

Ökobilanz von Freileitungen und Erdverkabelung der Swissgrid



Verfasst von:

Julia Wetzel

Thomas Pohl

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

Datum: 06.09.2023

Im Auftrag von Swissgrid

Management Summary

Einleitung

Die nationale Netzgesellschaft Swissgrid hat bislang hauptsächlich Freileitungen zur Übertragung elektrischer Energie errichtet und betrieben. In der jüngeren Vergangenheit hat sie zudem erste Projekte der erdverlegten Übertragung elektrischer Energie verwirklicht. Gegenwärtig gewinnt die erdverlegte Übertragung elektrischer Energie zunehmend an Bedeutung, da sie Hindernisse wie Gebäude und Bauwerke in siedlungsdichten Gebieten umgehen kann. Damit berücksichtigt sie verstärkt raumplanerische und bautechnische Kriterien, die in einer immer dichter besiedelten Schweiz zunehmend wichtiger werden.

Um das bestmöglich geeignete Trasse und die bautechnisch entsprechende Ausführung für die Übertragung elektrischer Energie zu evaluieren, nutzt Swissgrid die Software Gilytics. Durch Gilytics lassen sich einerseits die technische Machbarkeit mitsamt der ökonomischen Bepreisung, andererseits die rechtliche und raumplanerische Verträglichkeit der einzelnen Varianten ermitteln. Allerdings bezieht Gilytics bisher noch keine für die Ökobilanz relevanten Kriterien ein. Um diese Lücke zu schliessen und als Bauherrin eine Vorreiterrolle hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit einzunehmen, hat Swissgrid eine Ökobilanz in Auftrag gegeben. Die Ökobilanz untersucht die Nachhaltigkeit der unterschiedlichen Varianten des Freileitungsbaus und der Erdverkabelung, die zur Übertragung elektrischer Energie genutzt werden.

Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Produktökobilanz für die unterschiedlichen Übertragungstechnologien elektrischer Energie bzw. für Erdverkabelungen und Freileitungen auf den Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV. Er berücksichtigt ferner die Übergangsbauwerke. Er bezweckt, die Umweltauswirkungen der einzelnen Übertragungstechnologien elektrischer Energie zu erheben und zu beziffern. Zudem bietet er eine Entscheidungsgrundlage für Swissgrid, welche Technologien künftig aus umwelttechnischer Sicht umgesetzt werden sollen.

Die Entscheidungsgrundlage für die Wahl einer geeigneten Übertragungstechnologie elektrischer Energie beruht auf einer Vielzahl von Kriterien bzw. zu berücksichtigenden Gesichtspunkten. Sie beinhaltet nicht nur ökologische, sondern ebenso technische, rechtliche, ökonomische sowie soziale Gesichtspunkte. Alle Gesichtspunkte müssen ermittelt und kritisch hinterfragt werden, um ihren Nutzen abzuwiegen. Dieser Bericht betrachtet einzig die ökologischen Gesichtspunkte.

Methodik und Vorgehen

Die UTech AG hat die vergleichende Ökobilanz im Rahmen dieses Berichts weitestgehend gemäss ISO 14040:2006 [1] bzw. ISO 14044:2006 [2] unter folgenden Rahmenbedingungen erarbeitet:

- **Funktionelle Einheit:** Als funktionelle Einheit gilt die Übertragung von 1 GWh elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV über 1 km.
- **Systemgrenze:** Die Systemgrenze verläuft gemäss DIN EN 15643 [3] von der Herstellungsphase bis zur Entsorgungsphase.
- **Sachbilanz (Daten):** Die technischen Vordergrunddaten zu den einzelnen Bauverfahren sind mittels eines Fragebogens von Swissgrid erhoben worden. Die generischen Hintergrunddaten der Ökobilanz sind dem Ökobilanzdatenbestand UVEK 2022 [4] entnommen.

- **Wirkungsabschätzung:** Dieser Bericht nutzt gemäss der Ökobilanzplattform KBOB/ecobau die in der Schweiz üblichen drei Wirkungsabschätzungsmethoden: kumulierter Energieaufwand (KEA), Treibhausgasemissionen (IPCC 2021 GWP 100 a) sowie die Methode der ökologischen Knappheit – Umweltbelastungspunkte (UBP 2021).

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

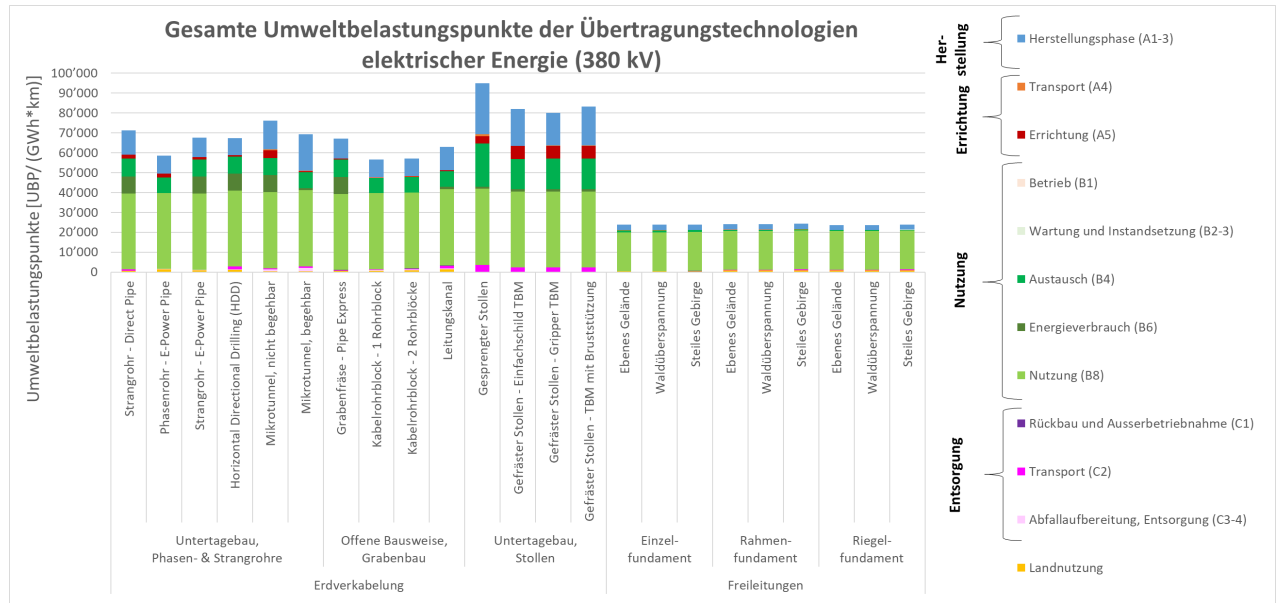


Abbildung 1: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie (Verbraucherstrommix Schweiz) über 1 km

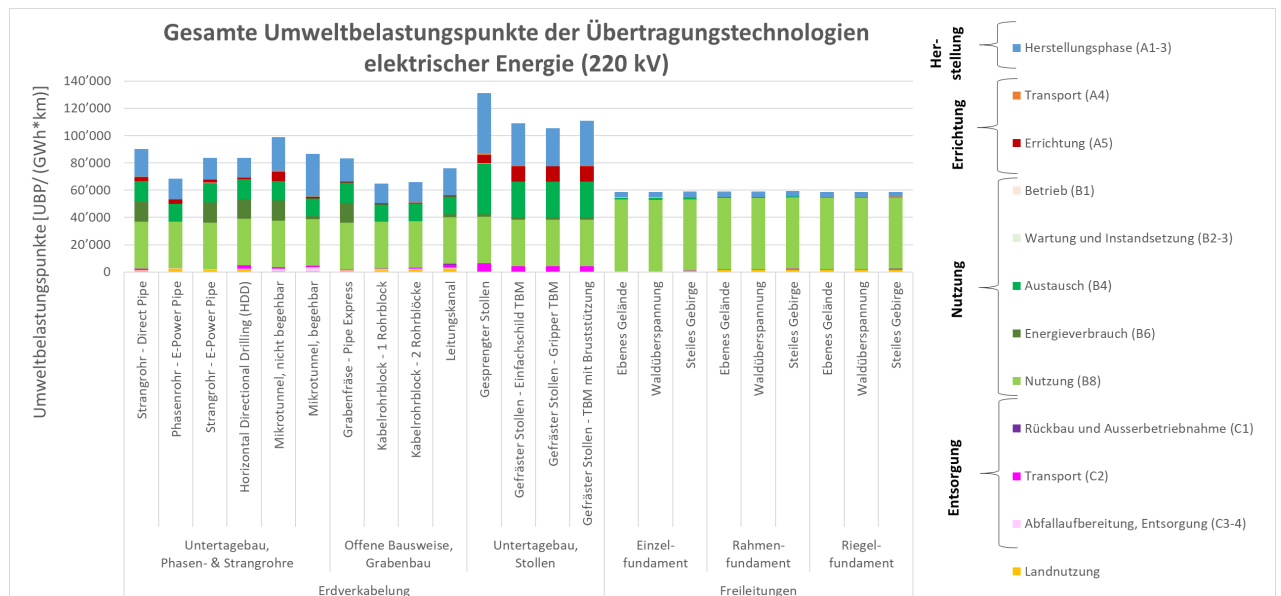


Abbildung 2: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie (Verbraucherstrommix Schweiz) über 1 km

Wie die Ökobilanz nachweist (siehe Abbildung 1), erzielen Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV tiefere Umweltauswirkungen als die Bauverfahren der

Erdverkabelung. Auf der Höchstspannungsebene 220 kV weisen die Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung unterschiedlich hohe Werte auf, die je nach Wirkungsabschätzungsmethode sich unterscheiden. Bei den «Treibhausgasemissionen» und bei der «Methode der ökologischen Knappheit» zeigen die Freileitungen vergleichbar hohe Umweltauswirkungen wie diejenigen Bauverfahren der Erdverkabelung mit den tiefsten Umweltauswirkungen («Phasenrohr – E-Power Pipe», «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock», «Kabelrohrblock – 2 Kabelrohrblöcke»). Beim kumulierten Energieaufwand weisen die Freileitungen gleich hohe bis leicht erhöhte Umweltauswirkungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung auf. Das Bauverfahren «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» bei der Erdverkabelung und «Freileitung mit Einzelfundament» bei den Freileitungen zeigen auf den Höchstspannungsebene 380 kV sowie 220 kV bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden die geringste Umweltauswirkungen.

Die ökologisch relevanten Lebenszyklusphasen bei den Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV sind die Herstellung (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) und die Nutzung (B8). In der Herstellungsphase (A1-3) und im Austausch (B4) ist der Ressourcenverbrauch für das Gesamtergebnis entscheidend. In der Lebenszyklusphase Energieverbrauch (B6) verursachen die energetischen Aufwände für die mechanische Lüftung, den Betrieb, die Instandsetzung und den Austausch die wesentlichen Umweltauswirkungen. In der Lebenszyklusphase Nutzung (B8) sind die Übertragungsverluste für die Umweltauswirkungen verantwortlich.

Das Variantenstudium ergibt, dass die Bauverfahren der Erdverkabelung auf der tieferen Höchstspannungsebene 220 kV 1,2-mal bis 1,4-mal, sowie die Freileitungen 2,5-mal höhere Umweltauswirkungen aufweisen als die Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Der Grund für die erhöhten Umweltauswirkungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV gegenüber der Höchstspannungsebene 380 kV liegt in der Systemeffizienz. Die Materialisierung ist bei beiden Nennspannungen der Höchstspannungsebene fast gleich hoch; doch wird um etwa die Hälfte weniger elektrische Energie in der tieferen Nennspannung 220 kV übertragen. Die Übertragungsverluste der Erdverkabelungsvarianten halbieren sich, jedoch kompensiert dies nicht den Effekt der geringeren übertragbaren elektrischen Energie. Dieser Effekt betrifft nur die Erdverkabelungsvarianten. Bei den Freileitungen sind die relativen Übertragungsverluste hinsichtlich der Menge der elektrischen übertragenen Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV doppelt so hoch wie auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Dieser Umstand erklärt den signifikanten Anstieg der Umweltauswirkungen, zumal die Übertragungsverluste einen sehr hohen Einfluss auf die Umweltauswirkungen aufweisen.

Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, beeinflusst der Einsatz eines erneuerbaren Schweizer Strommixes die Hauptaussagen der Ökobilanz. Dies hauptsächlich bei den Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV. In diesem Fall fällt die Menge an Umweltauswirkungen der Freileitungen erheblich unter die der Bauverfahren der Erdverkabelung. Dass das Szenario eines erneuerbaren Schweizer Strommixes in naher Zukunft eintritt, ist zwar unwahrscheinlich. Doch bleibt die Aussage zulässig, dass die Umweltauswirkungen der Freileitungen mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien im Schweizer-Übertragungsnetz abnehmen und Freileitungen zudem auf der Höchstspannungsebene 220 kV und 380 kV gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung klar im Vorteil sind.

Die Ergebnisse der Analyse der Materialien/Komponenten gelten für alle Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf beiden Höchstspannungsbereichen, da sich die Materialisierung nur im Querschnitt der Kabel und der Leiterseile unterscheidet. Alle Materialien/Komponenten der Bauverfahren der Erdverkabelung, die einen erhöhten Metall- bzw. Elektroanteil aufweisen, führen zu hohen Umweltauswirkungen. Zu diesen Materialien/Komponenten gehören die Übertragungskabel, die Elektroverteilung der Stollen, die Kabelschutzrohre aus Stahl, der Bewehrungsstahl und die Stahlbetonrohre. Die Bauverfahren der Freileitungen beruhen ebenfalls auf Komponenten aus Metallen wie den Leiterseilen aus Aldrey, dem verzinkten Stahl für die Masten sowie dem Bewehrungsstahl und die Mikropfähle der Fundamente.

Im Falle der Übergangsbauwerke belegt die Ökobilanz, dass das «Übergangsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast» den geringsten Ressourcenverbrauch und daher die tiefsten Umweltauswirkungen aufweist. Die höchsten Umweltauswirkungen weist das Übergangsbauwerk «Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase» auf. Es weist mit Abstand den höchsten Materialaufwand auf.

Die erhobenen Daten zu den Übertragungstechnologien elektrischer Energie verfügen über eine hohe Genauigkeit und Aktualität, da sie anhand bereits erfolgter Bauprojekte erhoben sind. Dementsprechend sind alle Aufwände für die Sachbilanz zielgerichtet und mit einer hohen Zuverlässigkeit erhoben worden.

Empfehlung

Grundsätzlich existieren für alle Geländetypen mehr und weniger geeignete Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Das zentrale Ziel lautet demnach nicht, die aus ökologischer Sicht umweltfreundlichste Technologie losgelöst von den technischen Gegebenheiten zu wählen. Vielmehr geht es darum, die bestgeeignete Technologie für das jeweilige Gelände zu wählen. Besteht für einen Geländetyp die Wahl zwischen mehreren Übertragungstechnologien elektrischer Energie, ist es sinnvoll, diejenige Technologie zu wählen, welche die geringsten Umweltauswirkungen mit sich bringt. Die Entscheidungsgrundlage für die Wahl einer geeigneten Technologie ist multifaktoriell: Sie beinhaltet ökologische wie technische, rechtliche, ökonomische sowie soziale Gesichtspunkte. Die über die Ökologie hinausgehenden Gesichtspunkte müssen ermittelt und kritisch hinterfragt werden, um eine Nutzenabwägung zu treffen.

Nach Möglichkeit sollten auf der Höchstspannungsebene 380 kV Freileitungen statt Bauverfahren der Erdverkabelung eingesetzt werden, da Freileitungen tiefere Umweltauswirkungen aufweisen. Die einzelnen Varianten von Freileitungen haben untereinander vergleichbar hohe Umweltauswirkungen, weswegen der Fundamenttyp (Riegelfundament, Rahmenfundament, Einzelfundament) frei für den jeweiligen Zweck ausgewählt werden kann. Wird eine Erdverkabelung vorgesehen, sollte nach Möglichkeit das Bauverfahren «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» zum Einsatz gelangen. Denn dieses zeigt im Vergleich zu allen Bauverfahren der Erdverkabelung die geringsten Umweltauswirkungen. Im Falle des Baus eines Stollens bietet sich das Bauverfahren «Gefräster Stollen – Gripper-TBM» an. Bei Unterfahrungen mittels eines Bauverfahrens des Untertagebaus sollte nach Möglichkeit das Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe» eingesetzt werden.

Die Umweltauswirkungen der Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV und 380 kV variieren im Vergleich mit den Bauverfahren der Erdverkabelung je nach angewandter Methode zur Wirkungsabschätzung. Wird einzig die aufgewendete Primärenergie der Übertragungstechnologien elektrischer Energie mittels der Methode «kumulierter Energieaufwand» betrachtet, sind die Bauverfahren der Erdverkabelung mit geringem Primärenergieaufwand («Phasenrohr – E-Power Pipe» und die Kabelrohrblöcke) im Vorteil. Bei Anwendung der beiden anderen Methoden trifft diese Aussage nicht zu. Allerdings ist der Primärenergieaufwand als alleiniger Indikator nicht aussagekräftig genug, da er nur eine Umweltauswirkung berücksichtigt. Daher ist es empfehlenswert, künftig – jeweils angepasst an die Rahmenbedingungen – Freileitungen oder die Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» und «Kabelrohrblock – 2 Rohrblocke» einzusetzen. Weiter bietet sich aus ökologischer Sicht das Bauverfahren «Gefräster Stollen – Gripper TBM» an, wenn ein Stollen vorgesehen ist.

Die Ökobilanz belegt, dass die Übertragungsverluste einen hohen Anteil der Umweltauswirkungen ausmachen. Allerdings ist das entsprechende Optimierungspotenzial auf Grund der technischen und politischen Rahmenbedingungen beschränkt. Deshalb scheint es verfehlt, sich auf die Minimierung der Übertragungsverluste zu konzentrieren.

Zielführender scheint es, die Umweltauswirkungen der energetischen Aufwände während des Baus und der Nutzung zu reduzieren. Die wohl einfachste Massnahme, um Umweltauswirkungen energetischer Herkunft zu reduzieren, ist der Einsatz von erneuerbarer elektrischer Energie. Wie die Sensitivitätsanalyse klar nachweist, verhindert ein solcher Einsatz einen Grossteil der aus der Produktion elektrischer Energie resultierenden Emissionen. Zudem hat der Ansatz «Vermeiden» oberste Priorität, um Umweltauswirkungen effektiv zu reduzieren. Konkret ist es deshalb sinnvoll, bereits während des Baus und den laufenden Bauverfahren der Erdverkabelung möglichst wenig elektrische Energie zu verbrauchen. Geeignete Massnahmen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise ein effizientes Beleuchtungssystem oder der Einsatz von energieeffizienteren Baumaschinen. Weiter sollten die Anlagen mit einem erneuerbaren Schweizer Strommix betrieben werden. Ebenso können während des Leitungsbaus elektrifizierte Baumaschinen kombiniert mit einem erneuerbaren Strommix zum Einsatz kommen. Somit existieren zahlreiche Möglichkeiten, den Bauprozess und die Nutzungsphase energetisch zu optimieren.

Die Nachhaltigkeit eines Bauprojekts ist in einer frühen Planungsphase am besten zu beeinflussen. Deshalb gilt das Prinzip, weiterhin schon in der Vorplanung ein Schwergewicht auf die Wahl der Materialien zu legen. Zusammenfassend lassen sich aus ökologischer Sicht drei Massnahmen treffen, um die Übertragungstechnologien elektrischer Energie aufgrund einer ökologischen Materialwahl effizient und möglichst einfach umweltfreundlich zu gestalten: der Ersatz von Komponenten aus Metallen, der Einsatz von Recycling-Materialien, wenn die Gewährleistung der Qualität und der Langlebigkeit der Komponenten gegeben ist.

Um ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte in Einklang zu bringen, ist es sinnvoll, bereits in der Planungsphase möglicher Erweiterungen elektrischer Netze einen Massnahmenplan zu erarbeiten. Dabei sollen die betreffenden Massnahmen mittels einer Ökoeffizienzanalyse hinsichtlich ihrer Ökoeffizienz beurteilt werden. Dies ermöglicht es, ökologisch wirksame Massnahmen zielgerichtet umzusetzen und dabei nicht nur Umweltauswirkungen zu reduzieren, sondern auch ökonomische Gesichtspunkte einzubeziehen.

Inhalt

Glossar 9

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis.....	13
Digitaler Anhang	16
1. Einleitung	17
1.1 Ausgangslage und Problemanalyse	17
1.2 Aufbau des Berichts	17
2. Ziel und Untersuchungsrahmen	19
2.1 Ziel	19
2.2 Methodik	20
2.3 Fragebogen	21
2.4 Beschreibung des Untersuchungsgegenstands	22
2.5 Untersuchungsrahmen	39
2.6 Funktionelle Einheit	44
2.7 Variantenstudium	44
2.8 Sensitivitätsanalyse	45
2.9 Datengrundlage	47
2.10 Datenqualität	54
3. Sachbilanz	55
3.1 Baumaterialien und Baukomponenten	55
3.2 Betriebsmittel	61
3.3 Baumaschinen	61
3.4 Transporte	65
3.5 Energie (elektrische Energie und Wärme)	66
3.6 Übertragene elektrische Energie	66
3.7 Übertragungsverluste	66
3.8 Technische Infrastruktur	67
3.9 Emissionen	67
3.10 Abfallaufbereitung und Entsorgung	68
4. Wirkungsabschätzung	69

4.1	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV	69
4.2	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV	83
4.3	Sensitivitätsanalyse	89
4.4	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Übergangsbauwerke auf der Höchstspannungsebene 380 kV	99
5.	Auswertung.....	109
5.1	Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV	109
5.2	Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV	110
5.3	Materialien und Komponenten der Übertragungstechnologien elektrischer Energie	112
5.4	Sensitivitätsanalyse	113
5.5	Übergangsbauwerke.....	114
6.	Diskussion	116
6.1	Variantenstudium – Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf den Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV.....	116
6.2	Sensitivitätsanalyse	119
6.3	Datenqualität und Unsicherheiten.....	119
7.	Schlussfolgerungen.....	121
8.	Empfehlung.....	122
	Literaturverzeichnis	124

Glossar

Bauverfahren	Dieser Begriff umfasst die Freileitungen, die Bauverfahren der Erdverkabelung und die Übergangsbauwerke.
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CO ₂ -eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente («equivalents»)
FU	Funktionelle Einheit der Ökobilanz, engl. «functional unit»
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
SPV	Sprengvortrieb
UBP	Umweltbelastungspunkt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie (Verbraucherstrommix Schweiz) über 1 km	3
Abbildung 2: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie (Verbraucherstrommix Schweiz) über 1 km	3
Abbildung 3: Rahmen einer Ökobilanz ISO 14040 [13].....	21
Abbildung 4: Normal- und Längenprofil des «Phasenrohrs – E-Power Pipe»	23
Abbildung 5: Normal- und Längenprofil des «Strangrohrs – E-Power Pipe»	24
Abbildung 6: Schema des «Strangrohrs – Horizontal Directional Drilling (HDD)»	25
Abbildung 7: Normal- und Längenprofil des «Strangrohrs – Direct Pipe»	26
Abbildung 8: Normal- und Längenprofil des «Mikrotunnel, nicht begehbar»	27
Abbildung 9: Normal- und Längenprofil des «Mikrotunnel, begehbar»	28
Abbildung 10: Normal- und Längenprofil des «Gesprengten Stollens»	29
Abbildung 11: Normal- und Längenprofil des «Gefrästen Stollens – Gripper TBM»	30
Abbildung 12: Normal- und Längenprofil des «Gefrästen Stollens – Einfachschild TBM»	31
Abbildung 13: Normal- und Längenprofil des «Gefrästen Stollens – TBM mit Bruststützung»	32
Abbildung 14: Normalprofil der «Grabenfräse – Pipe Express»	33
Abbildung 15: Normalprofil des «Kabelrohrblocks – 1 Rohrblock»	34
Abbildung 16: Normalprofil des «Kabelrohrblocks – 2 Rohrblöcke»	35
Abbildung 17: Normalprofil des «Leitungskanals»	36
Abbildung 18: Normal- und Längenprofil der Freileitungen, schematisch für ebenes Gelände, steiles Gebirge und Waldüberspannung	37
Abbildung 19: Zeitstrahl für die Kabelleitung Stollen (TBM/SPV/Mikrotunnel, begehbar) während 80 Jahren	41
Abbildung 20: Zeitstrahl der Kabelleitung Kabelrohrblock während 80 Jahren	41
Abbildung 21: Zeitstrahl der Freileitungen während 80 Jahren	42
Abbildung 22: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [3].	43
Abbildung 23: Übertragungsarbeit und -verluste/km je Leitung (2 Systeme)	49
Abbildung 24: Unterschied der jährlichen Übertragungsverluste der Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV	67
Abbildung 25: Treibhausgasemissionen pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert	70

Abbildung 26: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert	71
Abbildung 27: KEA erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert.....	71
Abbildung 28: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert.....	72
Abbildung 29: Gesamte Treibhausgasemissionen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	73
Abbildung 30: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	73
Abbildung 31: Gesamter KEA erneuerbar der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	74
Abbildung 32: Gesamter KEA nicht erneuerbar der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	74
Abbildung 33: Treibhausgasemissionen pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen	76
Abbildung 34: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung	76
Abbildung 35: KEA erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen	77
Abbildung 36: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen.....	77
Abbildung 37: Ressourcen und Emissionen – Erdverkabelung (380 kV), Umweltbelastungspunkte	79
Abbildung 38: Energie – Erdverkabelung (380 kV), Umweltbelastungspunkte.....	80
Abbildung 39: Ressourcen und Emissionen, Energie – Freileitungen (380 kV)	82
Abbildung 40: Treibhausgasemissionen pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert	84
Abbildung 41: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert	84
Abbildung 42: KEA erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert.....	85
Abbildung 43: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert.....	85
Abbildung 44: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	87
Abbildung 45: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	87

Abbildung 46: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV) nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung	88
Abbildung 47: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV) nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung	89
Abbildung 48: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Lebensdauer der Kabel 40 Jahre	90
Abbildung 49: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Lebensdauer der Kabel 60 Jahre	90
Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Lebensdauer der Kabel 80 Jahre	91
Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Lebensdauer der Kabel 40 Jahre	92
Abbildung 52: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Lebensdauer der Kabel 60 Jahre	92
Abbildung 53: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Lebensdauer der Kabel 80 Jahre	93
Abbildung 54: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Schweizer Verbraucherstrommix	94
Abbildung 55: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), ENTSO-E-Mix	94
Abbildung 56: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Erneuerbarer Schweizer Strommix	95
Abbildung 57: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Schweizer Verbraucherstrommix	96
Abbildung 58: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), ENTSO-E-Mix	96
Abbildung 59: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Erneuerbarer Schweizer Strommix	97
Abbildung 60: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Spannweite 400 m	98
Abbildung 61: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Spannweite 600 m	98
Abbildung 62: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Spannweite 400 m	99
Abbildung 63: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Spannweite 600 m	99
Abbildung 64: Treibhausgasemissionen pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert.....	100
Abbildung 65: Umweltbelastungspunkte pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert.....	101

Abbildung 66: KEA erneuerbar pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert.....	101
Abbildung 67: KEA nicht erneuerbar pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert.....	102
Abbildung 68: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), Treibhausgasemissionen	103
Abbildung 69: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), Umweltbelastungspunkte	103
Abbildung 70: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), KEA erneuerbar	104
Abbildung 71: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), KEA nicht erneuerbar ...	104
Abbildung 72: Treibhausgasemissionen pro Übergangsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen	105
Abbildung 73: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen	106
Abbildung 74: KEA erneuerbar pro Übertragungsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen	106
Abbildung 75: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen	107
Abbildung 76: Ressourcen und Emissionen – Übergangsbauwerke (380 kV)	108
Abbildung 77: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	109
Abbildung 78: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km.....	111
Abbildung 79: Ressourcen und Emissionen - Erdverkabelung (380 kV)	112
Abbildung 80: Ressourcen und Emissionen. Energie – Freileitungen (380 kV)	113
Abbildung 81: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Erneuerbarer Schweizer Strommix	113
Abbildung 82: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), Umweltbelastungspunkte	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wesentliche Parameter des Variantenstudiums	45
Tabelle 2: Umweltkennwerte der Strommixe, Sensitivitätsanalyse Parameter 2: Strommix	46
Tabelle 3: Materialien für eine Freileitung mit Einzelfundament, ebenes Gelände; Sensitivitätsanalyse Parameter 3: Spannweite der Freileitungen	46
Tabelle 4: Relevante Materialien/Bauteile für die Errichtung einer Erdverkabelung oder Freileitung	47
Tabelle 5: Flächennutzungskonzept für den Untertagebau – Phasenrohre/Strangrohre.....	51

Tabelle 6: Flächennutzungskonzept für den offenen Grabenbau.....	52
Tabelle 7: Flächennutzungskonzept für die Freileitungen	53
Tabelle 8: Allgemeingültige Parameter	55
Tabelle 9: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Phasenrohr – E-Power Pipe», Mengen pro GWh und km	55
Tabelle 10: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Strangrohr – E-Power Pipe», Mengen pro GWh und km.....	56
Tabelle 11: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Strangrohr – Direct Pipe», Mengen pro GWh und km	56
Tabelle 12: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Strangrohr – Horizontal Directional Drilling (HDD)», Mengen pro GWh und km	56
Tabelle 13: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Mikrotunnel, begehbar», Mengen pro GWh und km	57
Tabelle 14: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Mikrotunnel, nicht begehbar», Mengen pro GWh und km.....	57
Tabelle 15: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Grabenfräse – Pipe Express», Mengen pro GWh und km.....	57
Tabelle 16: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock», Mengen pro GWh und km.....	58
Tabelle 17: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Kabelrohrblock – 2 Rohrböcke», Mengen pro GWh und km	58
Tabelle 18: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Leitungskanal», Mengen pro GWh und km.....	58
Tabelle 19: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gesprengter Stollen», Mengen pro GWh und km	59
Tabelle 20: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gefräster Stollen – Einfachschild TBM», Mengen pro GWh und km	59
Tabelle 21: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gefräster Stollen – Gripper TBM», Mengen pro GWh und km	59
Tabelle 22: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gefräster Stollen – Bruststützung mit TBM», Mengen pro GWh und km.....	60
Tabelle 23: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Freileitung mit Einzelfundament», Mengen pro GWh und km	60
Tabelle 24: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Freileitung mit Rahmenfundament», Mengen pro GWh und km	60
Tabelle 25: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Freileitung mit Riegelfundament», Mengen pro GWh und km	61
Tabelle 26: Streckenlänge Gütertransport, vom Hersteller zur Baustelle.....	65

Tabelle 27: Gütertransport, von der Baustelle zur Entsorgungsstelle	65
Tabelle 28: Verwertungsarten der Materialien/Komponenten	68

Digitaler Anhang

Abschlussbericht

- 20230614_Bericht_Swissgrid_Oekobilanz
- Review-Report LCA Swissgrid

Fragebogen

- 20230131_Erdverkabelung_380kV
- 20230131_Freileitungen_380kV

Sachbilanz

- 20230614_Sachbilanz_Swissgrid_Ökobilanz
- 20230614_Ökobilanzmodell_Ökobilanz_Swissgrid

Vordergrunddaten

- Erdverkabelung
- Freileitung
- Herstellergarantie
- Übergangsbauwerk
- Zeitstrahl

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemanalyse

Die nationale Netzgesellschaft Swissgrid hat bislang zur Übertragung elektrischer Energie hauptsächlich Freileitungen erstellt und betrieben. In der jüngeren Vergangenheit hat sie zudem einzelne erste Projekte der erdverlegten Übertragung elektrischer Energie verwirklicht. Gegenwärtig gewinnt die erdverlegte Übertragung elektrischer Energie zunehmend an Bedeutung, da sie Hindernisse wie Gebäude und Bauwerke in siedlungsdichten Gebieten umgehen kann. Damit berücksichtigt sie verstärkt raumplanerische und bautechnische Kriterien, die in einer immer dichter besiedelten Schweiz zunehmend wichtiger werden.

Um das bestmöglich geeignete Trasse und die bautechnisch entsprechende Ausführung der Übertragung elektrischer Energie zu evaluieren, nutzt Swissgrid die Software Gilytics. Durch Gilytics lassen sich einerseits die technische Machbarkeit mitsamt der ökonomischen Bepreisung, andererseits die rechtliche und raumplanerische Verträglichkeit der einzelnen Varianten ermitteln. Allerdings bezieht Gilytics bisher noch keine umwelttechnischen Gesichtspunkte ein. Um diese Lücke zu schliessen und als Bauherrin eine Vorreiterrolle im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit einzunehmen, hat Swissgrid eine Ökobilanz in Auftrag gegeben. Die Ökobilanz untersucht die Nachhaltigkeit der unterschiedlichen Verfahren des Freileitungs- und Erdverkabelungsbaus.

Die Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse oder «Life Cycle Assessment (LCA)» genannt, ist ein Hilfsmittel, um die Umweltauswirkungen von Produkten, Prozessen und Unternehmen zu analysieren. Das Vorderglied «Öko-» steht dabei für die Umwelt und die auf sie wirkenden Einflüsse, das Hinterglied «Bilanz» für die buchhalterische Erfassung sämtlicher Energie- und Stoffflüsse bzw. Umweltauswirkungen über den ganzen Lebenszyklus eines Produktes oder Prozesses in quantitativer/numerischer Form (d.h. «von der Wiege bis zur Bahre»). Dabei sollen alle Emissionen und Ressourcenverbräuche während der Produktion eines Produktes oder Errichtung eines Prozesses über die eigentliche Lebenszeit bis zur Entsorgung oder Wiederverwendung in die Lebenszyklusanalyse einfließen.

