

Executive Summary

Aktualisierte Ökobilanz von Cargo sous terrain vertieft und bestätigt die guten Umweltdaten von 2015

Cargo sous terrain (CST) hat das Life Cycle Assessment (LCA) für sein Gesamtlogistiksystem erneuern lassen. Wie schon die erste Ökobilanz aus dem Jahr 2015, ist es von unabhängiger Seite durchgeführt und geprüft worden.

Ein LCA betrachtet die Umweltwirkungen, Ressourcen- und Energiebilanz eines technischen Systems oder Produktes «von der Wiege bis zur Bahre». Sämtliche Aufwendungen über den gesamten Lebenszyklus - vom Bau über den Betrieb bis hin zum Ersatz und der Entsorgung von Komponenten der ersten Teilstrecke von CST - wurden untersucht, quantifiziert und mit Vergleichsszenarien ohne CST verglichen.

Die Hauptidee aus dem ersten LCA wurde durch die neue Studie von 2023 bestätigt: CST weist eine deutlich tiefere Umwelt- und Klimabelastung als der Strassentransport aus, auch in einer Zukunft mit neuen LKW-Antriebsarten.

Gegenüber dem ersten LCA von Quantis, konnte das Beratungsunternehmen Carbotech auf aktualisierte und vertiefte Grundlagen und Bewertungsmethoden zur Modellierung des CST-Systems zurückgreifen. Die Studie und Resultate wurden durch eine studienbegleitende Critical Review von der Empa St. Gallen geprüft und verifiziert.

Über die im LCA ermittelten Auswirkungen hinaus, bringt CST weitere Vorteile, welche sich auch mit aktualisierten Methoden des LCA nicht oder nicht vollständig abbilden lassen. Zu diesen weiteren Faktoren gehören zentrale Leistungen von CST wie die Reduktion von Staus und Unfällen. Ebenfalls ausserhalb der Modellgrenzen liegen die Flächeneinsparungen bei CST-Kunden oder die Bündelungs-Effekte, die dank der digital gesteuerten Vorsortierung von Gütern im Tunnelsystem von CST auch bei der Zustellung immer kleinteiligerer Güter auf der letzten Meile, insbesondere in der Stadt, zum Tragen kommen.

So hat eine wissenschaftliche Studie der ZHAW aufgezeigt, dass der CST-Tunnel kombiniert mit einer höheren Auslastung durch eine konsolidierte Feinverteilung, die Fahrleistung von Lastwagen in der Stadt Zürich pro Tag um 25% reduzieren und so die Stadt verkehrlich stark entlasten kann. Und aus aktuellen Verkehrsanalysen geht hervor, dass CST bereits mit der Eröffnung des ersten Teilstücks im Jahr 2031 den schweren Güterverkehr auf der A1 zwischen Härkingen und Zürich um bis zu 30% reduziert. Eine ältere, im Auftrag des Bundesamts für Verkehr durchgeführte Studie kommt zum Schluss, dass CST aufgrund der Reduktion der Verkehrsmenge und der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen PW und LKW die Stauzeit an neuralgischen Punkten der A1 um 5 bis 10% vermindert. Dies entspricht mehreren 1'000 vermiedenen Staustunden pro Tag.

Durch neue Lösungen für eine zuverlässige, resiliente und nachhaltige Warenversorgung in der Schweiz erhöhen sich so die Vorteile von CST gegenüber dem Strassentransport zusätzlich zu den Umweltleistungen, die das neue LCA ausweist.

Da das LCA auf Material- und Energieflüssen basiert, lassen sich darin soziale, ökonomische und technische Faktoren nicht direkt bewerten. Diese Effekte müssen über spezifische wissenschaftliche Studien weiter untersucht und danach in den LCA-Modellen ergänzt werden. Diese Auswirkungen will CST erfassen, sobald dies mit allgemeingültigen Methoden möglich ist.

CST steht zu seiner langjährigen Verpflichtung, das System mit zertifiziertem, erneuerbarem Strom zu betreiben und pflegt eine transparente Kommunikation im Hinblick auf seine Umweltwirkungen und den Stand des Wissens, auch was noch offene Punkte angeht.

Für weitere Informationen:

Carmen Bachmann, Nachhaltigkeitsbeauftragte CST
 carmen.bachmann@cst.ch
 +41 44 586 78 53

Patrik Aellig, Kommunikationsbeauftragter CST
 patrik.aellig@cst.ch
 +41 78 764 13 88

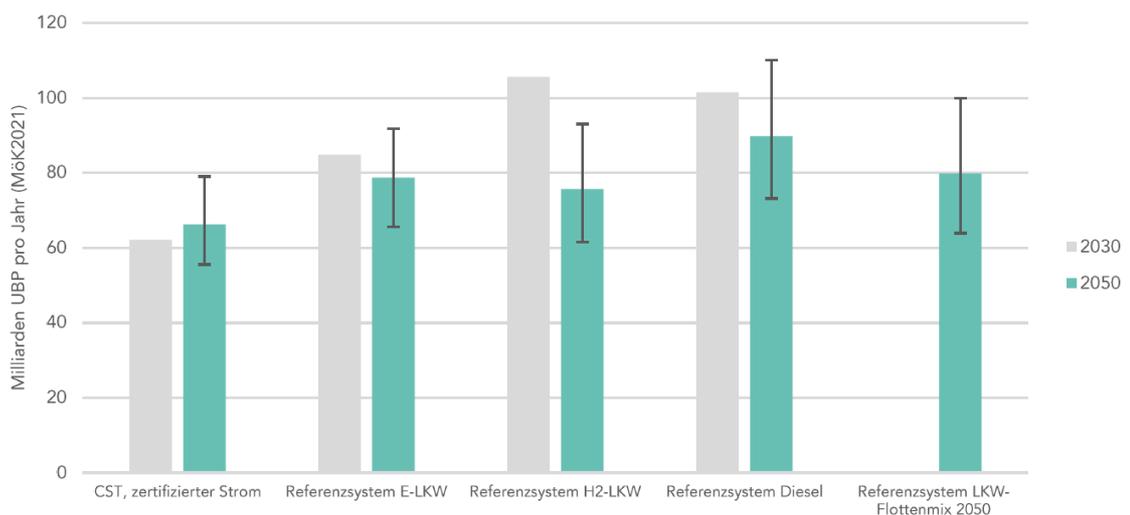


Abbildung 1 - Jährliche Umweltbelastung von CST, den Referenzsystemen und dem prognostizierten LKW-Flottenmix 2050. Am wichtigsten ist der Vergleich mit dem zu erwartenden Flottenmix, nicht der Vergleich mit einzelnen Antriebsarten, welche nicht das gesamte Transportvolumen abdecken können.

CustomLCA

Ökobilanz Cargo sous terrain

Lebenszyklusanalyse von Bau und Betrieb des Cargo sous terrain Systems und Vergleich mit konventionellem Gütertransport

Auszug

Auftraggeberin

Carmen Bachmann, Cargo sous terrain, Römerstrasse 3, CH-4600 Olten

Verfasser

Gavin Roberts, Stefanie Conrad & Thomas Kägi, Carbotech AG

Anzahl Seiten: 30

Basel, 7. September 2023

Impressum

Titel

Ökobilanz Cargo sous terrain

Auftraggeberin

Carmen Bachmann, Cargo sous terrain, Römerstrasse 3, CH-4600 Olten

Auftragnehmer

Carbotech AG

Verfasser/Autoren

Gavin Roberts, Stefanie Conrad & Thomas Kägi

Externes Review

Roland Hischier, Empa, St. Gallen

Version

1.1

Basel, 7. September 2023

–

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. Zu beachten ist, dass die Grundlagedaten und die Bewertungsmethode, auf welcher dieser Bericht basiert, ändern können. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig. 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.

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage und Zielsetzung	8
2 Methodik und Vorgehen	10
2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung	10
2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	10
2.3 Externes Review	11
2.4 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	11
2.4.1 Zielsetzung	11
2.4.2 Funktionelle Einheit	11
2.4.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie	12
2.4.4 Systemgrenze	12
2.5 Sachbilanz	14
2.5.1 Modellierung des Produktsystems	14
2.5.2 Vordergrunddaten	15
2.5.3 Umgang mit Produktbestandteilen	16
2.5.4 Hintergrunddaten	16
2.6 Wirkbilanz	16
2.6.1 Die Methode der ökologischen Knappheit	17
2.7 Unsicherheiten und Sensitivitätsanalysen	18
3 Resultate und Diskussion	20
3.1 Analyse Cargo sous terrain	20
3.2 Vergleich Cargo sous terrain und Referenzsystem 2030	22
3.2.1 Gesamtumweltbelastung	22
3.2.2 Klimabilanz	23
3.3 Szenarien	24
3.3.1 Entwicklung 2040 und 2050	24
3.3.2 Auslastung	26
4 Fazit	29
5 Literatur	30

Zusammenfassung

Cargo sous terrain (CST) verfolgt das Ziel einen Teil des Güterverkehrs auf den am stärksten befahrenen Achsen der Schweiz in den Untergrund zu verlagern. Dazu soll ein System von Genf bis St. Gallen und von Basel bis nach Luzern, mit einem zusätzlichen Ast nach Thun, entstehen. Die erste zu realisierende Teilstrecke führt dabei von Neuendorf via Zürich City bis zum Flughafen Zürich.

Die ökologischen Auswirkungen dieses Projekts wurden bereits einmal mit einer Ökobilanz untersucht (Zah & Del Duce, 2015). Die vorliegende Studie führt ebenfalls eine Ökobilanz der ersten Teilstrecke durch, mit aktuelleren Datenbanken und Methoden sowie einer weiter ausgereiften Planung.

Sämtliche Aufwendungen für Bau und Betrieb der ersten Teilstrecke von CST wurden ökobilanztechnisch untersucht. Die Umweltwirkungen wurden mit der Methode der ökologischen Knappheit 2021 (MöK 2021), der Methode IPCC 2021 (Klimabelastung) sowie mit der Environmental Footprint Methode 3.1 (EF 3.1) bewertet. Dieser Auszug umfasst nur die Bewertung mit den ersten beiden Methoden. Der vertrauliche Hauptbericht umfasst, neben den genauen Sachbilanzdaten und der Analyse weiterer Varianten, auch die Resultate mit der EF 3.1 Methode.

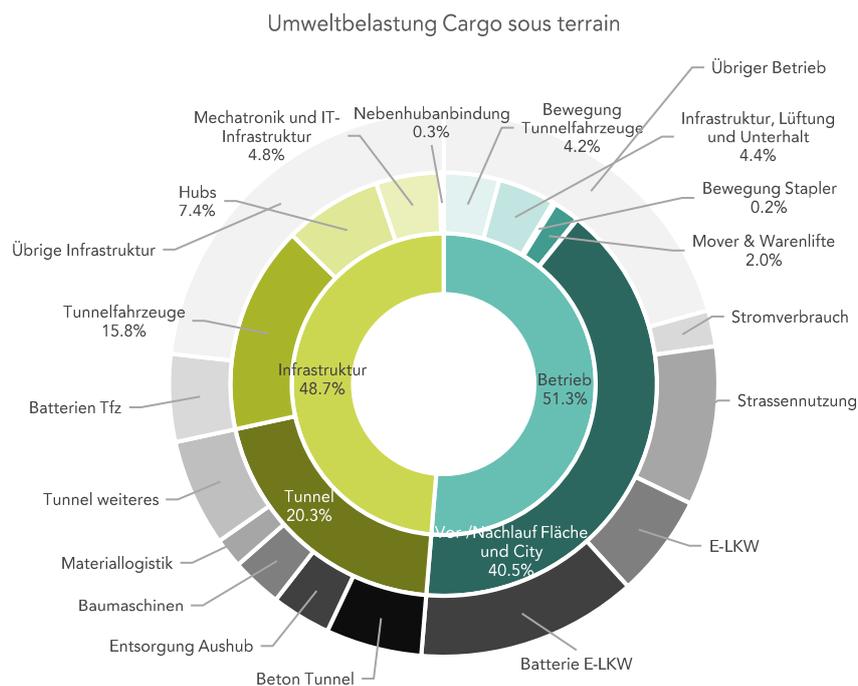


Abbildung 1: Aufteilung der Umweltbelastung des CST-Systems (pro Jahr, MöK 2021)

Die jährliche Umweltbelastung von CST verteilt sich etwa zur Hälfte auf die Infrastruktur und zur Hälfte auf den Betrieb. Bei letzterem geht der grösste Anteil auf die Feinverteilung mit E-LKWs zurück. Bei der Infrastruktur tragen der Bau des Tunnels sowie die Herstellung der Tunnelfahrzeuge am stärksten zur Umweltbelastung bei.

