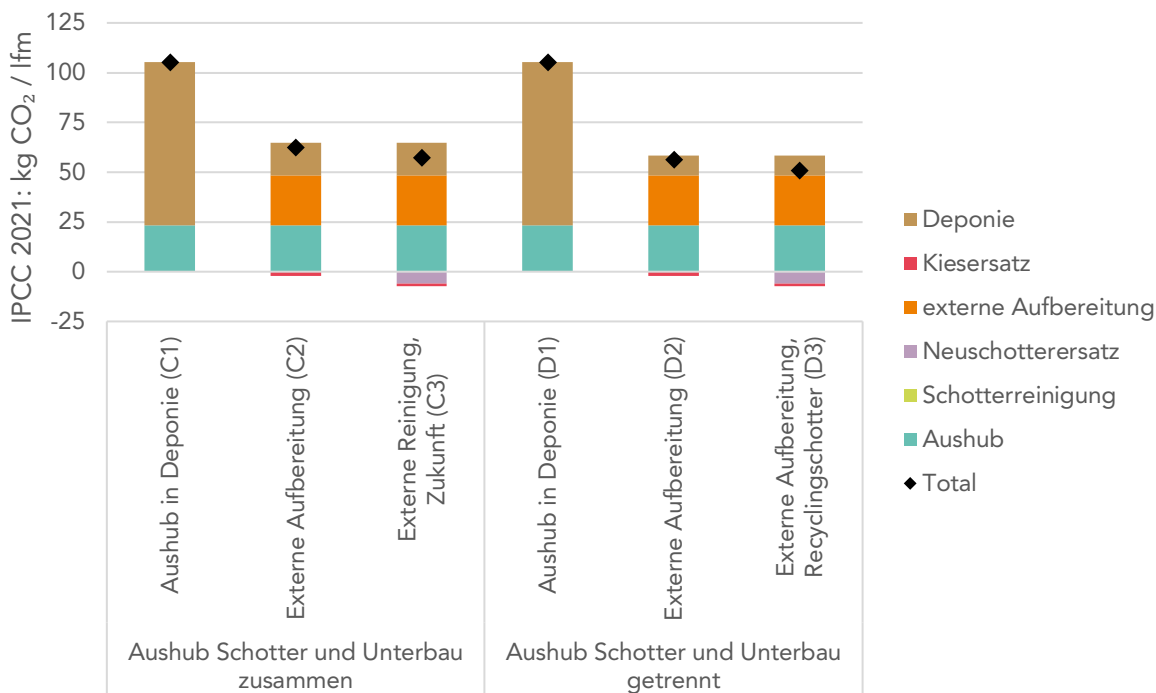


Abbildung 14: Klimafussabdruck der Schotterreinigung vor Ort gegenüber Schotteraushub. Definition der Varianten siehe Kapitel 1.

3.1.3 Unsicherheitsanalyse

Da die Unsicherheit der Ergebnisse teilweise von den gleichen Faktoren abhängig ist und sich damit aufheben, wurden einige besonders nahe beieinanderliegende Varianten direkt verglichen. Dabei werden mit einer Monte-Carlo-Analyse jeweils zwei Varianten miteinander verglichen, indem ermittelt wurde, wie oft die Differenz kleiner bzw. grösser als Null ist. Für die Berechnungen wurden jeweils 2'000 Runs durchgeführt. Dadurch lässt sich eine robustere Aussage zur Rangfolge der Ergebnisse treffen, als alleine durch Angabe des Unsicherheitsbereichs.