1.2 Aufbau des Berichts

Der vorliegende Bericht definiert zunächst das Ziel und den Untersuchungsbereich (Kapitel 2). Dazu zählen im Einzelnen die Beschreibungen und Festlegungen des Ziels (Kapitel 2.1), der Methodik (Kapitel 2.2), des Untersuchungsgegenstands (Kapitel 2.4), des Untersuchungsbereichs (Kapitel 2.5), der funktionellen Einheit (Kapitel 2.6), des Variantenstudiums (Kapitel 2.7), der Sensitivitätsanalyse (Kapitel 2.8) sowie der Datengrundlage (Kapitel 2.9). In der Folge erläutert der Bericht die Sachbilanz (Kapitel 3) und diskutiert dabei die wichtigsten Annahmen zu den Berechnungen sowie die Hintergrunddaten der Sachbilanz. Genaue Angaben zur Sachbilanz finden sich im Anhang «Sachbilanz». Nach der Sachbilanz erläutert der Bericht die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Kapitel 4). Dabei visualisiert und diskutiert er die Resultate für die einzelnen Übertragungstechnologien elektrischer Energie sowie für die Übergangsbauwerke. Die

Auswertung (Kapitel 5) gibt Aufschluss über die wichtigsten Erkenntnisse aus der Wirkungsabschätzung. Schliesslich formuliert der Bericht eine Empfehlung (Kapitel 8).

2. Ziel und Untersuchungsrahmen

2.1 Ziel

Ziel des vorliegenden Berichts ist es, eine Ökobilanz für die unterschiedlichen Übertragungstechnologien elektrischer Energie der Erdverkabelung und Freileitungen auf den Höchstspannungsebenen 220 kV und 380 kV zu erstellen. Die Ökobilanz quantifiziert die Umweltauswirkungen der einzelnen Bauverfahren und vergleicht diese miteinander. Der Bericht bietet eine Entscheidungsgrundlage für Swissgrid, welche Bauverfahren künftig aus umwelttechnischer Sicht idealerweise umgesetzt werden sollen.

Neben der Ökobilanz der Übertragungstechnologien elektrischer Energie legt der Bericht eine Ökobilanz für die Übertragungsbauwerke vor. Er weist die Übertragungsbauwerke als separate Module aus und vergleicht nicht mit den Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Die erhobenen Daten der Übertragungstechnologien elektrischer Energie und der Übertragungsbauwerke sollen Swissgrid künftig als Instrumente dienen, um bei Bauprojekten neben den Kosten auch die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Varianten effizient zu ermitteln.

Die Entscheidungsgrundlage für die Wahl eines geeigneten Übertragungssystems elektrischer Energie ist multifaktoriell und beinhaltet nicht nur ökologische, sondern auch technische, rechtliche, ökonomische sowie soziale Gesichtspunkte. Alle Gesichtspunkte müssen ermittelt und kritisch hinterfragt werden, um ihren Nutzen abzuwägen. Dieser Bericht beschränkt sich darauf, die ökologischen Gesichtspunkte mittels einer Ökobilanz zu untersuchen.

Die Ökobilanz soll weitestgehend mit den internationalen Normen ISO 14040 [1] und 14044 [2] kompatibel sein. Zudem sollen die Ergebnisse aus der Ökobilanz so aufgearbeitet werden, dass die Datenintegration in die Software Gilytics gewährleistet und einfach möglich ist. Die Methodik, die Erarbeitung sowie die Ergebnisse der Ökobilanz werden in einem technischen Bericht festgehalten.

2.1.1 Vorgehensweise

1. Die Ökobilanz wird weitestgehend gemäss der ISO 14040 [1] und ISO 14044 [2] erstellt.
2. In der Ökobilanz sind die Lebenszyklusphasen Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung getrennt betrachtet und gemäss der EN 15643-5 [3] gegliedert.
3. Die technischen Vordergrunddaten zu den Bauverfahren werden auf Grundlage des Lösungskatalogs der Swissgrid zusammengetragen und aufbereitet.
4. Die Sachbilanz wird anhand der folgenden drei im Baubereich üblichen Wirkungsabschätzungsmethoden ausgewertet:
 - ➔ Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100 a)
 - ➔ Kumulierter Energieaufwand (Cumulative Energy Demand, Version 1.09), getrennt als nicht erneuerbarer und erneuerbarer Energieaufwand ausgewiesen

- ➔ Methode der ökologischen Knappheit 2021 (Ecological Scarcity 2021), Ökofaktoren 2021

2.2 Methodik

Die Ökobilanz ist weitestgehend gemäss ISO 14040:2006 [1] bzw. ISO 14044:2006 [2] und nach den spezifischen methodischen Anforderungen v6.0 gemäss KBOB (Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren) erarbeitet [4, S. 6]. Sie umfasst die folgenden Schritte:

i. Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Im ersten Schritt werden die Ziele des Berichts festgelegt. Der vorliegende Bericht orientiert sich an der EN 15643-5 [3] für die Systemdefinition und die Beschreibung der funktionalen Einheit.

ii. Sachbilanz

Die Emissionen und der Ressourcenverbrauch bzw. die Ressourceninanspruchnahme werden im zweiten Schritt für sämtliche Prozesse der zu untersuchten Übertragungstechnologien elektrischer Energie erfasst bzw. abgeschätzt. Die Sachbilanz berechnet die Mengen der kumulierten Emissionen und Ressourceninanspruchnahme über den ganzen Lebenszyklus des Produkt-/Prozesssystems hinweg.

Der vorliegende Bericht wendet die KBOB-Bilanzierungsregeln an. Davon abweichende Annahmen sind dokumentiert. Dazu stützt sich die Ökobilanz auf folgende Datenbank:

- UVEK Ökobilanzdatenbestand 2022: «UVEK LCI Data DQRv2:2022» [5]

Die Maschinenstunden sind mittels der Daten des «Technik & Betriebswirtschafts-Viewer des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV)» (TB-Viewer) abgebildet. Die generischen Hintergrunddaten, um die Umweltauswirkung der Herstellung der Baumaschine sowie der Verbrennung von Diesel in den Baumaschinen abzuschätzen, stammen ebenfalls aus der o.g. UVEK Datenbank 2022 [5].

Der Zugriff auf die Ökobilanzdatenbank erfolgt über die Ökobilanzsoftware SimaPro [6].

iii. Wirkungsbilanz

Die Wirkungsbilanz beschreibt im dritten Schritt, wie stark die unterschiedlichen Varianten die Umwelt belasten. Die EN 15643-6 [3] enthält eine Liste von Umweltindikatoren, durch die sich spezifische Umweltauswirkungen wie die Klimaerwärmung oder der Abbau der Ozonschicht quantifizieren lassen. Mit Hilfe von Wirkungsabschätzungsmethoden zeigt der Bericht, wie stark die untersuchten Prozesse zu aktuellen Umweltproblemen beitragen. Daraus resultiert eine mehrdimensionale Bewertung, auf deren Grundlage Swissgrid entscheiden kann, welchen Umweltproblemen die grösste Bedeutung zukommt.

iv. Auswertung und Interpretation

Im vierten Schritt werden die Ergebnisse der Wirkungsbilanz der untersuchten Varianten im Hinblick auf die Ziele des Berichts ausgewertet und interpretiert. Dies kann dazu führen, dass die im ersten Schritt festgelegten Annahmen der Analyse gewisse Anpassungen erfahren (z.B.

hinsichtlich der Systemgrenzen oder der Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethoden). Dadurch verbessert sich die Aussagekraft des Berichts schrittweise und iterativ.

Abbildung 3 fasst die vier Schritte der Ökobilanzierung gemäss ISO 14040:2006 [1], [2] nochmals zusammen.

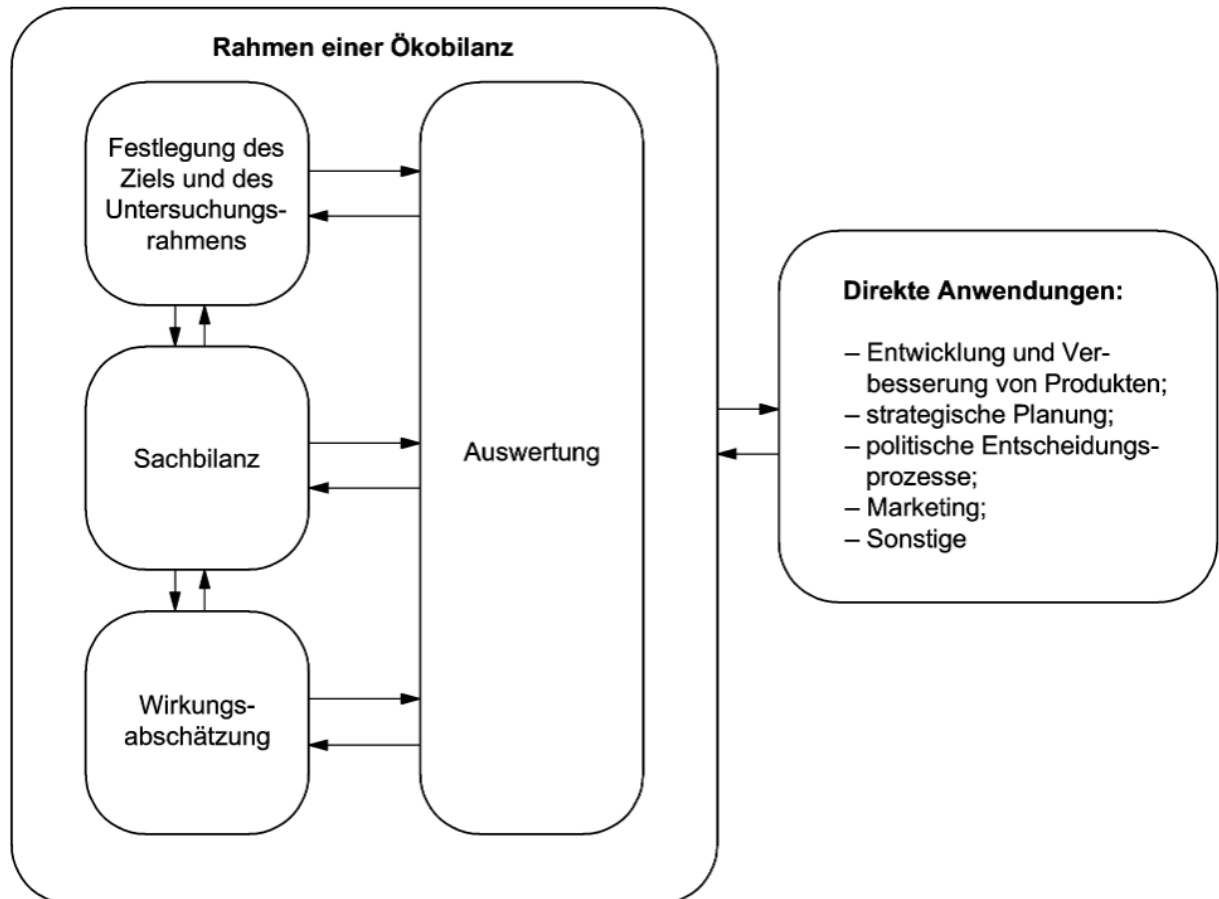


Abbildung 3: Rahmen einer Ökobilanz ISO 14040 [13]

2.3 Fragebogen

Im Rahmen des vorliegenden Berichts sind zwei Fragebögen – jeweils ein Bogen zu den Bauverfahren der Erdverkabelung beziehungsweise zu den Freileitungen – erstellt worden. Dabei untersuchen die Fragebögen die wichtigsten Material- und Energieaufwände innerhalb der einzelnen Lebenszyklusphasen. Die ihnen zugrundeliegenden Daten sind von Swissgrid gesammelt worden. Die Fragebögen sind im digitalen Anhang im Ordner «Fragebogen» dokumentiert.

Für die Übertragungsbauwerke liegt eine einzelne Excel-Tabelle mit den relevantesten Materialaufwänden vor. Zudem legt ein getrenntes Dokument fest, von welchen Wartungs- und Austauschvorgängen auszugehen ist. Der Anhang zu den Übertragungsbauwerken ist im digitalen Anhang im Ordner «Hintergrunddaten» ersichtlich.

Ferner schliessen geeignete Datenblätter allenfalls vorliegende Datenlücken zur Materialisierung. Die entsprechenden Daten sind von Swissgrid gesammelt worden. Die Datenblätter sind im digitalen Anhang im Ordner «Hintergrunddaten» zu den jeweiligen Bauverfahren zu finden.

2.4 Beschreibung des Untersuchungsgegenstands

2.4.1 Einführung

Der vorliegende Bericht untersucht die Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene zwischen den Spannungen 380 kV und 220 kV. Dabei verändern sich die übertragene Menge elektrischer Energie, die Übertragungsverluste sowie die Querschnitte der Kabel der Erdverkabelung bzw. die Leiterseile der Freileitungen. Gemäss heutigem Stand der Technik werden mehrheitlich elektrische Übertragungssysteme auf der Höchstspannungsebene (220-380 kV) gebaut.

Der Bericht berücksichtigt in seinen Berechnungen Freileitungen im ebenen Gelände, im steilen Gebirge und mit einer Waldüberspannung sowie die drei unterschiedlichen Fundamenttypen, die bei Freileitungen zum Einsatz kommen. Da sich Freileitungen in jedem Terrain errichten lassen, ist je nach Topografie mit Mehrinstallationen in der Errichtungsphase zu rechnen.

Die Bauverfahren der Erdverkabelung werden anhand ihres vorgesehenen Einsatzterrains modelliert. Die Bauverfahren der Erdverkabelung sind technisch weitgehend gleichwertig. Jedoch ist nicht jedes Bauverfahren der Erdverkabelung für jedes Terrain bzw. jeden Untergrund gleich gut geeignet. Deshalb sind die Einsatzgebiete der unterschiedlichen Bauverfahren beschränkt und die technischen Gegebenheiten spezifisch auf die jeweiligen Terrains ausgerichtet.

Die Übergangsbauwerke werden für die Höchstspannungsebene 380 kV berechnet. Der Bericht führt demnach keine Sensitivitätsanalyse auf einer niedrigeren Höchstspannungsebene durch.

Im Zusammenhang mit der Übertragung elektrischer Energie erstellt der Bericht die Ökobilanz der im Folgenden genannten Bauverfahren der Erdverkabelung und Freileitungen. Die Bilder und die Kurzbeschreibungen der Bauverfahren stammen aus den technischen Berichten von Swissgrid «Lösungskatalog» und «Baukasten Technischer Bericht Kabelleitungen». Diese Berichte sind vertraulich und nur mit Genehmigung von Swissgrid einzusehen.

2.4.2 Erdverkabelung im Untertagebau

2.4.2.1 Phasenrohre mit DN 250 der Bauart «E-Power Pipe»

Normalprofil



Längenprofil (schematisch)

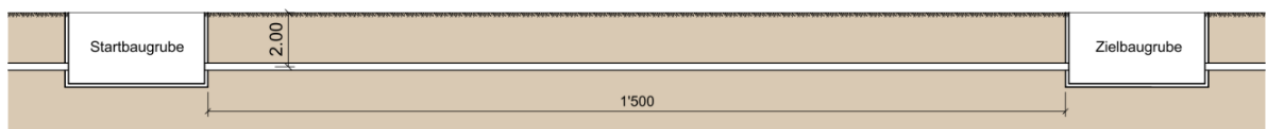


Abbildung 4: Normal- und Längenprofil des «Phasenrohrs – E-Power Pipe»

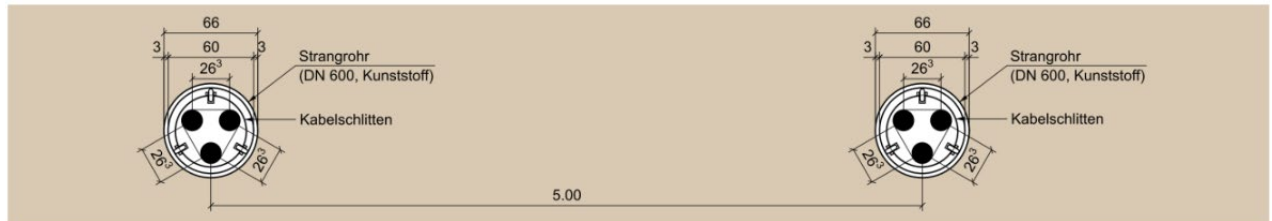
Die Lösung mit Phasenrohren, erstellt im E-Power Pipe-Verfahren, eignet sich für ebenes oder mässig geneigtes Gelände im Lockergestein. Sie kann in trockenen Böden wie auch im Grundwasser angewendet werden.

Die Lösung besteht aus dem Vortrieb und Einzug von sechs nebeneinander angeordneten Kabelschutzrohren in Kunststoff mit einem Durchmesser von 250 mm, die Platz für je ein Kabel bieten. Der Vortrieb erfolgt jeweils von einem Start- in einen Zielschacht, wobei die mögliche Haltungslänge 1'500 m beträgt.

E-Power Pipe ist ein von der Firma Herrenknecht neu entwickeltes Verfahren, um Erdkabel über möglichst lange Strecken wirtschaftlich zu verlegen. Das Verfahren erfordert zwei Arbeitsschritte. Im ersten Schritt erfolgt mittels einer kleinen Tunnelbohrmaschine der Vortrieb von einem Startschacht in Richtung eines Zielschachtes. Dabei dringen einzelne Vortriebsrohre aus Stahl, die gleichzeitig die gesamten Ver- und Entsorgungsleitungen der Maschine beinhalten, gekoppelt vor. Im zweiten Schritt wird das definitive Ausbaurohr aus Kunststoff eingezogen.

2.4.2.2 Strangrohre mit DN 600 der Bauart «E-Power Pipe»

Normalprofil



Längenprofil (schematisch)

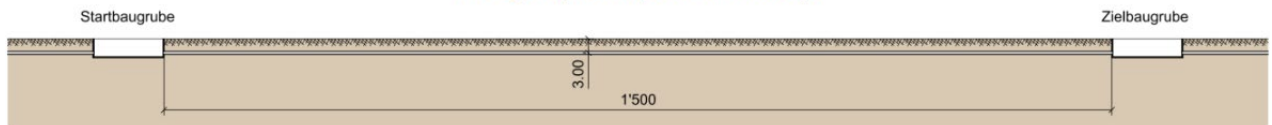


Abbildung 5: Normal- und Längenprofil des «Strangrohrs – E-Power Pipe»

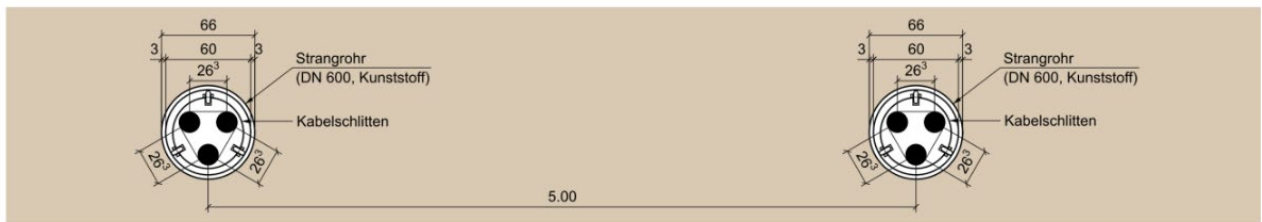
Die Lösung mit Strangrohren mittels E-Power Pipe-Verfahren eignet sich für ebenes oder mässig geneigtes Gelände. Sie zeichnet sich durch ihre hohe Vortriebsleistung und die daraus resultierenden tiefen Kosten aus.

Die Lösung besteht aus der unterirdischen Erstellung zweier nebeneinander angeordneter Kunststoffrohre mit einem Innendurchmesser von 600 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt von einer Start- in eine Zielbaugrube, wobei die mögliche Haltungslänge 1'500 m beträgt.

E-Power Pipe ist ein von der Firma Herrenknecht neu entwickeltes Verfahren, um für Erdkabel über möglichst lange Strecken wirtschaftlich zu verlegen. Das Verfahren erfordert zwei Arbeitsschritte. Im ersten Schritt erfolgt der Vortrieb von einem Startschacht in Richtung eines Zielschachtes mit einer kleinen Tunnelbohrmaschine. Dabei dringen die einzelnen Vortriebsrohre aus Stahl, die jeweils die gesamten Ver- und Entsorgungsleitungen der Maschine beinhalten, gekoppelt vor. Im zweiten Schritt wird das definitive Ausbaurohr aus Kunststoff eingezogen.

2.4.2.3 Strangrohre mit DN 600 der Bauart «Horizontal Directional Drilling (HDD)»

Normalprofil



Längenprofil (schematisch)

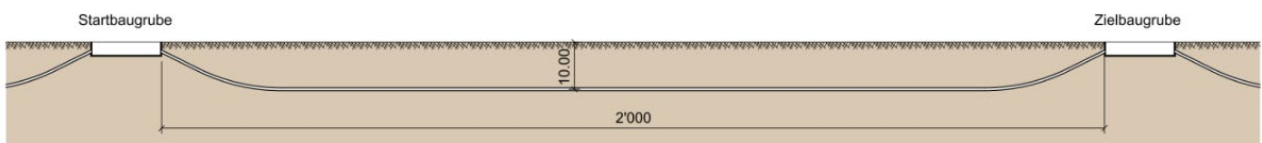


Abbildung 6: Schema des «Strangrohrs – Horizontal Directional Drilling (HDD)»

Die Lösung mit Strangrohren der Bauart «Horizontal Directional Drilling» (HDD) eignet sich für ebenes wie hügeliges Gelände. Aufgrund seiner Tiefenlage lässt sich die Vortriebsweise für die Unterfahrung von Hindernissen wie Flüssen, Strassen, Werkleitungen usw. nutzen. Dem Vorteil der günstigen Bauweise steht jedoch die geologisch eingeschränkte Anwendbarkeit der Lösung gegenüber.

Die Lösung umfasst die unterirdische Erstellung zweier nebeneinander angeordneter Kunststoffrohre mit einem Innendurchmesser von 600 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt jeweils von einer Start- in eine Zielbaugrube, wobei die mögliche Haltungsänge 2'000 m beträgt.

Das Verfahren beinhaltet drei Arbeitsschritte: In einem ersten Schritt erfolgt eine Pilotbohrung von einer Startbaugrube in Richtung Zielpunkt. Dabei wird der anstehende Boden bei weichen Geologien hydraulisch mit hohem Druck abgebaut, im Felsen dagegen mithilfe eines Bohrmotors. In einem zweiten Schritt wird der Schacht mittels Rückzug eines Räumungsbohrkopfes durch die bereits erstellte Pilotbohrung aufgeweitet. In einem dritten und letzten Arbeitsschritt erfolgt der Einzug des definitiven Ausbaurohrs aus Kunststoff oder Stahl.

2.4.2.4 Strangrohre mit DN 1000 der Bauart «Direct Pipe»

Normalprofil



Längenprofil (schematisch)

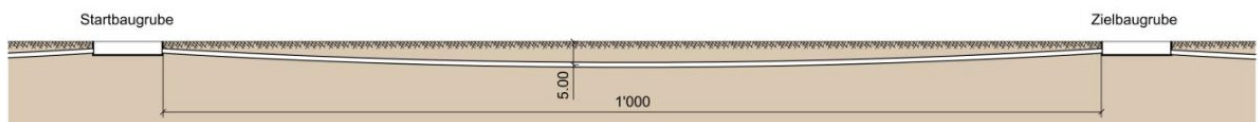


Abbildung 7: Normal- und Längenprofil des «Strangrohrs – Direct Pipe»

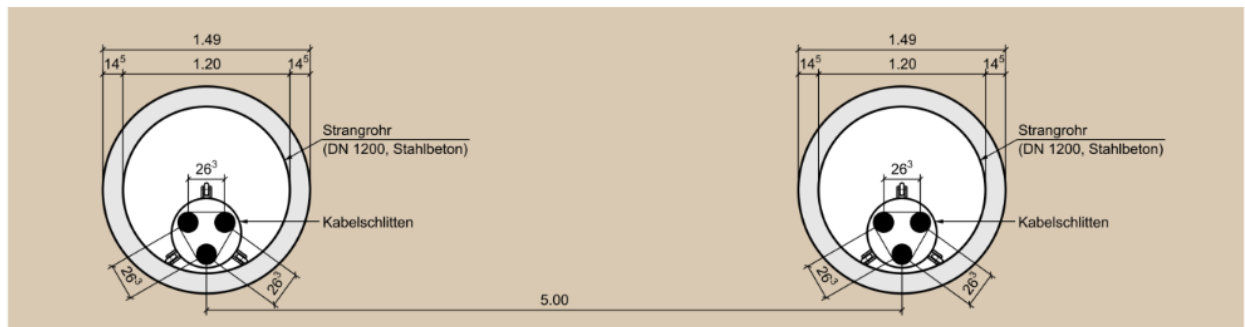
Die Lösung mit Strangrohren der Bauart «Direct Pipe» eignet sich für ebenes oder mässig geneigtes Gelände. Das Verfahren zeichnet sich durch seine hohe Vortriebsleistung und das breite geologische Einsatzspektrum aus.

Die Lösung umfasst die unterirdische Erstellung zweier nebeneinander angeordneter Stahlrohre mit einem Innendurchmesser von 1'000 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt von einer Start- in eine Zielbaugrube, wobei die mögliche Haltungs-länge 1'000 m beträgt.

Direct Pipe ist ein von der Firma Herrenknecht entwickeltes Vortriebsverfahren zur wirtschaftlichen Pipelineverlegung. Das Verfahren kombiniert die Vorteile von Mikrotunnel mit jenen der Horizontalbohrtechnik. In einem einzigen Arbeitsschritt lässt sich die vorgefertigte Rohrleitung grabenlos installieren und gleichzeitig das dafür erforderliche Bohrloch erstellen. Wie beim Mikrotunnel erfolgt der Vortrieb mittels einer Tunnelbohrmaschine von einer Startbaugrube in Richtung einer Zielbaugrube. Im Gegensatz zum Mikrotunnel bestehen die Vortriebsrohre aus Stahl, die im Bereich der Startbaugruben über grosse Längen vorbereitet und verschweisst werden. Die erreichbare Vortriebsleistung liegt dadurch wesentlich höher als beim Mikrotunnel.

2.4.2.5 Strangrohre mit DN 1200 der Bauart «Mikrotunnel, nicht begehbar»

Normalprofil



Längenprofil (schematisch)

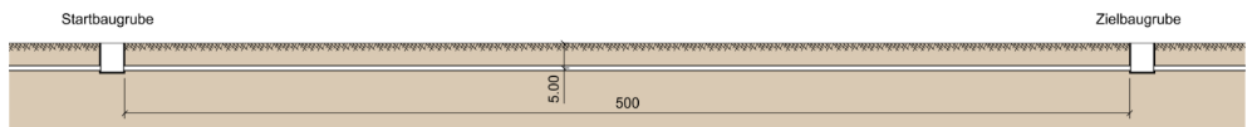


Abbildung 8: Normal- und Längenprofil des «Mikrotunnel, nicht begehbar»

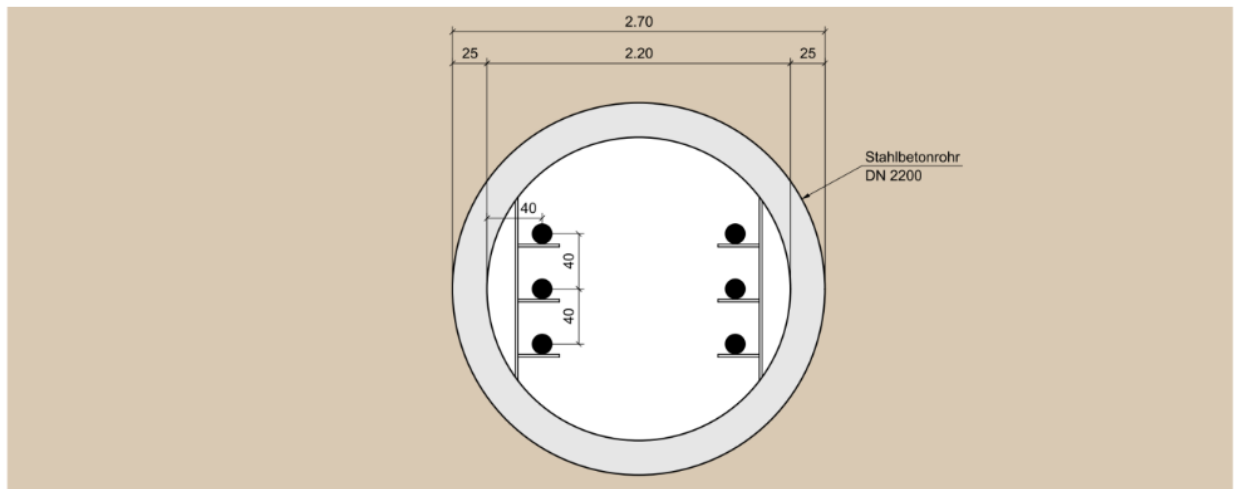
Die Lösung mit Strangrohren der Bauart «Mikrotunnel» eignet sich für ebenes wie hügeliges Gelände. Sie zeichnet sich durch ihr breit gefasstes geologisches Einsatzspektrum aus. Mit einem entsprechenden Bohrkopf lässt sie sich bei sämtlichen Baugründen (Lockergestein, Mischboden, Fels) sowie im Grundwasser einsetzen.

Die Lösung umfasst die unterirdische Erstellung zweier nebeneinander angeordneter Betonrohre mit einem Innendurchmesser von 1'200 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt von einer Start- in eine Zielbaugrube, wobei die mögliche Haltungslänge 500 m beträgt.

Der Mikrotunnel (Rohrvortrieb) ist ein bewährtes maschinelles Vortriebsverfahren. Dabei wird von einem Startschacht aus eine am Kopf von Rohrelementen angebrachte Tunnelbohrmaschine mittels einer Presse in Richtung eines Zielschachtes vorgetrieben. Im Startschacht werden laufend weitere Vortriebsrohre versetzt und vorgeschoben. Die Rohre bestehen aus Stahlbeton. Vortrieb und Einbau der definitiven Stollenverkleidung erfolgen somit in einem Arbeitsschritt.

2.4.2.6 Begehrbarer Mikrotunnel mit DN 2200 der Bauart «Vortrieb mit Tunnelbohrmaschine»

Normalprofil



Längenprofil (schematisch)

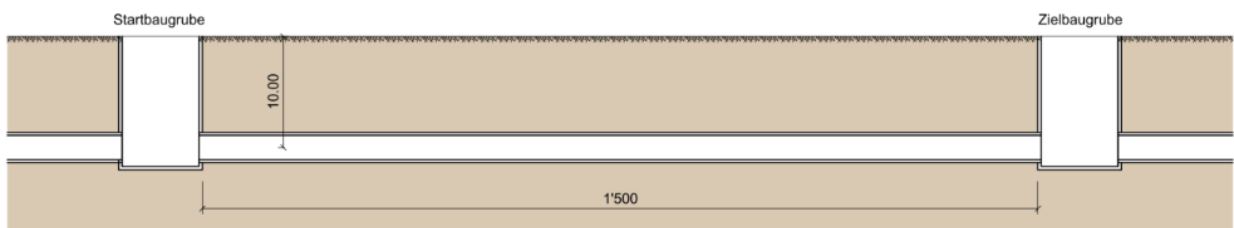


Abbildung 9: Normal- und Längenprofil des «Mikrotunnel, begehrbar»

Die Lösung der Bauart «Vortrieb mit Tunnelbohrmaschine» (mit begehrbarem Mikrotunnel) eignet sich für flaches oder mässig geneigtes Gelände. Sie zeichnet sich durch ihr breites geologisches Einsatzspektrum aus: Mit einem entsprechenden Bohrkopf lässt sie sich in sämtlichen Baugründen (Lockergestein, Mischboden, Fels) sowie im Grundwasser einsetzen.

Die Lösung umfasst den Vortrieb eines Stahlbetonrohrs mit einem Innendurchmesser von 2'200 mm, das Platz für zwei Leitungsstränge bietet. Der Vortrieb erfolgt von einem Start- in einen Zielschacht mit Haltungslängen bis 1'500 m.

Der Mikrotunnel (Rohrvortrieb) ist ein bewährtes maschinelles Vortriebsverfahren. Dabei wird von einem Startschacht eine am Kopf von Rohrelementen angebrachte Tunnelbohrmaschine mittels einer Presse in Richtung eines Zielschachtes vorgetrieben. Im Startschacht werden laufend weitere Vortriebsrohre versetzt und vorgeschoben. Die Rohre bestehen aus Stahlbeton. Vortrieb und Einbau der definitiven Stollenverkleidung erfolgen somit in einem Arbeitsschritt.