Die Umweltbelastung von CST wurde mit der Umweltbelastung verglichen, die entsteht, wenn die gleiche Menge an Gütern per LKW (90 %) und Schiene (10 %) transportiert wird. Da die Infrastruktur von CST erst

in naher Zukunft gebaut sein wird, wurden dazu die Referenzjahre 2030, 2040 und 2050 definiert. Bezüglich Antriebstechnologien wurden Diesel-LKWs, Elektro-LKWs und H₂-LKWs untersucht. Bei CST und den LKWs mit alternativem Antrieb wurde zudem der Einfluss des Strommixes untersucht.

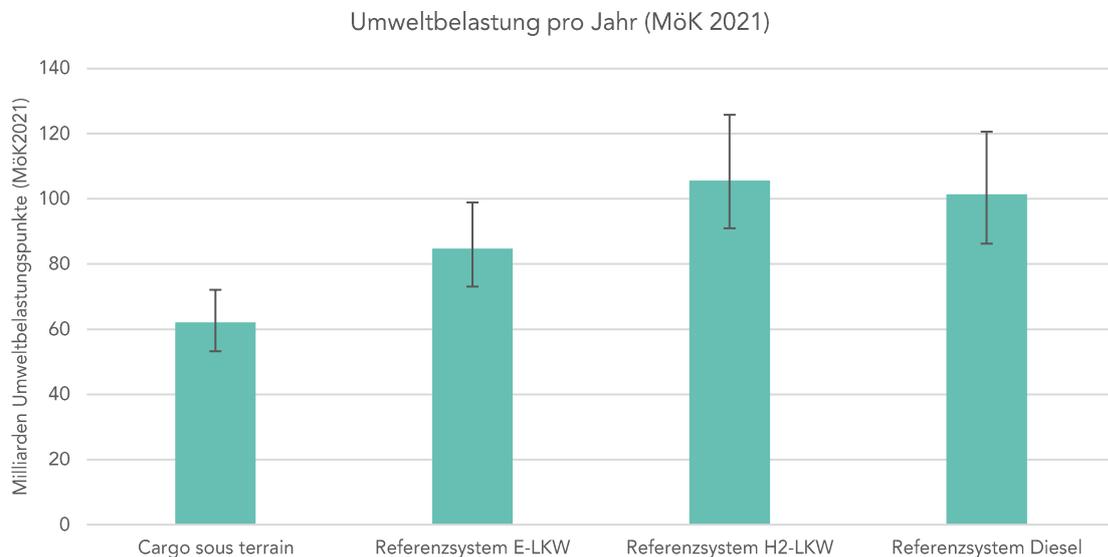


Abbildung 2: Umweltbelastung während einem Betriebsjahr für Cargo sous terrain und die Referenzszenarien (MöK 2021)

Wird die Gesamtumweltbelastung mit der Methode der ökologischen Knappheit 2021 analysiert, dann weist Cargo sous terrain unter Verwendung von zertifiziertem Strom eine wesentlich bessere Ökobilanz als das Referenzsystem mit Diesel-LKWs auf. Auch gegenüber E-LKWs und H₂-LKWs weist CST eine wesentlich bessere Ökobilanz auf, wenn die Referenzsysteme mit dem durchschnittlichem Schweizer Strommix betrieben werden.

Die Auswertung mit IPCC 2021 und EF 3.1 kommt in den Grundzügen zu ähnlichen Ergebnissen.

Auch die Auswertung des Referenzjahrs 2050 zeigt, dass CST das tendenziell beste Ergebnis aufweist. Die Unterschiede zwischen den Referenzszenarien werden jedoch kleiner, da sich der durchschnittliche Schweizer Strommix bis 2050 verbessert. Gleichzeitig werden die Unsicherheiten der Modellierung grösser.

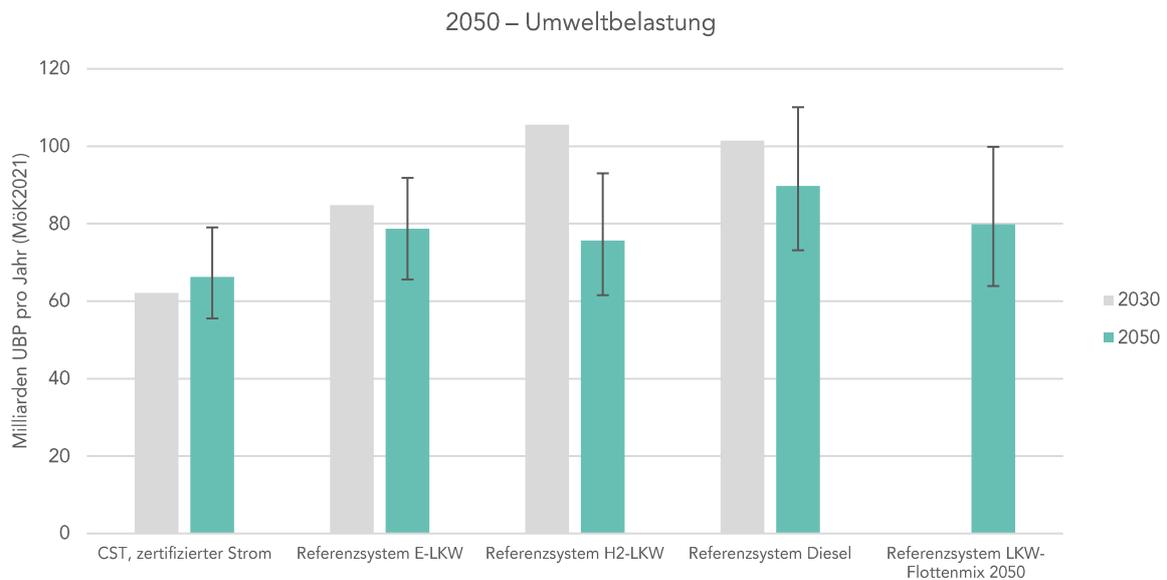


Abbildung 3: Jährliche Umweltbelastung (MöK 2021) im Jahr 2050 von CST, den Referenzsystemen und dem erwartbaren Flottenmix.

Insgesamt kann mit Cargo sous terrain eine Reduktion gegenüber dem aktuell vorherrschenden Transportsystem mit Diesel-LKWs erzielt werden. Gegenüber E-LKWs und H₂-LKWs wird ein besseres Ergebnis erzielt, wenn bei den Referenzszenarien mit dem durchschnittlichen Strommix 2030 gerechnet wird. Auch 2050 erreicht CST ein tendenziell besseres Ergebnis. Die Unsicherheit der Ergebnisse ist dann allerdings grösser, als der Unterschied zwischen den Varianten.

Die vorliegende Studie betrachtet nur die ökologischen Auswirkungen. Für eine gesamtheitliche Beurteilung von CST sollten auch soziale und wirtschaftliche Faktoren bezüglich Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. So geht beispielsweise die Studie der ZHAW davon aus, dass dank CST die Fahrleistungen von LKWs in der Stadt Zürich um 25 % gesenkt werden kann. Auch auf der A1 soll 30 % des Schwerverkehrs und damit 3 % des Gesamtverkehrs dank CST verschwinden (B+S AG, 2023), was wiederum zu einer Reduktion der Stauzeiten von 5 bis 10 % an den neuralgischen Stellen führen soll (Maibach u. a., 2016). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen jedoch auch, dass einige dieser ausgewiesenen positiven Effekte von Cargo sous terrain – wie vermiedene Staus, Unfälle und effizientere Nutzung von Verkehrsflächen – mit der bestehenden Ökobilanz-Methodik nur ansatzweise quantifiziert werden können.

Glossar und Abkürzungen

CST	Cargo sous terrain
Cut-off Ansatz	Methode zur Zuordnung der Umweltauswirkungen (Allokation) beim Recycling auf die Produkte die ins Recycling gelangen zu den Rezyklaten. Beim Cut-off Ansatz endet der Lebensweg des ersten Produktes im Moment der Sammlung (Cut-Off) alle weiteren Aufwände ab Sammlung werden dem Rezyklat belastet. Es erfolgt keine Gutschrift für den Ersatz von Primärmaterial.
EF 3.1	Environmental Footprint. Bewertungs-Methode entwickelt für den europäischen Kontext.
ESR	Electrified Road System
Funktionelle Einheit	Bezugsgrösse, auf die sich ein Vergleich oder eine Analyse bezieht. Widerspiegelt die Funktion des Produktes.
GWP	Global Warming Potential: Treibhausgaspotential
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change: UN Gremium, welches sich mit der Klimaveränderung befasst.
ISO 14'040 ff	ISO Normen über die Erstellung von Ökobilanzen
LCA	Life Cycle Assessment: Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse
MöK 2021, Methode der ökologischen Knappheit 2021	Totalaggregierende Bewertungsmethode, basierend auf umweltpolitischen Zielsetzungen. Ergebnis: Umweltbelastungspunkte (UBP). Als Gewichtungsfaktor der Auswirkungen wird die ökologische Knappheit verwendet: Verhältnis aktuelle Emissionsfracht in der Schweiz zur maximal tolerablen Fracht (kritische Fracht). (BUWAL 1990 bzw. Braunschweig et al. 1993, aktualisiert im Auftrag des BAFU: 1997, 2006, 2013 und 2021).
Ökoinventar	Enthält sämtliche umweltrelevanten, quantitativen Angaben eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung in Form von Inputs und Outputs.
Sachbilanz	Darstellung von Stoffflüssen und Energieverbräuchen in physikalischen Grössen
UBP, Umweltbelastungspunkt	Umweltbelastungspunkt ist die Einheit, in der die Resultate der Berechnungen mit der Methode der ökologischen Knappheit angegeben werden.
UVEK 2021	Ökobilanzdatenbank, welche auf ecoinvent v2.2 basiert und für die Situation der Schweiz aktualisiert und angepasst wurde.
Wirkbilanz	Im Rahmen der Wirkbilanz werden die Ergebnisse der Sachbilanz hinsichtlich bestimmter Wirkungen auf die Umwelt, wie z. B. Treibhaus- oder Ozonbildungspotential, beurteilt. Dies geschieht mit Gewichtungsfaktoren als Bestandteil eines Gewichtungsmodells.
Wirkung	Auswirkung durch Emissionen oder die Nutzung von Ressourcen auf die Umwelt

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Verkehrsinfrastruktur der Schweiz stösst auf immer mehr Strecken an ihre Grenzen. In den kommenden Jahrzehnten dürften sowohl der Personenverkehr als auch der Güterverkehr weiter steigen (Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2022).

Cargo sous terrain (CST) verfolgt das Ziel einen Teil dieses Güterverkehrs in der Schweiz über ein unterirdisches Netzwerk verteilen zu lassen. Dazu soll eine erste Strecke des Netzwerks zwischen Neuendorf und Zürich mit 11 Hubs bis 2031 realisiert werden.