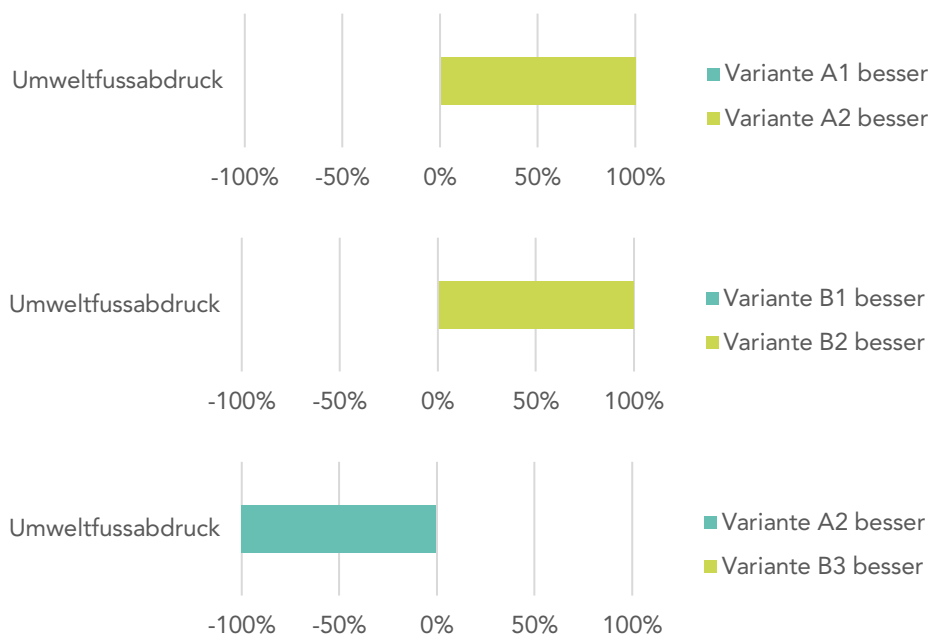


Abbildung 15: Ergebnisse des Monte-Carlo-Direktvergleichs

- Variante A1: Schotterreinigung, Ausfall in Deponie
- Variante A2: Schotterreinigung, Ausfall in Reinigung Kiesersatz
- Variante B1: Schotteraushub, Aushub in Deponie
- Variante B2: Schotteraushub, Aushub in Aufbereitung Kiesersatz
- Variante B3: Schotteraushub, Aushub in Aufbereitung für RC-Schotter

Mit der ersten Monte-Carlo-Analyse wurden für die Reinigung vor Ort die beiden Varianten mit Ausfall in Deponie (A1) und Ausfall in externe Aufbereitung (A2) verglichen. Dabei zeigte sich, dass 100 % der Direktvergleiche zugunsten der Variante A2 ausfielen. Dies zeigt, dass, obwohl der Unterschied der Umweltbelastung zwischen den beiden Varianten weniger als 10 % beträgt, dieser Unterschied als signifikant bezeichnet werden kann. Auch der Vergleich der zentralen Aufbereitung zwischen den Varianten Aushub in Deponie (B1) und Aushub in externe Aufbereitung (B2) zeigt das gleiche Ergebnis. Ebenfalls fällt in 100 % der Simulationen das Ergebnis zugunsten der Variante B2 aus. Beim Vergleich der Varianten Reinigung vor Ort (A2) und der zentralen Aufbereitung (B3) zeigt sich, dass Variante A2 signifikant besser ist als Variante B3.

Nicht dargestellt sind die Vergleiche A1 oder A2 mit B1 oder B2 da die Unterschiede sehr gross und damit sicher signifikant sind.

3.2 Kosten

Auf Basis von Kostenangaben der SBB konnten für die Varianten A und B die Kosten für den Ausbau und die Aufbereitung berechnet werden (Abbildung 16). Die Kalkulationen haben wir von der SBB vertraulich erhalten, konnten diese entsprechend prüfen jedoch dürfen wir diese nicht veröffentlichen. Da die Systemgrenzen in unserer Untersuchung nicht deckungsgleich mit denjenigen der SBB sind, mussten wir die Kosten zusätzlich an unsere Szenarien anpassen. (Die SBB Kosten berücksichtigen auch den Aufwand des Einbaus des Neumaterials und liegen wesentlich höher, während wir in unseren Szenarien diesen Einbau nicht berücksichtigt haben respektive Gutschriften berücksichtigen. – siehe dazu auch Kapitel 2.2), Die Berechnung der Kosten für die jeweiligen Referenzsysteme (gesamter Ausfall/Aushub in Deponie) wurden Kosten von 34.-/t für die Deponierung von Inertstoffen verwendet.