2.4.2.7 Gesprengter Stollen der Bauart «Sprengvortrieb»

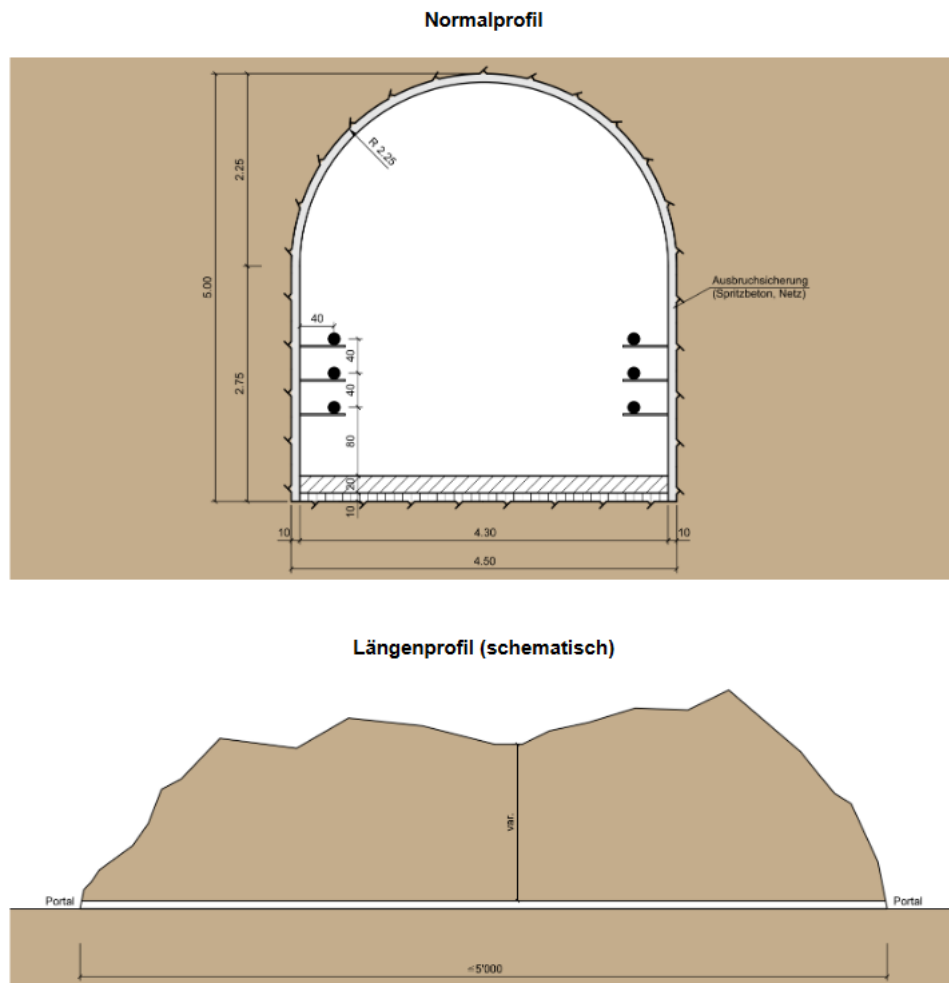


Abbildung 10: Normal- und Längenprofil des «Gesprengten Stollens»

Die Lösung der Bauart «Sprengvortrieb» (mit konventionell gesprengtem Stollen) kommt in steilem und gebirgigem Gelände sowie in festem Fels zur Anwendung. Sie ermöglicht es, einen grossen Gebirgszug ohne Zwischenzugang zu durchqueren.

Die Lösung umfasst den sprengtechnischen Vortrieb eines Tunnels mit einer Breite von 4,5 m und einer Höhe von 5,0 m. Diese Dimensionen sind ein Erfordernis des Baus für Tunnel bis etwa 5'000 m. Längere Tunnel verlangen noch grössere Querschnitte. Der erforderliche Tunnelquerschnitt übersteigt in der Regel den Platzbedarf für die Kabelanlage und die betrieblichen Transportmittel.

Der Stollenvortrieb erfolgt in einem fortlaufenden Zyklus von drei Arbeitsschritten: Zunächst wird in der Ortsbrust des Tunnels ein Netz von 2 bis 3 m langen Bohrungen erstellt. In der Folge werden diese Bohrungen mit Sprengstoff und Zündern beladen und die Zünder verkabelt sowie die Sprengung ausgelöst. Nach dem Absaugen von Staub und Verbrennungsgasen sowie der Zufuhr von Frischluft wird in einem letzten Schritt die Stollenleibung mittels Spritzbeton, Netzen und Ankern gesichert sowie das abgesprengte Felsmaterial abtransportiert.

2.4.2.8 Gefräster Stollen: Gripper TBM der Bauart «Mechanischer Vortrieb»

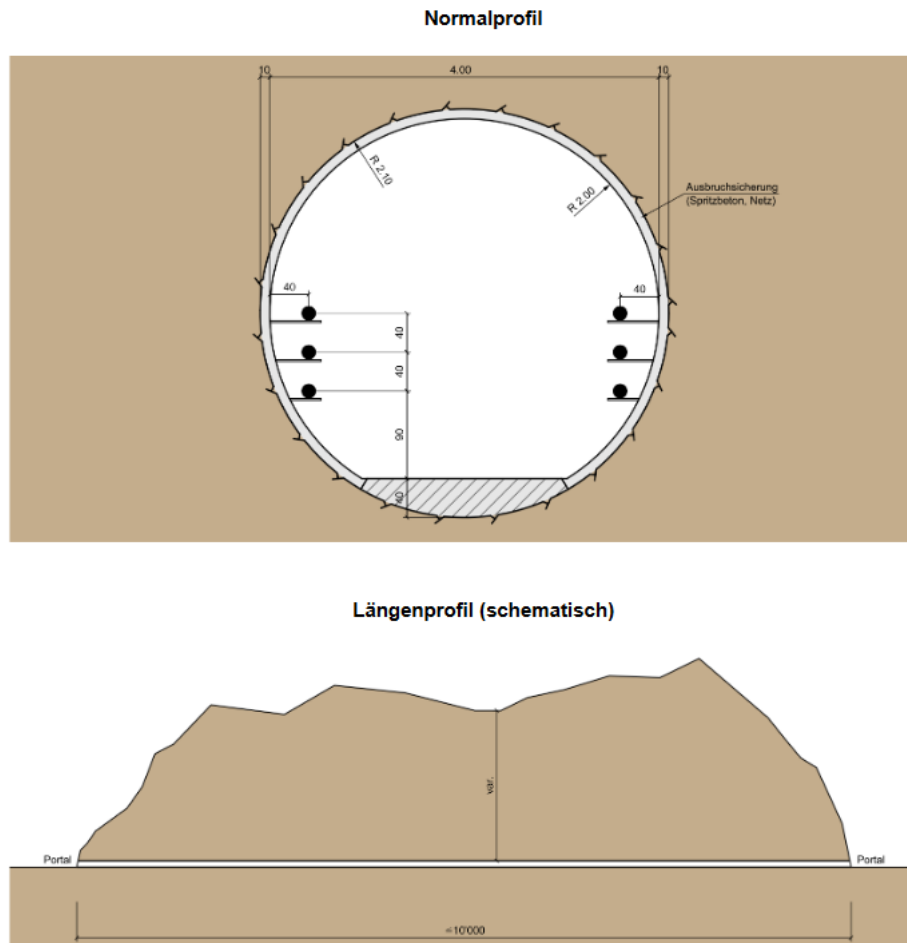


Abbildung 11: Normal- und Längenprofil des «Gefrästen Stollens – Gripper TBM»

Die Lösung der Bauart «Mechanischer Vortrieb» (mittels einer Gripper-Tunnelbohrmaschine gefräster Tunnel) gelangt in steilem und gebirgigem Gelände in hartem, standfestem Felsen zur Anwendung. Sie ermöglicht es, einen grossen Gebirgszug ohne Zwischenzugang zu durchqueren.

Die Lösung umfasst den Vortrieb eines kreisrunden Stollens mit einem Durchmesser von rund 4,0 m (je nach Verfügbarkeit der Maschine). Dieser Durchmesser gestattet Vortriebe bis etwa 10'000 m.

Das mechanisierte Verfahren ermöglicht eine hohe Vortriebsleistung. Die maschinelle Ausrüstung ist allerdings kostenintensiv, so dass das Verfahren erst ab einer gewissen Tunnellänge (typischerweise ab etwa 2 km) wirtschaftlich wird. Die baubedingt grossen Querschnittsabmessungen führen zu einem bedeutenden Anfall an Ausbruchsmaterial, das abtransportiert und deponiert werden muss.

2.4.2.9 Gefräster Stollen: Einfachschild TBM der Bauart «Mechanischer Vortrieb mit Stützung»

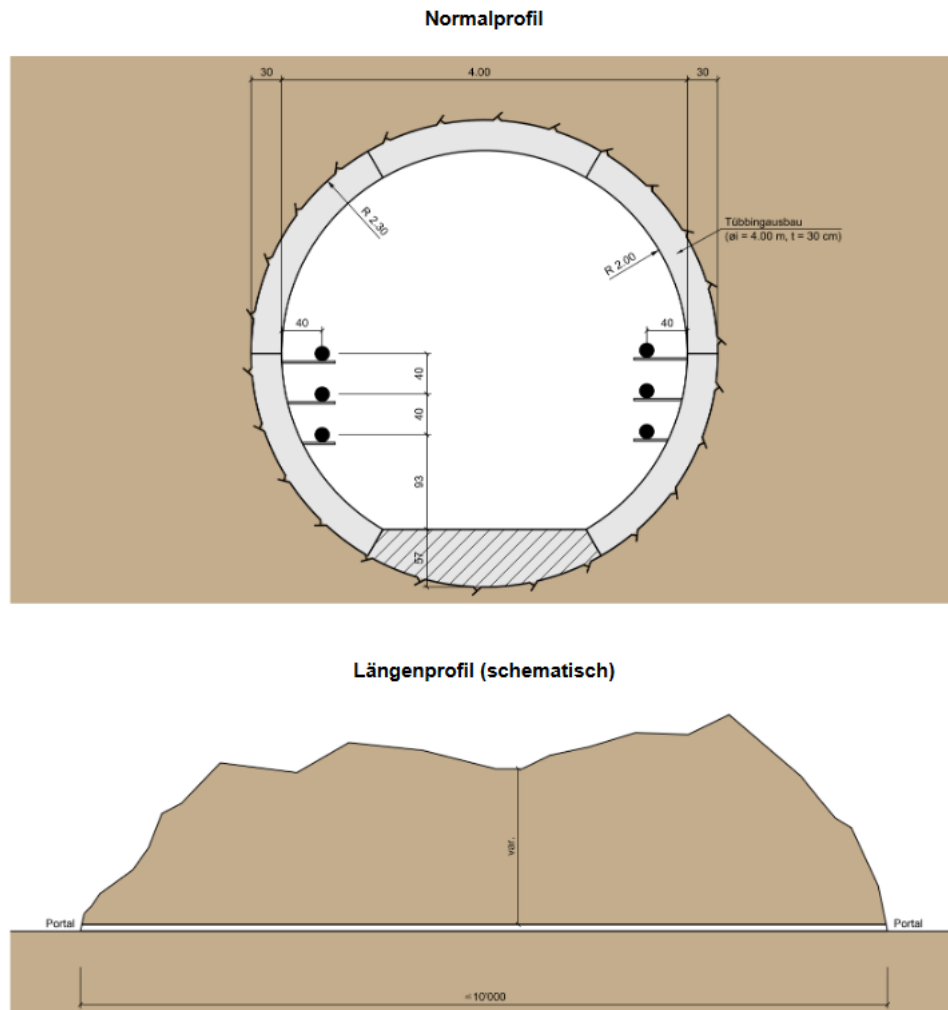


Abbildung 12: Normal- und Längenprofil des «Gefrästen Stollens – Einfachschild TBM»

Die Lösung der Bauart «Mechanischer Vortrieb mit Stützung» (mittels einer Einfachschild-Tunnelbohrmaschine gefräster Stollen) kommt in steilem und gebirgigem Gelände in weichem, nachbrüchigem Felsen zur Anwendung. Sie ermöglicht es, einen grossen Gebirgszug ohne Zwischenzugang zu durchqueren.

Die Lösung umfasst den Vortrieb eines kreisrunden Tunnels mit einem Innendurchmesser von rund 4,0 m. Dieser Durchmesser gestattet Vortriebe bis etwa 10'000 m. Die baubedingt grossen Querschnittsabmessungen führen zu einem bedeutenden Anfall an Ausbruchsmaterial, das abtransportiert und deponiert werden muss.

Eine Auskleidung mit Tübbing aus Stahlbeton gewährleistet einen sofort tragfähigen Ausbau. Das mechanisierte Verfahren gestattet eine hohe Vortriebsleistung. Es ist allerdings kostenintensiv.

2.4.2.10 Gefräster Stollen: TBM mit Bruststützung der Bauart «Mechanischer Vortrieb mit verstärkter Stützung»

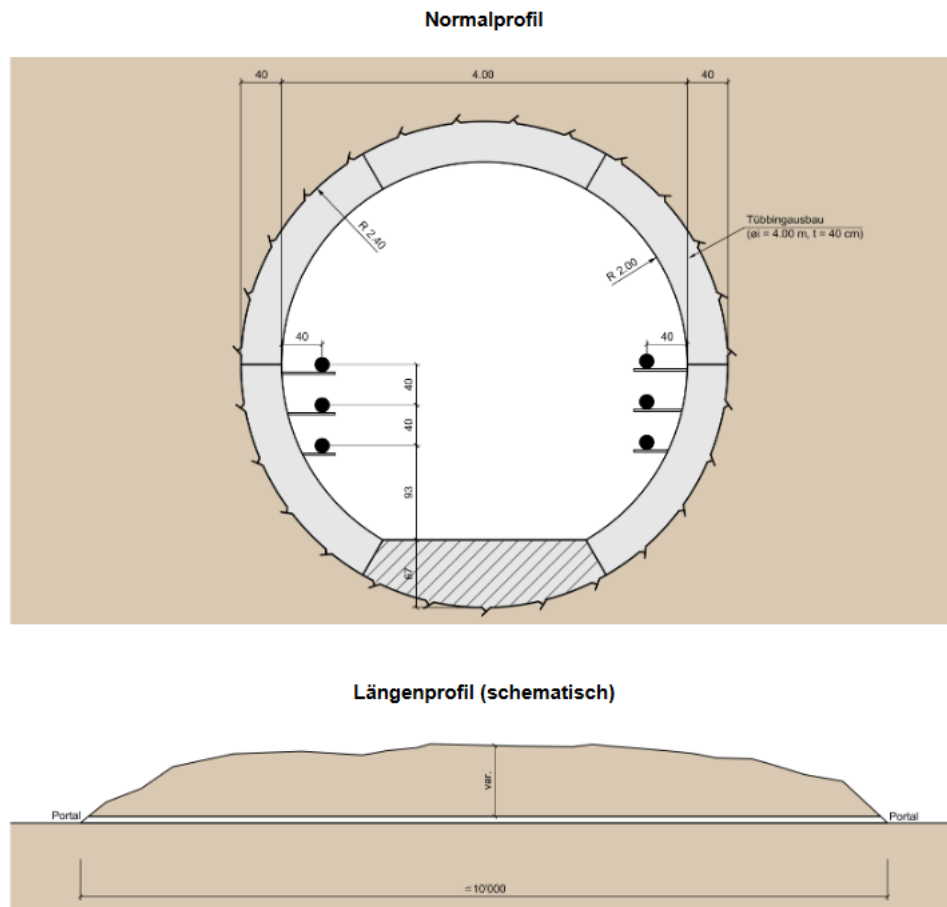


Abbildung 13: Normal- und Längenprofil des «Gefrästen Stollens – TBM mit Bruststützung»

Die Lösung der Bauart «Mechanischer Vortrieb mit verstärkter Stützung» (mittels einer Bohrmaschine mit Bruststützung gefräster Stollen) kommt in sämtlichen topographischen Verhältnissen zur Anwendung. Sie ist für den Einsatz im Lockergestein geeignet, wobei der Einsatz von Tübbing aus Stahlbeton einen sofort tragfähigen Ausbau gewährleistet. Die Lösung zeichnet sich durch die grosse erreichbare Vortriebslänge sowie die hohe Vortriebsleistung aus.

Die Lösung umfasst den Vortrieb eines kreisrunden Tunnels mit einem Innendurchmesser von rund 4,0 m. Dieser Durchmesser gestattet Vortriebe bis etwa 10'000 m. Das Stollenprofil reicht für die Unterbringung zweier Kabelstränge in jedem Fall aus und ermöglicht eine vorzügliche Wärmeabfuhr.

Im Verlaufe des Verfahrens baut ein rotierender Bohrkopf den Baugrund ab. Der Bohrkopf ist je nach geologischen Verhältnissen mit unterschiedlichen Abbauwerkzeugen wie Rollenmeisseln oder Schälmeiseln bestückt. Der Ausbau besteht im standfesten Felsen aus einer einfachen Spritzbetonsicherung; bei problematischen geologischen Verhältnissen erfolgt der Ausbau mittels geschlossenem Tübbingring (bzw. vorgefertigten Betonelementen).

2.4.3 Erdverkabelung im Grabenbau

2.4.3.1 Grabenfräse mit DN 900 der Bauart «Pipe Express»

Normalprofil

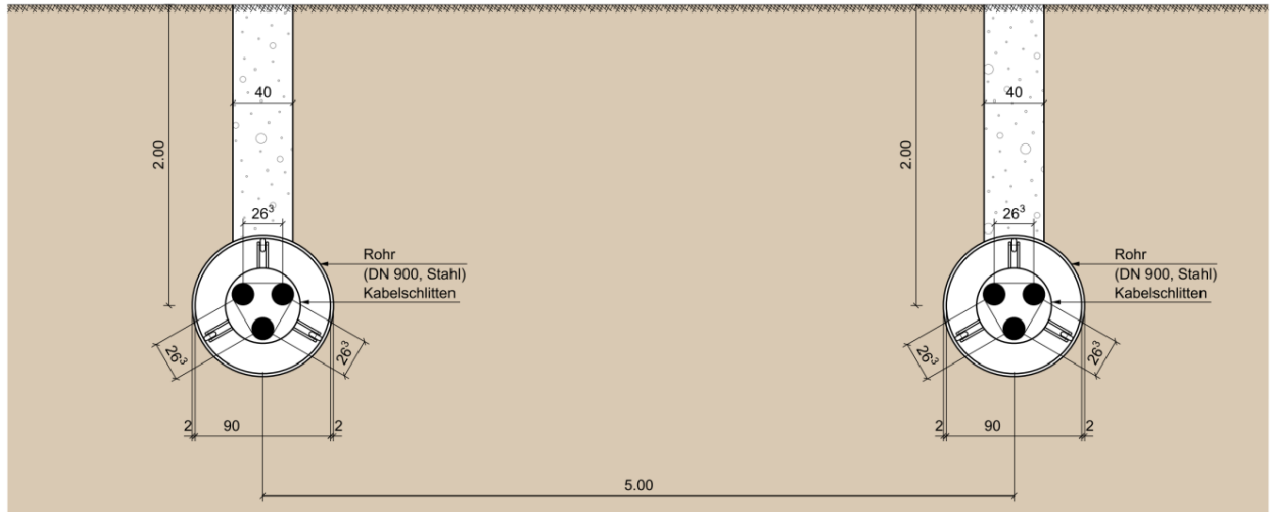


Abbildung 14: Normalprofil der «Grabenfräse – Pipe Express»

Die Lösung der Bauart «Pipe Express» (Grabenfräse) eignet sich für ebenes oder gleichmässig geneigtes Gelände. Sie ermöglicht eine enorme Vortriebsleistung und kommt beim Vortrieb im Lockergestein sowie gleichermassen in trockenen Böden wie im Grundwasser zum Einsatz.

Die Lösung umfasst die unterirdische Erstellung zweier nebeneinander angeordneter Kunststoffrohre mit einem Innendurchmesser von 900 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt, geführt durch eine an der Terrainoberfläche fahrende Grabenfräse, jeweils von einer Start- in eine Zielbaugrube, wobei die mögliche Haltungsänge 1'000 m beträgt.

Pipe Express ist ein von der Firma Herrenknecht entwickeltes Verfahren, um die Pipeline schnell und wirtschaftlich über grosse Strecken zu verlegen. Eine kleine Tunnelbohrmaschine löst in halboffener Bauweise den Boden und fördert ihn über eine verbundene Grabenfräse zu Tage. Gleichzeitig werden Stahlrohre eingebaut. Diese sind mit der Tunnelbohrmaschine verbunden und werden von der Startbaugrube her mittels einer Presse (Pipe-Thruster) zur Vortriebsunterstützung vorgeschoben.

2.4.3.2 Kabelrohrblock einfach (1 Rohrblock) mit Bauart «Offene Bauweise/Grabenbau»

Normalprofil

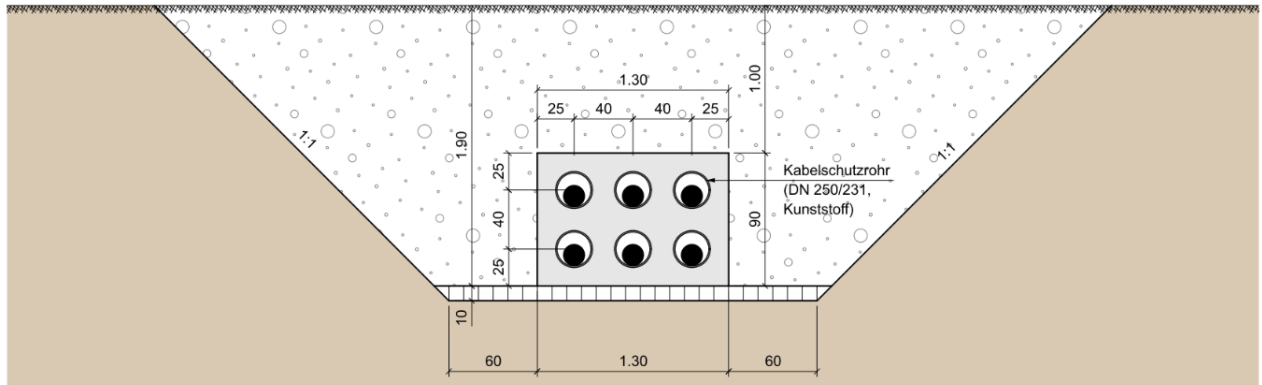


Abbildung 15: Normalprofil des «Kabelrohrblocks – 1 Rohrblock»

Die Lösung der Bauart «Offene Bauweise/Grabenbau» (Rohrblock) eignet sich für flaches oder gleichmässig geneigtes Gelände sowie in sämtlichen Lockergesteinsböden und weichem Felsen.

Die Lösung beinhaltet einen Grabenaushub und benötigt einen freien Zugang von der Oberfläche aus. Für Grabenaushub, Zwischendepots von Aushubmaterial sowie Baupisten ist ein Bautrassee mit einer Breite von ca. 20 m erforderlich. Die offene Bauweise muss dem bebauten Gelände ausweichen.

Der Rohrblock und der begehbare Leitungskanal sind klassische Lösungen für Kabeltrassees. Sie erfordern den Aushub eines Grabens über die gesamte Länge des Leitungsabschnitts. Der Rohrblock wird etappenweise aus Magerbeton erstellt. Zum Abschluss wird der Graben mit dem zwischengelagerten Aushubmaterial verfüllt und die Terrainoberfläche rekultiviert.

2.4.3.3 Kabelrohrblock zweifach (2 Rohrblöcke) mit Bauart «Offene Bauweise/Grabenbau»

Normalprofil

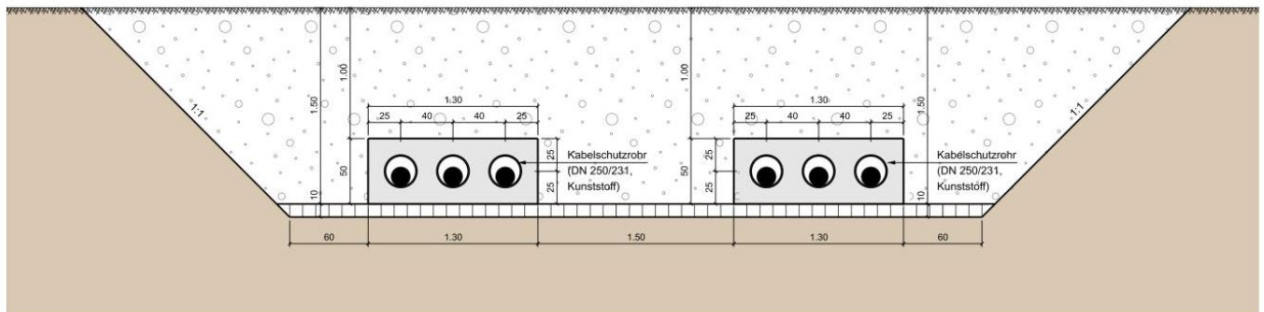


Abbildung 16: Normalprofil des «Kabelrohrblocks – 2 Rohrblöcke»

Die Lösung der Bauart «Offene Bauweise/Grabenbau» (Rohrblock) eignet sich für flaches oder gleichmässig geneigtes Gelände sowie in sämtlichen Lockergesteinsböden und weichem Felsen.

Der in diesem Bericht berücksichtigte Kabelrohrblock für zwei Stränge hat eine Breite von 1,3 m und eine Höhe von 0,9 m. Die einbetonierten Kabelschutzrohre müssen möglichst klein dimensioniert sein, da ein darin enthaltenes Luftpolster die Wärmeabgabe behindert. Der Graben, der zur Erstellung des zweisträngigen Rohrblocks erforderlich ist, hat in der Sohle eine Breite von 2,5 m und eine Tiefe von 2,0 m. Bei einer Böschungsneigung von 1:1 ergibt sich eine Grabenbreite auf Terrainniveau von 6,5 m.

Der Rohrblock und der begehbare Leitungskanal sind die klassischen Lösungen für Kabeltrassees. Sie erfordern den Aushub eines Grabens über die gesamte Länge des Leitungsabschnitts. Der Rohrblock wird etappenweise aus Magerbeton erstellt. Zum Abschluss wird der Graben mit dem zwischengelagerten Aushubmaterial verfüllt und die Terrainoberfläche rekultiviert.

2.4.3.4 Leitungskanal mit Bauart «Offene Bauweise/Grabenbau»

Normalprofil

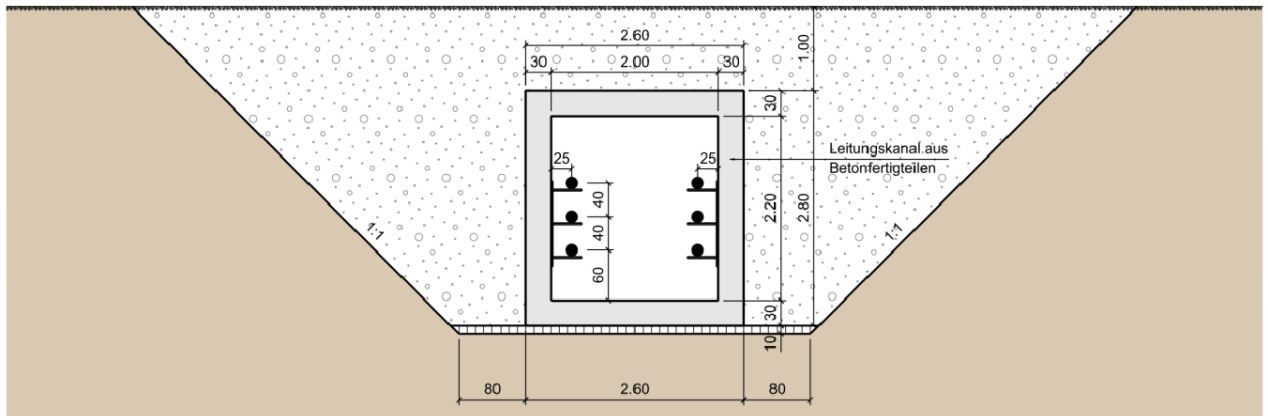


Abbildung 17: Normalprofil des «Leitungskanals»

Die Lösung der Bauart «Offene Bauweise/Grabenbau» (begehbare Leitungskanal) eignet sich für flaches oder gleichmässig geneigtes Gelände sowie in sämtlichen Lockergesteinsböden und in weichem Felsen oberhalb des Grundwasserspiegels. Sie nimmt während der Bauzeit temporär viel Land in Anspruch. Die Breite des Bautrassees beträgt bis ca. 35 m pro Leitungskanal.

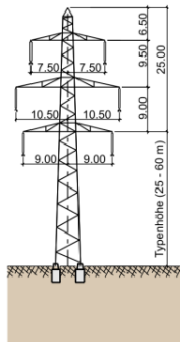
Das Verfahren sieht vor, den Leitungskanal im offenen Graben aus vorgefertigten Betonelementen zu erstellen. Alternativ besteht die Möglichkeit, Ortbeton mittels Gleitschalung zu nutzen (diese Alternative wird in diesem Bericht nicht vertieft untersucht). Bei einer angenommenen Aussenabmessung von 2,6 x 2,8 m bietet der Kanal Platz für zwei Leitungsstränge. Die Überdeckung des Kanals beträgt ca. 1,0 m.

Der Rohrblock und der begehbare Leitungskanal sind die klassischen Lösungen für Kabeltrassees. Sie erfordern den Aushub eines Grabens über die gesamte Länge des Leitungsabschnitts, wobei die Abmessungen des Grabens für den Leitungskanal bedeutend grösser sind als beim Rohrblock. Der Leitungskanal lässt sich entweder durch vorgefertigte Elemente oder durch Ortbeton mittels einer Gleitschalung (im ebenen Gelände) erstellen. Zum Abschluss wird der Graben mit dem zwischengelagerten Aushubmaterial verfüllt und die Terrainoberfläche rekultiviert.

2.4.4 Freileitungen

- Freileitung in ebenem Gelände
- Freileitung in steilem Gebirge
- Freileitungen Waldüberspannungen

Normalprofil



Längenprofil

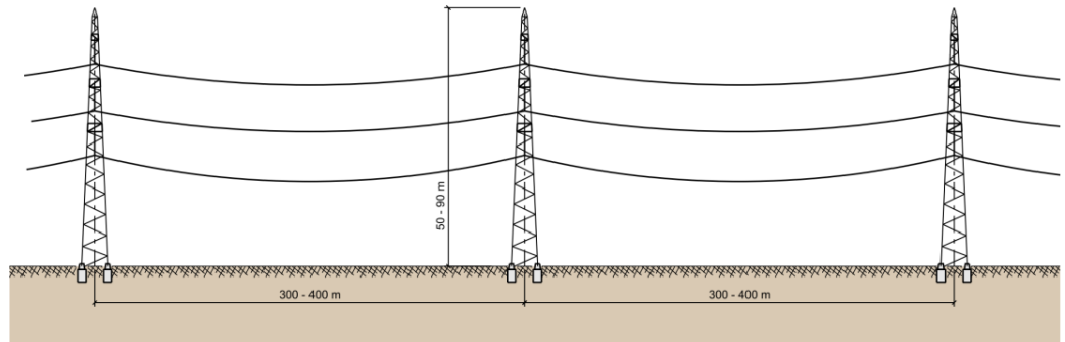


Abbildung 18: Normal- und Längenprofil der Freileitungen, schematisch für ebenes Gelände, steiles Gebirge und Waldüberspannung

Die Freileitung eignet sich für fast jedes Gelände, und ihre Fundierung ist bei nahezu jeglicher Geologie möglich. Dabei stellt sich bei der Fundierung vor allem die Frage des gerechtfertigten Aufwands. Den grössten Einfluss auf die Linienführung einer Freileitung hat der Raumwiderstand (Siedlungen, Wald, Schutzzonen). Die Korridorverhältnisse haben hingegen vor allem einen Einfluss auf die baulichen Ausbildungen und auf den Bauvorgang.

Die Bauerschliessung, die Vorbereitung des Trassees und die Entschädigungen spielen beim Bau einer Freileitung eine besondere Rolle, zumal die entsprechenden Aufwendungen einen Drittel bis die Hälfte der Anlagekosten ausmachen. Die Masten werden auf herkömmliche Weise als einzelne Schüsse vormontiert und miteinander verschraubt. Ein Mobilkran hebt die einzelnen Mastbauteile in die entsprechende Höhe und Position. Der Seilzug erfolgt über Winden vom Boden aus. Das Vorseil wird in der Regel eingeflogen.

2.4.5 Übergangsbauwerke

Die Ökobilanz berücksichtigt die folgenden Übergangsbauwerke:

- Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase
- Abspannportal ohne Kabelkeller: 1 Kabel pro Phase
- Übertragungsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast

Beim Bau von Übergangsbauwerken existieren zahlreiche Varianten. Dieser Bericht bezieht sich auf die drei Bauvarianten, welche die grössten Unterschiede hinsichtlich der Umweltauswirkungen aufweisen.

Übergangsbauwerke schliessen Freileitungen und Kabelleitungen zusammen. Ihre Hauptelemente sind die Abspanneinrichtung für die Seile der Freileitung in Form eines Portals oder eines Masts, die Kabelendverschlüsse, die Überspannungsableiter zum Schutze der Kabelisolation, die räumlichen Vorkehrungen zur Einschlaufung des Kabels und zur Unterbringung einer Längenreserve sowie die für den Betrieb nötige Sekundärtechnik.

2.4.6 Datensatz zur Übertragung elektrischer Energie «Höchstspannungsnetz (380 kV)» in der Schweiz

Basierend auf den Ergebnissen dieses Berichts, ist es das Ziel, einen allgemeingültigen Datensatz zur elektrischen Energieübertragung «Höchstspannungsnetz (380 kV)» in der Schweiz zu erstellen. Der Datensatz vereint die in den einzelnen Datensätzen ausgewiesene Gewichtung der unterschiedlichen elektrischen Energieübertragungstechnologien und beruht auf dem gewichteten Mittelwert der drei Bauverfahren «Untertagebau, Grabenbau und Freileitungen inklusive Anteil Übertragungsbauwerke».