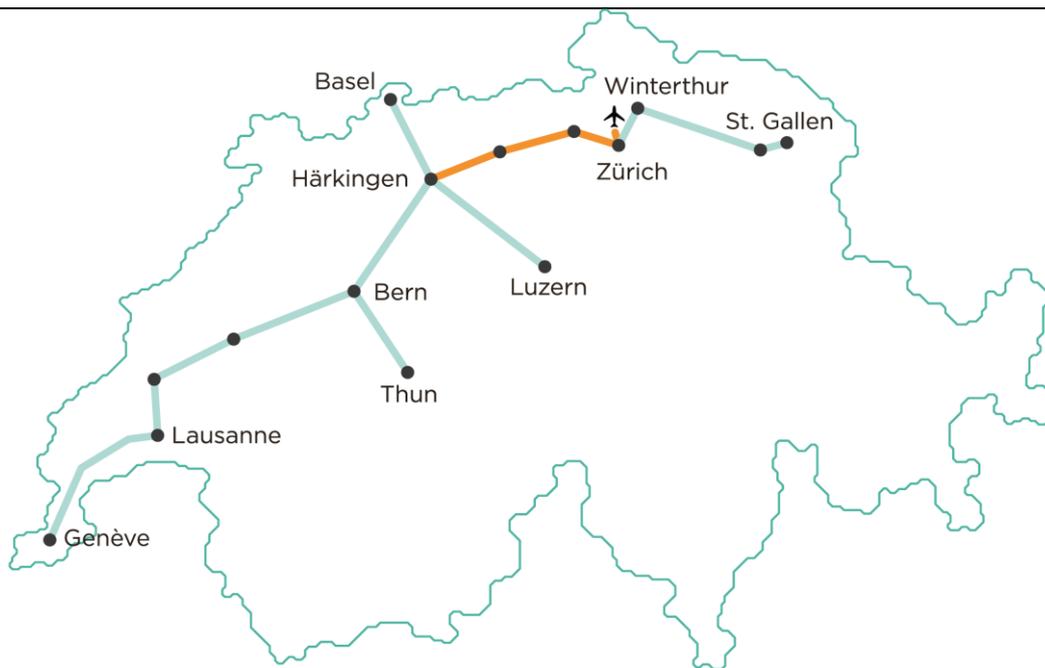


Abbildung 4: Geplantes Netz CST im Endausbau. Grafik: CST

2015 wurde bereits eine Ökobilanzanalyse zu CST von Quantis durchgeführt (Zah & Del Duce, 2015). Diese stellte fest, dass CST je nach Szenario eine signifikante Reduktion der Umweltauswirkungen gegenüber dem Referenzszenario bewirken kann.



Abbildung 5: Verlauf der 1. Teilstrecke. Grafik: CST

In der Zwischenzeit ist die Planung bei CST vorangeschritten und viele noch unsichere Parameter der Vorgängerstudie wurden nun konkretisiert. Auch die Ökobilanz-Datenbanken und Bewertungsmethoden haben in der Zwischenzeit verschiedene Aktualisierungen erfahren. Aus diesen Gründen soll mit dieser Studie eine erneute Beurteilung des CST-Systems in ökologischer Hinsicht vorgenommen werden.

Dazu soll, wie in der Vorgängerstudie, die ökologische Auswirkung des Güterverkehrs während eines Jahres analysiert werden, wenn diese Güter mit CST transportiert werden. Diese Auswirkungen werden dem Referenzszenario, wenn kein CST-System gebaut wird, gegenübergestellt. Dabei wird insbesondere anhand von Szenarien berücksichtigt, dass sich die Antriebsarten der LKWs in Zukunft ebenfalls weiter entwickeln. Dazu werden Szenarien mit Elektroantrieb sowie mit Wasserstoff/Brennstoffzelle berücksichtigt.

Aufgrund neuer Methoden sollen folgende zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden: Bewertung der Lärmreduktion durch CST, Bewertung der Verminderung von Mikroplastikeinträgen aufgrund des geschlossenen Systems von CST sowie die Reduktion der Landnutzung durch Verlagerungseffekt und dem entsprechend geringeren Druck auf die oberirdische Verkehrsinfrastruktur.

Die Erkenntnisse der Studie sollen zudem helfen Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Dazu werden die relevantesten Komponenten von CST identifiziert und für diese Hot-Spots mögliche Alternativen ökologisch bewertet.

Der vorliegende Auszug stellt eine Auswahl der wichtigsten Erkenntnisse der vertraulichen Hauptstudie dar.

2 Methodik und Vorgehen

Heute besteht ein breiter Konsens, dass die 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 genannten Produkte zu eruieren.

2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung

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. 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 Beurteilung 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 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

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, 2006; ISO/TC, 2006) umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

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

Wie Abbildung 6 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

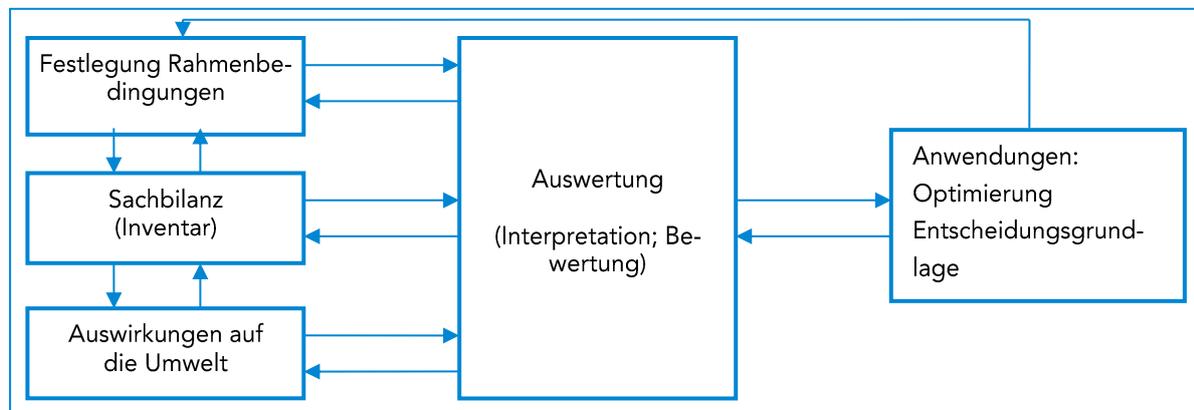


Abbildung 6: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040/44

Die vorliegende Studie richtet sich nach der Norm ISO 14'040; bei der Verwendung von gesamtaggregierenden Methoden, divergiert die vorliegende Studie jedoch von der Norm.

2.3 Externes Review

Die Studie wurde einem Critical Review, angelehnt an ISO 14'040/44 (2006a, b), unterzogen. Dazu wurde nicht ein Review-Panel, aber eine unabhängige externe Fachperson hinzugezogen. Das Reviewverfahren wurde studienbegleitend durchgeführt.

Als Gutachter wurde Roland Hischier von der Empa, St. Gallen, herbeigezogen.

2.4 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

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

2.4.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Studie ist es zu bewerten, wie gross die Umweltbelastung des Gütertransports via Cargo sous terrain ist. Insbesondere sollen der Bau und Betrieb von CST berücksichtigt werden. Diese Auswirkungen sollen verglichen werden mit dem Transport der gleichen Menge an Güter via dem bestehenden oberirdischen Gütertransportsystem.

2.4.2 Funktionelle Einheit

Die Grösse, auf welche sich die Analyse bezieht, wird als funktionelle Einheit bezeichnet.

Als funktionelle Einheit in dieser Studie wird die in einem Jahr auf der Teilstrecke transportierte Menge an Gütern definiert.

2.4.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie

Dieser Auszug der Studie richtet sich in erster Linie an die Auftraggeberin Cargo sous terrain sowie an die interessierte Öffentlichkeit.

2.4.4 Systemgrenze

Die vorliegende Ökobilanz betrachtet die ökologischen Auswirkungen „von der Wiege bis zur Bahre“ (*cradle to grave*). Es werden entsprechend dem Ökobilanz-Ansatz, soweit möglich, alle umweltrelevanten Prozesse innerhalb der Systemgrenze von der Extraktion der Rohstoffe, über deren Verarbeitung zu den verwendeten Materialien und Komponenten, inklusive der Transportprozesse, der Nutzung bis zur Entsorgung der involvierten Materialien erfasst und bewertet.

Die Systemgrenze der vorliegenden Studie umfasst damit im Wesentlichen die folgenden als relevant betrachteten Stoff- und Energieflüsse der nachfolgenden Prozesse und Dienstleistungen (siehe Abbildung 7 und 8):

- Bereitstellung und Herstellung der Materialien für die Infrastruktur von Cargo sous terrain sowie der Referenzsysteme
- Transporte von Rohstoffen und Materialien bis zur Baustelle
- Abfälle und deren Behandlung entlang der Produktionsketten und aus der Bereitstellung Hilfsstoffe und Energie
- Bereitstellung Energie Wärme und Strom, Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle, etc. für die involvierten Prozesse

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

Nicht berücksichtigt werden die transportierten Güter selbst.

Es wird zwar berücksichtigt, dass es zukünftig zu einer Steigerung der transportierten Menge an Gütern kommt. Es wird jedoch nicht berücksichtigt, ob das CST-System indirekt einen Einfluss auf diese Menge hat (z. B. via tiefere/höhere Preise, schnellere/langsamere Transporte).

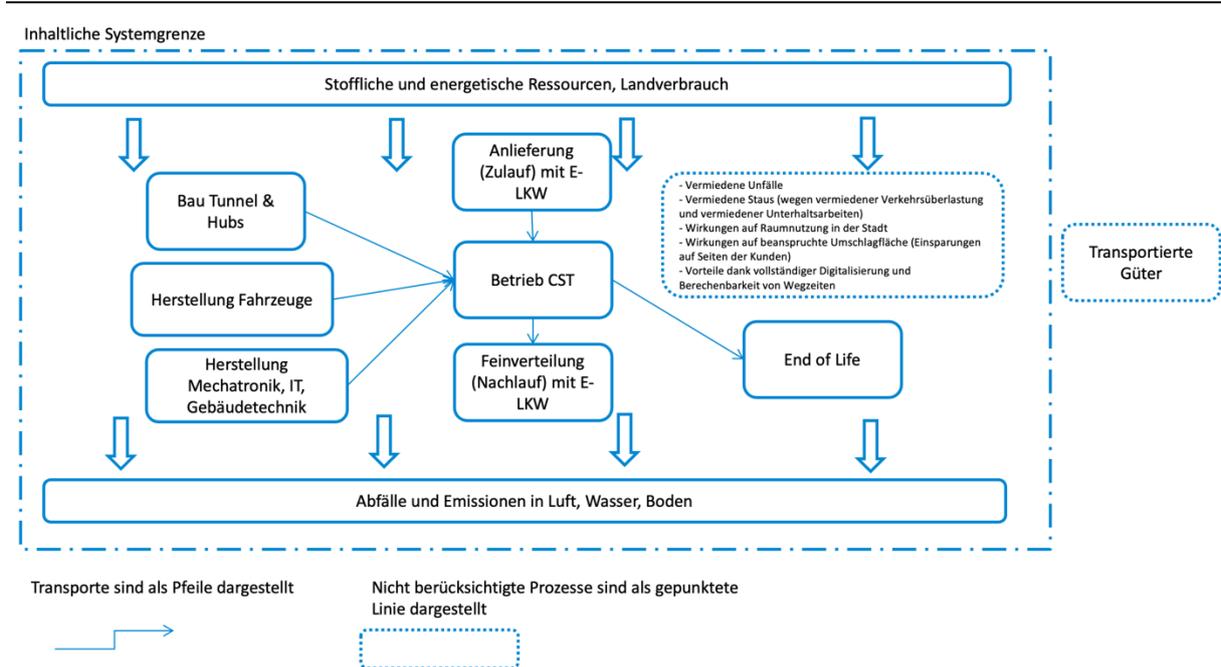


Abbildung 7: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse des CST-Systems

Auch bei den Referenzsystemen wurden möglichst alle relevanten Prozesse berücksichtigt. Dies umfasst insbesondere die Herstellung der Fahrzeuge und deren Entsorgung sowie alle Emissionen welche durch den Betrieb verursacht werden sowie die Nutzung der Strasseninfrastruktur. Zusätzlich wurde berücksichtigt, dass auch die Referenzsysteme Flächen und Gebäude für den Umschlag brauchen. Als Annäherung wurde hierfür anteilmässig der Flächen- und Gebäudebedarf von CST verwendet. Dieser wurde um 30 % reduziert, unter der Annahme, dass 30 % der Transporte direkt und ohne Crossdocking erfolgen. Die transportieren Güter selbst sind, wie beim CST-System, nicht Teil der Studie (siehe Abbildung 8)