Die Varianten A «Schotterreinigung, gleisgebunden» weisen mit 30 bis 40 CHF pro Laufmeter wesentlich tiefere Kosten auf als die Varianten B bei denen der gesamte Bahnschotter ausgehoben wird und entweder in eine Deponie oder in eine zentrale Aufbereitung und Weiterverwendung gelangt. Diese Kosten liegen zwischen 200 und 250 CHF pro Laufmeter. Dabei sind die Kosten für Variante B1 «Aushub in Deponie» am höchsten. Die externe Aufbereitung und Einsatz als RC-Kies, Variante B2, ist geringfügig tiefer. Falls rund 60% als RC-Schotter wiederverwendet werden kann, Variante B3, so ergeben sich nochmals etwas tiefere Kosten im Vergleich zur Variante B2. Der Grund für die geringeren Kosten der Varianten A gegenüber den Varianten B liegt darin, dass bei der gleisgebundenen Schotterreinigung 60 % des Materials gleich wieder eingesetzt werden kann und somit ein Grossteil der Transport- und Materialkosten eingespart werden können.

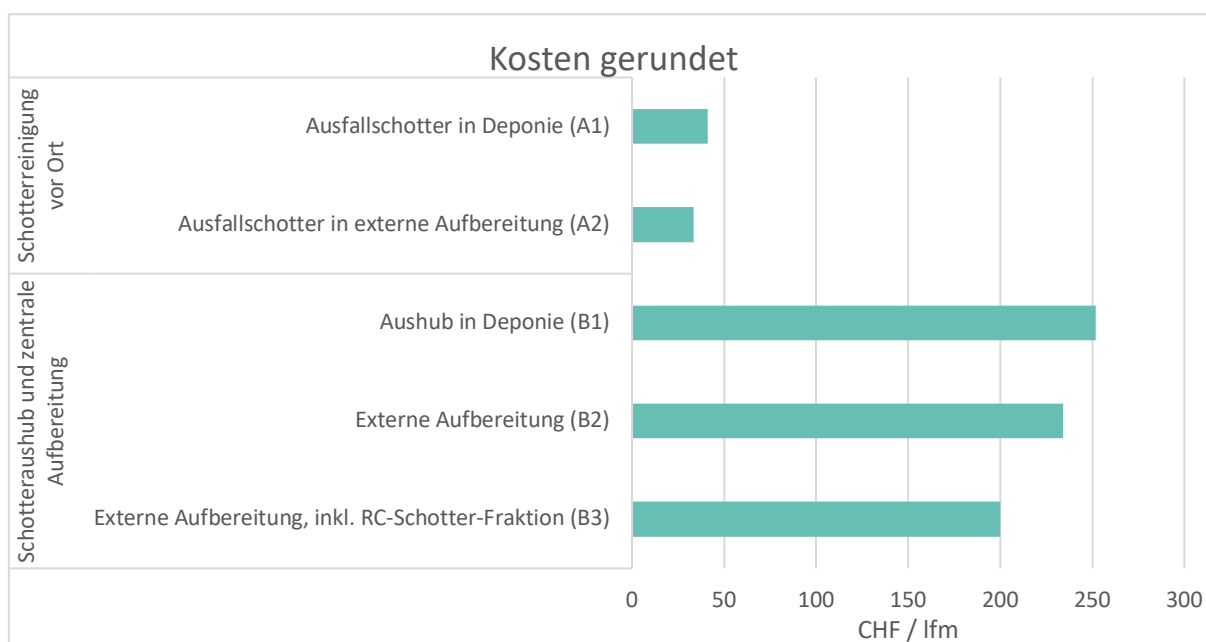


Abbildung 16: Kostenvergleich Varianten A und B

3.3 Öko-Effizienz

Ein System wird dann als öko-effizient bezeichnet, wenn möglichst geringe Umweltauswirkungen bei möglichst geringen Kosten entstehen. Die Öko-Effizienz wurde vom World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) definiert als Kombination von ökonomischen mit ökologischen Kennzahlen. Dabei soll gelten:

- Gleichgewichtung der ökonomischen und ökologischen Kennzahlen
- Eine höhere Öko-Effizienz weist einen besseren Zustand auf