2.5 Untersuchungsrahmen

2.5.1 Wirkungsabschätzungsmethoden

Im Bericht sind die Ökobilanzen nach den drei folgenden Wirkungsabschätzungen bzw. Indikatoren ausgewertet:

Kumulierter Energieaufwand (KEA): Der Indikator quantifiziert den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger, von Holz aus Kahlschlag in Primärwäldern sowie von erneuerbaren Energieträgern. Der KEA ist ein im Baubereich etablierter Kennwert, wobei vor allem die beiden Indikatoren «KEA nicht erneuerbar» und «KEA erneuerbar» in den «Ökobilanzdaten im Baubereich» [5] verwendet werden. Das Ergebnis der Ökobilanz wird hierbei als MJ oil-eq oder kWh oil-eq («equivalents» = MJ / kWh Öl-Äquivalente) ausgewiesen. Das Rohöl bildet beim KEA die Referenzsubstanz und hat die Grundeinheit von MJ oil-eq pro MJ [7]. Diese Studie weist die Wirkungsabschätzung getrennt für nicht erneuerbare und erneuerbare Energie aus.

Treibhausgasemissionen (IPCC 2021 GWP 100a): Der Indikator beschreibt das relative «radiative forcing¹», das durch die Emission von Treibhausgasen ausgelöst wird, und zwar integriert über einen Zeitraum von 100 Jahren. Er wird in Bezug auf die identische Emissionswirkung der Leitsubstanz CO₂ ausgedrückt. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 6. Sachstandberichts des IPCC (2021) quantifiziert [8] [9].

Methode der ökologischen Knappheit – Umweltbelastungspunkte (UBP 2021): Der Indikator der Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP 2021) quantifiziert die Umweltauswirkungen, die durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen sowie von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung und durch Verkehrslärm entstehen. Die Beurteilung mittels den Ökofaktoren Schweiz 2021 zeigt in Umweltbelastungspunkten (UBP 2021) ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen und nimmt auf die schweizerischen Umweltziele Bezug [10]. Sie entspricht den Anforderungen einer Beurteilung nach dem «True and fair view»-Prinzip. Der Indikator der UBP 2021 hat den Vorteil, die Umweltauswirkungen bezüglich der Schweizer Umweltziele gewichtet zu erfassen. In der Schweiz gilt die UBP-Methode als Standard bei Ökobilanzen [11], [12], [13]. Sie ist im Auftrag des BAFU erarbeitet worden und ist besonders hilfreich bei der Schaffung von Entscheidungsgrundlagen.

¹ Der Strahlungsantrieb (engl. «radiative forcing» bzw. «climate forcing») misst die Veränderung der Energiebilanz der Erde, die durch eine veränderte Wirkung der Weltraumstrahlung bedingt ist. Er wird in W/m² gemessen und ist seitens des IPCC eingeführt worden, um im Rahmen der Klimastudien den Einfluss äusserer Einflusskräfte auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde zu beschreiben. [Definition gemäss Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsantrieb>]

2.5.2 Zeitlicher Geltungsbereich

Die vorliegende Ökobilanz bildet die aktuelle Situation der Jahre 2022/2023 ab. Bei der Herstellung, der Materialbereitstellung, den Transporten, den Baumaschineneinsätzen sowie bei den Entsorgungsprozessen geht sie vom aktuellen Stand der Technik aus.

Der Betrachtungszeitraum und die vorgesehene Nutzungsdauer beträgt für die Bauwerke der Erdverkabelung sowie der Freileitungen 80 Jahre. Gemäss Swissgrid ist in diesen 80 Jahren bei einer Freileitung kein Ersatz des Leiterseils notwendig, doch muss einmal die Korrosionsschicht der Leitungsmasten erneuert werden.

Im Gegensatz dazu ist bei der Erdverkabelung ein Kabelersatz nach 40 Jahren erforderlich. Ansonsten sind bei der Erdverkabelung keine wesentlichen Wartungsarbeiten innerhalb der Nutzungsdauer zu erwarten. Die Angaben zur Lebensdauer der Kabel ist im Rahmen dieses Berichts durch Befragung von Kabelherstellern verifiziert worden. Die Herstellergarantie für die Kabel der Erdverkabelung und die Leiterseile der Freileitung ist im digitalen Anhang Ordner «Hintergrunddaten > Herstellergarantie» zu finden.

Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 veranschaulichen die Zeitstrahlen für die jeweiligen Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Sie listen die jeweils verbauten Komponenten und deren Lebensdauer auf und dokumentieren, nach wie vielen Jahren jeweils ein Austausch erforderlich ist. Je nach Bauverfahren unterscheiden sich die Austauschfrequenzen während der Nutzungsdauer von 80 Jahren. Die Zeitstrahlen sind von Swissgrid erstellt und in die Ökobilanz übernommen worden. Die Austauschfrequenz stimmt mit den Angaben im Fragebogen überein. Mehr zum Fragebogen ist Seite 21, Kapitel «2.3 Fragebogen» zu entnehmen.

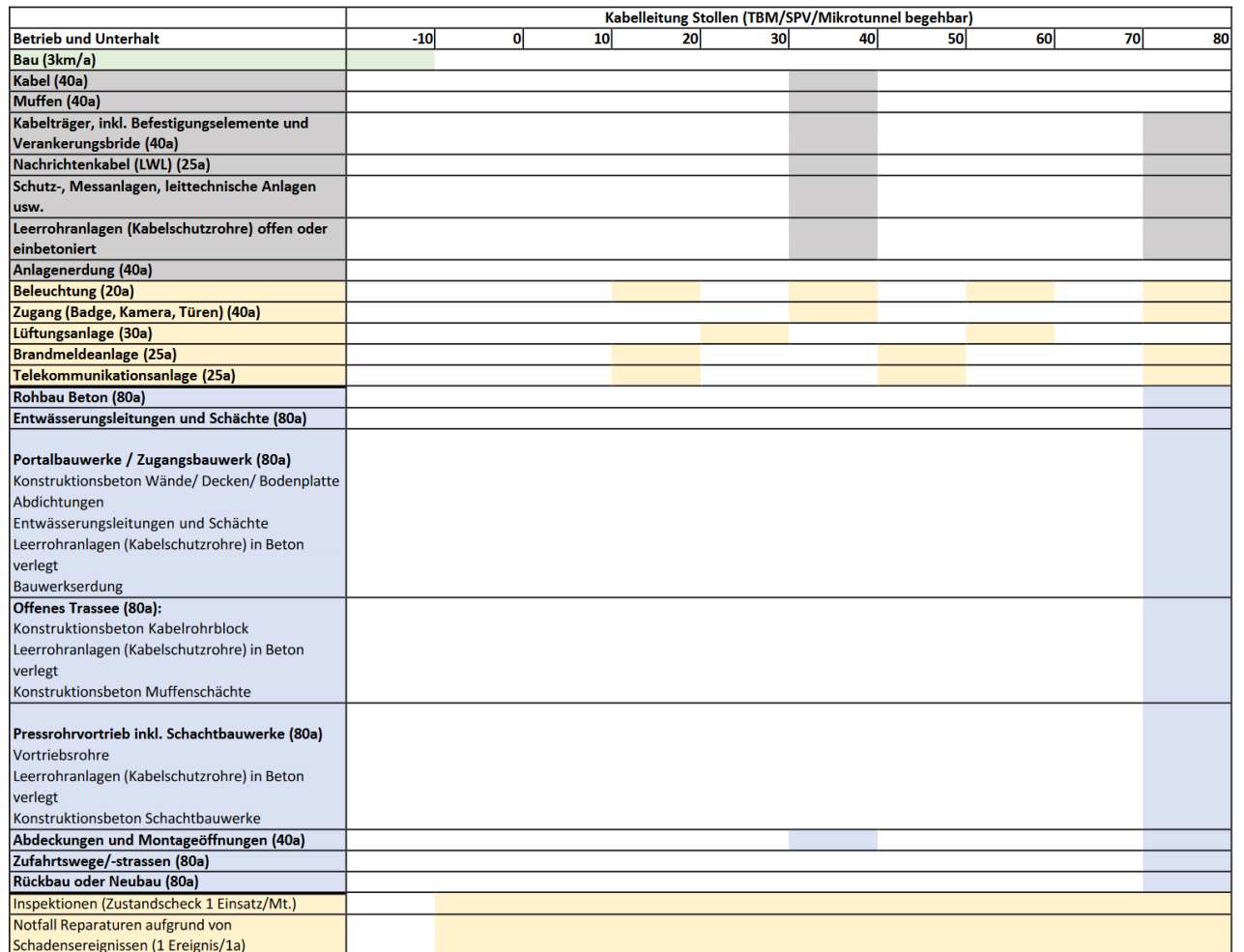


Abbildung 19: Zeitstrahl für die Kabelleitung Stollen (TBM/SPV/Mikrotunnel, begehbar) während 80 Jahren

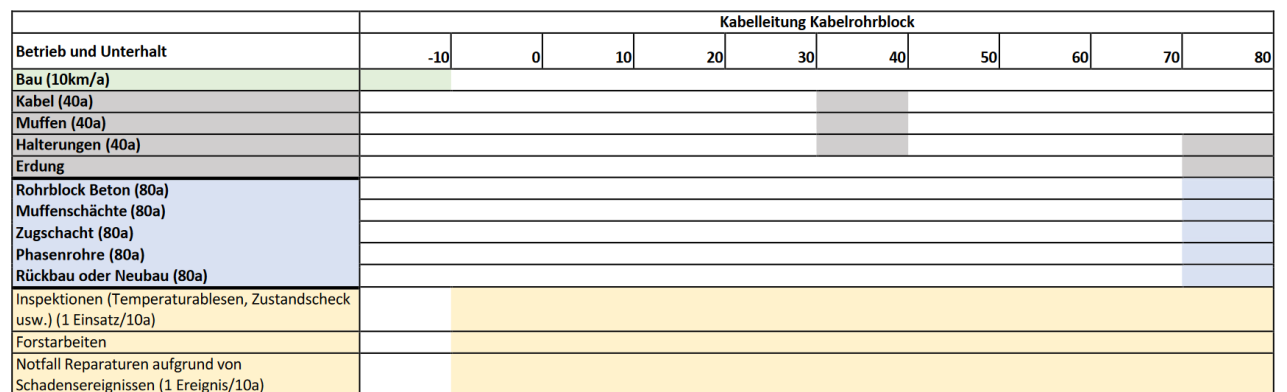


Abbildung 20: Zeitstrahl der Kabelleitung Kabelrohrblock während 80 Jahren

	Freileitung [80a Nutzungsdauer]									
Betrieb und Unterhalt	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Bau (10km/a)										
Korrosionsschutz (30a)										
Ersatz Isolatorenkette (60a)										
Ersatz Leitersseil (80a)										
Ersatz Erdseil (80a)										
Ersatz Erdseil mit OPGW (25a)										
Tragwerk (80a)										
Fundament (80a)										
Mikropfähle (60a)										
Erdung										
Rückbau oder Neubau (80a)										
Inspektionen und ANV-Einsatz (laufend 30 PW h a/km)										
Niederhaltung (laufend Forstarbeiten)										
Notfall Reparaturen aufgrund von Schadensereignissen (1 Ereignis/10a)										

Abbildung 21: Zeitstrahl der Freileitungen während 80 Jahren

2.5.3 Geographischer Geltungsbereich

Der Bericht berücksichtigt einzig die Hochspannungsnetze (Spannungsebene 220-380 kV) sowie die Leitungsabschnitte einer Erdverkabelung bzw. Freileitung in der Schweiz von mindestens 1 km Länge. Swissgrid-interne technische Berichte haben anhand der technischen Einsatzmöglichkeiten für die einzelnen Übertragungstechnologien elektrischer Energie geeignete Standorte evaluiert. Diese Berichte dienen als Basis für die Ökobilanz.

2.5.4 Systemumfang und Gliederung

Gemäss EN 15643-5 [3] (siehe dazu Abbildung 22) umfasst das analysierte System die Herstellungsphase der Baustoffe (Module A1 bis A3), die Errichtungsphase des Bauwerks (Module A4 und A5), einen Teil der Nutzungsphase des Bauwerks (Module B1 bis B4, B6, B8) sowie die Entsorgungsphase (Module C1 bis C4). Der Bericht berücksichtigt keine Vorteile und Belastungen (Modul D aus Abbildung 22) ausserhalb der Systemgrenzen, da die Schweizer Bilanzierungsregeln gemäss KBOB/ecobau [14] dies nicht zulassen.

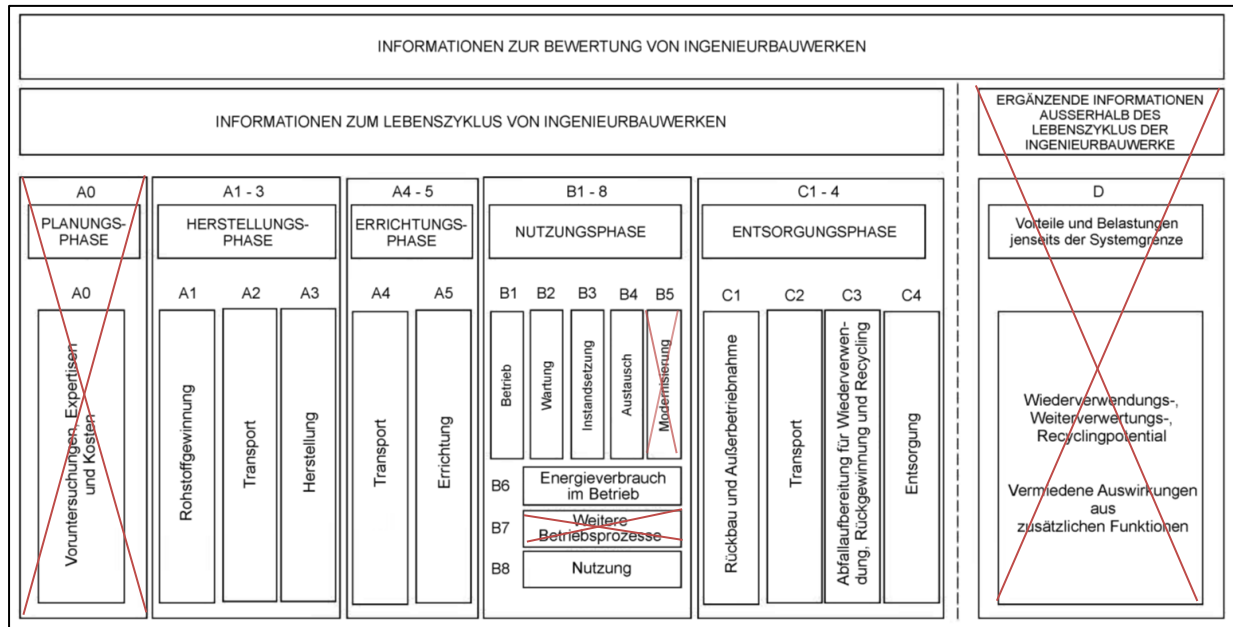


Abbildung 22: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [3].

Im Rahmen der **Herstellungsphase** betrachtet der Bericht die Rohstoffgewinnung, den Transport und die Herstellung der quantitativ wesentlichen verwendeten Baumaterialien bzw. Bauelemente.

Im Rahmen der **Errichtungsphase** betrachtet der Bericht den Transport der Baumaterialien bis zur Baustelle und die einzelnen Bauprozesse. Der Schwerpunkt der Analyse liegt bei den Erdverlegungsmassnahmen (Bohrungen, Aushub, Kabelschutzrohrverlegung, Kabelverlegungen, Sprengungen, Tunnelsicherungen usw.) und der Installierung der Freileitungsmasten (Aushub, Giessen des Fundaments, Aufrichtung der Freileitungsmasten, Installierung der Leiterseile usw.). Ebenfalls berücksichtigt der Bericht die Maschinenstunden für die Wasserhaltung (sofern erforderlich) sowie die Transporte innerhalb der Baustelle (Radlader, Dumper).

Im Rahmen der **Nutzungsphase** betrachtet der Bericht diejenigen Auswirkungen, die sich aus dem Betrieb (Modul B1), der Wartung (Modul B2), der Instandsetzung (Modul B3), dem Austausch (Modul B4), dem Energieverbrauch im Betrieb (Modul B6) und der Nutzung (Modul B8) der Erdverkabelung und Freileitung ergeben. Der Begriff Betrieb meint somit alle Material- und Energieaufwände, die erforderlich sind, um die Anlage zu betreiben. Unter Energieverbrauch im Betrieb fällt beispielsweise der Energieverbrauch der mechanischen Lüftung zur Kühlung der Erdverkabelung. Die Wartung umfasst die Wartungsarbeiten und Reparaturen (z.B. die Erneuerung des Schutzanstrichs, das Nachfüllen des Transformatorenöls, die Reinigungsarbeiten der Schaltzentrale usw.). Die Instandsetzung beinhaltet alle wesentlichen Bauvorhaben während der Nutzung, die einen Eingriff verursachen (z.B. Reparaturarbeiten am Mastfundament, bauliche Massnahmen wie Aushubarbeiten usw.). Im Rahmen des Austausches werden ganze Anlagenteile ersetzt (z.B. Ersatz eines ganzen Freileitungsmasts oder Kabels nach Ende der Lebensdauer, Austausch von Isolatoren usw.). Unter die Nutzung fallen die Übertragungsverluste und mögliche Gasemissionen der Freileitung (Lachgasemissionen und Ozonbildung durch die Koronaentladungen). Hingegen vernachlässigt der Bericht die Modernisierung sowie die weiteren Betriebsprozesse der Erdverkabelung und Freileitung.

Im Rahmen der **Entsorgungsphase** werden die Erdverkabelung und Freileitung rückgebaut und die dabei anfallenden Abfälle entsorgt (Deponie Typ A oder B, je nach Belastungssituation, sowie nach

Abfallfraktionen getrenntes Recycling oder thermische Verwertung). Der Bericht betrachtet alle damit verbundenen Prozesse (inklusive der Transporte) unter Annahme des aktuellen Stands der Technik. Gemäss EN 15643-5 [3] sind die Prozessketten der Entsorgungsphase so lange zu berücksichtigen, bis das rückgebaute Material den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht. Der vorliegende Bericht verwendet den Ökobilanzdatenbestand UVEK 2022 [5] mit den entsprechenden methodischen Vorgaben. Demnach endet der Lebenszyklus dann, wenn ein Produkt den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht hat. Diese methodische Vorgabe wird als «Recycled content»-Modell bezeichnet [15] [16]. Sie trennt systematisch zwei Lebenszyklen: konkret den ersten Lebenszyklus eines Produktes (z.B. Stahl aus der Verhüttung von Eisenerz) vom zweiten Lebenszyklus (z.B. die Nutzung von Recyclingstahl, der aus dem im ersten Lebenszyklus anfallenden Eisenschrott hergestellt wird). Die Trennung («Cut-off») erfolgt, wenn beispielsweise das Eisen am Ende seiner ersten Gebrauchsphase der Recyclingsammlung zugeführt wird. Dann verliert der Schrott seine «Abfalleigenschaft» und wird als Sekundärrohstoff zum Ausgangspunkt des nächsten Lebenszyklus. Der Bericht erteilt bzw. berücksichtigt keine ökologischen Gutschriften.

2.6 Funktionelle Einheit

Die Definition der funktionellen Einheit lautet: die Übertragung von 1 GWh elektrische Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV oder 220 kV über 1 km.

Mathematisch lässt sich die funktionelle Einheit wie folgt ausdrücken:

$$\text{Funktionelle Einheit} = \text{Uebertragene elektrische Energie} * \text{Strecke} = 1 \text{ GWh} * \text{km}$$

Die funktionelle Einheit der Übergangsbauwerke unterscheidet sich von derjenigen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Der Bericht untersucht einzig Übergangsbauwerke, die für die Höchstspannungsebene 380 kV vorgesehen sind. Die funktionelle Einheit der Übergangsbauwerke für die Höchstspannungsebene 380 kV ist die Stückzahl (ein Übergangsbauwerk).

2.7 Variantenstudium

Der Bericht untersucht jeweils zwei Varianten: eine Variante 1 (für elektrische Übertragungstechnologien auf der Höchstspannungsebene 380 kV) sowie eine Variante 2 (für elektrische Übertragungstechnologien auf der Höchstspannungsebene 220 kV). Dabei vergleicht er den Einfluss der unterschiedlichen Spannungsebenen und prüft die Korrektheit der Ergebnisse.

Bei Leitungen, die mit 220 kV betrieben werden, wird eine geringerer Leiterquerschnitt für die Leiterseile verwendet als bei einer Leitung, die mit 380 kV betrieben wird, siehe Tabelle 1. Zudem verringert sich bei der Erdverkabelung und bei der Freileitung sich die übertragene elektrische Energie auf circa die Hälfte. Bei Verringerung der Spannung von 380 kV auf 220 kV nehmen die Übertragungsverluste bei der Erdverkabelung ab, bei den Freileitungen hingegen zu (Betrachtung der Verluste in Relation zur übertragenen elektrischen Energie).

Tabelle 1: Wesentliche Parameter des Variantenstudiums

Parameter	Höchstspannungsebene 380 kV (Variante 1)	Höchstspannungsebene 220 kV (Variante 2)
Querschnitt Kabel [mm ²]	2 Systeme mit je 3x1x2500mm ² Cu	2 Systeme mit je 3x1x2500mm ² Cu
Querschnitt Leiterseil [mm ²]	2 Systeme mit je 3x2x1000mm ² Ad	2 Systeme mit je 3x2x600mm ² Ad
Übertragene elektrische Energie [GWh/a]	5'189.09	3'004.21
Übertragungsverluste Erdverkabelung einschl. Blindleistungskompensation [MWh/km/a]	386.4	200.15
Übertragungsverluste Freileitungen [MWh/km/a]	197.87	306.04

Dieser Bericht berücksichtigt bei den Übergangsbauwerken keine Varianten. Er stellt im Falle der Übergangsbauwerke einzig Modellberechnungen für die Höchstspannungsebene 380 kV an.

2.8 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Validität der Ergebnisse, die aus der Variantenanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf den Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV resultieren. Den Ausgangspunkt bilden drei zu variierende Parameter. Anhand dieser Parameter nimmt der Bericht zwei unterschiedliche Berechnungen vor und vergleicht die Umweltauswirkungen der beiden Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Die Sensitivitätsanalyse beruht auf folgenden variierten Parametern:

Parameter 1 – Lebensdauer der Kabel: Es wird ein Szenario mit unterschiedlichen Lebensdauern der Kabel – einerseits von 60 Jahren, andererseits von 80 Jahren – berechnet.

Parameter 2 – Strommix: Das Basisszenario beruht auf der Annahme, dass die Übertragungsverluste mit dem Schweizer Verbraucherstrommix kompensiert werden. In der Folge werden jeweils ein Szenario mit dem europäischen ENTSO-E-Mix sowie ein Szenario mit einem Schweizer Mix von Stromprodukten aus erneuerbaren Energien errechnet. Dies gewährleistet, dass die Analyse die ganze Spannbreite der Möglichkeiten abbildet: vom erneuerbaren Strommix mit geringen Umweltauswirkungen bis hin zu einem Mix mit einem hohen Anteil an nicht erneuerbaren Energien.

Tabelle 2: Umweltkennwerte der Strommixe, Sensitivitätsanalyse Parameter 2: Strommix

Strommix	Umweltkennwerte			
	[kg CO ₂ -eq/kWh]	[UBP/kWh]	[kWh oil-eq/kWh, nicht erneuerbar]	[kWh oil-eq/kWh, erneuerbar]
Schweizer Verbraucherstrommix	0.125	513.00	0.56	2.08
ENTSO-E-Mix	0.52	935.00	2.87	0.28
Erneuerbarer Schweizer Strommix	0.002	7.91	0.30	0.01

Parameter 3 – Spannweite der Freileitungen: Die Spannweiten der Freileitungen werden wie folgt variiert: Es werden unterschiedliche Szenarien mit einer Spannweite von 600 m sowie 400 m berechnet und verglichen. Je nach Szenario verändert sich der Materialaufwand der Leiterseile, der Masten und der Fundamente. Je länger die Spannweiten der Freileitungsmasten sind, desto mehr Materialien müssen für den Bau eines Mastes aufgewendet werden. Dabei beruhen die Berechnungen des Materialaufwands jeweils auf der Grundlage der Freileitung mit Einzelfundament, da die Hauptaussagen aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse auf die anderen zwei Fundamenttypen übertragbar sind.

Tabelle 3: Materialien für eine Freileitung mit Einzelfundament, ebenes Gelände; Sensitivitätsanalyse Parameter 3: Spannweite der Freileitungen

Materialien für eine Freileitung mit Einzelfundament, ebenes Gelände	Spannweite 400 m	Spannweite 600 m
Kranbeton, NPK C, C30/37, 0/32 mm, XC 4, XF 1, CEM II/A	40.00 m ³	75.00 m ³
Kranbeton, NPK D, C25/30, 0/32 mm, XF2, XC4, XD1, CEM II/A	4.00 m ³	4.00 m ³
Sohlen-/Füllbeton, CEM 150 kg/m ³ , CEM II/A	0.16 m ³	0.25 m ³
Mikropfahl, Durchmesser 156 mm, Länge 7.0 m	16.00 St	32.00 St
Bentonit	0.39 t	0.78 t
Bewehrungsstahl B500B	8'832.00 kg	17'435.00 kg
Verzinkter Stahl für den Masten	36'000.00 kg	60'000.00 kg
Korrosionsschutz	400.00 kg	460.00 kg

2.9 Datengrundlage

Die Datengrundlage basiert auf dem Lösungskatalog von Swissgrid. Da die Datengrundlage der einzelnen Bauverfahren der Erdverkabelung sowie der Freileitung sehr umfassend ist, ist eine Auswahl der Daten erforderlich.

Die Ökobilanz erfasst die folgenden Daten:

1. Baumaterialien und Baukomponenten
2. Betriebsmittel
3. Baumaschinen
4. Transporte
5. Energie (elektrische Energie und Wärme)
6. Übertragbare elektrische Energie
7. Übertragungsverluste
8. Technische Infrastruktur
9. Emissionen
10. Landnutzung

Die Daten zu Baumaterialien, Betriebsmitteln, Energie (elektrische Energie und Wärme), übertragene elektrische Energie, Übertragungsverlusten sowie zur technischen Infrastruktur werden von Swissgrid bereitgestellt, die Daten zu Baumaschinen, Transporten, Emissionen und zur Landnutzung von der UTech AG.

2.9.1 Baumaterialien und Baukomponenten

Der Bericht berücksichtigt in erster Linie die Baumaterialien mit hohen Mengenanteilen.

Tabelle 4: Relevante Materialien/Bauteile für die Errichtung einer Erdverkabelung oder Freileitung

Erdverkabelung	Freileitung	Übergangsbauwerke
Aushubmaterial	Aushubmaterial	Aushubmaterial
Kabel	Fundamentbeton (armiert)	Beton
Kabelschutzrohre	Mikropfähle	Kies
Beton	Freileitungsmasten	Stahl
Muffen	Leiterseile	Umzäunung
Kabelschlitten, Kabelbriden, Kabelhalterungen	Isolatoren	Endverschlüsse
Muffen- und Zugschacht	Korrosionsschutz	Schutzkasten
Schmierstoffe und Stützflüssigkeiten	Auffüllmaterial	Stromwandler
Sprengstoffe und weitere Betriebsmittel	Betriebsmittel	Erdungsband

Metalle	Asphalt	Kabelschutzrohre
BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstung) / EMA (Einbruchmeldeanlagen)	Kies	Betriebsmittel
Auffüllmaterial	Auffüllmaterial	BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstung)

2.9.2 Betriebsmittel

Der Bericht umfasst die relevanten Betriebsmittel aller betrachteten Lebenszyklusphasen. Dazu gehören Hydrauliköl, Schmieröl sowie Diesel, Flockungsmittel, Abwässer und der Wasserverbrauch.

2.9.3 Baumaschinen

Der Bericht umfasst alle Baumaschinen und deren Verbrauch während der betrachteten Lebenszyklusphasen. Die Baumaschinenstunden sind anhand des «Technik & Betriebswirtschafts-Viewer des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV)» (TB-Viewer) geschätzt und zusammen mit den Materialaufwänden der Übertragungstechnologien elektrischer Energie und Übergangsbauwerken verbucht.

2.9.4 Transporte

Der Bericht umfasst alle externen Transportaufwände vom Hersteller bis zur Baustelle und von der Baustelle bis zur Entsorgungsstelle. Ferner umfasst er alle internen Transporte direkt auf der Baustelle.

2.9.5 Energie

Der Bericht umfasst alle Verbräuche an elektrischer Energie und Wärme während des gesamten Lebenszyklus der Bauverfahren. Hierzu gehören beispielsweise der Verbrauch elektrischer Energie der mechanischen Lüftung bei der Erdverkabelung oder der Energieverbrauch im Betrieb, in der Instandsetzung und im Austausch.

2.9.6 Übertragbare Menge elektrischer Energie

Der Bericht umfasst die übertragbare elektrische Energie in GWh jeder Übertragungstechnologie elektrischer Energie. Die übertragbare Menge elektrischer Energie in GWh ist ein wichtiger Parameter, da sie je nach Spannungsebene variiert und Bestandteil der funktionellen Einheit ist. Bei den Übergangsbauwerken wird keinerlei übertragene elektrische Energie angenommen. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass der Übergang von der Freileitung zum Kabel oder umgekehrt durch den Kabelverlust fließend verläuft. Die Abschätzung der Daten zur elektrischen Energie unterliegen einer Genauigkeit von ca. $\pm 30\%$, gemäss SIA 31.

2.9.7 Übertragungsverluste

Der Bericht umfasst einzig die Übertragungsverluste, die über eine Hochspannungsleitung als Freileitung oder Kabelleitung (Erdverkabelung) einschliesslich der Kompensationsverluste (bei Kabelleitungen) entstehen. Die Übertragungsverluste sind auf der Basis des technischen Berichts «Lösungskatalog» von Swissgrid erhoben und in Abbildung 23 aufgeführt. Für die Übergangsbauwerke werden keine Übertragungsverluste berücksichtigt, da diese Verluste vernachlässigbar klein sind. Die Abschätzung der Daten zur elektrischen Energie unterliegen einer Genauigkeit von ca. $\pm 30\%$, gemäss SIA 31.

Übertragungsarbeit und Verluste/km je Leitung (2 Systeme)								
		Übertragene Energie pro Jahr GWh/a	Übertragungs- verluste pro Jahr MWh/km/a	Übertragungsverluste prozentual zur übertr. Energie %				
Strom I = 450A								
Kabelleitung 2 x 380kV		5'189.09	386.40	0.07				
Kabelleitung 2 x 220kV		3'004.21	200.15	0.07				
Freileitung 2 x 380kV		5'189.09	197.87	0.04				
Freileitung 2 x 220kV		3'004.21	306.04	0.10				
Verluste jährlich nach Verlustart (2 Systeme)								
Verluste jährlich		jährliche Verluste in kW/km pro Leitung (2 Systeme)				Blindleistungsverluste		total Verluste (100%)
Strom I = 450A		Leitungsverluste MWh/km/a	%	Ableitungsverluste MWh/km/a	%	MWh/km/a	%	MWh/km/a
Kabelleitung 2 x 380kV		92.60	24.0%	66.48	17.2%	227.32	58.8%	386.40
Kabelleitung 2 x 220kV		92.60	46.3%	24.43	12.2%	83.13	41.5%	200.15
Freileitung 2 x 380kV		154.86	78.3%	43.01	21.7%	-	-	197.87
Freileitung 2 x 220kV		291.63	95.3%	14.42	4.7%	-	-	306.04

Abbildung 23: Übertragungsarbeit und -verluste/km je Leitung (2 Systeme)

2.9.8 Technische Infrastruktur

Die Ökobilanz berücksichtigt zusätzliche technische Infrastruktur für den reibungsfreien Betrieb der Bauverfahren wie beispielsweise die mechanische Lüftung. Zudem umfasst sie die Daten zur technischen Infrastruktur der Stollen, die sich in Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) und Einbruchmeldeanlagen (EMA) einteilen lässt. Schliesslich enthält die Ökobilanz die Daten zur technischen Infrastruktur der Kabelkeller innerhalb der Übergangsbauwerke.

2.9.9 Landnutzung

Der Bericht berechnet für jede Übertragungstechnologie elektrischer Energie die Landnutzung. Dabei erhebt er die Umweltauswirkungen der Landnutzung für die Start- und Zielbaugruben der Erdverkabelung wie für die Fundamente der Freileitungen. Für die Erdverkabelung und für die Freileitungen wird zudem die Landnutzung des ganzen Trassees berechnet. Die Fläche des Trassees wird während der Nutzungsphase als Waldplantage genutzt. Weiter sieht der Bericht bei der Errichtung einer Freileitung im Landnutzungskonzept eine Wegerschliessung von 50 m vor. Die Stollen sind hingegen aus dem Landnutzungskonzept ausgeschlossen, da eine mögliche Landnutzung im Fels keine Umweltauswirkungen aufweist. Zudem wird die Landnutzung der Übergangsbauwerke vernachlässigt, da der Bericht den Schwerpunkt auf die Modellierung der Freileitungen und der Bauverfahren der Erdverkabelung setzt.