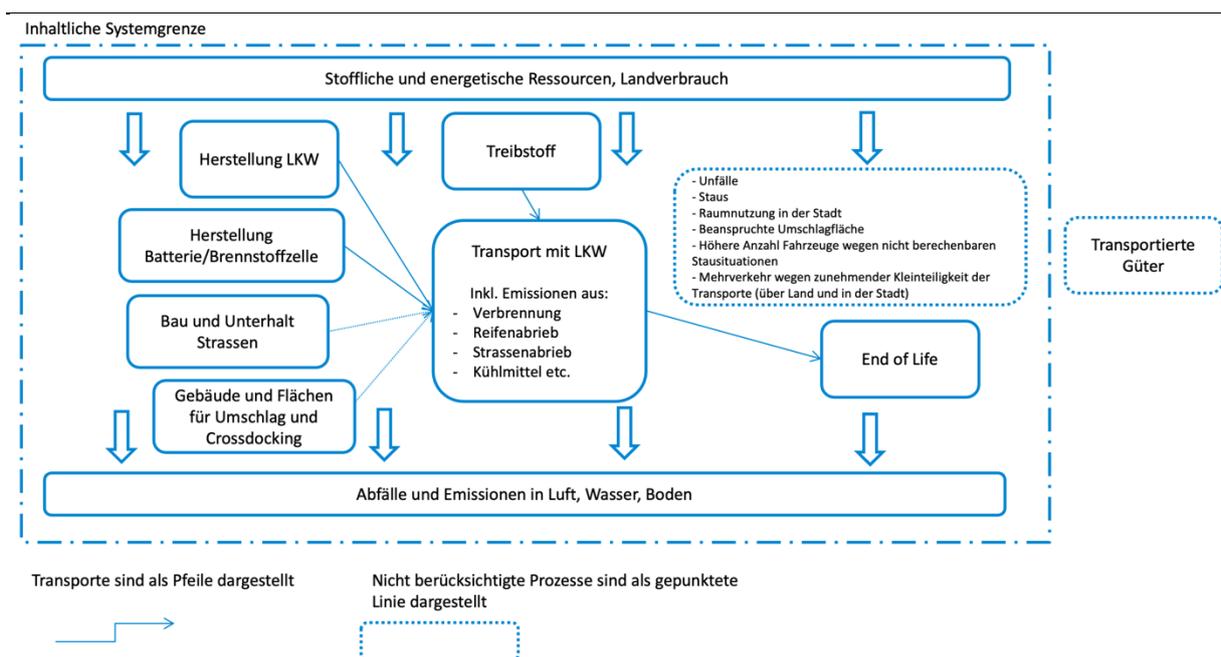


Abbildung 8: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse der Referenzsysteme

2.4.4.1 Räumliche Systemgrenze

Da die Teilstrecke gänzlich in der Schweiz liegt, werden vorwiegend schweizerische Prozesse und Technologien berücksichtigt.

2.4.4.2 Zeitliche Systemgrenze

Da es sich um zukünftige Technologie handelt, die einerseits erst noch gebaut werden muss und andererseits anschliessend während Jahrzehnten verwendet wird, liegt der Fokus dieser Studie auf der Zukunft. In Absprache mit der Auftraggeberin wurde entschieden 2030 als Referenzjahr zu verwenden. Als zusätzliche Szenarien wird die Entwicklung für die Jahre 2040 und 2050 extrapoliert.

Dies bedeutet, dass auch die Technologie des Referenzsystems, insbesondere die LKW-Antriebsarten und der Strommix, ebenfalls in die Zukunft modelliert werden (siehe 2.5.2.1 Referenzsystem).

Der Strommix für 2050 orientiert sich dabei am Szenario ZERO Basis der Energieperspektiven 2050+ (Bundesamt für Energie, 2020). Diese umfasst ein Wachstum des Elektrizitätsverbrauchs von 11 % gegenüber 2019. Die Stromerzeugung geschieht vor allem durch Wasserkraft (51.7 %) und Photovoltaik (41 %). Die Referenzjahre 2030 und 2040 wurden als lineare Zwischenschritte von 2019 zu 2050 interpoliert. Dies ist im Einklang mit dem nahezu linear sinkenden CO₂-Ausstoss der Schweizer Stromproduktion gemäss dem Szenario ZERO Basis bis 2050. Tabelle 1 zeigt die für die Modellierung verwendeten Werte:

Tabelle 1: Entwicklung Strommix bis 2050

	2030	2040	2050
Wasserkraft	54.6%	53.0%	51.4%
Nuklear	22.7%	11.3%	0.0%
Fossile KW	1.7%	0.9%	0.0%
Wind	1.9%	3.5%	5.1%
PV	16.4%	28.6%	40.8%
Biomasse und Biogas	1.0%	1.3%	1.6%
Geothermie	0.1%	0.2%	0.2%
Weitere Erneuerbare	1.6%	1.2%	0.9%

2.5 Sachbilanz

2.5.1 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 u. a.

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro Version 9.5 (PRé Consultants, 2023) berechnet und als Basis für die Wirkbilanz verwendet.

2.5.2 Vordergrunddaten

Die Daten für das Cargo-sous-terrain-System wurden vorwiegend von CST geliefert. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind diese nur im umfassenden Hauptbericht aufgelistet.

2.5.2.1 Referenzsystem

Ziel von Cargo sous terrain ist es, den oberirdischen Güterverkehr in den Untergrund zu verlagern. Es wird also davon ausgegangen, dass vorwiegend LKW-Fahrten ersetzt werden. Da aber nicht absehbar ist, wie sich der LKW-Flottenmix in den nächsten 10 (geschweige denn 30) Jahren entwickelt, wurden verschiedene Antriebsarten verglichen. Allen Varianten gemeinsam ist, dass dabei immer von 90 % LKW-Transporten und 10 % Schienentransporten ausgegangen wird (Annahme Zah & Del Duce, 2015). Zudem geht CST zwar davon aus, dass sie die Feinverteilung und Citylogistik effizienter gestalten werden, jedoch werden die Distanzen, welche die Güter zurücklegen müssen tendenziell grösser, da für viele Transportwege CST, aufgrund der geringeren Flexibilität der Streckenführung, ein Umweg darstellt. Aus diesem Grund wurde beim Referenzsystem von 6 % kürzeren Distanzen ausgegangen (Annahme CST). Auf der anderen Seite wurde berücksichtigt, dass CST zu einer Reduktion der Fahrten im Bereich City, Vor- und Nachlauf von 30 % führt. Konkret wurde mit 512'472'489 tkm/Jahr gerechnet.

Bezüglich Lärmemissionen wurden für die Referenzsysteme Inventardaten aus der Hintergrunddatenbank verwendet. Diese Daten werden nur in der Methode der ökologischen Knappheit 2021 bewertet. Diese Bewertung verwendet als Referenz den Faktor *Anzahl stark gestörte Personen*. Für den Teil des Systems CST, der unterirdisch erfolgt, wurde entsprechend der Faktor für Lärm auf 0 gesetzt. Für den oberirdischen Teil wurden die Faktoren für LKW-Transporte verwendet.

Diesel-LKW

Als Ausgangsbasis wurde das Inventar *transport, freight, lorry 32-40 metric ton, EURO 6/tkm/RER* verwendet. Das Inventar enthält sämtliche Aufwendungen für die Fahrzeugherstellung, -unterhalt und -entsorgung. Weiter wird der Reifenabrieb, der Bremsabrieb, der Anteil an der Strassenabnutzung sowie die Lärmemissionen berücksichtigt.

Da CST erst in naher Zukunft gebaut sein wird, musste das Inventar in die Zukunft extrapoliert werden. Dazu wurden die Angaben aus De Haan, Peter & Zah, Rainer, (2013) verwendet, die davon ausgehen, dass Verbrennungsmotoren den Treibstoffverbrauch bis 2050 um ca. 30 % gegenüber 2020 senken werden.¹ Daraus lässt sich linear eine Reduktion von 10 % für 2030 und 20 % für 2040 errechnen. Zu diesem Zwecke wurde das Inventar für Diesel-LKWs kopiert und die Treibstoffverbräuche und daraus entstehenden Emissionen entsprechend angepasst.

Zudem wurde eine gekühlte Version erstellt, welche über 20 % höhere Treibstoffverbräuche und Emissionen, sowie Kühlmittlemissionen gemäss demecoinvent-Inventar für gekühlte LKW verfügt. Der Anteil ungekühlt und gekühlt wurde mit 68 % zu 32 % gleich gewählt wie beim CST-System.

¹ Zwar ist der Ausstieg für Verbrennungsmotoren für PKW in der EU beschlossene Sache. Für LKWs ist bisweilen noch kein ähnlicher Entscheid gefällt worden, so dass eine kleine Wahrscheinlichkeit besteht, dass auch 2050 noch Verbrenner-LKWs existieren.

E-LKW

Da es sich hierbei noch um eine sich erst etablierende Technologie handelt, existiert noch kein E-LKW in den gängigen Ökobilanz-Datenbanken. Aus diesem Grund wurde anhand von Literaturangaben (Mareev u. a., 2017) und dem Inventar für Diesel-LKWs ein E-LKW modelliert.

Dabei wurde insbesondere berücksichtigt, dass die Batterie über die Lebensdauer von 540'000 vkm einmal ausgetauscht werden muss. Konkret wiegt die modellierte Batterie 5'440 kg.

Für die Extrapolation in die Zukunft wurde nur der jeweilige Strommix für das Aufladen der Batterien berücksichtigt. Es wurde hingegen nicht berücksichtigt, ob sich die Batterietechnologie verbessert. Dies vor allem, weil diese technologische Entwicklung zurzeit schwer vorhersehbar ist. Aber auch, weil sich eine Verbesserung der Batterietechnologie sowohl auf das Referenzsystem E-LKW als auch auf das System CST auswirkt (Feinverteilung per E-LKW sowie die Batterien der Tunnelfahrzeuge).

H₂-LKW

Wie der E-LKW musste auch der H₂-LKW modelliert werden. Anhand von Literaturangaben wurden der Lastwagen (Vijayagopal, 2016), der Wasserstofftank (Elgowainy u. a., 2012) sowie die Batterie (Unterlohner, 2020) modelliert. Die Brennstoffzelle konnte aus bestehenden Ökobilanzinventaren übernommen werden.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Ökobilanz von H₂-LKWs hat die Herstellung des Wasserstoffs. Tendenziell am schlechtesten schneidet Wasserstoff aus Dampfreformierung ab. Demgegenüber weist Wasserstoff aus Elektrolyse je nach verwendetem Strommix eine bessere Ökobilanz auf (Conrad u. a., 2022). Für diese Analyse wurde von Wasserstoff aus Elektrolyse mit zukünftigem Schweizer Standardstrom ausgegangen. Als Sensitivität wurde auch die Herstellung mit zertifiziertem Strom gerechnet.

2.5.3 Umgang mit Produktbestandteilen

2.5.4 Hintergrunddaten

Für die Modellierung wurden die Hintergrunddaten der KBOB:2022 verwendet (UVEK 2021). Dabei handelt es sich um eine Ökobilanzdatenbank ausgehend von ecoinvent 2.2, welche im Auftrag der Schweizer Bundesämter erstellt und weiterentwickelt wird. Insbesondere wurden Erdöl-, Erdgas-, Kernbrennstoff- und Strom-Bereitstellung, Transport- und Entsorgungsdienstleistungen sowie Forst- und Holzwirtschaft aktualisiert. Bei ecoinvent wiederum handelt es sich um die umfangreichste und etablierteste Ökobilanzdatenbank.

2.6 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 aus der Sachbilanz bezüglich ihrer Auswirkungen)
- 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. Beim Treibhauspotential wird CO₂ als Leitsubstanz verwendet und Beiträge von weiteren Treibhausgasen wie Methan und Lachgas in CO₂-Äquivalenten umgerechnet.

Auf Ebene Wirkbilanz wird das Treibhauspotential (CO₂-Fussabdruck) gemäss IPCC 2021, GWP 100a berücksichtigt. 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 (CO₂-eq).

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. Die Resultate werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt.

Diese Methode wurde gewählt, weil sie für die Bewertung sowohl die Umweltsituation wie auch die Umweltziele der Schweiz berücksichtigt (vgl. Abbildung 9) und somit bezüglich Werthaltung breit abgestützt ist. Betreffend der Verwendung der gesamttaggregierenden Methoden richtet sich die vorliegende Studie nicht nach der ISO Norm 14'040, sondern geht über diese hinaus².