Entsprechend diesen Anforderungen, muss der Öko-Effizienz Indikator entsprechend dem untersuchten System definiert werden. Im Falle des Gleisaushubes, verursacht die Variante B1 sowohl die höchsten Kosten wie auch höchsten Umweltauswirkungen. Daher wurde diese Variante als Basis verwendet und die Einsparung der Kosten bzw. Umweltauswirkungen als Differenz zur Variante B1 berechnet. Damit wurde die Öko-Effizienz folgendermassen definiert:

$$\text{Öko-Effizienz} = \text{Kosteneinsparungen (CHF)} * \text{Reduktion der Umweltauswirkungen (Mio. UBP)}$$

Im Gegensatz zu den Darstellungen der Umweltauswirkungen, bei denen ein tiefer Wert optimal ist, indiziert ein hoher Öko-Effizienz-Wert ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Lösungen an. Abbildung 17 zeigt die Öko-Effizienz der verschiedenen Varianten.

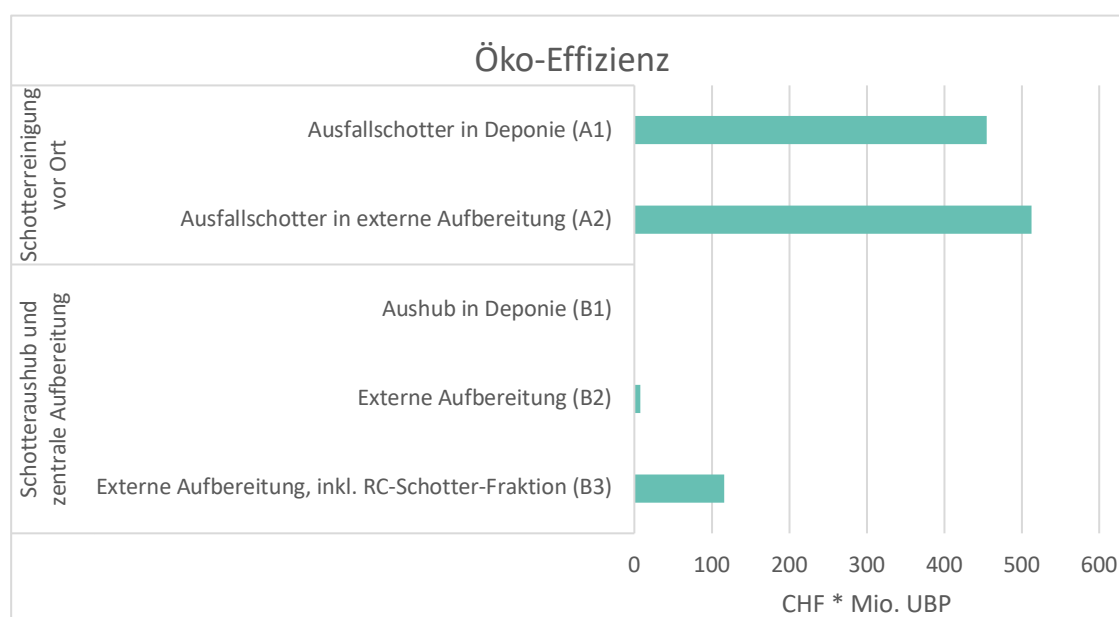


Abbildung 17: Öko-Effizienz der Varianten A und B

Mit Abstand am besten schneiden die Varianten A1 und A2 ab. Der Grund liegt vor allem in der Tatsache, dass die gleisgebundene Schotterreinigung wesentlich kostengünstiger als die zentrale Schotteraufbereitung ist. Da bei Variante A2 praktisch der gesamte Schotter aufbereitet und wieder eingesetzt wird, ist deren Öko-Effizienz höher als bei Variante A1 und wesentlich öko-effizienter als Variante B3, bei der auch der grösste Teil des Schotters aufbereitet wird. Obwohl die Unterschiede zwischen den Varianten A1 und A2 nicht sehr gross sind, so ist Variante A2 dennoch signifikant besser als Variante A1, da die Monte Carlo-Analyse dies für den ökologischen Teil gezeigt hat, Kapitel 3.1.3, und der ökonomische Teil in dieselbe Richtung weist. Zudem kann Variante A2 empfohlen werden, da diese zum Schutz der Kiesressourcen beiträgt und Deponevolumen einspart.