Die Flächennutzungskonzepte für den Untertagebau, für den offenen Grabenbau und für die Freileitungen sind wie folgt definiert:

Tabelle 5: Flächennutzungskonzept für den Untertagebau – Phasenrohre/Strangrohre

Flächennutzungsphasen	Flächennutzungsart	Flächennutzungsjahre [a]
Transformation Errichtung der Start- und Zielbaugrube	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Errichtung der Start- und Zielbaugrube	Transformation, to construction site	-
Transformation Nutzung der Start- und Zielbaugrube	Transformation, from construction site	-
Transformation Nutzung der Start- und Zielbaugrube	Transformation, to forest, extensive, CH	-
Transformation der Fläche des Luftauslasses	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation der Fläche des Luftauslasses	Transformation, to industrial area, CH	-
Transformation Kabeltrasse	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Kabeltrasse	Transformation, to forest, extensive, CH	-
Nutzung der Fläche der Start- und Zielbaugrube während der Baustellenzeit	Occupation, construction site, CH	0.25
Nutzung der Fläche der Start- und Zielbaugrube während 80 Jahren	Occupation, forest, plantation, light use, CH	80
Nutzung der Fläche des Luftauslasses	Occupation, industrial area, CH	80
Nutzung Kabeltrasse	Occupation, forest, plantation, light use, CH	80

Tabelle 6: Flächennutzungskonzept für den offenen Grabenbau

Flächennutzungsphasen	Flächennutzungsart	Flächennutzungsjahre [a]
Transformation Errichtung des Grabens	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Errichtung des Grabens	Transformation, to construction site	-
Transformation der Fläche des Lufteinlasses und Luftauslasses	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation der Fläche des Lufteinlasses und Luftauslasses	Transformation, to industrial area, CH	-
Transformation Kabeltrasse	Transformation, from construction site	-
Transformation Kabeltrasse	Transformation, to forest, extensive, CH	-
Transformation Rückbau Graben	Transformation, from forest, extensive, CH	-
Transformation Rückbau Graben	Transformation, to annual crop, CH	-
Nutzung der Fläche der Errichtung des Grabens	Occupation, construction site, CH	0.9
Nutzung der Fläche des Lufteinlasses und Luftauslasses	Occupation, forest, plantation, light use, CH	80
Nutzung Kabeltrasse	Occupation, industrial area, CH	80
Nutzung der Fläche vom Rückbau des Grabens	Occupation, construction site, CH	0.9

Tabelle 7: Flächennutzungskonzept für die Freileitungen

Flächennutzungsphasen	Flächennutzungsart	Flächennutzungsjahre [a]
Transformation Wegerschliessung	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Wegerschliessung	Transformation, to traffic area, road network, CH	-
Transformation Einzelfundament	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Einzelfundament	Transformation, to industrial area, CH	-
Transformation Leitungstrasse	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Leitungstrasse	Transformation, to forest, extensive, CH	-
Nutzung, Leitungstrasse	Occupation, forest, plantation, light use, CH	80
Nutzung, Wegerschliessung	Occupation, traffic area, road network	80
Nutzung, Einzelfundament	Occupation, industrial area, CH	80

2.10 Datenqualität

Die erhobenen technischen Vordergrunddaten zu den Übertragungstechnologien elektrischer Energie verfügen über eine hohe Genauigkeit und Aktualität, da sie auf Daten bereits erfolgter Bauprojekte beruhen. So weist der Bericht alle Aufwände für die Sachbilanz zielgerichtet und mit einer hohen Zuverlässigkeit aus. Geringe Aufwände (beispielsweise Papier im Betrieb), die das Ergebnis der Ökobilanz nicht beeinflussen, sind nicht in der Sachbilanz aufgenommen. Im Falle der Übergangsbauwerke entspricht die Datenqualität der technischen Vordergrunddaten nicht dem Detaillierungsgrad der Daten zu den Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Dies liegt darin begründet, dass einerseits für Übergangsbauwerke unterschiedliche Ausführungsvarianten existieren sowie der Bericht andererseits den Schwerpunkt auf die Übertragungstechnologien elektrischer Energie legt. Dennoch reicht die Datengrundlage aus, um im Falle der Übergangsbauwerke die Unterschiede der drei ausgeprägtesten Bauvarianten aus Sicht der Ökobilanz abzubilden.

Ebenso ist ein hoher Detaillierungsgrad der Daten zu den Baumaschinenstunden gewährleistet, da die Aufwände der einzelnen Bauprozesse direkt auf Grundlage des «Technik & Betriebswirtschafts-Viewer des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV)» (TB-Viewer) sowie der aus dem Fragebogen resultierenden Mengenangaben abgebildet sind. Die generischen Hintergrunddaten stammen aus der Datenbank UVEK LCI Data 2022, die eine zuverlässige Datenquelle darstellt.

3. Sachbilanz

Das Kapitel Sachbilanz erläutert die Berechnungen und deren Annahmen zu Materialien, Transporten, Baumaschinen und Emissionen der zu untersuchenden Bauverfahren und listet die entsprechende Sachbilanz auf. Für eine vollumfängliche Darstellung der Sachbilanz wird auf den digitalen Anhang «Sachbilanz» verwiesen.

Die technischen Vordergrunddaten sind im Rahmen des Fragebogens von Swissgrid geliefert und im Ordner «Fragebogen» des digitalen Anhangs einsehbar.

Es werden die folgenden Annahmen getroffen, die jeweils für alle Bauverfahren gelten:

Tabelle 8: Allgemeingültige Parameter

Parameter	Annahme
Betrachtungszeitraum	80 a
Lebensdauer der Bauwerke	80 a

3.1 Baumaterialien und Baukomponenten

Aufgrund des Datenumfangs der Sachbilanz wird auf den digitalen Anhang verwiesen. So sind die gesamten Materialaufwände der Übertragungstechnologien elektrischer Energie im Ordner «Sachbilanz» des digitalen Anhangs einsehbar. Für eine bessere Übersicht sind im Folgenden einzig die entscheidenden Materialmengen für die Übertragungstechnologien elektrischer Energie aufgelistet:

Tabelle 9: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Phasenrohr – E-Power Pipe», Mengen pro GWh und km

Phasenrohr – E-Power Pipe			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Kabelschutzrohr PE-HD 10 m ohne Steckmuffe, 250 mm	0.01445	0.02496	lfm
Bentonit	0.00036	0.00062	t

Tabelle 10: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Strangrohr – E-Power Pipe», Mengen pro GWh und km

Strangrohr – E-Power Pipe			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 3x1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Kabelschlitten aus Stahl, DN 300	0.00964	0.01664	lfm
Bentonit	0.00036	0.00062	t
Kabelschutzrohr PE-HD 10 m ohne Steckmuffe, 600 mm	0.00482	0.00832	lfm

Tabelle 11: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Strangrohr – Direct Pipe», Mengen pro GWh und km

Strangrohr – Direct Pipe			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Kabelschutzrohr aus Stahl, DN 100	0.00482	0.00832	lfm
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 3x1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Kabelschlitten aus Stahl, DN 300	0.00964	0.01664	lfm
Metallstützen, Länge 0.5 m, Durchmesser 0.086 m	0.00964	0.01664	St

Tabelle 12: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Strangrohr – Horizontal Directional Drilling (HDD)», Mengen pro GWh und km

Strangrohr – Horizontal Directional Drilling (HDD)			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 3x1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Kabelschlitten aus Stahl, DN 300	0.00964	0.00832	lfm
Metallstützen, Länge 0.11 m, Durchmesser 0.086 m	0.00964	0.01664	St

Tabelle 13: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Mikrotunnel, begehbar», Mengen pro GWh und km

Mikrotunnel, begehbar			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Stahlbetonrohr, DN 2200	0.00241	0.00416	lfm
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Hydraulische Fuge, MCT begehbar	0.00080	0.00139	lfm

Tabelle 14: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Mikrotunnel, nicht begehbar», Mengen pro GWh und km

Mikrotunnel, nicht begehbar			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Stahlbetonrohr, DN 1200	0.00482	0.00832	lfm
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Hydraulische Fuge, MCT nicht begehbar	0.00161	0.00277	lfm

Tabelle 15: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Grabenfräse – Pipe Express», Mengen pro GWh und km

Grabenfräse – Pipe Express			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Kabelschutzrohr aus Stahl, DN 900	0.00482	0.00832	lfm
Kabelschlitten aus Stahl, DN 300	0.00482	0.00832	lfm

Tabelle 16: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock», Mengen pro GWh und km

Kabelrohrblock – 1 Rohrblock			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Recycling-Beton RCB Korngemisch, CEM 200 kg/m ³ , CEM II/A, 0.88 m ³ /m	0.00424	0.00212	m ³
Kabelschutzrohr PE-HD 10 m ohne Steckmuffe, DN250	0.01454	0.02496	lfm

Tabelle 17: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Kabelrohrblock – 2 Rohrblöcke», Mengen pro GWh und km

Kabelrohrblock – 2 Rohrblöcke			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Recycling-Beton RCB Korngemisch, CEM 200 kg/m ³ , CEM II/A, 1.0 m ³ /m	0.00482	0.00241	m ³
Kabelschutzrohr PE-HD 10 m ohne Steckmuffe, DN250	0.01454	0.02496	lfm

Tabelle 18: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Leitungskanal», Mengen pro GWh und km

Leitungskanal			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Kranbeton, NPK F, C30/37, 0/32 mm, XF2, XC4, XD3, CEM II/A, 2.9 m ³ /m	0.00699	0.01207	m ³
Bewehrungsstahl B500B	0.83830	1.44797	kg

Tabelle 19: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gesprengter Stollen», Mengen pro GWh und km

Gesprengter Stollen			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Spritzbeton SC 3, C25/30, CEM II/A	0.00523	0.00915	m ³
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Elektroverteilung (2 Felder)	2.89068E-07	4.9930E-06	St

Tabelle 20: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gefräster Stollen – Einfachschild TBM», Mengen pro GWh und km

Gefräster Stollen – Einfachschild TBM			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Spritzbeton, Trockengemisch, CEM 350 kg/m ³ , CEM I	0.01056	0.01831	m ³
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Elektroverteilung (2 Felder)	14.4534E-07	2.4965E-06	St

Tabelle 21: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gefräster Stollen – Gripper TBM», Mengen pro GWh und km

Gefräster Stollen – Gripper TBM			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Spritzbeton SC 3, C25/30, CEM II/A	0.00265	0.00458	m ³
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Spritzbeton, Trockengemisch, CEM 350 kg/m ³ , CEM I	0.00169	0.00291	m ³

Tabelle 22: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Gefräster Stollen – Bruststützung mit TBM», Mengen pro GWh und km

Gefräster Stollen – Bruststützung mit TBM			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Spritzbeton, Trockengemisch, CEM 350 kg/m ³ , CEM I	0.01349	0.02331	m ³
XLPE-Kabel, Kabeltyp XDRCU-ALT 1x2500EN mm ² 380/220 kV	0.02891	0.04993	lfm
Elektroverteilung (2 Felder)	14.4534E-07	2.4965E-06	St

Tabelle 23: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Freileitung mit Einzelfundament», Mengen pro GWh und km

Freileitung mit Einzelfundament			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Mikropfahl, Durchmesser 156 mm, Länge 7.0 m	2.2483E-04	3.8834E-04	St
Verzinkter Stahl	0.21680	0.37447	kg
Leiterseile aus Aldrey	0.03902	0.04044	kg

Tabelle 24: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Freileitung mit Rahmenfundament», Mengen pro GWh und km

Freileitung mit Rahmenfundament			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Kranbeton, NPK C, C30/37, 0/32 mm, XC 4, XF 1, CEM II/A	0.00060	0.001040	m ³
Verzinkter Stahl	0.21680	0.37447	kg
Leiterseile aus Aldrey	0.03902	0.04044	kg

Tabelle 25: Resultatbestimmende Materialien der Bauart «Freileitung mit Riegelfundament», Mengen pro GWh und km

Freileitung mit Riegelfundament			
Material	Menge für 380 kV	Menge für 220 kV	Einheit
Bewehrungsstahl B500B	0.07737	0.13365	kg
Verzinkter Stahl	0.21680	0.37447	kg
Leiterseile aus Aldrey	0.03902	0.04044	kg

3.2 Betriebsmittel

Die im Bericht berücksichtigten Betriebsmittel sind Hydrauliköl, Diesel, Schmieröl, Flockungsmittel, Frischwasser und Abwasser. Diese sind im Fragekatalog getrennt erhoben.

Diesel wird bei den Bauarten «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Strangrohr – E-Power Pipe», «Direct Pipe» und «HDD» genutzt bzw. für den Antrieb der Vortriebsmaschinen verwendet. Ebenso wird bei den zuvor genannten Bauverfahren – mit Ausnahme von «Direct Pipe» – Hydrauliköl benötigt. Schmieröl ist im Rahmen der Bauverfahren «Direct Pipe», «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Strangrohr – E-Power Pipe», «Mikrotunnel, begehbar» und «Mikrotunnel, nicht begehbar» erforderlich. Es dient dazu, die Kabel einzuziehen. Schliesslich wird beim Bauverfahren «Gesprengter Stollen» Flockungsmittel eingesetzt.

Frischwasser ist bei den Bauverfahren des Grabenbaus erforderlich. Die Bauart «Gesprengter Stollen» erfordert Bohrwasser sowie Wasser für allenfalls auf der Baustelle installierte Waschplätze. Prozesswasseranfall fällt bei den Bauarten «Phasenrohr – E-Power Pipe» und «Direct Pipe» an.

3.3 Baumaschinen

Der Bericht erhebt für alle Bauarten und für alle Lebenszyklusphasen die eingesetzten Baumaschinen, sofern die Daten im TB-Viewer bzw. bei Swissgrid vorhanden sind. Die Baumaschinenstunden zur Einrichtung der Vortriebsgeräte und Pressstationen auf der Baustelle sowie die Baumaschinenstunden der Vortriebsgeräte und Pressstationen sind von Swissgrid erhoben. Die restlichen Baumaschinenstunden werden von der UTech AG anhand der Materialisierung und den Angaben von Swissgrid erhoben. Dabei modelliert der Bericht für die einzelnen Lebenszyklusphasen je nach Bauverfahren die folgenden Bauschritte:

Untertagebau (Erdverkabelung, Phasenrohre, Strangrohre, Mikrotunnel, Stollen)

- Baustelleneinrichtung: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für die Installierung der Kräne, der Aufzugeinrichtungen, der Lagerflächen, der Vortriebsgeräte und der Pressstationen.

- Aushub und Bau der Start- und Zielbaugruben: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Aushub der Start- und Zielbaugrube sowie für die Verschalung und Betonierung der Gruben.
- Installierung der Kabelschutzrohre und Kabeleinzug: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Vortrieb sowie für den Einzug der Kabelschutzrohre und Kabel.
- Aushub für den Luftauslass und -einlass: Einige der Bauarten verfügen über eine mechanische Lüftung. Dabei sind je nach Bauverfahren unterschiedliche Luftauslässe und -einlässe vorgesehen. Der Bericht berücksichtigt die für den Aushub der Luftauslässe erforderlichen Baumaschinenstunden.
- Kabelaustausch: Bei den Bauarten der Erdverkabelung werden die Kabel alle 40 Jahre ausgetauscht. Dabei berücksichtigt der Bericht die Baumaschinenstunden für das Entfernen und Wiedereinziehen der Kabel.
- Rückbau: Bei Stilllegung der Bauwerke werden die Kabel entfernt. Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Abbruch der Kabel.

Grabenbau (Pipe Express, Kanalrohrblock 1 & 2 Rohrblöcke, Leitungskanal)

- Baustelleneinrichtung: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für die Installierung der Kräne, der Aufzugeinrichtungen, der Lagerflächen, der Vortriebsgeräte und der Pressstationen. Die Bauart «Pipe Express» ist das einzige Verfahren, das die Kabelschutzrohre mittels Vortriebsgerät und Pressstation einzieht.
- Aushub und Bau der Start- und Zielbaugruben: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Aushub der Start- und Zielbaugrube sowie für die Verschalung und Betonierung der Gruben. Bei den Bauarten Kanalrohrblock 1 & 2 Rohrblöcke sowie beim Leitungskanal sind keine Gruben vorhanden. Hier wird der Boden auf der gesamten Länge der Leitung aufgebrochen und wieder zugeschüttet.
- Installierung der Kabelschutzrohre und Kabeleinzug: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Vortrieb sowie für den Einzug der Kabelschutzrohre und Kabel.
- Aushub für den Luftauslass und -einlass: Einige der Bauarten weisen eine mechanische Lüftung auf. Dabei werden je nach Bauverfahren unterschiedliche Luftauslässe und -einlässe installiert. Der Bericht berücksichtigt die für den Aushub der Luftauslässe erforderlichen Baumaschinenstunden.
- Kabelaustausch: Die Kabel der Bauverfahren der Erdverkabelung werden alle 40 Jahre ausgetauscht. Dabei berücksichtigt der Bericht die Baumaschinenstunden für das Entfernen und Wiedereinziehen der Kabel.
- Rückbau: Bei der Stilllegung von Bauwerken der Bauart «Pipe Express» werden nur die Kabel herausgezogen. Der Bericht berücksichtigt die für den Abbruch der Kabel erforderlichen Baumaschinenstunden. Die Bauwerke der Bauart Kabelrohrblock 1 & 2 Kabelrohrblöcke sowie Leitungskanal werden vollständig abgebrochen. Hierbei wird der Boden auf der gesamten Länge der Leitung freigelegt, der Kabelrohrblock samt Kabel herausgehoben und der Graben zum Schluss zugeschüttet.

Freileitungen

Die Angaben gelten für alle Fundamenttypen und Geländetypen:

- Wegerschliessung von 50 m: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für eine Wegerschliessung von 50 m. Eine Wegerschliessung findet bei allen drei Geländetypen statt.
- Baustelleneinrichtung: Der Bericht berücksichtigt die zur Errichtung möglicher Lagerplätze erforderlichen Baumaschinenstunden.
- Fundamenterstellung: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Aushub, für das Giessen und für die Zuschüttung des Fundaments.
- Austausch: Die Sockel müssen alle 40 Jahre ausgetauscht werden. Der Bericht berücksichtigt die hierfür erforderlichen Baumaschinenstunden.
- Rückbau: Die Freileitungen werden nach Ablauf ihrer Lebensdauer von 80 Jahren vollständig rückgebaut. Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden, die für die Demontage der Leiterseile, der Masten und des Fundaments sowie für die Zuschüttung des Fundaments benötigt werden. Für die Freileitungen im steilen Gebirge wird im Bericht aufgrund der erschwerten topographischen Verhältnisse ein doppelter Aufwand für den Rückbau vorausgesetzt.

Übergangsbauwerke

- Errichtung des Kabelkellers: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Aushub, für den Einbau des Betons und der Schalungen sowie für Beschichtungen des Kabelkellers. Ein Kabelkeller wird dabei einzig bei der Bauart «Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase» errichtet.
- Errichtung des Kabelrohrblocks: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Aushub, die Installierung des Kabelrohrblocks sowie die Zuschüttung des Grabens. Dies gilt für die Bauarten «Abspannportal ohne Kabelkeller: 1 Phase pro Kabel» und «Übergangsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast».
- Abbruch des Kabelkellers: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden, die für den Abbruch des gesamten Kabelkellers und die Aufschüttung erforderlich sind.
- Abbruch des Kabelrohrblocks: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Aushub, die Entfernung des Kabelrohrblocks sowie die Zuschüttung.
- Abbruch der Umzäunung: Der Bericht berücksichtigt die Baumaschinenstunden für den Abbruch der Umzäunung, die bei allen drei untersuchten Bauarten vorhanden ist.

Folgende Baumaschinen sind in der Sachbilanz aufgenommen:

Baumaschinen aus dem TB-Viewer

- Schnureinzugsgerät mit Kompressor
- Notstromgenerator
- Pneukrane Teleskop-Ausleger – 30 t
- Lastwagen Kippbrücke ohne Allrad – 26 t
- Tiefenganganhänger – 24 t

- Ladekran – 10 mt, auf Lastwagen
- Vibriernadel – 70 mm, Hochfrequenz Elektromotor
- Umformer EM – 5.5 kVA
- Turmkran Laufkatze – 120 mt/65 m, stationär
- Radlader – 6 t, 50 kW
- Schraubenkompressor – 4.5 m³, VM, fahrbar
- Grossdumper – 5 m³, 90 kW, Gelenk
- Hydr-Bagger-Raupen – 18 t, 100 kW
- Winkelschleifer, EM – 250 mm, 2.4 kW
- Säbelsäge, Akkubetrieb
- Kleindumper Allrad – 2.0 m³
- Hydr-Bagger-Raupen – 18 t, 115 kW
- Abbauhammer Druckluft – 25 kg
- Hydraulik-Hammer für Bagger – 1'200 kg
- Kombihammer, EM – 12 kg
- Tiefenganganhänger – 24 t
- Schraubenkompressor – 2.8 m³, VM, fahrbar

Vortriebsgeräte

- Vortriebsgerät Einfachschild TBM
- Vortriebsgerät Gripper TBM
- Vortriebsgerät TBM mit Bruststützung
- Vortriebsgerät SPV (Sprengvortrieb)
- Vortriebsgerät Phasenrohr – E-Power Pipe
- Vortriebsgerät Strangrohr – E-Power Pipe
- Vortriebsgerät Direct Pipe
- Vortriebsgerät HDD
- Vortriebsgerät MCT, DN 1'200
- Vortriebsgerät MCT, DN 2'200
- Vortriebsgerät Pipe Express

Pressstationen

- Pressstation Pipe Express
- Pressstation Phasenrohr – E-Power Pipe
- Pressstation Strangrohr – E-Power Pipe
- Pressstation Direct Pipe
- Pressstation MCT, DN 1'200
- Pressstation MCT, DN 2'200
- Pressstation Pipe Express

3.4 Transporte

Die Ökobilanz berücksichtigt die Güter- sowie die Personentransporte aller betrachteten Lebenszyklusphasen. Sie umfasst externe Gütertransporte vom Hersteller zur Baustelle und von der Baustelle zur Entsorgung sowie sämtlichen Personentransport für Errichtung, Betrieb, Wartung und Instandsetzung, Austausch, Entsorgung und Abfallaufbereitung. Die Modellrechnung geht davon aus, dass der Gütertransport mittels eines LKWs (16-32 t, betrieben mit Diesel), die Personentransporte mittels eines herkömmlichen PKWs (betrieben mit Diesel) erfolgen. Diese Annahmen gelten gleichermassen für die Bauverfahren der Erdverkabelung, der Freileitungen und der Übergangsbauwerke.

Der Bericht geht von folgenden Strecken für den Güter- und den Personentransport aus:

Gütertransport: vom Hersteller zur Baustelle

Tabelle 26: Streckenlänge Gütertransport, vom Hersteller zur Baustelle

Gut	Strecken [km]
Beton	20
Asphalt	30
Gesteinskörnung	30
Stahl	150
Komponenten, allgemein	100
Betriebsmittel	50

Gütertransport: von der Baustelle zur Entsorgungsstelle

Tabelle 27: Gütertransport, von der Baustelle zur Entsorgungsstelle

Gut/Entsorgungsstelle	Strecken [km]
Deponie	80
Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)	50
Betonrecycling	50
Metalle	100

Personentransport

Für den Personentransport wird eine Strecke von 50 km vorausgesetzt. Die Annahmen zum Personentransport gelten für alle Bauarten und Lebenszyklusphasen.

Helikoptertransport

Die Güter werden bei den Freileitungen im steilen Gebirge mit einem Helikopter vom Lagerplatz zur Baustelle transportiert. Der Bericht geht davon aus, dass die Distanz zwischen Lagerplatz und Baustelle 1 km beträgt. Um die effektiven Einsatzstunden zu modellieren, wird ein Transporthelikopter mit einer maximalen Transportlast von 360 kg und einer Maximalgeschwindigkeit von 260 km/h vorausgesetzt.

Die Anzahl der Flüge wird ermittelt, indem das Gewicht aller verbauten Materialien durch die maximale Transportlast von 360 kg des Helikopters geteilt wird. Danach wird die Anzahl Flüge mit der Streckenlänge von 2 km für Hin- und Rückflug (Lagerplatz → Baustelle, Baustelle → Lagerplatz), multipliziert. Zuletzt wird die effektiv für den gesamten Materialtransport zurückzulegende Strecke durch die Maximalgeschwindigkeit von 260 km/h des Helikopters geteilt. Dies ermöglicht die Berechnung der benötigten Helikopterstunden.

3.5 Energie (elektrische Energie und Wärme)

Die Errichtung der Stollen benötigt elektrische Energie für die Abwasserbehandlung. Der Bericht geht für die Anlage zur Abwasservorbehandlung während der Errichtung des Stollens von einer elektrischen Leistungsaufnahme von 15 kW und einer Betriebsstundenanzahl von 270 Stunden aus.

Eine mechanische Lüftung wird in der Nutzung für alle Bauarten ausser für den «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock», «Kabelrohrblock – 2 Rohrblöcke» und «Phasenrohr – E-Power Pipe» vorausgesetzt. Dabei ist die mechanische Lüftung bei allen Bauverfahren pro Jahr 4320 h in Betrieb. Die elektrische Leistung der mechanischen Lüftung beträgt bei den begehbaren Bauverfahren 25 kW, bei den nicht begehbaren Bauverfahren 20 kW.

Alle Angaben aus diesem Kapitel stammen aus dem Fragebogen.

3.6 Übertragene elektrische Energie

Die jährlich übertragbare elektrische Energie liegt bei Freileitungen, sowie bei der Erdverkabelung jeweils gleich hoch. Der Bericht berücksichtigt keinerlei Unterschiede zwischen den einzelnen Bauarten, da die übertragene elektrische Energie nicht von der Bauart bzw. vom Bauwerk, sondern von den Querschnitten und Spannungen der Übertragungsmedien (Leiterseile, Kabelquerschnitt, elektrische Spannung) abhängig ist. Die übertragene elektrische Energie bezieht sich auf ein Leitungstrasse ohne Längenannahme.

Die übertragene elektrische Energie für Freileitungen und Kabelleitungen auf der Höchstspannungsebene zu 380 kV beträgt 5'189.09 GWh/a, auf der Höchstspannungsebene zu 220 kV 3'004.21 GWh/a.

3.7 Übertragungsverluste

Die Übertragungsverluste unterscheiden sich zwischen Freileitungen und der Erdverkabelung, jedoch nicht zwischen deren einzelnen Bauarten. Die Übertragungsverluste beziehen sich im Bericht auf eine Trasseelänge von 1 km und sind in Abbildung 24 aufgeführt.

Die Übertragungsverluste der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 380 kV betragen 0,3864 GWh/a, auf der Höchstspannungsebene 220 kV 0,20015 GWh/a. Die Ableitverluste und Blindleistungsverluste der Kabel der Höchstspannungsebene 220 kV sind geringer als die der Kabel auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Als Blindleistung ist der Anteil elektrischer Energie zu

verstehen, der nicht in nutzbare Energie umgewandelt werden kann Ableitverluste entstehen z. B. durch Kriechströme an der Oberfläche von Isolatoren.

Die Übertragungsverluste der Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV betragen 0,19787 GWh/a, auf der Höchstspannungsebene 220 kV 0,3064 GWh/a. Die Übertragungsverluste sind von Swissgrid erhoben. Der Strom 450A stellt eine geschätzte mittlere Netzbelastung im Normalbetrieb dar. Reale Ströme in Hochspannungsleiten können von diesem abweichen.

Verluste jährlich nach Verlustart (2 Systeme)								
Verluste jährlich Strom I = 450A	jährliche Verluste in kW/km pro Leitung (2 Systeme)							
	Leitungsverluste		Ableitverluste		Blindleistungsverluste		total Verluste (100%)	
	MWh/km/a	%	MWh/km/a	%	MWh/km/a	%	MWh/km/a	
Kabelleitung 2 x 380kV	92.60	24.0%	66.48	17.2%	227.32	58.8%	386.40	
Kabelleitung 2 x 220kV	92.60	46.3%	24.43	12.2%	83.13	41.5%	200.15	
Freileitung 2 x 380kV	154.86	78.3%	43.01	21.7%	-	-	197.87	
Freileitung 2 x 220kV	291.63	95.3%	14.42	4.7%	-	-	306.04	

Abbildung 24: Unterschied der jährlichen Übertragungsverluste der Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV

3.8 Technische Infrastruktur

Die technische Infrastruktur setzt sich unter anderem aus der natürlichen oder mechanischen Lüftung, sowie den Komponenten der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) und Einbruchmeldeanlagen (EMA) zusammen.

Je nach Bauverfahren der Erdverkabelung wird eine natürliche oder mechanische Lüftung installiert. Eine natürliche Lüftung besteht aus einem Lufteinlass und einem Luftauslass, wobei Aussenluft den Tunnel durchströmt und so die Wärme abtransportiert. Das System der mechanischen Lüftung beinhaltet einen Luftauslass und eine mechanische Lüftung (Gerät). Die mechanische Lüftung (Gerät) setzt sich aus einem Ventilator, einer Absperrklappe, einem Schalldämpfer, einem Wetterschutzgitter und einem Schaltschrank zusammen. Weiter sind Steuerungselemente wie ein Volumenstromregler und Sensorik-Elemente wie ein Klimamonitoring in der mechanischen Lüftung verbaut.

Bei den begehbaren Bauverfahren sind alle 10'000 m, bei den nicht begehbaren Bauverfahren alle 1'000 m eine mechanische Lüftung sowie ein Luftauslass vorgesehen.

Die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) und die Einbruchmeldeanlagen (EMA) sind nur bei Stollen vorhanden. Die BSA/EMA umfasst Einbruch- und Brandmeldeanlagen, Rauch- und Wärmesensoren, Beleuchtung, Kabel für die Kommunikation und die Leuchten, Schaltanlagen und Elektroverteilungen, Kommunikationsanlagen, Brandschutzklappen sowie Brandschutztüren und die Infrastruktur für die Entwässerung.

3.9 Emissionen

Der Bericht berücksichtigt die durch den Koronaeffekt entstehenden Lachgas- und Ozonemissionen der Freileitungen. Hierfür hat die UTech AG eine Literaturrecherche vorgenommen. Aufgrund der mangelnden Datenlage sind die Lachgas- und Ozonemissionen der Ökobilanz-Studie «Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid» [19] entnommen.

Der Bericht geht von einer Emission von 5 kg Lachgas und 4,5 kg Ozon pro übertragene Gigawattstunde aus[19]. Das Übertragungsnetz in der Schweiz umfasst 6'750 km Trassenlänge. Somit betragen die Lachgasemissionen pro Gigawattstunde und Kilometer 0.00051 kg/GWh/km sowie die Ozonemissionen 0.00046 kg/GWh/km.

3.10 Abfallaufbereitung und Entsorgung

Der Bericht berücksichtigt die Abfallaufbereitung und die Entsorgung für alle Materialaufwände, die durch die Errichtung, die Wartung und Instandsetzung, den Austausch und den Rückbau anfallen. Die Materialaufwände werden dabei wie folgt verwertet:

Tabelle 28: Verwertungsarten der Materialien/Komponenten

Verwertungsarten	Materialien/Komponenten
Aufbereitungsanlagen	Jegliche Arten von Kabeln, Metallen, Elektrokomponenten, Beton, Luftauslass, Lufteinlass, Muffenschacht, Zugschacht
Kunststoffe in Kehrichtverbrennungsanlage	Kabelschutzrohre aus PE-HD, Verbindungsmuffen
Deponie	Aushubmaterial und Fels in Deponie Typ A, Bohrschlamm und Bentonit in Deponie Typ E

4. Wirkungsabschätzung

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung. Es stellt Variante 1 (Höchstspannungsebene 380 kV) und Variante 2 (Höchstspannungsebene 220 kV) vergleichend gegenüber. Ferner enthält es die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung gemäss den drei Wirkungsmethoden Treibhausgasemissionen, Methode der ökologischen Knappheit 2021 sowie Methode des kumulierten Energieaufwands – und zwar unterteilt in erneuerbar und nicht erneuerbar.

4.1 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV

Dieses Kapitel wertet die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der einzelnen Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV aus. Dabei präsentiert es zunächst die kumulierten Ergebnisse, danach die Ergebnisse nach Lebenszyklusphasen sowie die Ergebnisse nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung. Schliesslich visualisiert es im Detail die Ergebnisse hinsichtlich Ressourcen und Emissionen sowie Energieverbrauch.

4.1.1 Kumulierte Wirkungsabschätzung (380 kV)

Die Freileitungen weisen die niedrigsten Umweltauswirkungen gemäss allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden und über den gesamten Betrachtungszeitraum von 80 Jahren auf: siehe Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28. Die aus den einzelnen Methoden gewonnenen Resultate unterscheiden sich hinsichtlich der Höhe der Umweltauswirkungen nur gering. Grundsätzlich führen die Bauverfahren der Freileitungen je nach Wirkungsabschätzungsmethode zu doppelt bis dreifach so niedrigen Umweltauswirkungen als die Verfahren der Erdverkabelung. Entscheidend für die Differenzen ist der Umstand, dass die einzelnen Wirkungsabschätzungsmethoden die Übertragungsverluste unterschiedlich gewichten – und gerade die Übertragungsverluste das für die Freileitungen ausgewiesene Gesamtergebnis stark beeinflussen. Es zeigt sich, dass sich die Bilanz der Bauverfahren von Freileitungen hinsichtlich der Umweltauswirkungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung noch verbessert, wenn die Wirkungsabschätzungsmethode «kumulierter Energieaufwand» verwendet wird.