Obwohl diese Methode die Werthaltung der schweizerischen Umweltpolitik widerspiegelt, hat sie auch international eine hohe Akzeptanz.

² Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamttaggregierenden 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 jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamt aggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich sondern notwendig (Kägi u. a., 2016) um die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

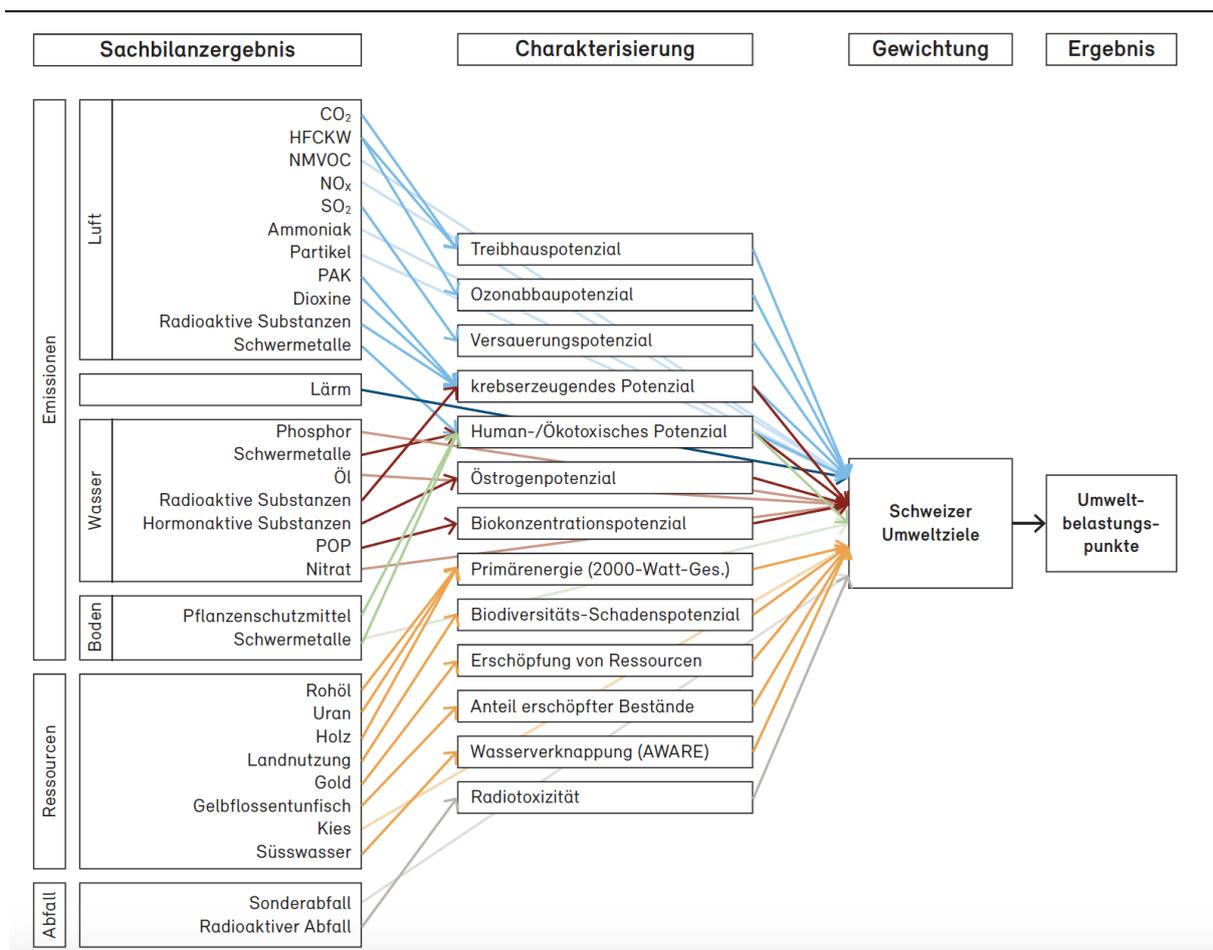


Abbildung 9: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit (Grafik aus (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013))

2.7 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:

- **Messungenauigkeit**
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 1'000 Durchläufen. Zu beachten ist, dass diese nur die Unsicherheiten der Sachbilanz berücksichtigen. Dies beinhaltet beispielsweise nicht die Unsicherheiten der Methoden.

3 Resultate und Diskussion

Das vorliegende Kapitel zeigt den Umweltfussabdruck nach der Methode der ökologischen Knappheit (MöK 2021) sowie den Klimafussabdruck nach IPCC 2021.

3.1 Analyse Cargo sous terrain

Das System Cargo sous terrain verursacht pro Jahr eine Umweltbelastung von ca. 62 Milliarden UBP. Diese Umweltbelastung wird jeweils zur Hälfte von der Infrastruktur und dem Betrieb selbst verursacht (siehe Abbildung 10).

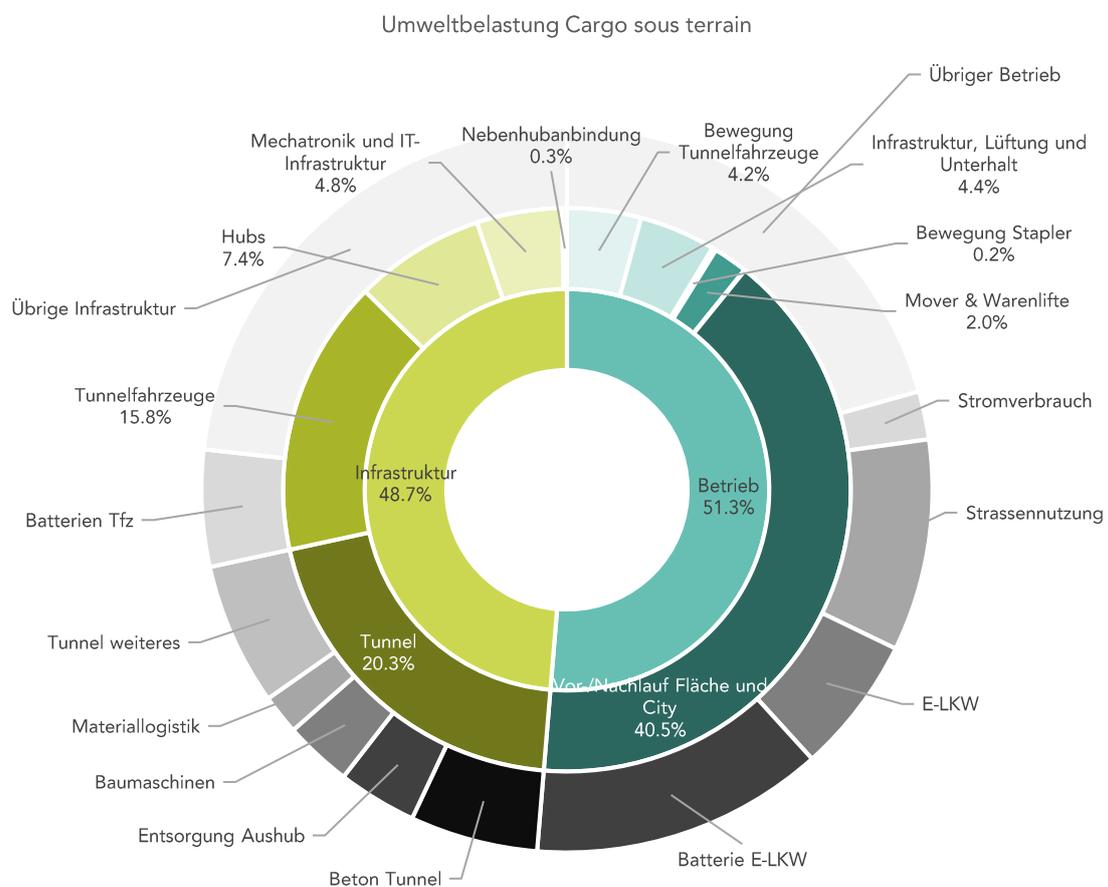


Abbildung 10: Aufteilung der Umweltbelastung des CST-Systems (pro Jahr, MöK 2021)

Auf Seiten der Infrastruktur ist vor allem der Bau des Tunnels für die Umweltbelastung verantwortlich. Weiter ist die Herstellung der benötigten Fahrzeuge für die Umweltbelastung relevant. Der Bau der Hubs und die ganze technische Ausrüstung rund um den Tunnel tragen ebenfalls einen gewissen Beitrag zur Umweltbelastung bei.

Auf der Betriebsseite fällt vor allem die Feinverteilung per E-LKWs ins Gewicht. Dies obwohl auch hier davon ausgegangen wird, dass zertifizierter Strom für das Aufladen verwendet wird. Der Stromverbrauch für die

Bewegung der Tunnelfahrzeuge sowie für die Lüftung etc. haben hingegen einen kleineren Einfluss auf den Umweltfussabdruck.

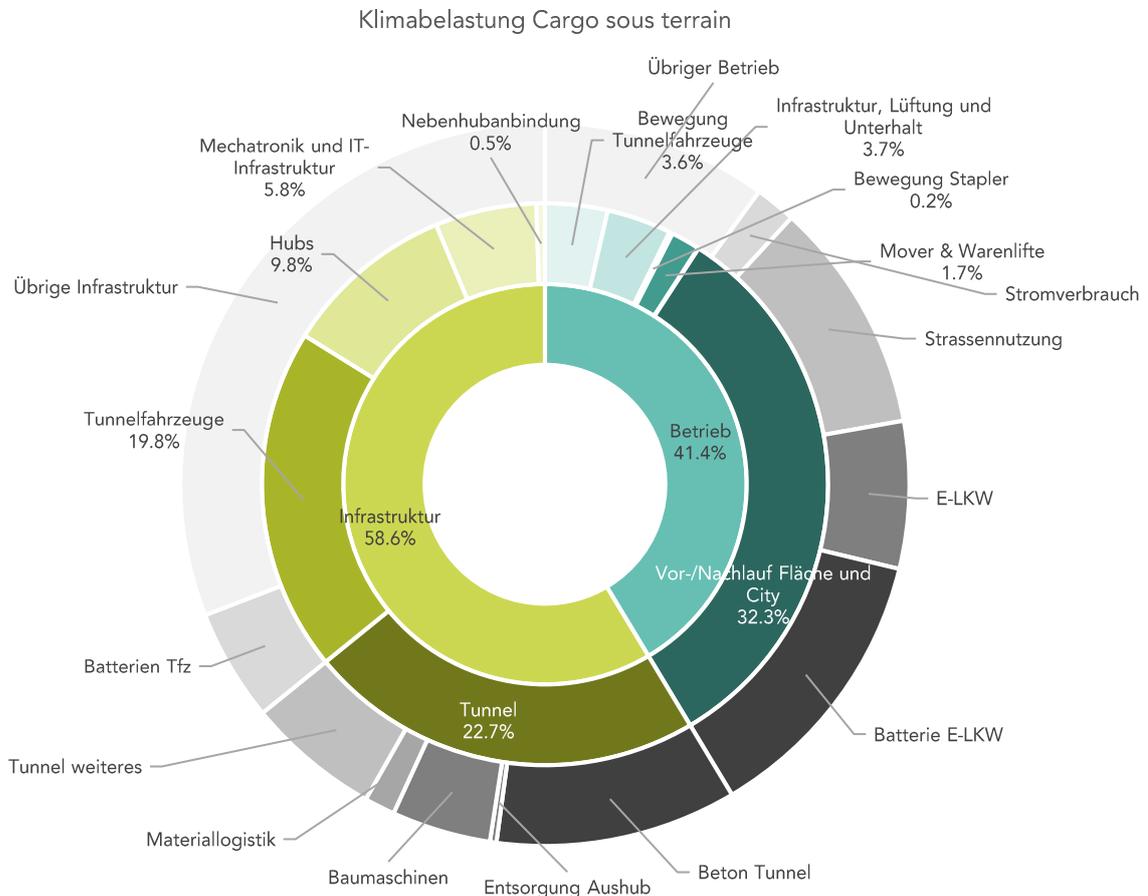


Abbildung 11: Aufteilung der Klimabelastung des CST-Systems (pro Jahr, IPCC 2021)

Wird nur die Klimabelastung betrachtet, fällt auf, dass der Anteil des Betriebs etwas geringer ausfällt. Dies liegt vor allem daran, dass die Feinverteilung per E-LKW bezüglich Klimabelastung besser abschneidet.