4 Fazit und Empfehlungen

Möglichst hohe Wiederverwendung von Hartsteinschotter ist entscheidend

Aus ökologischer Sicht schneiden diejenigen Varianten, bei denen ein möglichst hoher Anteil an Hartsteinschotter als gereinigter Grobschotter oder als RC-Schotter wieder verwendet wird, signifikant am besten ab. Der Hauptgrund liegt in der Schonung der Hartsteinressourcen. Diese sind zwar als reine mineralische Ressourcen in ausreichendem Masse vorhanden, jedoch ist deren Abbau aus raumplanerischer Sicht in der Schweiz begrenzt. Daher wird Gleisschotter schon heute teilweise aus dem Ausland importiert. Eine teilweise Verwertung des Altschotters als Kiesersatz z.B. in der Betonherstellung oder Strassenbaus, kann aus ökologischer Sicht nicht empfohlen werden, da Hartgestein eine wesentlich knappere Ressource darstellt als Kies, bzw. kann dafür auch Recyclingmaterial verwendet werden, welches nicht als Schotter im Gleisbau geeignet ist.

Neben der gesamtökologischen Beurteilung mit der Methode der ökologischen Knappheit wurden auch die Auswirkungen auf das Klima mit der Methode nach IPCC 2021 und der nicht erneuerbare kumulierte Energiebedarf berechnet. Diese haben gezeigt, dass die Variante A2: Schotterreinigung vor Ort und Ausfallschotter in Aufbereitung am besten abschneidet. Die anderen Varianten der Wiederverwendung des Gleisschotters als gereinigter Schotter, als Kies- oder RC-Ersatz haben vergleichbare Klimaauswirkungen bzw. kumulierten Energiebedarf. Damit spricht auch aus Klimasicht oder Sicht KEA nichts gegen eine möglichst hohe Wiederverwendung des Gleisschotters.

Bei allen untersuchten Indikatoren schliesst die Entsorgung in einer Deponie tendenziell bis signifikant am schlechtesten ab.

Gleisgebundene Reinigung ist einer zentralen Aufbereitung vorzuziehen

Falls nur der Schotter gereinigt wird, so kann dies gleisgebunden erfolgen. Dies ist einer zentralen Aufbereitung aus ökologischer wie auch aus ökonomischer Sicht vorzuziehen. Aushub mit externer Aufbereitung ist nur dann eine fast gleich gute Option wie die gleisgebundene Schotterreinigung, wenn zukünftig die Nachfrage nach RC-Schotter besteht und dieser separat ausgesiebt und als Schotter verwendet wird.

Aufbereitung von Schotter und Unterbau besser getrennt als zusammen

Falls auch der Unterbau ersetzt werden muss, so ist aus ökologischer Sicht der getrennte Aushub von Schotter und Unterbau dem gemeinsamen Aushub vorzuziehen. Denn während beim getrennten Aushub der RC-Schotter separat ausgesiebt werden kann, sofern die Nachfrage dazu besteht, ist dies beim gemeinsamen Aushub nur dann möglich, wenn der Unterbau aus Kiessand PSS besteht, was bei sanierungsbedürftigen, älteren Anlagen meist nicht der Fall ist. Somit kann beim gemeinsamen Aushub das Material zu 80% zwar wiederverwertet werden, jedoch nur als Kiesersatz. Betreffend den Kosten können dazu keine Aussagen gemacht werden, da die entsprechenden Daten nicht zur Verfügung standen.

Empfehlung

Eine Öko-Effizienz-Analyse hat gezeigt, dass aus ökonomischer und ökologischer Sicht die gleisgebundene Schotterreinigung am effizientesten ist, falls der Ausfall in einer zentralen Aufbereitungsanlage aufbereitet wird. Da die Unterschiede zur nächst besten Variante signifikant sind, wird empfohlen, wenn möglich diese zu realisieren.

In jedem Fall soll eine möglichst hohe Wiederverwertung des Gleisschotters als gereinigter Schotter oder RC-Schotter angestrebt werden. Um dies zu ermöglichen, sind auch normative Anpassungen notwendig. Eine Verwertung als Kiesersatz z.B. in Beton oder kann nicht empfohlen werden. Dies kommt einem Downcycling der knappen Ressource Hartstein gleich.