Unter den Bauverfahren der Erdverkabelung ergeben sich für die Kabelrohrblöcke je Wirkungsabschätzungsmethode die niedrigsten Umweltauswirkungen. Weiter weisen die Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Horizontal Directional Drilling (HDD)», «Strangrohr – Pipe Express» und «Leitungskanal» bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden geringe Umweltauswirkungen auf.

Die Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV zeigt, dass das Bauverfahren «Gesprengter Stollen» bei den Wirkungsabschätzungsmethoden «Treibhausgasemissionen», «Methode der ökologischen Knappheit» und «kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar» die höchsten Umweltauswirkungen aufweist. Grund hierfür sind die verbauten Elektrokomponenten der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) und der Einbruchmeldeanlagen (EMA). Der «Mikrotunnel, nicht begehbar» zeigt die höchsten Umweltauswirkungen bei der Methode

«kumulierter Energieaufwand». Dabei sind die Stahlbetonrohre, die hydraulischen Fugen, die Kabel sowie der Bentonit auf Materialseite für die höchsten Umweltauswirkungen verantwortlich.

Je nach Wirkungsabschätzungsmethode weisen die Bauverfahren «Gefräster Stollen – TBM mit Bruststützung», «Strangrohr – Direct Pipe» und «Mikrotunnel, nicht begehbar» die zweithöchsten Umweltauswirkungen auf. Weiter zeigt sich, dass die Stollen, die Mikrotunnel, das «Strangrohr – E-Power Pipe» und das «Grabenfräse – Pipe Express» je nach Wirkungsabschätzungsmethode erhöhte Umweltauswirkungen aufweisen.

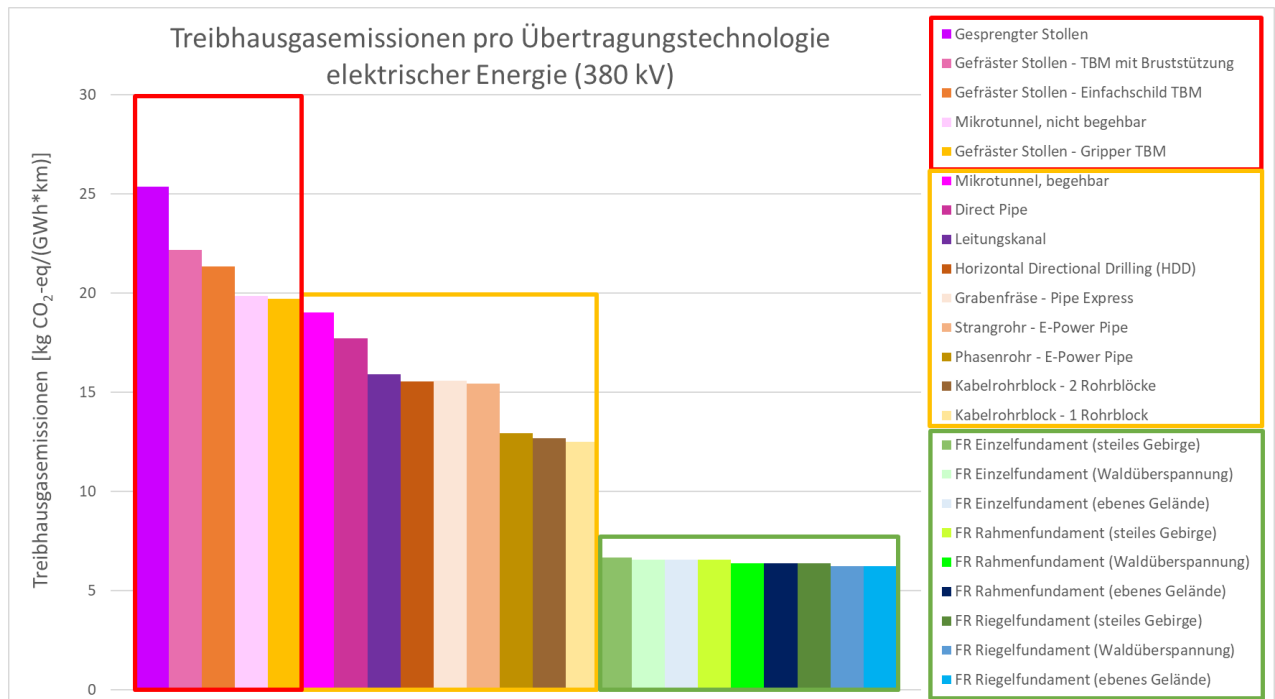


Abbildung 25: Treibhausgasemissionen pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert

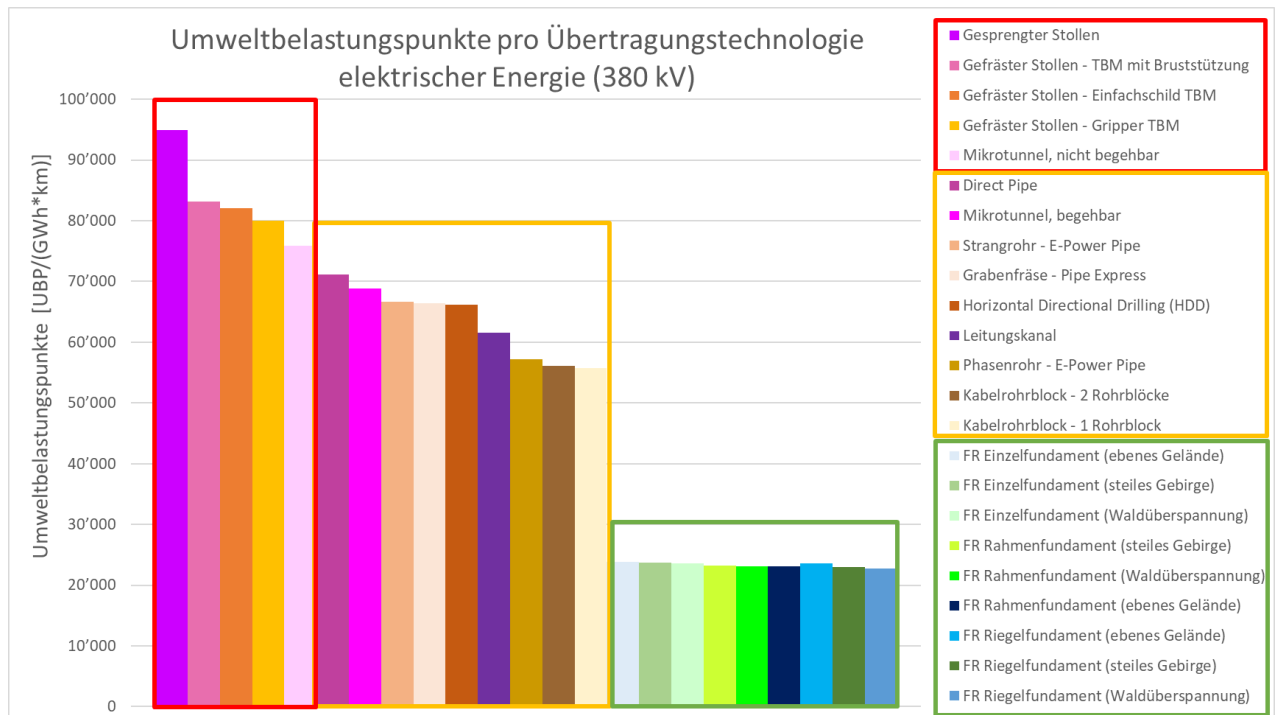


Abbildung 26: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert

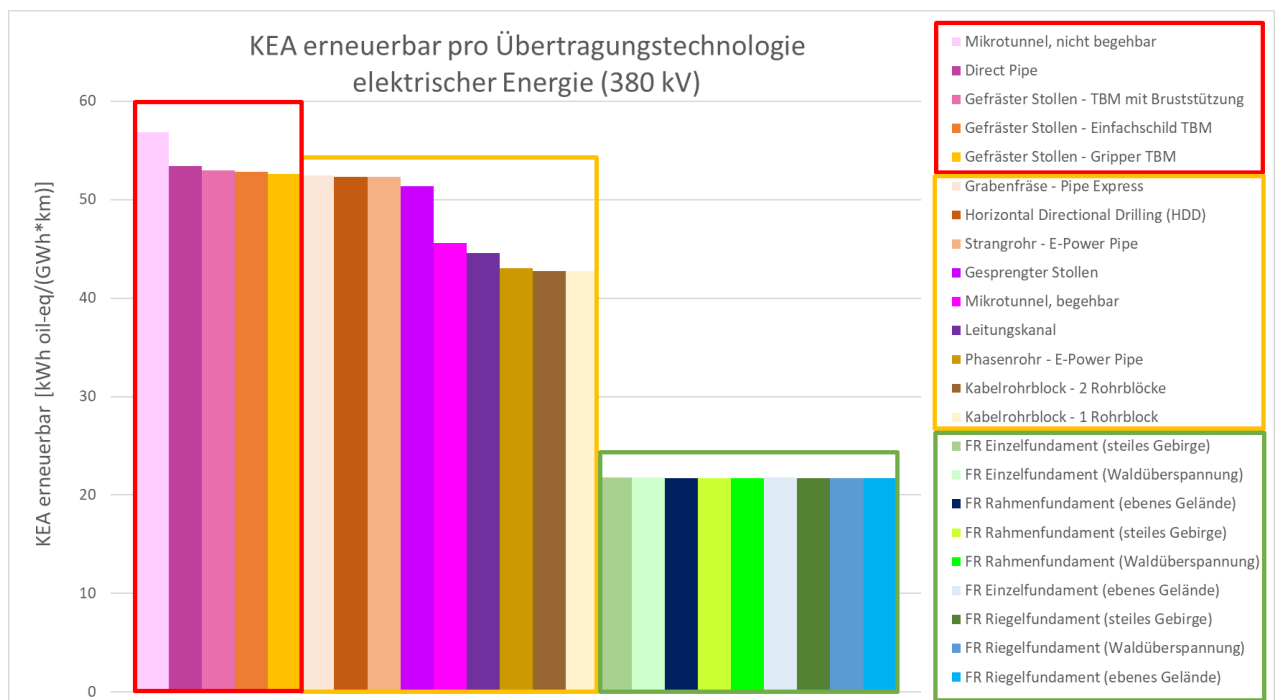


Abbildung 27: KEA erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert

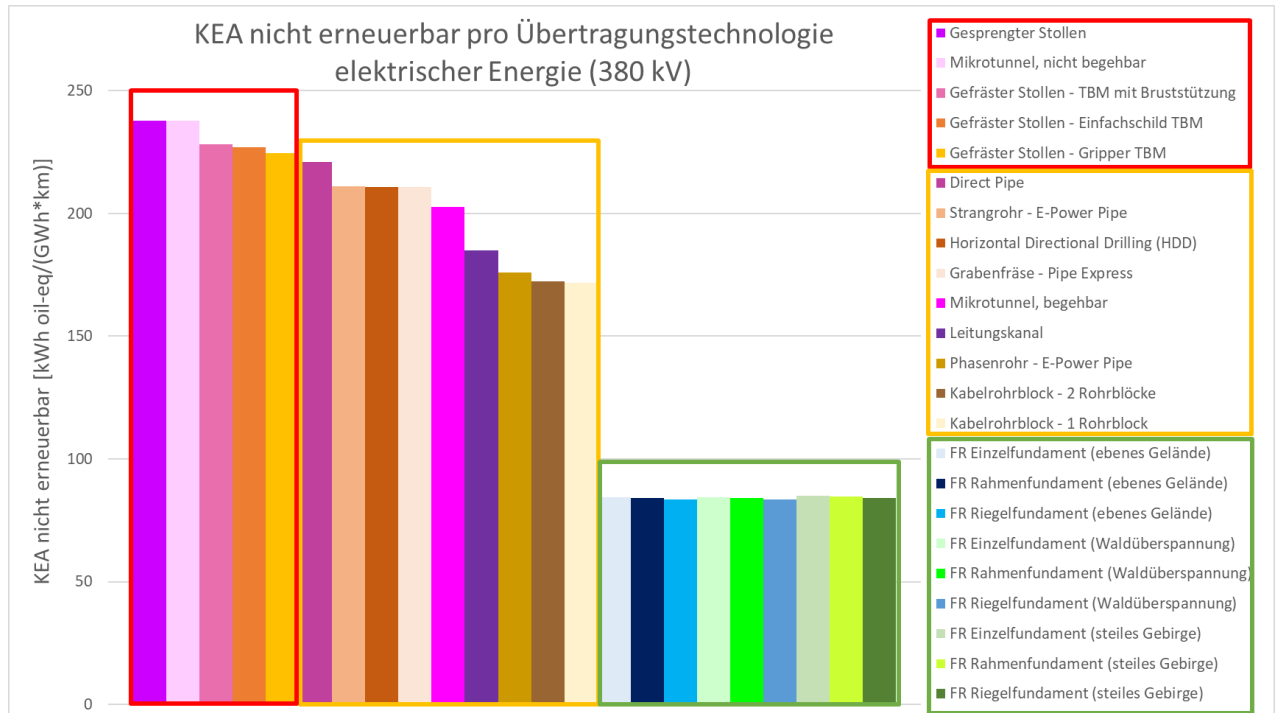


Abbildung 28: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), kumuliert

4.1.2 Wirkungsabschätzung nach Lebenszyklusphasen (380 kV)

Aus der Gesamtbetrachtung der Lebenszyklusanalyse geht hervor, dass die Lebenszyklusphase Nutzung (B8) die Ergebnisse der Ökobilanz massgeblich bestimmt: siehe Abbildung 29, Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32. Die Nutzung (B8) umfasst die Übertragungsverluste. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen sowie der Umweltbelastungspunkte sind die Übertragungsverluste bei den Bauverfahren der Erdverkabelung für die Hälfte, bei den Verfahren der Freileitungen für 75-82% der Gesamtumweltauswirkungen verantwortlich. Beim nicht erneuerbaren kumulierten Energieaufwand erzeugen die Übertragungsverluste bei der Erdverkabelung etwa zwei Drittel bzw. bei den Freileitungen 90% der gesamten Umweltauswirkungen. Die Übertragungsverluste liegen beim erneuerbaren kumulierten Energieaufwand noch höher und sind bei der Erdverkabelung je nach Bauverfahren für einen Anteil von 60-97% bzw. bei den Freileitungen für einen Anteil von 94-98% der Umweltauswirkungen verantwortlich.

Ferner zählt die Herstellungsphase (A1-3) zu den wichtigen Lebenszyklusphasen. Bei den Treibhausgasemissionen und den Umweltbelastungspunkten gehen je nach Bauverfahren die Hälfte bis ein Viertel der Umweltauswirkungen auf die Herstellungsphase (A1-3) zurück. Die Herstellungsphase spielt bei allen Stollen, bei den Mikrotunnel und beim «Strangrohr – Direct Pipe» in der Gesamtbetrachtung eine zentrale Rolle.

Die Lebenszyklusphasen Errichtung (A5), Austausch (B4), Energieverbrauch (B6), Transport (C2), Abfallaufbereitung, Entsorgung (C3-C4) haben in der Wirkungsabschätzung der

Lebenszyklusanalyse gesamthaft eine mittlere Bedeutung. Je nach Übertragungstechnologien elektrischer Energie weisen sie teils etwas höhere, teils etwas tiefere Werte aus.

Die Lebenszyklusphasen Transport (A4), Betrieb (B1), Wartung und Instandsetzung (B2-3), Rückbau und Ausserbetriebnahme (C1) und die Landnutzung beeinflussen das Gesamtergebnis der Ökobilanz der Übertragungstechnologien elektrischer Energie kaum.

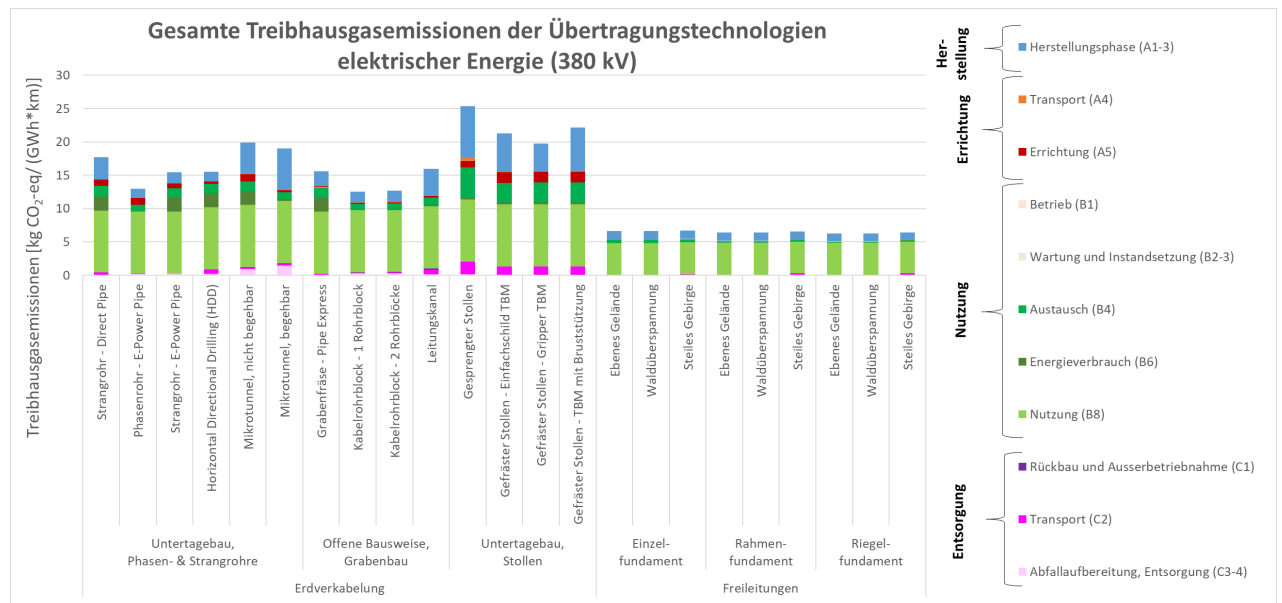


Abbildung 29: Gesamte Treibhausgasemissionen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

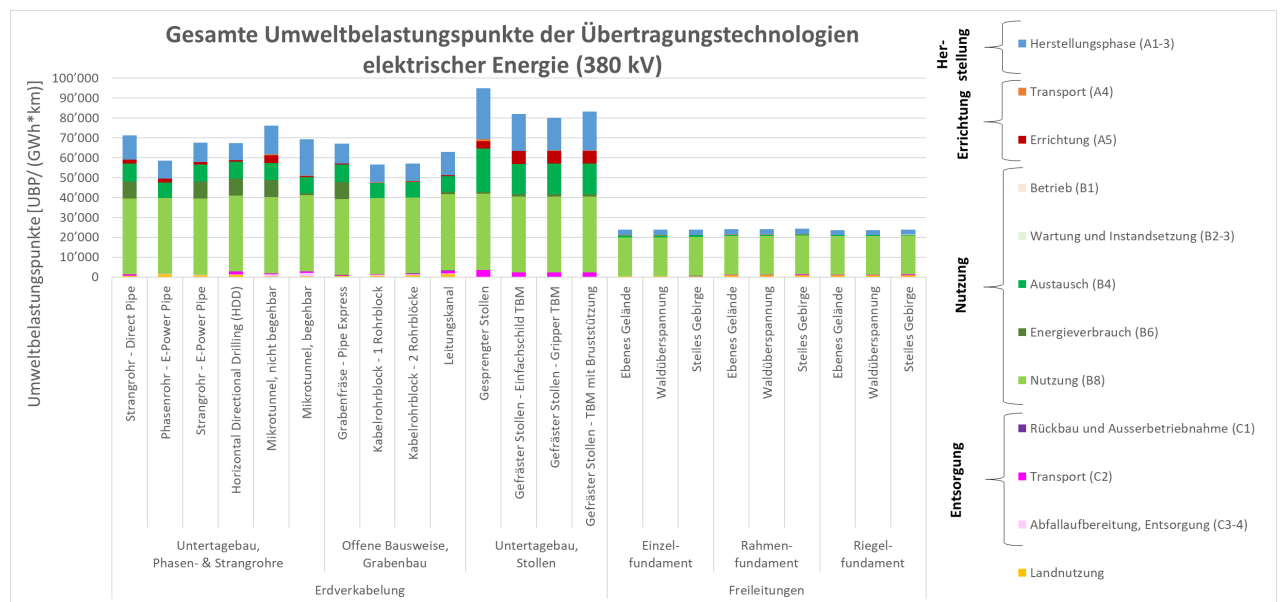


Abbildung 30: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

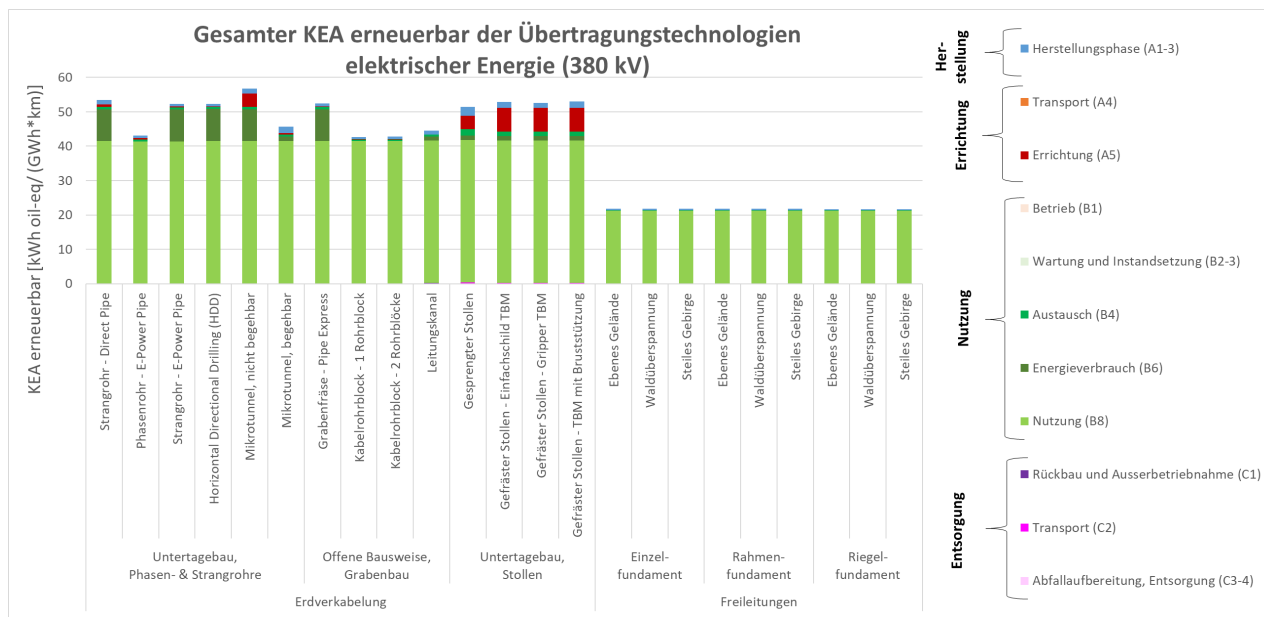


Abbildung 31: Gesamter KEA erneuerbar der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

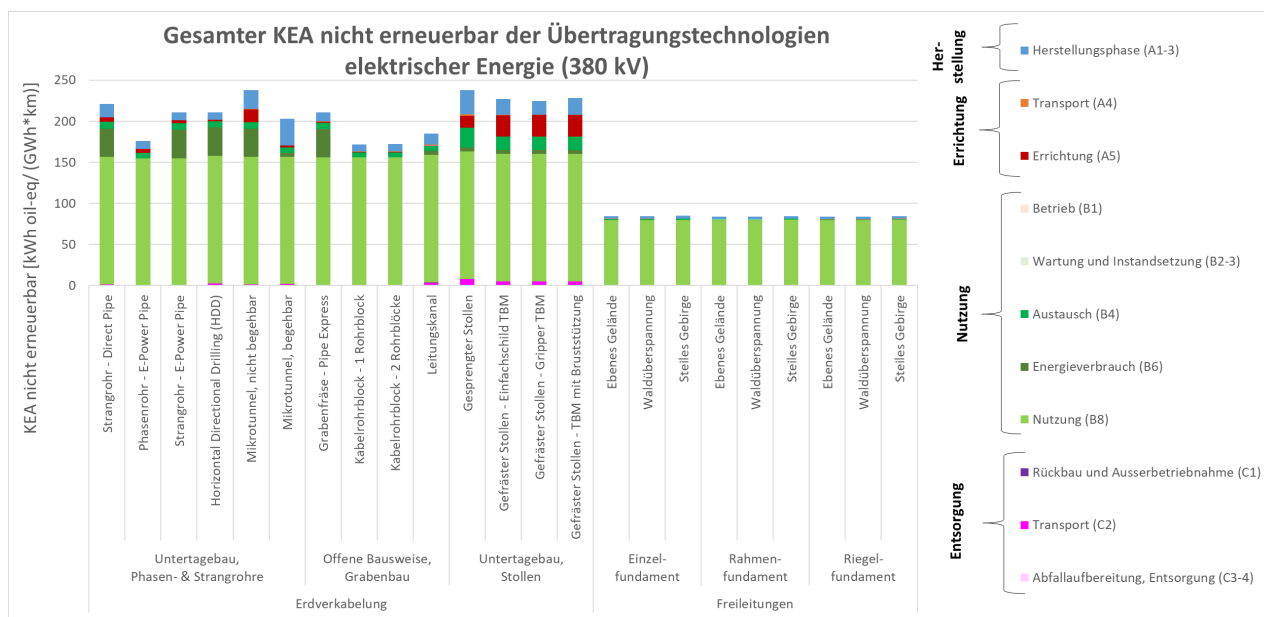


Abbildung 32: Gesamter KEA nicht erneuerbar der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

4.1.3 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transporte, Baumaschinen, Landnutzung (380 kV)

Die Kategorie «Ressourcen und Emissionen» verbucht alle Materialaufwände, die während eines gesamten Lebenszyklus verbaut werden. Darüber hinaus sind die Lachgas- und Ozonemissionen der Freileitungen in der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» verbucht. Die Kategorie «Energie» enthält die Übertragungsverluste und die Energie für die mechanische Lüftung, die Abwasservorbehandlungsanlage, den Betrieb, die Instandsetzung und den Austausch. Die Kategorie «Transporte» umfasst die gesamten internen und externen Transporte aller Lebenszyklusphasen. In der Kategorie Baumaschinen sind alle Baumaschinenstunden für die Errichtung, die Instandsetzung, den Austausch und für den Rückbau enthalten: siehe Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36.

Die Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV zeigt, dass die Kategorien «Energie» sowie «Ressourcen und Emissionen» für die Ökobilanz in der Gesamtbetrachtung am relevantesten sind. Die Kategorie «Energie» prägt das Gesamtergebnis der Ökobilanz am deutlichsten. Die Kategorie «Ressourcen und Emissionen» beeinflusst das Gesamtergebnis der Ökobilanz ebenso erheblich, und zwar vor allem bei den Wirkungsabschätzungsmethoden «Treibhausgasemissionen» und «Methode der ökologischen Knappheit». Grund hierfür ist die verbaute Materialmenge, die bei allen Stollen, bei den Mikrotunnel und beim «Strangrohr – Direct Pipe» gegenüber den anderen Übertragungstechnologien elektrischer Energie besonders hoch ist. Bei den o.g. beiden Wirkungsabschätzungsmethoden sind ebenso Elektro- und Metallteile für hohe Treibhausgasemissionen verantwortlich, da diese bei besagten Bauverfahren in grossen Mengen verbaut sind. Bei den Freileitungen sind wiederum die Metallkomponenten, wie der Masten und die Mikropfähle, sowie der verwendete Beton für die Höhe der gesamten Umweltauswirkungen von zentraler Bedeutung. Die Emissionen wie Lachgas und Ozon bei den Freileitungen spielen eine untergeordnete Rolle (bei den Bauverfahren der Erdverkabelung entstehen keine Lachgas- und Ozonemissionen). Die Transporte, die Baumaschinen und die Landnutzung weisen bei allen Übertragungstechnologien elektrischer Energie in der Gesamtbetrachtung geringe Umweltauswirkungen auf.

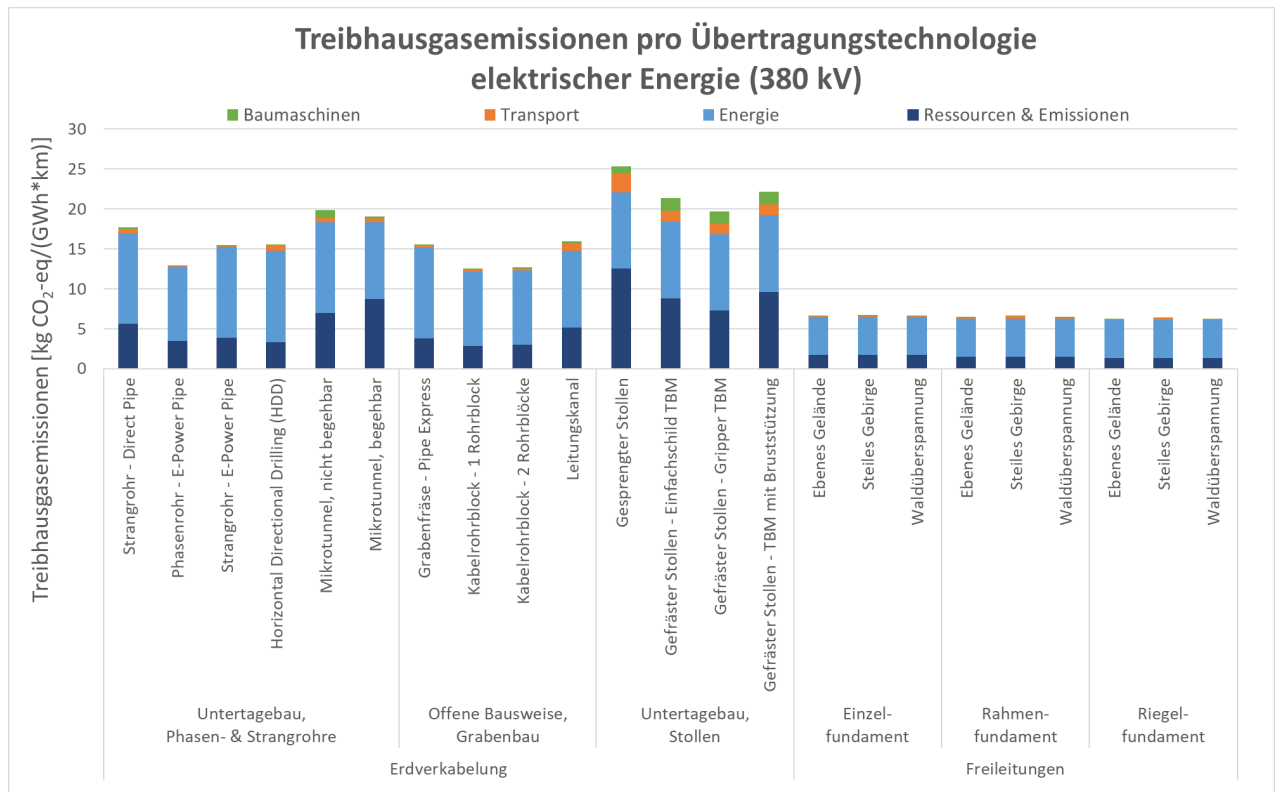


Abbildung 33: Treibhausgasemissionen pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen

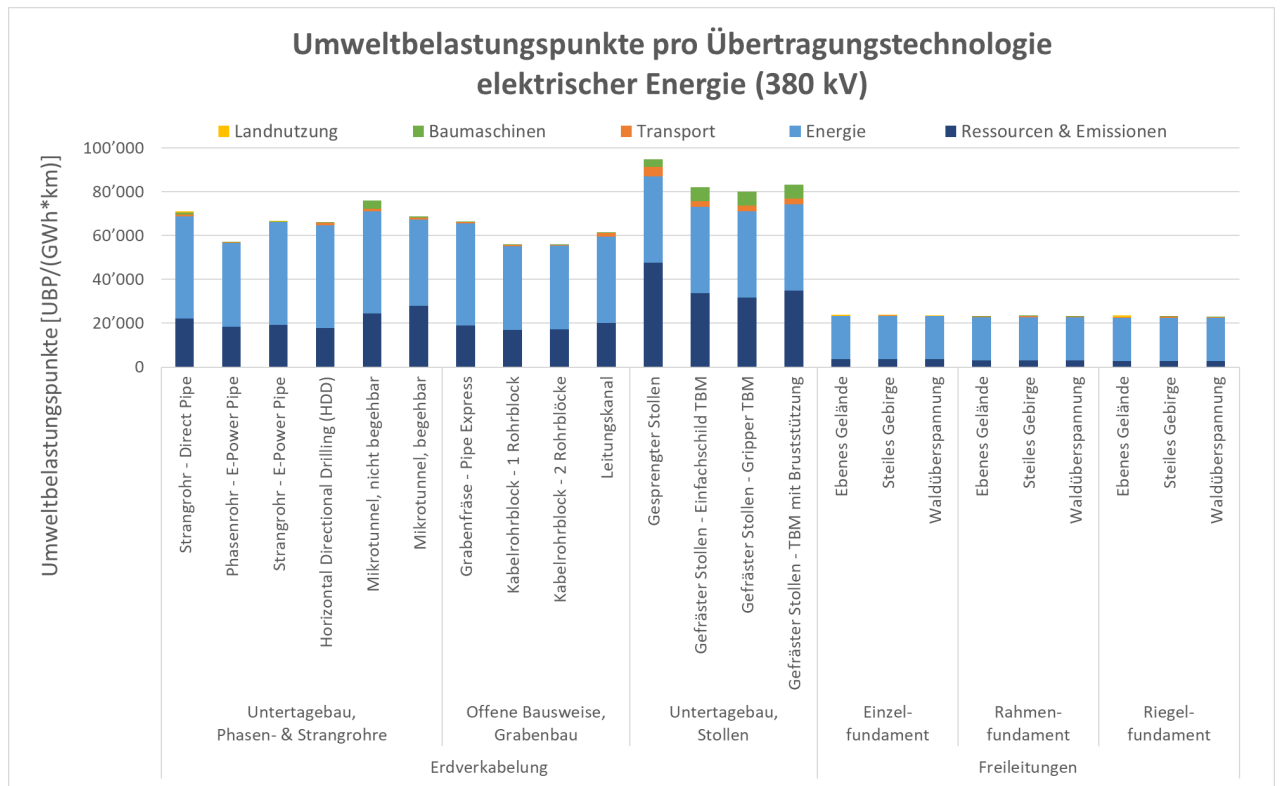


Abbildung 34: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung

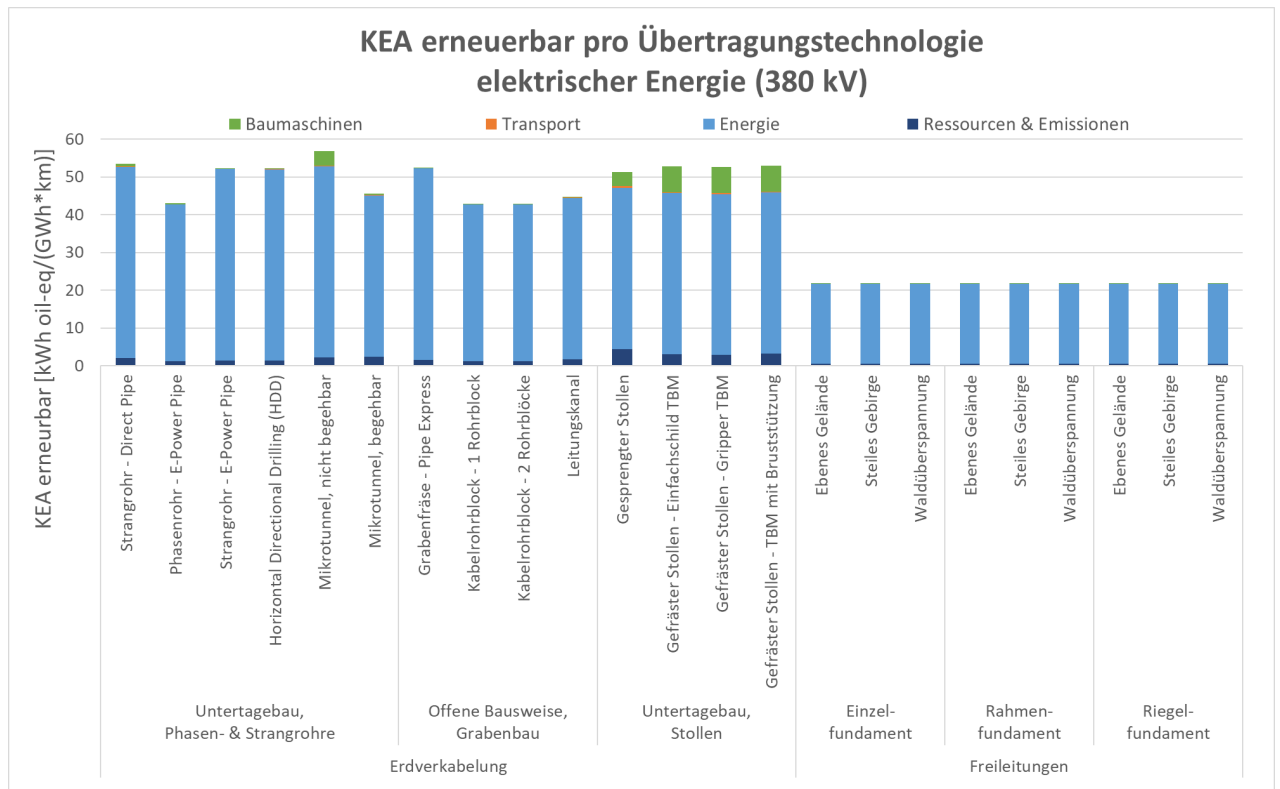


Abbildung 35: KEA erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen

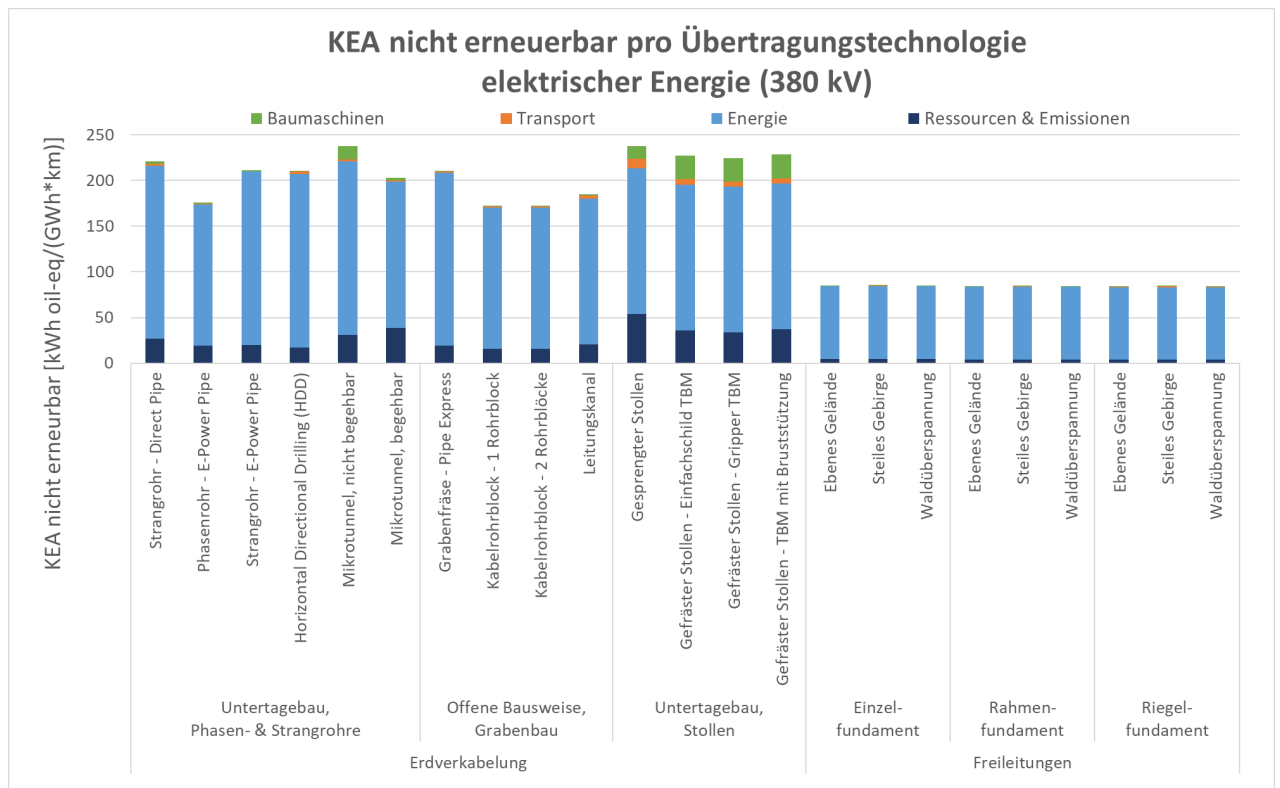


Abbildung 36: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen

4.1.4 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen sowie Energie bei der Erdverkabelung (380 kV)

Die Betrachtung der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» erfolgt bei der Erdverkabelung mittels der Wirkungsabschätzungsmethode «Methode der ökologischen Knappheit» gemäss der Einheit «Umweltbelastungspunkte, UBP». Denn diese Wirkungsabschätzungsmethode berücksichtigt die meisten für die Umwelt relevanten Gesichtspunkte.

Die Wirkungsabschätzung zeigt, dass alle Komponenten, die ein oder mehrere Metalle enthalten, hohe Umweltauswirkungen aufweisen: siehe Abbildung 37. Die Kabel führen bei allen Bauverfahren zu erhöhten Umweltauswirkungen, da die in ihnen enthaltenen Basismetalle (Kupfer und Aluminium) bei der «Methode der ökologischen Knappheit» verstärkt zu Buche schlagen. Weitere Komponenten mit erhöhten Umweltauswirkungen sind die Elektroverteilung der Stollen, die Kabelschutzrohre aus Stahl bei den Bauverfahren «Strangrohr – Direct Pipe» und «Grabenfräse – Pipe Express», der Bewehrungsstahl beim Bauverfahren «Leitungskanal» und die Stahlbetonrohre der Mikrotunnel.

Komponenten mit mittleren Umweltauswirkungen sind der Spritzbeton, die Leittechnik-Schaltanlagen bei den Stollen, die Kabelschlitten bei den Bauverfahren der Erdverkabelung «Leitungskanal», «Grabenfräse – Pipe Express», «Strangrohr – E-Power Pipe», «Strangrohr – Direct Pipe» und den Mikrotunnel. Der verbrauchte Diesel erzeugt ebenfalls eine mittlere Umweltbelastung; er wird bei den Bauverfahren der Erdverkabelung «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Strangrohr – E-Power Pipe», «Strangrohr – Horizontal Directional Drilling (HDD)» und «Strangrohr – Direct Pipe» verwendet.

Die Wirkungsabschätzung der Kategorie «Energie» zeigt, dass sich Umweltauswirkungen aus den Übertragungsverlusten der sechs Kabel (siehe Abbildung 38) und der mechanischen Lüftung (sofern vorhanden) ergeben. Die Übertragungsverluste pro sechs Kabel sind je Bauverfahren für 80-100% der Umweltauswirkungen verantwortlich.

Ressourcen und Emissionen - Erdverkabelung (380 kV)

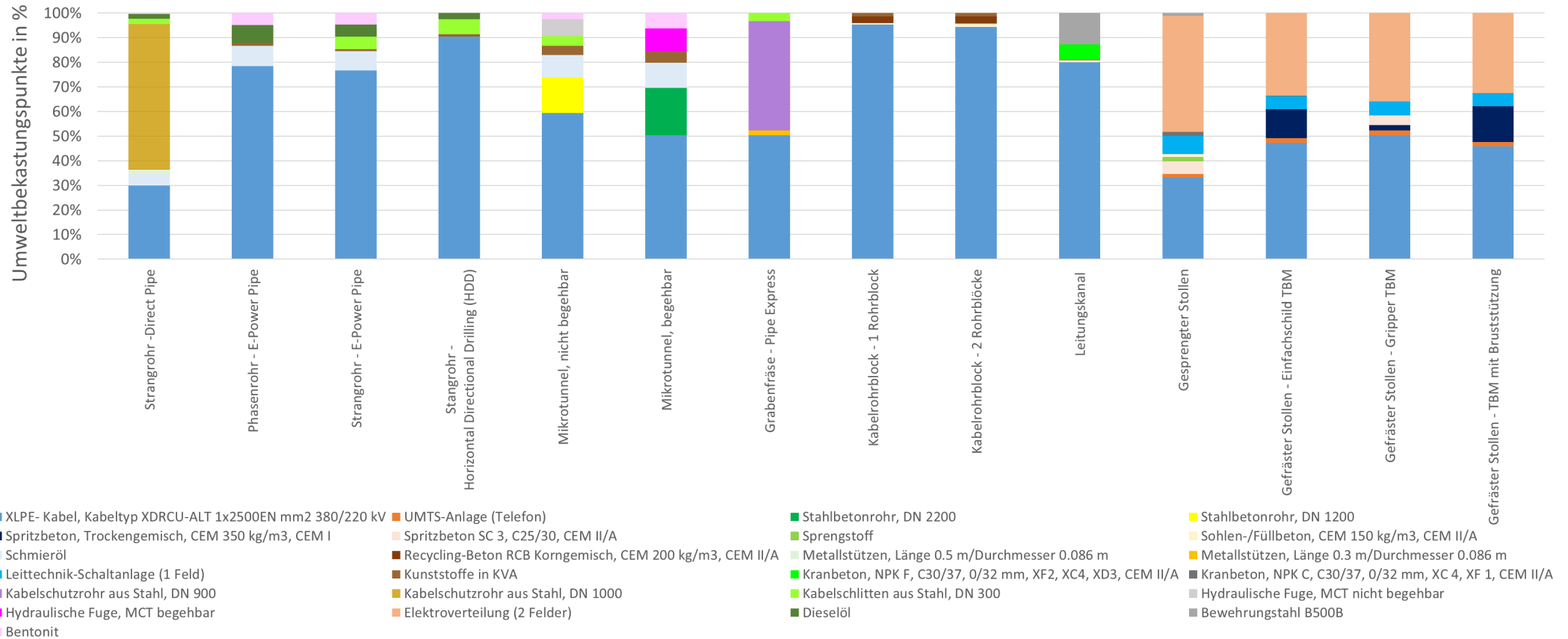


Abbildung 37: Ressourcen und Emissionen – Erdverkabelung (380 kV), Umweltbelastungspunkte

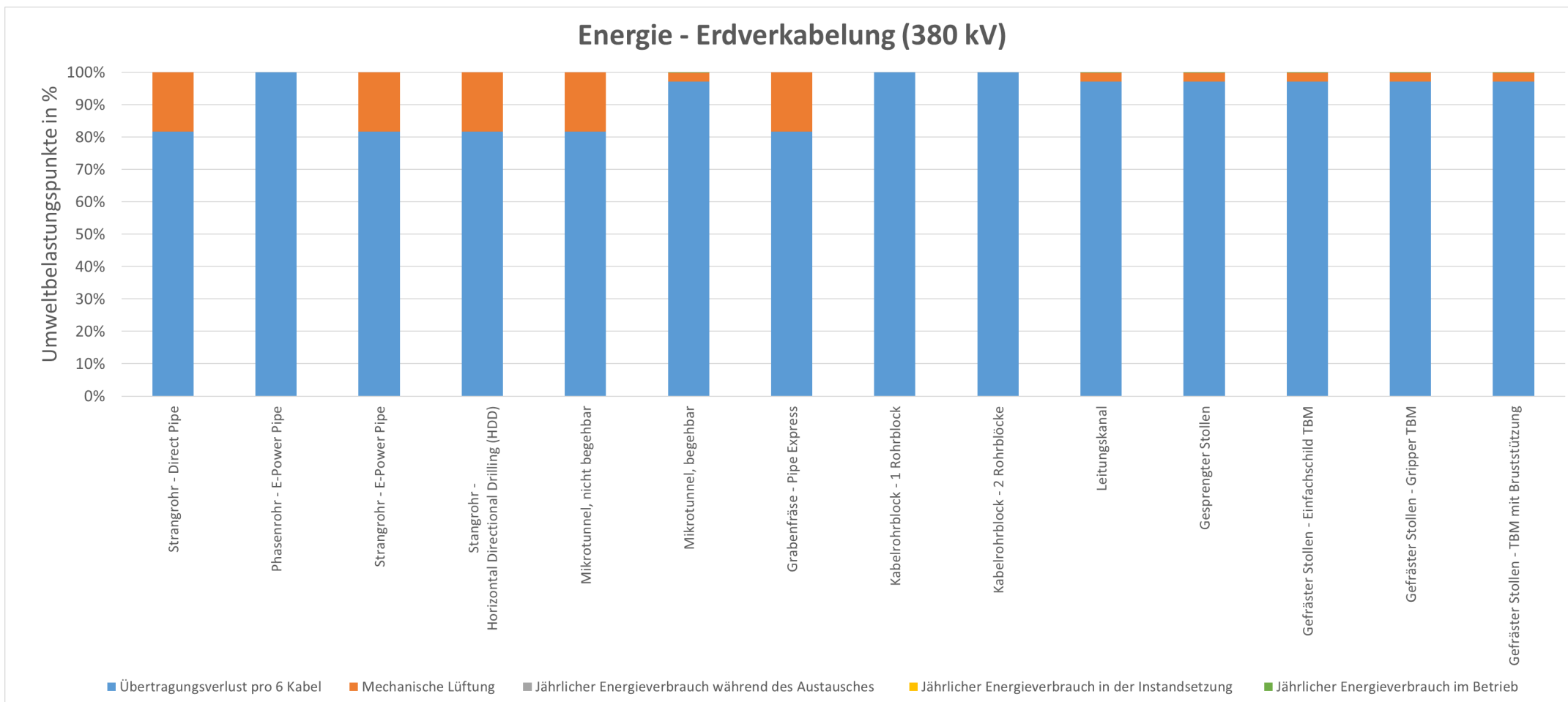


Abbildung 38: Energie – Erdverkabelung (380 kV), Umweltbelastungspunkte

4.1.5 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen sowie Energie bei den Freileitungen (380 kV)

Die Kategorie «Energie» bestimmt bei den Freileitungen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung – unabhängig der gewählten Wirkungsabschätzungsmethode – beinahe vollständig. Sie ist für 80%-95% der Umweltauswirkungen verantwortlich (je nach Topografie und Fundamenttyp). Sie umfasst ausschliesslich die Übertragungsverluste, da während des gesamten Lebenszyklus der Freileitungen keine weiteren Energieaufwände entstehen. Die Ressourcen und Emissionen nehmen in der Gesamtbetrachtung bei allen vier Wirkungsabschätzungsmethoden eine untergeordnete Rolle ein, siehe Abbildung 39.

Hinsichtlich der Umweltbelastungspunkte ist die Energie für 85% der Umweltauswirkungen verantwortlich. Die Übertragungsverluste sind für alle Topografien und Fundamenttypen gleich hoch und betragen pro funktionelle Einheit $1.02 \cdot 10^{-4}$ GWh. Weitere Energieaufwände fallen bei der Errichtung der Freileitungen an, die bei den Baumaschinen unter Verbrauch elektrischer Energie- und Dieserverbrauch verbucht sind.

Die Ressourcen und Emissionen umfassen gesamthaft 15% der Umweltauswirkungen. Wichtige Materialien bzw. Komponenten sind die Leiterseile aus Aldrey, der verzinkte Stahl für die Masten sowie der Bewehrungsstahl und die Mikropfähle der Fundamente, die für einen Grossteil der Umweltauswirkungen verantwortlich sind. Für einen kleinen Anteil der Umweltauswirkungen sind schliesslich die Komponenten wie Abspann- und Tragketten, das Erdseil sowie der Beton für die Fundamente verantwortlich.

Ressourcen und Emissionen, Energie - Freileitungen (380 kV)

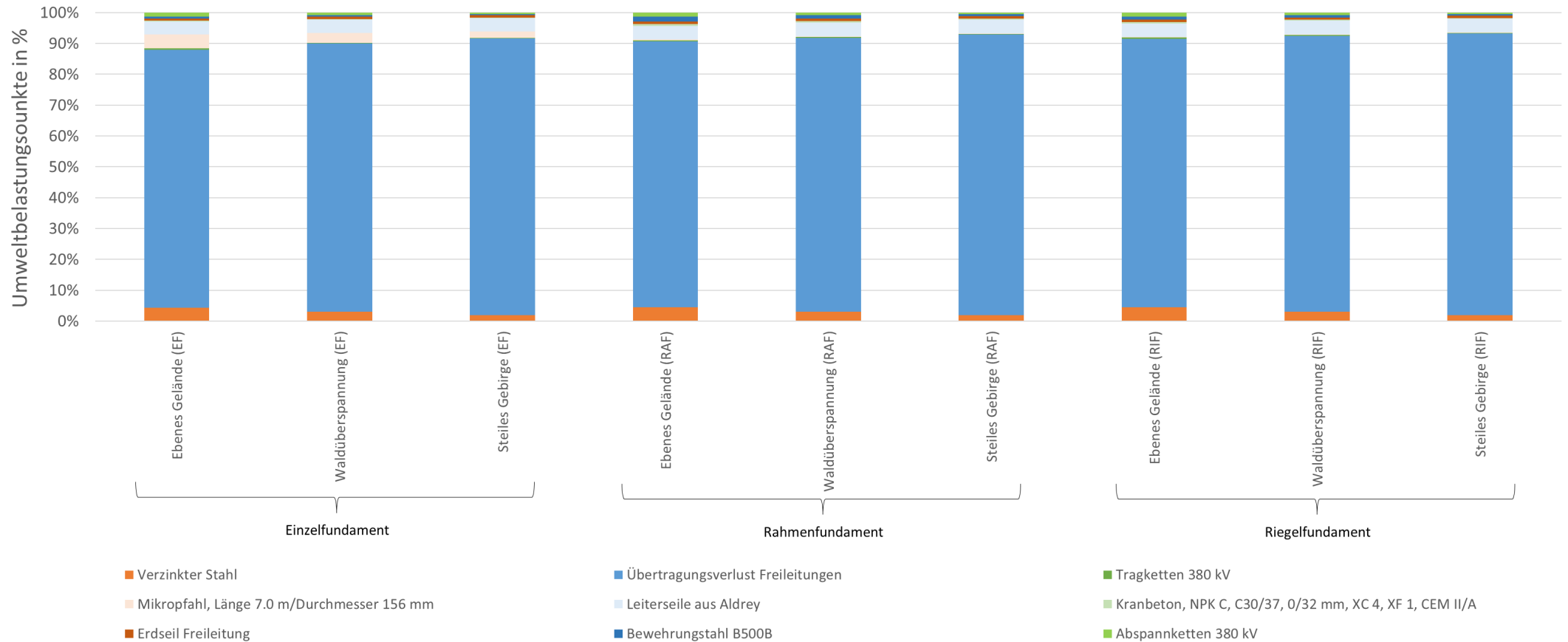


Abbildung 39: Ressourcen und Emissionen, Energie – Freileitungen (380 kV)

4.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV

4.2.1 Kumulierte Wirkungsabschätzung (220 kV)

Die kumulierte Wirkungsabschätzung der Übertragungstechnologien elektrischer Energie belegt, dass die Bauverfahren der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV dasselbe Ausmass an Umweltauswirkungen wie auf der Spannungsebene 380 kV aufweisen. Die Freileitungen hingegen zeigen bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden auf der Höchstspannungsebene 220 kV höhere Umweltauswirkungen als auf der Spannungsebene 380 kV. Die Umweltauswirkungen der einzelnen Bauverfahren unterscheiden sich bei Freileitungen nicht wesentlich voneinander; hingegen weisen die einzelnen Bauverfahren der Erdverkabelung unterschiedlich hohe Umweltauswirkungen auf: siehe Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43.

Auf der Höchstspannungsebene 220 kV führen die Freileitungen bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden zu geringeren oder vergleichbar hohen Umweltauswirkungen wie die Bauverfahren der Erdverkabelung. Dies ist durch die im Vergleich zur Erdverkabelung erhöhten Übertragungsverluste von Freileitungen zu erklären. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen weisen die Bauverfahren der Freileitungen eine höhere Umweltauswirkung als die Bauverfahren der Kabelrohrblöcke auf. Hinsichtlich der Umweltbelastungspunkte ergeben sich für die Bauverfahren der Freileitungen tiefere Umweltauswirkungen als für alle Bauverfahren der Erdverkabelung; im Vergleich zu den Bauverfahren der Kabelrohrblöcke liegen die Umweltauswirkungen jedoch auf ähnlich hohem Niveau.

Beim kumulierten nicht erneuerbaren Energieaufwand weisen die Bauverfahren der Freileitungen deutlich höhere Umweltauswirkungen als manche Bauverfahren der Erdverkabelung auf. Vergleichbar hohe Umweltauswirkungen wie aus den Bauverfahren der Freileitungen ergeben sich aus dem Bauverfahren «Mikrotunnel, begehbar». Die Bauverfahren «Leitungskanal», «Phasenrohr – E-Power Pipe» und die Bauverfahren der Kabelrohrblöcke haben tiefere Umweltauswirkungen als die Bauverfahren der Freileitungen. Beim kumulierten erneuerbaren Energieaufwand sind die Bauverfahren der Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung für vergleichbar hohe oder höhere Umweltauswirkungen verantwortlich. Einzig das Bauverfahren «Mikrotunnel, begehbar» weist höhere Umweltauswirkungen als die Bauverfahren der Freileitungen auf.

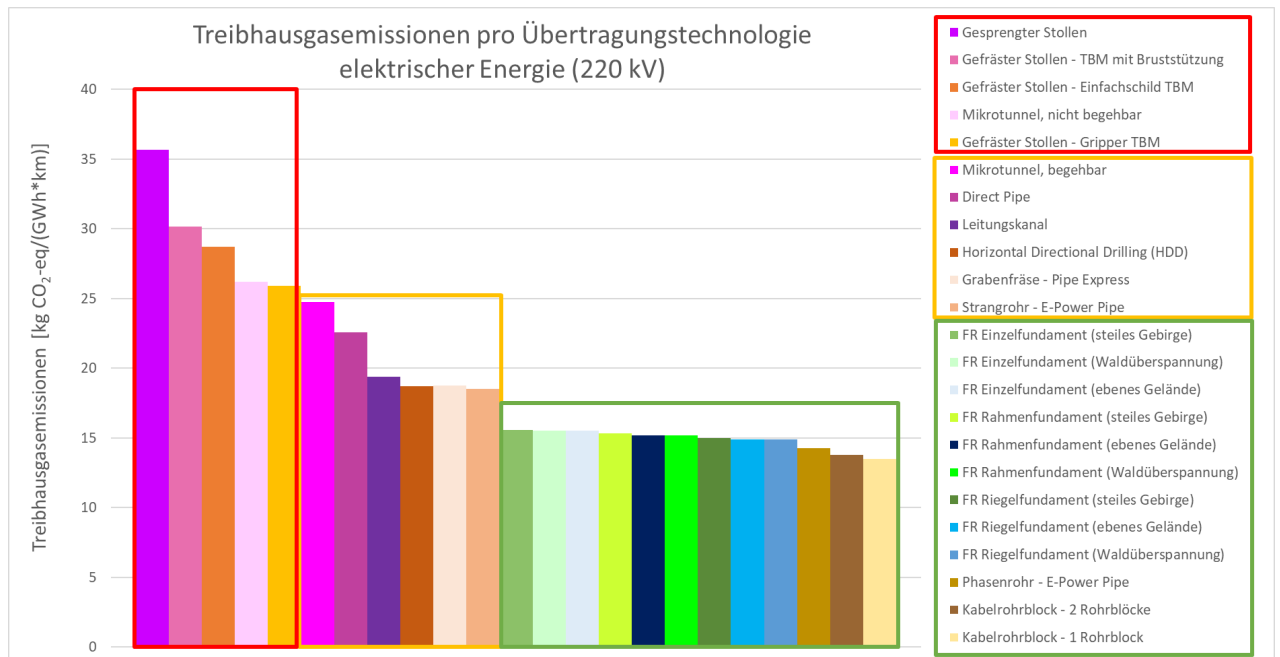


Abbildung 40: Treibhausgasemissionen pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert

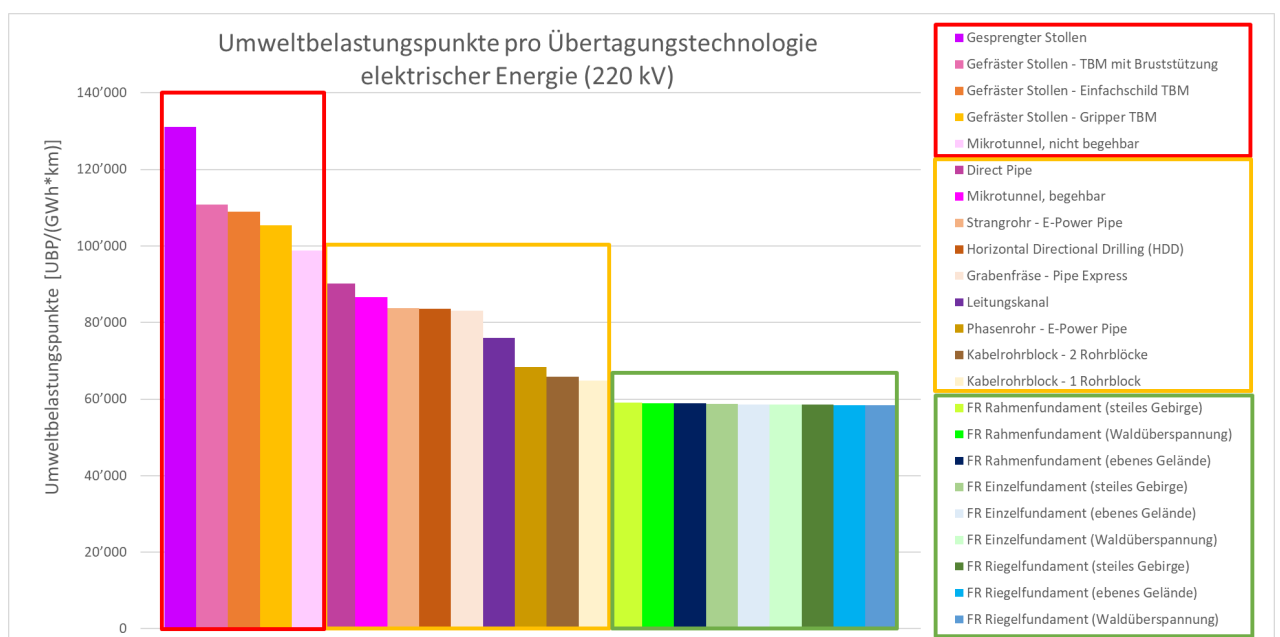


Abbildung 41: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert

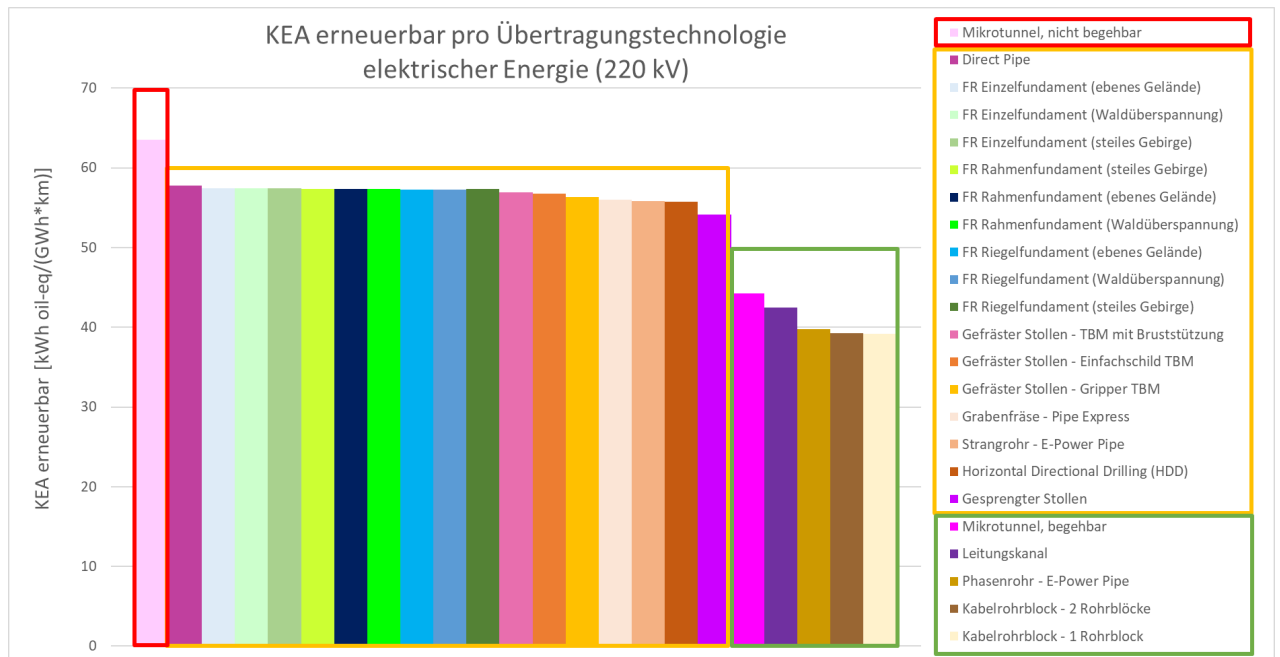


Abbildung 42: KEA erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert

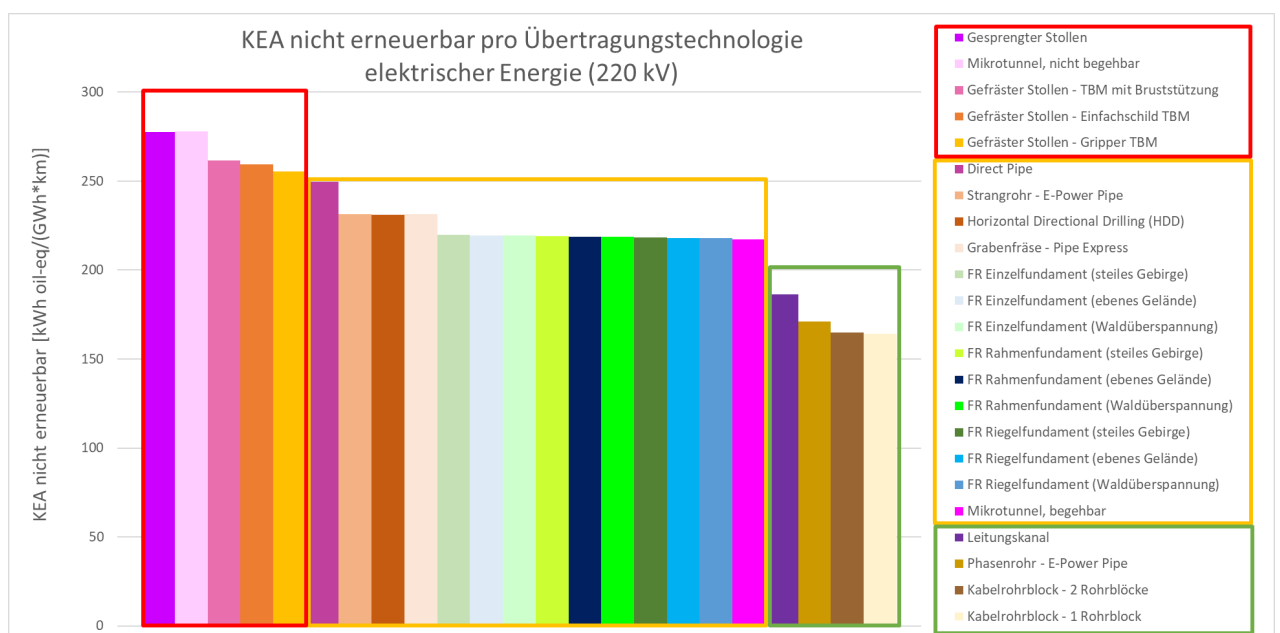


Abbildung 43: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV), kumuliert

4.2.2 Wirkungsabschätzung nach Lebenszyklusphasen (220 kV)

Die Übertragungstechnologien elektrischer Energie der Erdverkabelung weisen auf der Höchstspannungsebene 220 kV höhere Umweltauswirkungen als die Bauverfahren auf der Höchstspannungsebene 380 kV auf: siehe Abbildung 44 und Abbildung 45. Die Umweltauswirkungen liegen bei den Bauverfahren der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV um den Faktor 1,2 bis 1,4 höher als auf der Höchstspannungsebene 380 kV.