Der Anteil der Infrastruktur fällt bei der Klimabelastung grösser aus. Der relative Anteil der Unterprozesse bleibt jedoch ähnlich wie bei der Gesamtumweltbelastung.

3.2 Vergleich Cargo sous terrain und Referenzsystem 2030

3.2.1 Gesamtumweltbelastung

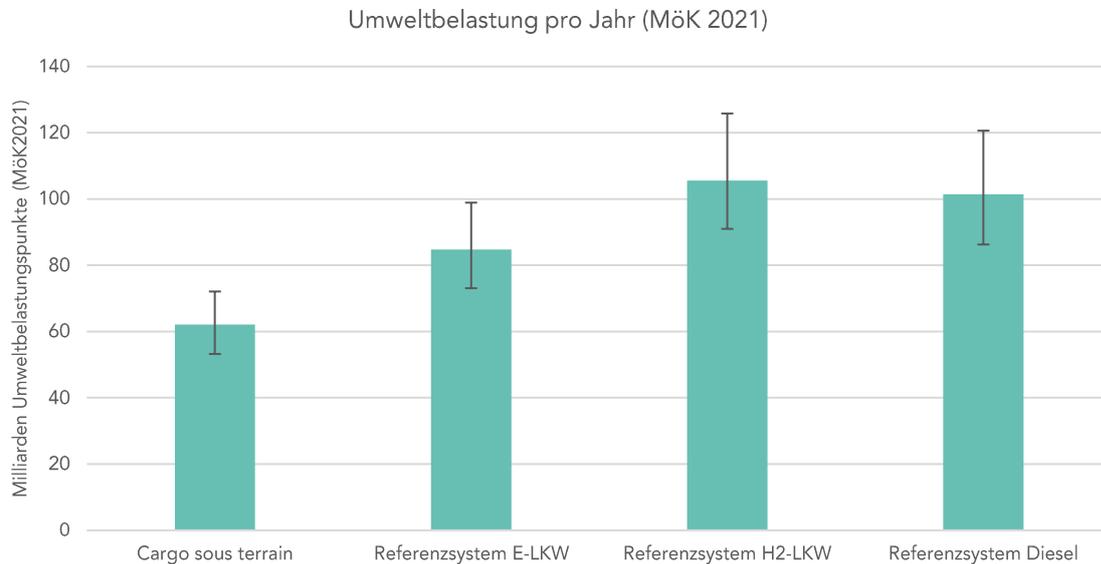


Abbildung 12: Umweltbelastung während einem Betriebsjahr für Cargo sous terrain und die Referenzszenarien (MöK 2021)

Wird die Gesamtumweltbelastung mit der Methode der ökologischen Knappheit 2021 analysiert, dann weist Cargo sous terrain unter Verwendung von zertifiziertem Strom eine wesentlich bessere Ökobilanz auf wie die beiden Referenzszenarien H₂-LKW sowie Diesel-LKW. Die Einsparung gegenüber dem Szenario Diesel-LKW beträgt über 39 Milliarden UBP pro Jahr. Auch gegenüber dem Referenzszenario E-LKW wird ein singifikant besseres Ergebnis erzielt.

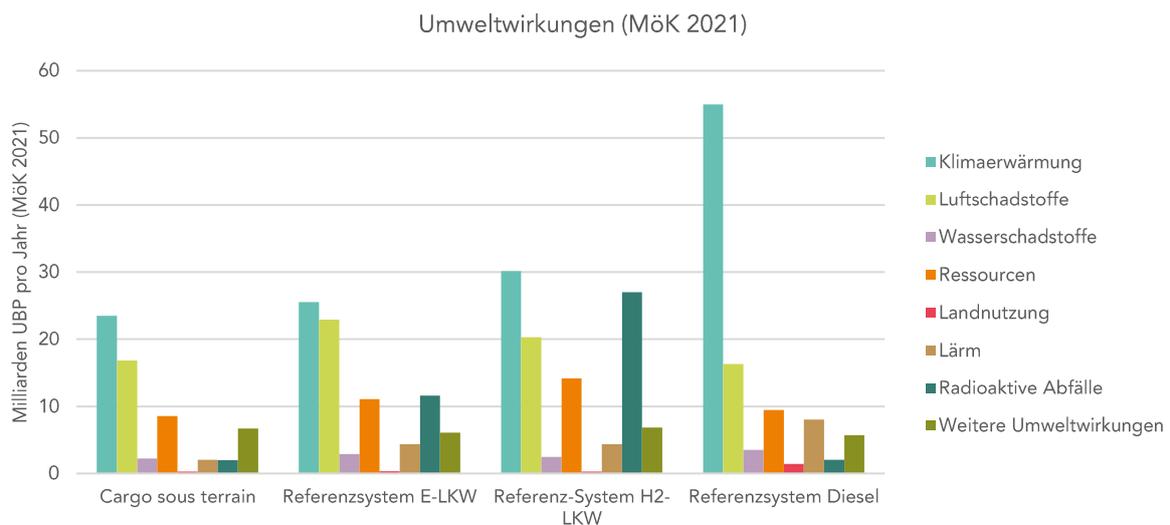


Abbildung 13: Aufteilung der Umweltbelastung ausgewählter Szenarien (MöK 2021)

Wie aus Abbildung 13 ersichtlich ist, geht bei den meisten Varianten ein Grossteil der Umweltbelastung auf die Auswirkungen auf den Klimawandel zurück. Eine weitere dominante Quelle der Umweltbelastung sind

die Emissionen an Luftschadstoffen. Diese sind im Falle von CST vor allem auf die Betonherstellung für die Hubs und Tunnels sowie Emissionen aus der Feinverteilung der E-LKWs (Batterieherstellung, Bremsabrieb) zurückzuführen.

Bei der Lärmbelastung zeigen sich klare Vorteile von CST dadurch, dass ein Grossteil unterirdisch transportiert werden kann. Auch die Wasserstoff- und E-LKWs weisen eine Verringerung der Lärmbelastung auf. Jedoch trägt auch beim Diesel-LKW die Lärmbelastung nur einen kleinen Teil zur Gesamtumweltbelastung bei.

Auch bezüglich Landnutzung weist CST klare Vorteile durch das unterirdische Konzept auf. Die wesentlich höhere Bewertung bezüglich Landnutzung bei der Variante Diesel-LKW ist darauf zurückzuführen, dass dem Diesel knapp 5 % biogener Diesel beigefügt wird. Der Anbau des dafür notwendigen Rapses sorgt für einen beachtlichen Flächenbedarf. Im Vergleich zur Gesamtumweltbelastung hat der Landverbrauch jedoch eine marginale Relevanz.

Mikroplastik: Die LKWs verursachen eine Umweltbelastung von 2.66 Milliarden UBP pro Jahr alleine aufgrund des Mikroplastiks aus Reifenabrieb. Im System CST sinkt diese Belastung auf 1.16 Milliarden UBP pro Jahr. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Strecken, die per LKW im offenen Strassenverkehr zurückgelegt werden mehr als halbiert werden. Im System CST selbst wird es aufgrund des geschlossenen Filtersystems zu keinen Mikroplastikeinträgen in die Biosphäre kommen.

3.2.2 Klimabilanz

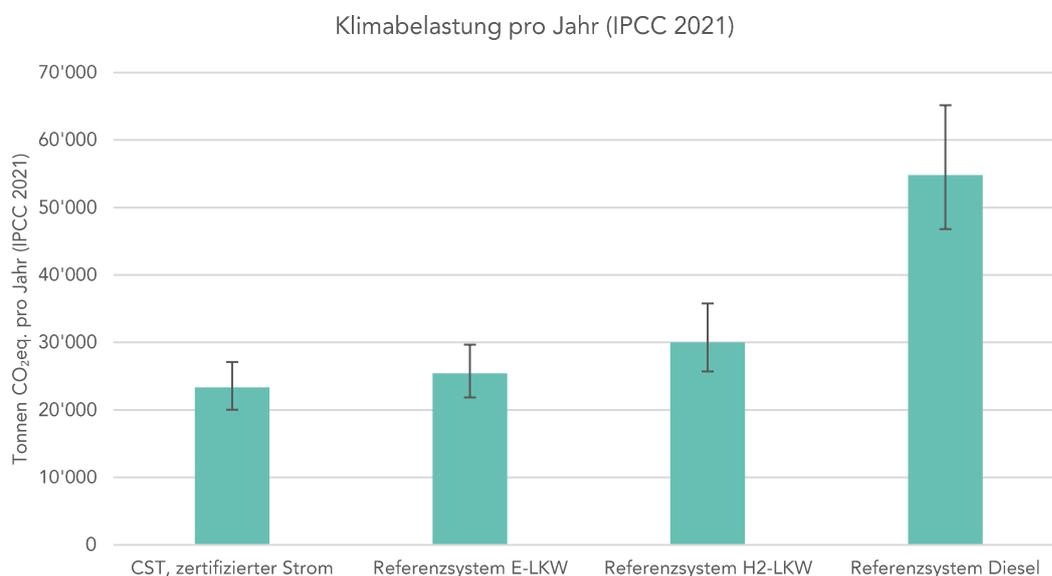


Abbildung 14: Klimabelastung während einem Betriebsjahr für Cargo sous terrain und die Referenzszenarien (IPCC 2021)

Wird nur die Klimabilanz betrachtet, weist das Referenzsystem Diesel das mit Abstand schlechteste Ergebnis auf. CST weist die tendenziell beste Klimabilanz auf. Die Referenzsysteme E-LKW und H₂-LKW weisen jedoch im Rahmen der Unsicherheit eine ähnlich gute Klimabilanz auf.

Die Klimabilanz betrachtet nur eine von vielen Umweltwirkungen. Deren Interpretation alleine ist mit Vorsicht zu geniessen und kann aus Gesamtumweltsicht zu falschen Schlussfolgerungen führen.

3.3 Szenarien

3.3.1 Entwicklung 2040 und 2050

Bis anhin wurde mit Technologien gerechnet, wie sie um das Jahr 2030 wahrscheinlich zum Einsatz kommen. Da die Infrastruktur von CST aber besonders langlebig ist, wurde der Vergleich auch für die zukünftigen Entwicklungen bis 2040 und 2050 modelliert.

Eine grosse Rolle spielt dabei die Entwicklung des Schweizer Strommixes. Hierbei wurde mit dem Zukunftsszenario ZERO Basis der Energieperspektiven 2050+ (Bundesamt für Energie, 2020) gerechnet. Dieser Strommix ist relevant für die Referenzszenarien E-LKW und H₂-LKW (Energie für die Elektrolyse des Wasserstoffes). Da sich der Standard-Strommix in Zukunft immer mehr dem zertifizierten Strommix angleicht, wurde für die Zukunftsszenarien der Referenzsysteme auf eine Berechnung mit zertifiziertem Strommix verzichtet.

Weiter wurde berücksichtigt, dass das Volumen an transportierten Gütern in Zukunft zunehmen wird. Für das Ausmass der Zunahme wurden die Werte des Szenario BASIS der Verkehrsperspektiven 2050 (Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2022) übernommen. Diese prognostizieren eine Zunahme des Güterverkehrs von 6.9 % bis 2040 gegenüber 2030, und von 14.1 % für 2050 gegenüber 2030.

Für das Jahr 2050 wurde zudem der anzunehmende Flottenmix berücksichtigt. Laut einer Studie, die sich mit emissionsfreiem Verkehr bis 2050 auseinandersetzt (Transport & Environment, 2022) werden auch im Jahr 2050 noch 13 % Diesel-LKWs unterwegs sein. Die Aufteilung der LKWs ohne Verbrennungsmotor wird als 90 % E-LKW und 10 % H₂-LKW prognostiziert (Transport & Environment, 2023).