5 Abkürzungen und Glossar

Abkürzung	Beschreibung
BAFU	Bundesamt für Umwelt der Schweiz
BAV	Bundesamt für Verkehr
F_n	Normierungsfluss: Aktuelle jährliche Emissionen (oder Umweltwirkung), bezogen auf die Schweiz
F	Aktueller Fluss: Aktueller jährliche Emissionen, bezogen auf das Referenzgebiet (meist die Schweiz)
F_k	Kritischer Fluss: Jährliche Emissionen nach Erreichen des Umweltziels, bezogen auf das Referenzgebiet (meist die Schweiz); teilweise definiert über ein Reduktionsziel;
FE	Funktionelle Einheit
IPCC	International Panel of Climate Change
KEA	Kumulierter Energieaufwand
l _{fm}	Laufmeter Geleise
LKW	Lastwagen
Mök	Methode der ökologischen Knappheit
UBP	Umweltbelastungspunkte; Einheit der Umweltauswirkungen in der Methode der ökologischen Knappheit

Für verschiedene Begriffe, welche im Rahmen dieses Projektes wichtig sind, gibt es unterschiedliche Definitionen. In diesem Bericht werden die aufgeführten Begriffe gemäss der im Folgenden aufgeführten Definition verwendet.

Begriff	Erklärung
Altschotter	Ausgebauter Schotter, der nicht vor Ort gereinigt und wiederverwendet wird, gemäss R RTE 21110. Dieser kann in eine externe Aufbereitungsanlage gelangen und zu RC-Schotter aufbereitet oder deponiert werden.
Ausfallschotter	Altschotter, der eine zu kleine Körnung aufweist als dass er wieder als Schotter eingesetzt werden kann, gemäss Gleisaushubrichtlinie.
Bahnschotter	Wird als Überbegriff für die verschiedenen Schotterarten, wie Altschotter, Gleisschotter, Grobschotter oder RC-Schotter, verwendet, welche im Gleisbau verwendet werden.
Gleisschotter	Neuer Schotter gemäss SN 670 110
Grobschotter	Schotter der vor Ort gereinigt wurde, gemäss Gleisaushubrichtlinie Kapitel 6
RC-Schotter	Schotter der bei einem Recycling-Unternehmen aufbereitet wurde
Schotteraufbereitung	Externe Aufbereitung oder Verwertung durch Entsorgungsunternehmen
Schotterreinigung	gleisgebundener Schotterreinigung
Unterbau	Unterbau unter dem Bahnschotter der in der Regel aus Wandkies, Kiessand PSS
Wiederverwendung	Wiederholter Einsatz eines Materials oder Produktes nachdem dieses gereinigt, jedoch nicht einer Umwandlung unterworfen wurde. In diesem Bericht wird dieser Begriff z.B. im Zusammenhang mit Grobschotter verwendet.
Wiederverwertet	Wiedereinsatz eines Materials nachdem dieses einem Umwandlungsprozess oder Reinigung unterworfen wurde. In diesem Bericht wird dieser Begriff z.B. im Zusammenhang mit RC-Schotter verwendet.

6 Literatur

- 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.
- Frischknecht, R., Dinkel, F., Braunschweig, A., Ahmadi, M., Kägi, T., Krebs, L., u. a. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (S. 200). Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H. J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., u. a. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No.3, v2.2*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. Abgerufen von http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03_LCIA-Implementation-v2.2.pdf
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021, The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*. Abgerufen von <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Geneva.
- ISO 14040. (2006). *Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines*. Geneva.
- ISO/TC. (2006). *Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kägi, T., Dinkel, F., Frischknecht, R., Humbert, S., Lindberg, J., De Mester, S., u. a. (2016). Session “Midpoint, endpoint or single score for decision-making?”—SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015. Conference Session Report. *Int J Life Cycle Assess*, 21(1), 129–132. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0998-0>
- PRé Consultants. (2021). SimaPro 9.2.0.1 (Version 9.2.0.1). PRé Consultants.
- swisstopo. (2021, August 13). Hartstein – Bedarf und Versorgungssituation in der Schweiz. DRAFT.