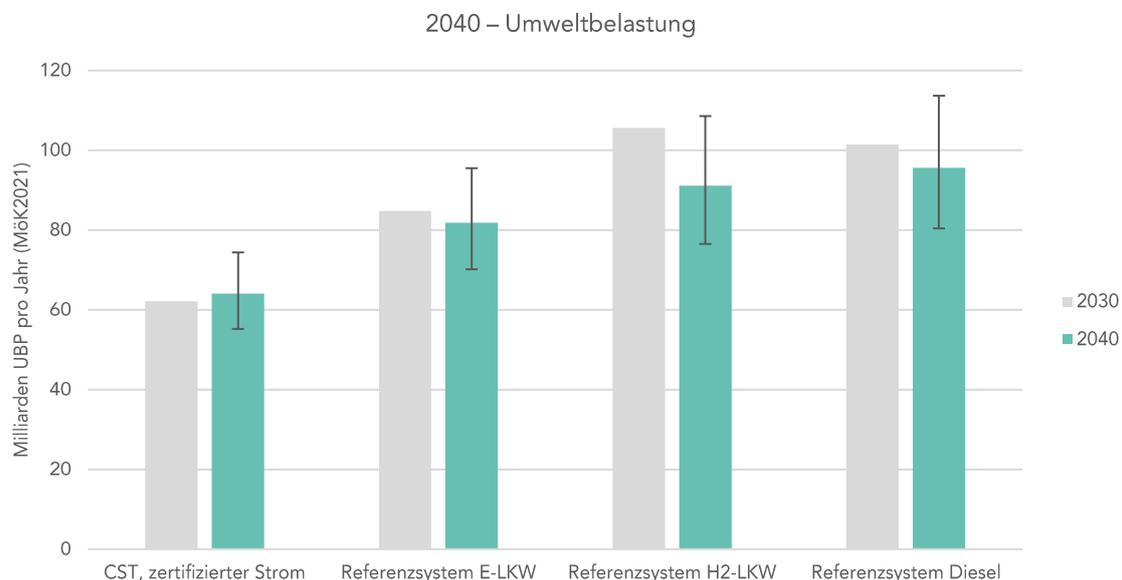


Abbildung 15: Jährliche Umweltbelastung im Jahr 2040 für CST und die Referenzszenarien (MöK 2021)

Generell werden die Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten kleiner. Einerseits nimmt die transportierte Menge, bei gleichbleibender Infrastruktur, im Falle von CST zu. Und andererseits nimmt die Effizienz der Referenzszenarien zu. So weist CST zwar weiterhin die tiefste Umweltbelastung auf, jedoch liegt diese nur gegenüber den Referenzszenarien H₂-LKW und Diesel-LKW ausserhalb des Unsicherheitsbereichs.

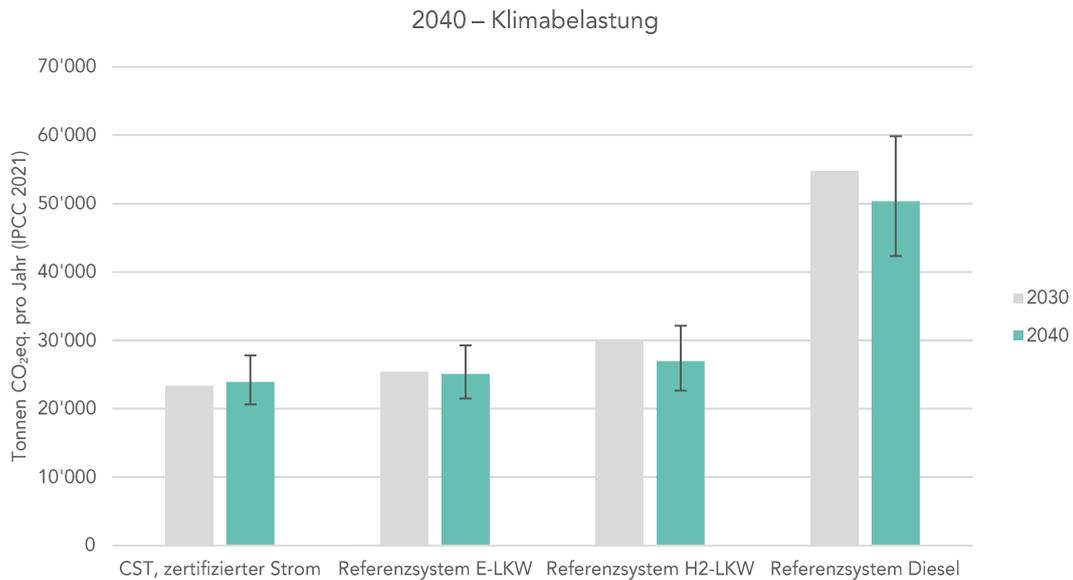


Abbildung 16: Jährliche Klimabelastung im Jahr 2040 für CST und die Referenzszenarien (IPCC 2021)

Auch bezüglich Klimabelastung gleichen sich die Varianten an. CST weist zwar weiterhin eine wesentlich bessere Klimabilanz als das Referenzszenario Diesel auf, gegenüber den Szenarien mit E-LKW und H₂-LKW ist dieser Unterschied allerdings nicht mehr signifikant.

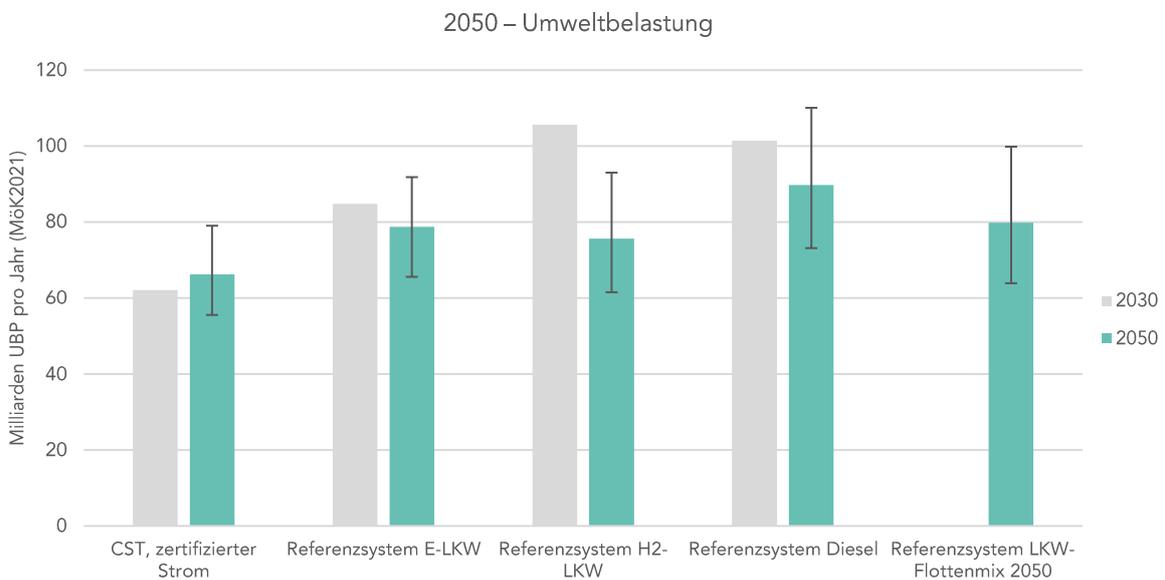


Abbildung 17: Jährliche Umweltbelastung im Jahr 2050 für CST und die Referenzszenarien (MöK 2021)

Auch im Jahr 2050 weist Cargo sous terrain mit zertifiziertem Strom tendenziell das beste Ergebnis auf. Das System Cargo sous terrain weist auch ein tendenziell besseres Ergebnis als der zu erwartende LKW-Flottenmix auf. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind nun aber so klein, dass die gewachsene Unsicherheit grösser als dieser Unterschied ist.

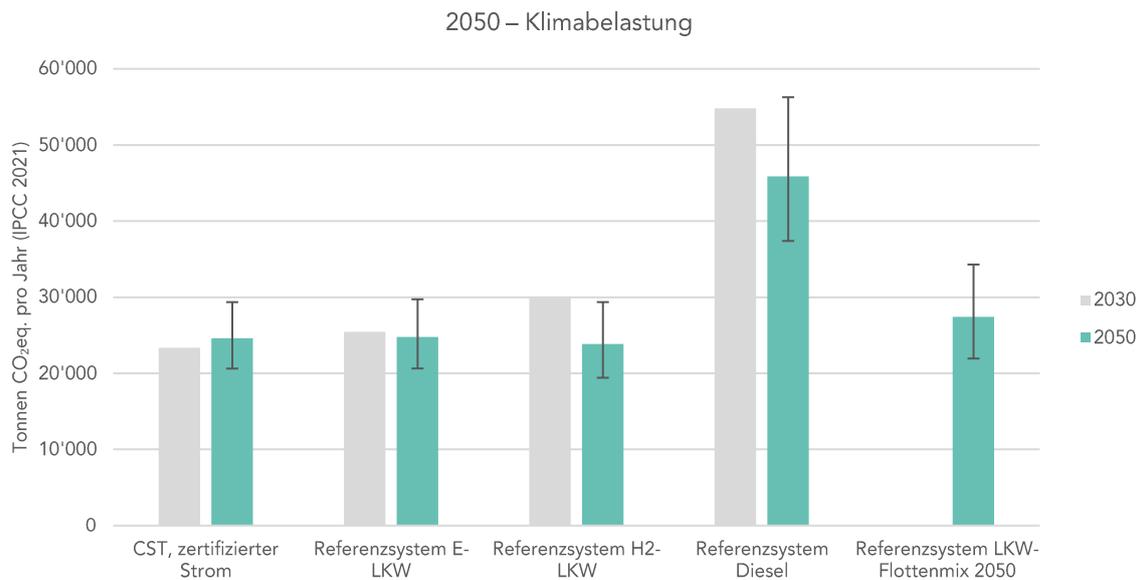


Abbildung 18: Jährliche Umweltbelastung im Jahr 2050 für CST und die Referenzszenarien (IPCC 2021)

Bezüglich Klimabelastung weist auch 2050 die Variante Diesel-LKW das signifikant schlechteste Ergebnis auf. CST weist zusammen mit E-LKWs und H2-LKWs ein wesentlich besseres Ergebnis auf. CST schneidet tendenziell auch besser ab als der zu erwartende LKW-Flottenmix; die Unsicherheiten sind jedoch grösser als dieser Unterschied.

3.3.2 Auslastung

Es besteht eine gewisse Unsicherheit darüber, wie viele Güter schliesslich pro Jahr via Cargo sous terrain transportiert werden. Da die Erstellung der Infrastruktur alleine bereits eine grosse Umweltbelastung verursacht, kommt der Auslastung eine wichtige Rolle zu. Für die Berechnung dieser Sensitivität wurde für Cargo sous terrain der Stromverbrauch für die Bewegung der Tunnelfahrzeuge und Stapler linear mit dem Güteraufkommen erhöht. Die Infrastruktur wurde dahingegen gleich gelassen. Es wurde also weder berücksichtigt, ob grössere Hubs nötig wären, noch ob mehr Tunnelfahrzeuge für den Gütertransport nötig wären.

Im Gegensatz dazu besteht beim Referenzsystem die Infrastruktur bereits und wird entsprechend nur anteilig an die Umweltbelastung angerechnet. Als Extrembeispiel: würde nur 1 tkm per CST transportiert, wird die gesamte Umweltbelastung der CST-Infrastruktur sowie der gesamte Betriebsaufwand diesem einem Tonnenkilometer angerechnet. Den LKW-Szenarien wird hingegen nur der Anteil an Strasse, LKW, etc. der benötigt wird um eine Tonne einen Kilometer weit zu transportieren angerechnet. Aus diesen modellierungstechnischen Gründen startet CST in den Grafiken unten bereits mit einem „Rucksack“ an Belastung (d. h. wegen der neu zu erstellenden Infrastruktur), während die Referenzszenarien aufgrund der bestehenden Infrastruktur nahe bei 0 starten.

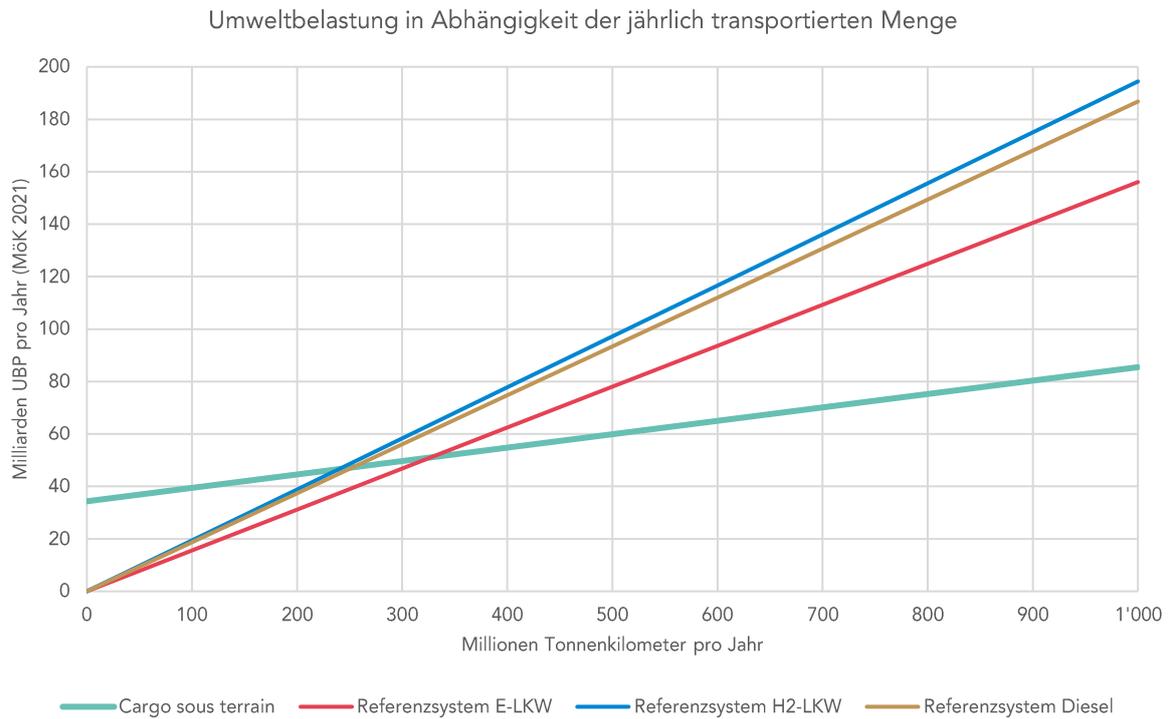


Abbildung 19: Umweltbelastung in Abhängigkeit der jährlich transportierten Menge an Gütern (MöK 2021)

Wie aus Abbildung 19 ersichtlich ist, weist CST bei Verwendung von zertifiziertem Strom bereits ab einer Auslastung von ca. 250–300 Millionen tkm pro Jahr eine bessere Ökobilanz auf als die meisten der Referenzszenarien. Dies entspricht etwa der Hälfte der geplanten Auslastung von CST.

Klimabelastung in Abhängigkeit der transportierten Menge

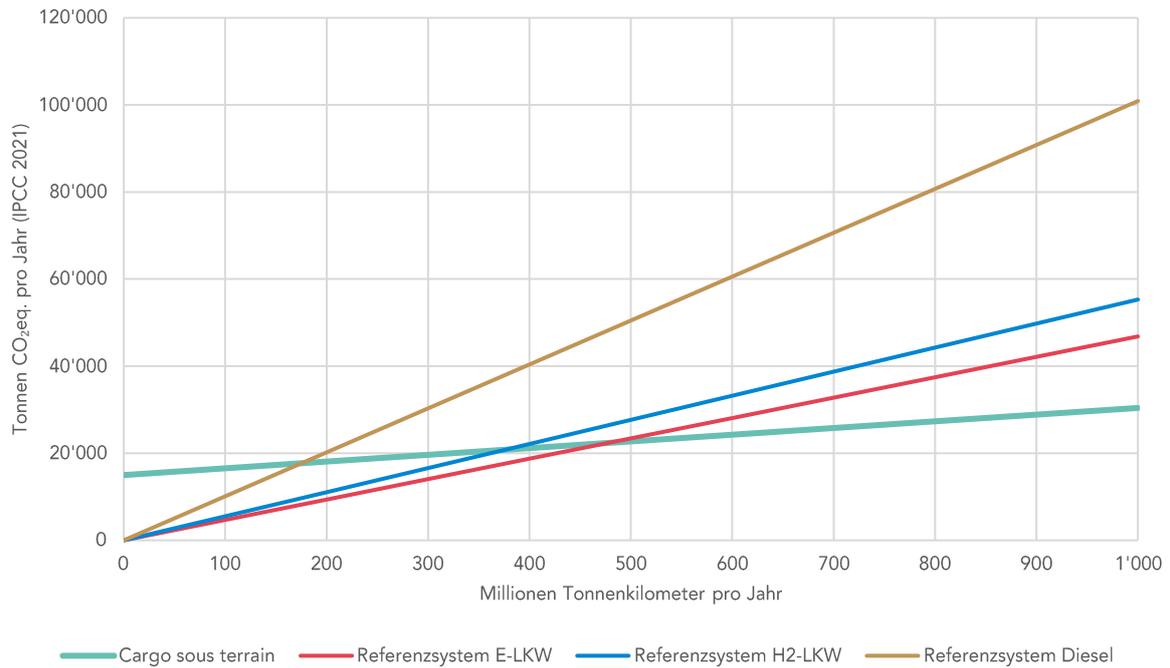


Abbildung 20: Klimabelastung in Abhängigkeit der jährlich transportierten Menge an Gütern (IPCC 2021)

Wird nur der Einfluss auf das Klima betrachtet, dann weist CST mit zertifiziertem Strom bereits ab einer Auslastung von weniger als 200 Mio. tkm pro Jahr ein besseres Ergebnis auf wie das Referenzszenario Diesel-LKW. Auch die Szenarien E-LKW und H₂-LKW werden unter der geplanten Auslastung von 500 Mio. tkm pro Jahr unterschritten.

4 Fazit

Aus Ökobilanz-Sicht kann festgehalten werden, dass CST zu einer Reduktion der Umweltbelastung gegenüber dem aktuell vorherrschenden Logistiksystem mit Diesel-LKWs führen dürfte. Ohne zertifiziertem Strom beträgt diese Einsparung 18'400 Tonnen CO₂-eq. pro Jahr, mit zertifiziertem Strom liegt diese Einsparung in der Grössenordnung von 31'500 Tonnen CO₂-eq. Wird CST mit zertifiziertem Strom betrieben, dann wird für das Referenzjahr 2030 auch gegenüber den Referenzszenarien E-LKW und H₂-LKW mit Standardstrom eine bessere Ökobilanz erzielt.

Für die Referenzjahre 2040 und 2050 wird dieser Vorteil von CST immer kleiner, da der Standardstrommix immer weniger umweltbelastend wird. Würden die Referenzsysteme E-LKW und H₂-LKW komplett mit Ökostrom betrieben, würden diese bereits ab 2030 eine im Rahmen der Unsicherheit ähnlich gute Ökobilanz aufweisen wie CST.

Grundsätzlich kommt diese Studie auf ähnliche Ergebnisse, wie die Vorgängerstudie. Die Datenlage hat sich dabei weiter verbessert. Insbesondere die Infrastruktur selbst wurde detaillierter beschrieben, weshalb auch die Ökobilanz von CST tendenziell höher ausfällt.

Es bleibt jedoch auch festzuhalten, dass mit der Methode der Ökobilanzierung alleine nicht alle relevanten Faktoren der Nachhaltigkeit abgedeckt werden. So werden beispielsweise soziale und wirtschaftliche Faktoren nicht berücksichtigt. Bei einem derart umfangreichen Jahrhundertprojekt sollten jedoch auch Faktoren wie der Einfluss auf die Beschäftigung und die Wirtschaft einbezogen werden, wie dies beispielsweise im Rahmen der ZHAW-Studie (Steiner u. a., 2023) geschehen ist.

Auch indirekte Effekte wurden in dieser Studie nur gestreift. So wurde beispielsweise nicht beurteilt, inwiefern überhaupt genügend zertifizierter Strom für den Betrieb von CST bis 2030 zur Verfügung steht. Weiter wurden nur die linearen indirekten Effekte auf das Strassennetz untersucht (z. B. Reduktion Anteil Strassenutzung), dynamische indirekte Effekte wurden jedoch nicht untersucht. So geht beispielsweise die Studie der ZHAW davon aus, dass dank CST die Fahrleistungen von LKWs in der Stadt Zürich um 25 % gesenkt werden kann. Auch auf der A1 soll 30 % des Schwerverkehrs und damit 3 % des Gesamtverkehrs dank CST verschwinden (B+S AG, 2023), was wiederum zu einer Reduktion der Stauzeiten von 5 bis 10 % an den neuralgischen Stellen führen soll (Maibach u. a., 2016). Inwiefern diese Effekte aber von Dauer sind (z. B. Kompensation durch Rebound-Effekte) und wie gross dabei die positiven ökologischen Auswirkungen sind, müsste weiter untersucht werden. Um diese Fragen seriös beantworten zu können, müssten einerseits Anpassungen an den Ökobilanz-Bewertungsmethoden vorgenommen werden und andererseits robuste Vordergrunddaten zur Verkehrsentwicklung und deren Folgen erhoben werden.

Angesicht dessen, dass eine weitere Steigerung des Güteraufkommens eine Realität ist und die Kapazitäten auf vielen Strecken in der Schweiz beschränkt sind, ist das System Cargo sous terrain, gerade auf den stark ausgelasteten Strecken, eine insgesamt ökologisch sinnvolle Ergänzung zum bestehenden Mobilitätssystem.

5 Literatur

- B+S AG. (2023). CARGO SOUS TERRAIN (CST) 1. Teilstrecke Gäu-Zürich Kopfdokument zu den Hub-Verkehrsanalysen.
- Bundesamt für Energie. (2020). Energieperspektiven 2050+. BFE.
- Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). (2022, April 8). Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050.
- Conrad, S., Roberts, G., & Kägi, T. (2022). *LCA of different H2 production processes for lorry fuels. Comparison of H2 from steam methane reforming and H2 from electrolysis, with diesel and electric vehicles.*
- De Haan, Peter & Zah, Rainer. (2013). *Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz.* (TA-SWISS, Hrsg.). vdf Hochschulverlag AG. <http://doi.org/10.3218/3488-2>
- Elgowainy, A., Reddi, Krishna, & Wang, M. (2012). Life Cycle Analysis of Hydrogen On-Board Storage Options, 31.
- 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. 260). Bern: Bundesamt für Umwelt.
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.* Geneva: International Standard Organisation.
- 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>
- Maibach, M., Ickert, L., & Sutter, D. (2016). Volkswirtschaftliche Aspekte und Auswirkungen des Projekts Cargo Sous Terrain (CST). . . *September*.
- Mareev, I., Becker, J., & Sauer, D. (2017). Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation. *Energies*, 11(1), 55. <http://doi.org/10.3390/en11010055>
- PRé Consultants. (2023). SimaPro 9.5 (Version 9.5.0.0). PRé Consultants.
- Steiner, A., Weingart, J., Huber, M., Scherrer, M., & Kissling, S. (2023, März 31). Verkehrsmodellierung für die Feinverteilung der Güter aus den CST-City-Hubs in der Stadt Zürich. Schlussbericht.
- Transport & Environment. (2022, September). Addressing the heavy-duty climate problem. Why all new freight trucks and buses need to be zero-emission by 2035.
- Transport & Environment. (2023, April). Fully charged for 2030. Enough infrastructure for more electric trucks in 2030.
- Unterlohner, F. (2020). Comparison of hydrogen and battery electric trucks. *Transport and Environment*.
- Vijayagopal, R. (2016). Fuel Cell Electric Truck (FCET) Component Sizing, 26.
- Zah, R., & Del Duce, A. (2015). *LCA von Cargo Sous Terrain*.