Die Ursache hierfür liegt in der Systemeffizienz. Der Materialaufwand ist bei beiden Höchstspannungsebenen vergleichbar hoch, doch lässt sich bei der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV weniger elektrische Energie als bei der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 380 kV übertragen. Die Übertragungsverluste sind bei der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV etwa um die Hälfte geringer als auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Die geringeren Übertragungsverluste gleichen den Effekt der geringeren übertragenen elektrischen Energie nicht aus.

Die Umweltauswirkungen der Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV sind 2,5-mal höher als auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Der Grund für diesen massiven Zuwachs an Umweltauswirkungen liegt in den erhöhten Übertragungsverlusten. Die Übertragungsverluste der Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV liegen um rund 1,5-mal höher als auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Die Analyse der Höchstspannungsebene 380 kV macht deutlich, dass die Übertragungsverluste den Grossteil der Umweltauswirkungen ausmachen. Bei Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV wird dieser Effekt noch einmal deutlicher, da die Übertragungsverluste 1,5-mal höher liegen und die übertragene elektrische Energie um die Hälfte kleiner ist.

Die einzelnen Lebenszyklusphasen der Bauverfahren der Erdverkabelung ergeben auf beiden Höchstspannungsebenen unterschiedliche Ergebnisse. Deutlich wird, dass die Bauverfahren der Erdverkabelung – mit Ausnahme der Nutzung (B8) – auf der Höchstspannungsebene 220 kV in allen Lebenszyklusphasen um 1,7-mal höhere Umweltauswirkungen aufweisen als auf der Höchstspannungsebene 380 kV. Die Umweltauswirkungen der Nutzung (B8) sind bei den Bauverfahren der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV um 11,7% geringer als auf der Höchstspannungsebene 380 kV.

Die Nutzung (B8) beeinflusst auf beiden Höchstspannungsebenen das Gesamtergebnis der Umweltbelastungspunkte der Freileitungen. Dabei führt die Nutzung (B8) auf der Höchstspannungsebene 220 kV zu 2,7-mal höheren Umweltauswirkungen als auf der Ebene 380 kV. Die Herstellungsphase (A1-3) zeigt auf der Höchstspannungsebene 220 kV 1,5-mal höhere Umweltauswirkungen als auf der Ebene 380 kV. Die Umweltauswirkungen der restlichen Lebenszyklusphasen auf der Höchstspannungsebene 220 kV liegen um 1,5-mal bis 1,7-mal höher als auf der Ebene 380 kV.

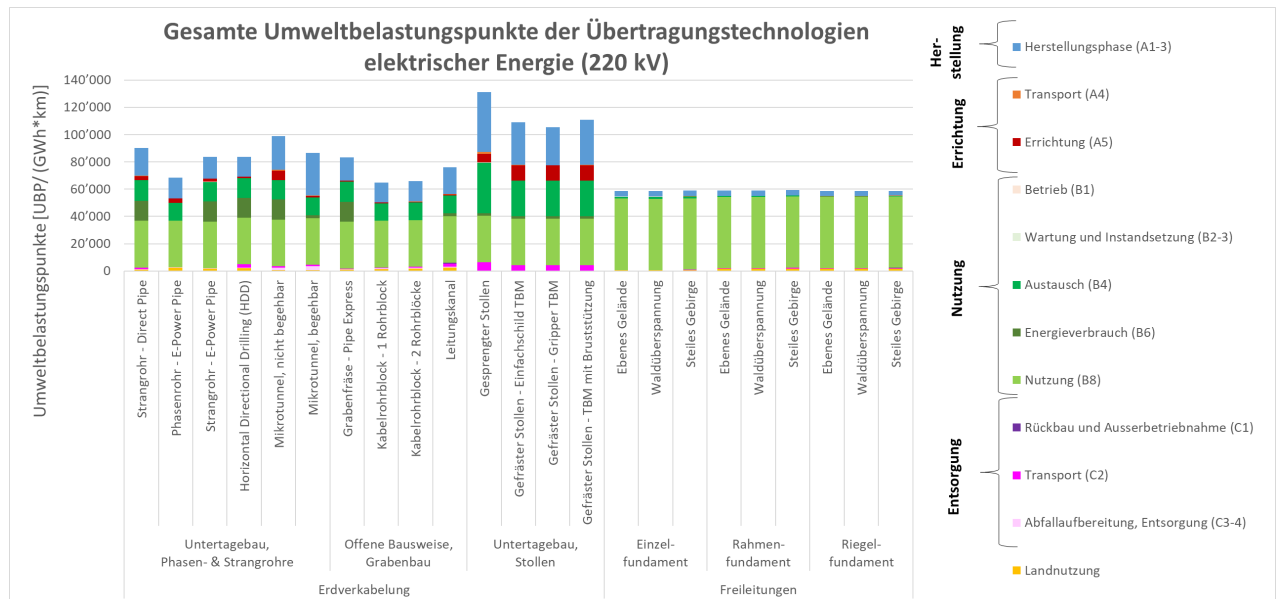


Abbildung 44: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

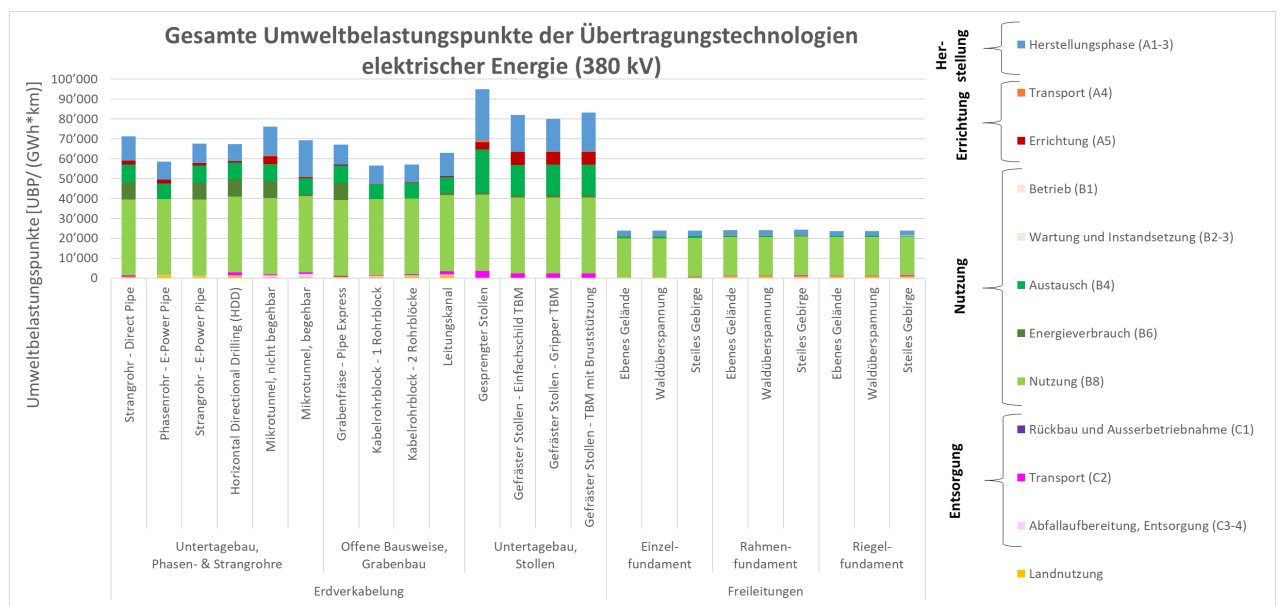


Abbildung 45: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

4.2.3 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transporte, Baumaschinen, Landnutzung (220 kV)

Die Wirkungsabschätzung belegt, dass die Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV wesentlich höhere Umweltauswirkungen als auf der Höchstspannungsebene 380 kV aufweisen: siehe Abbildung 46 und Abbildung 47.

Die Ressourcen und Emissionen sind auf der Höchstspannungsebene 220 kV mit den höchsten Umweltauswirkungen behaftet und übersteigen die Umweltauswirkungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV: siehe Abbildung 46 und Abbildung 47. Die Kategorie «Energie» weist auf den Höchstspannungsebenen 220 kV und 380 kV vergleichbar hohe Werte auf. Die Baumaschinen leisten bei den Stollen und beim «Mikrotunnel, nicht begehbar» einen geringen Beitrag zum Gesamtergebnis der Umweltbelastungspunkte. Der Transport sowie die Landnutzung nehmen auf beiden Höchstspannungsebenen eine untergeordnete Rolle in der Gesamtbetrachtung der Wirkungsabschätzung ein.

Die Kategorie «Energie» ist bei den Freileitungen – unabhängig von der Höchstspannungsebene – für die höchsten Umweltauswirkungen verantwortlich. Sie bestimmt quasi vollständig das Gesamtergebnis der Ökobilanz. Kleine Beiträge zum Gesamtergebnis liefern die Kategorien «Ressourcen und Emissionen» sowie «Landnutzung».

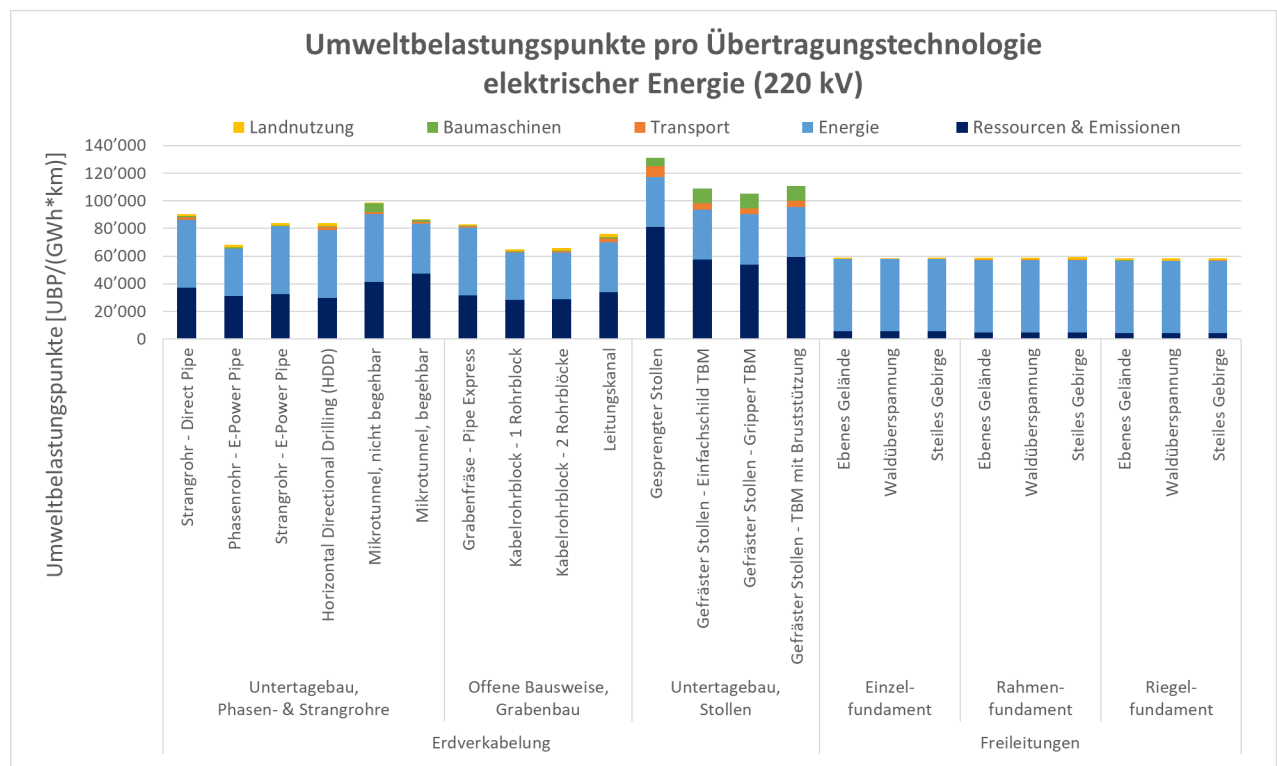


Abbildung 46: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (220 kV) nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung

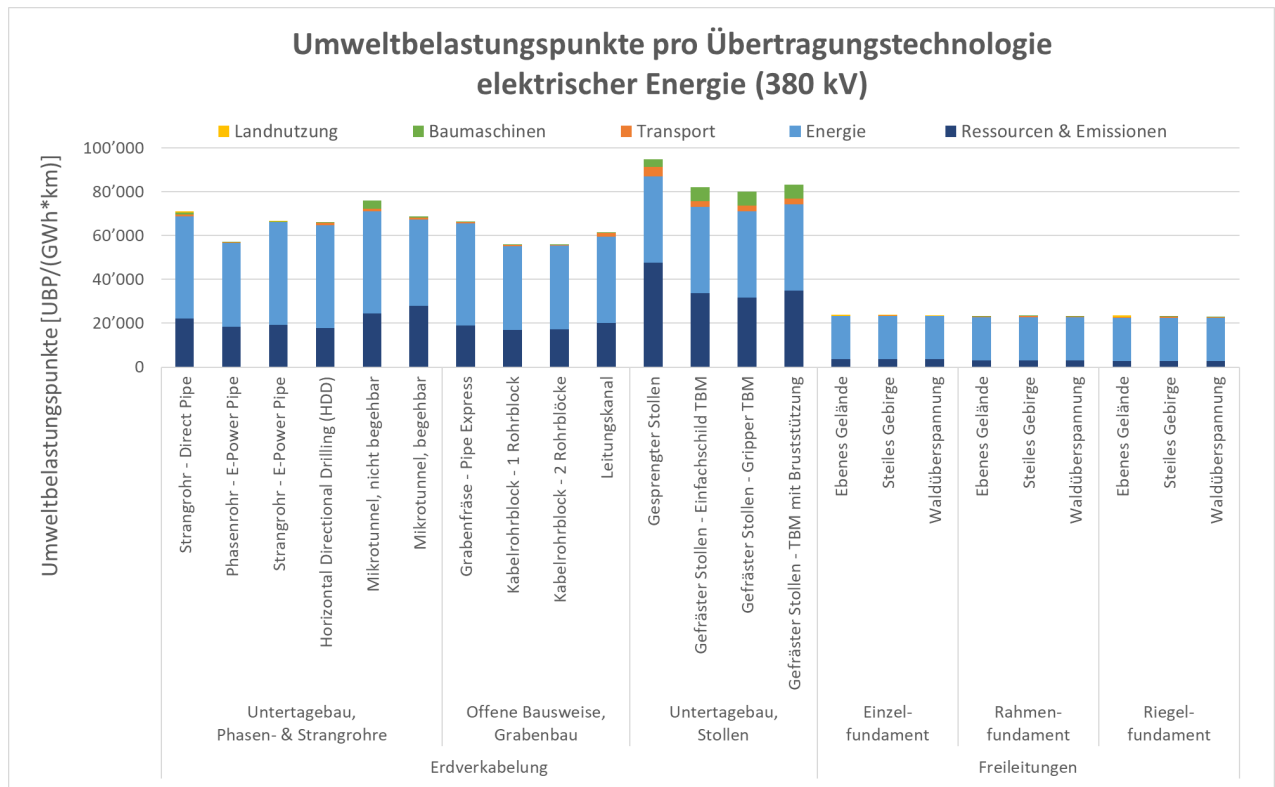


Abbildung 47: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie (380 kV) nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen, Landnutzung

4.3 Sensitivitätsanalyse

4.3.1 Parameter 1: Lebensdauer der Kabel

Die Variation der Lebensdauer der Kabel in der Modellrechnung illustriert, dass sich die Umweltauswirkungen mit zunehmender Lebensdauer der Kabel im Falle der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebenen 380 kV minimieren lassen. Der Umfang der Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase bleibt je nach Lebensdauer der Kabel unverändert. Einzig die durch den Austausch (B4) hervorgerufenen Umweltauswirkungen nehmen mit zunehmender Lebensdauer der Kabel ab. Durch den Kabelaustausch nach 60 Jahren lassen sich insgesamt 6,9% der Umweltauswirkungen vermeiden, durch den Wegfall des Kabelaustausches nach 80 Jahren 10,4%: siehe Abbildungen 48, 49 und 50.

Die Umweltauswirkungen der Bauverfahren der Erdverkabelung lassen sich zwar effizient senken, doch weisen die Bauverfahren der Erdverkabelung immer noch höhere Umweltauswirkungen auf als diejenigen der Freileitungen. Damit bleiben die Hauptaussagen bzw. die Ergebnisse aus dem Variantenstudium aufrecht.

Fazit: Die Lebensdauer der Kabel der Bauverfahren der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 380 kV beeinflusst das Gesamtergebnis der Ökobilanz nicht.

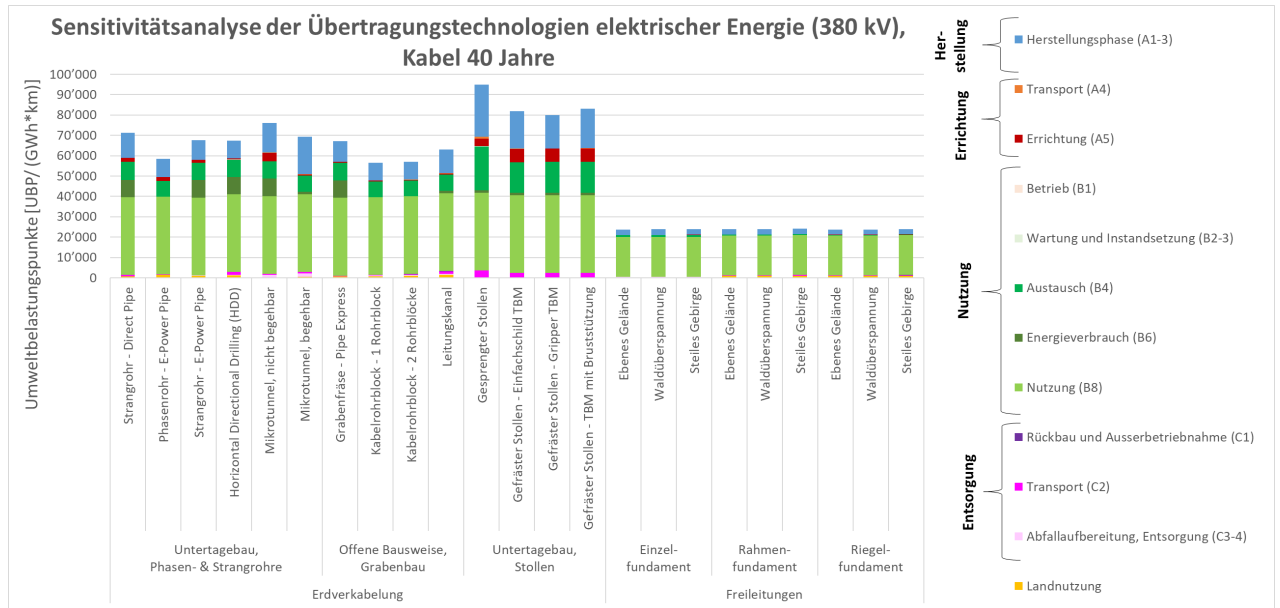


Abbildung 48: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Lebensdauer der Kabel 40 Jahre

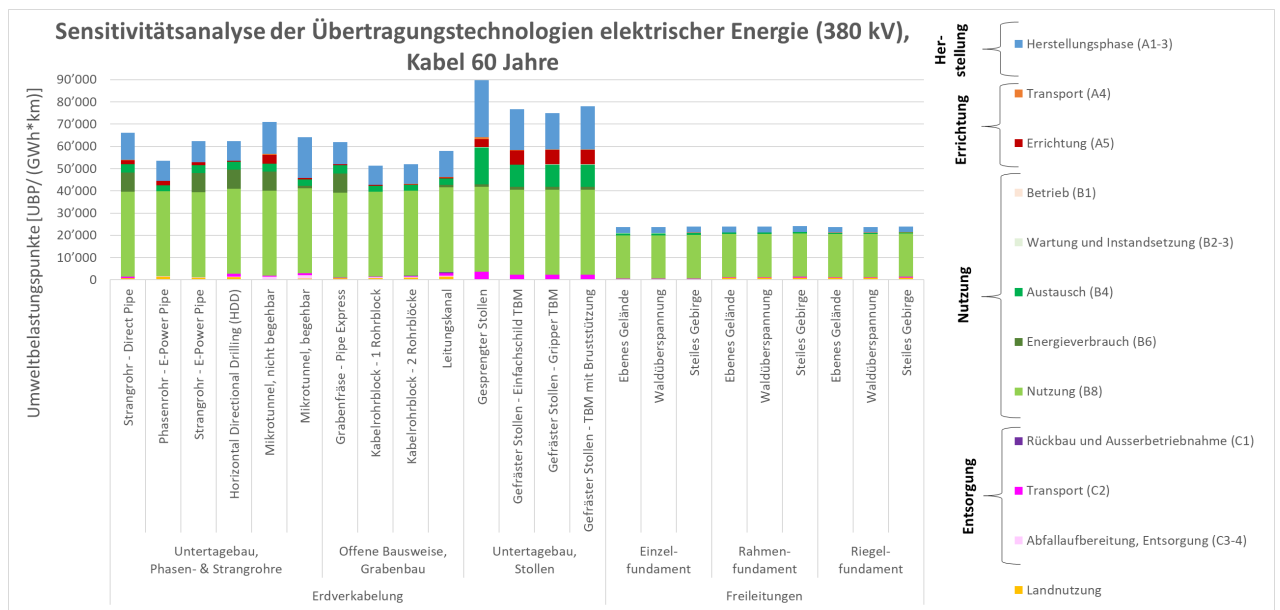


Abbildung 49: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Lebensdauer der Kabel 60 Jahre

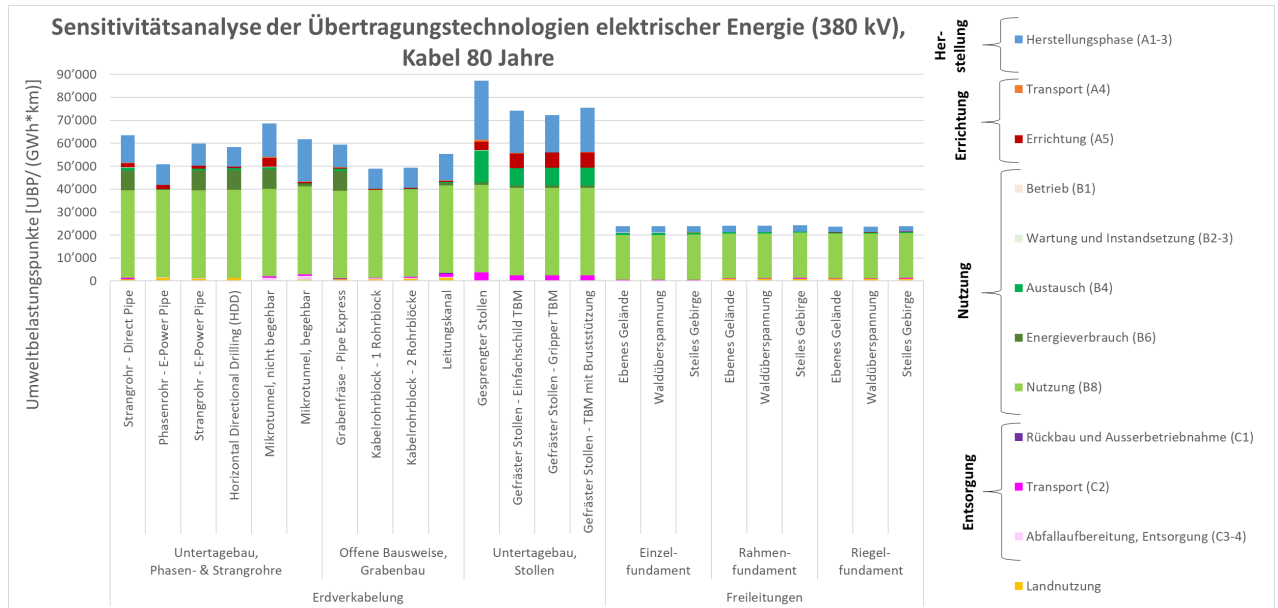


Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Lebensdauer der Kabel 80 Jahre

Die Variation der Lebensdauer der Kabel in der Modellrechnung zeigt, dass sich die Umweltauswirkungen bei zunehmender Lebensdauer der Kabel im Falle der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf den Höchstspannungsebenen 220 kV vermeiden lassen. Der Umfang der Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase bleibt je nach Lebensdauer der Kabel unverändert. Einzig die durch den Austausch (B4) hervorgerufenen Umweltauswirkungen nehmen bei zunehmender Lebensdauer der Kabel ab. Durch den Austausch der Kabel nach 60 Jahren lassen sich insgesamt 9,0% der Umweltauswirkungen vermeiden, durch den Wegfall des Austausches der Kabel nach 80 Jahren 13,5%: siehe Abbildungen Abbildung 51, Abbildung 52 und Abbildung 53.

Es zeigt sich, dass die Verlängerung der Lebensdauer der Kabel einen kleinen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Ökobilanz ausübt. Die durch den Austausch der Kabel nach 40 Jahren hervorgerufene Menge an Umweltbelastungspunkten bei Freileitungen ist mit der Menge an Umweltbelastungspunkten der Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» und «Kabelrohrblock – 2 Rohrblocke» vergleichbar. Wird die Lebensdauer der Kabel jedoch erhöht, verändert sich das Verhältnis der Umweltauswirkungen der Freileitungen zu den Umweltauswirkungen der Bauverfahren der Erdverkabelung. Die Umweltauswirkungen der Bauverfahren der Erdverkabelung lassen sich verringern. Umgekehrt bedeutet dies, dass die Freileitungen zusätzlich vergleichbare Umweltauswirkungen wie die Bauverfahren «Strangrohr – E-Power Pipe» und «Leitungskanal» aufweisen.

Fazit: Die Lebensdauer der Kabel bei den Bauverfahren der Erdverkabelung beeinflusst das Gesamtergebnis der Ökobilanz auf der Höchstspannungsebene 220 kV mässig. Die Hauptaussagen des Variantenstudiums bleiben bestehen.

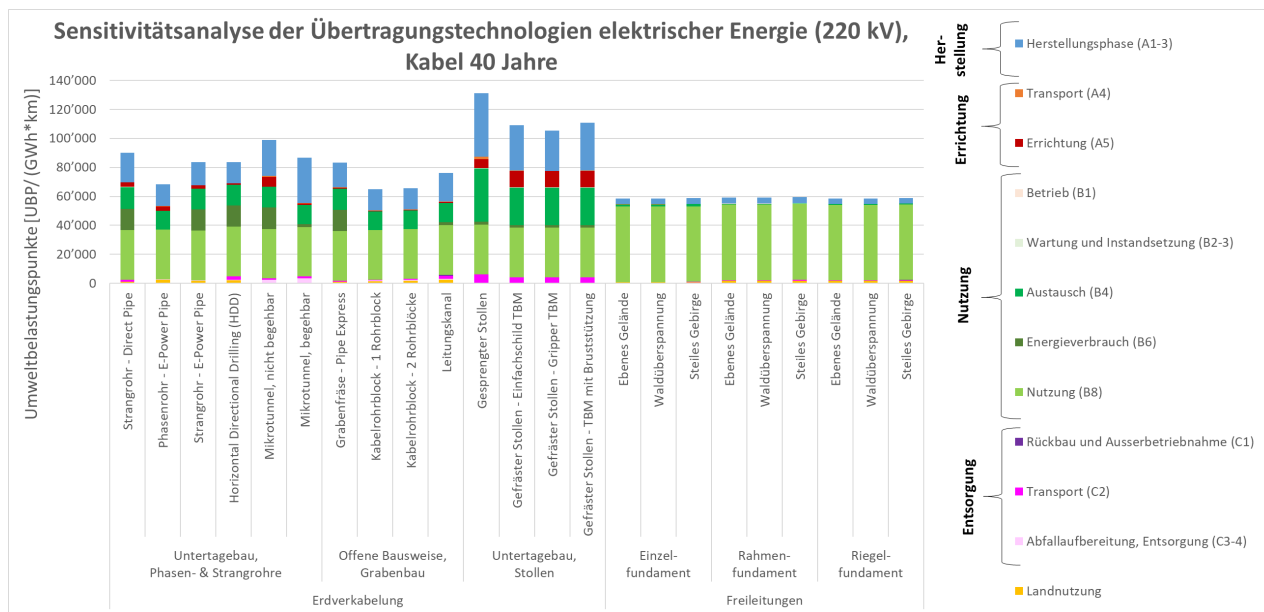


Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Lebensdauer der Kabel 40 Jahre

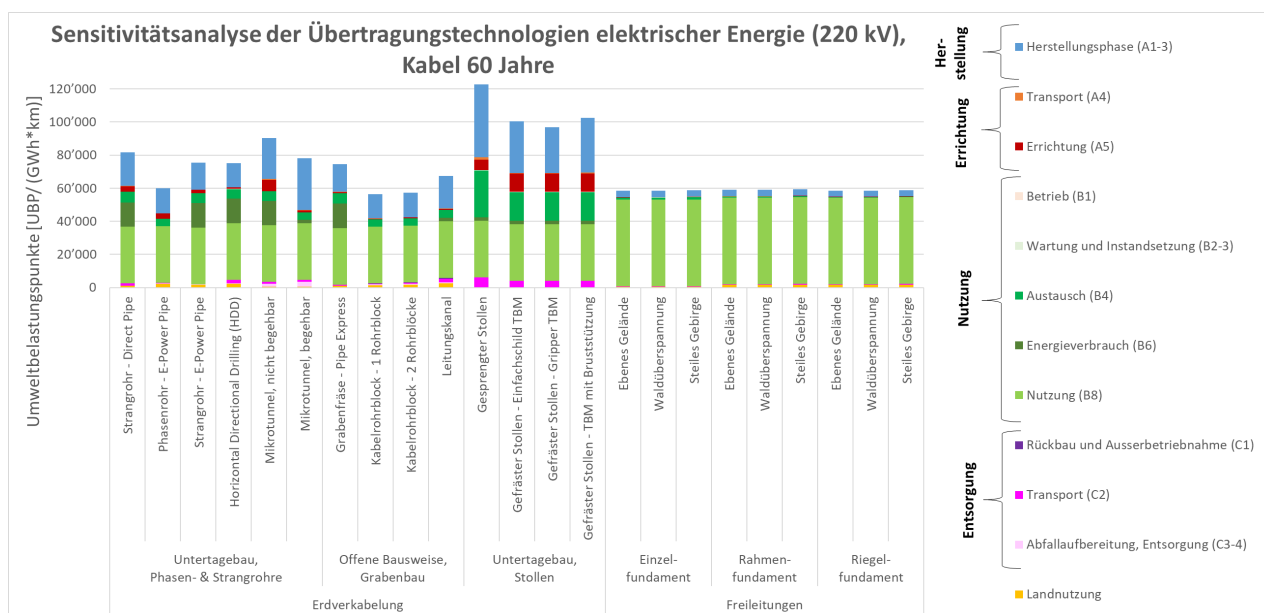


Abbildung 52: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Lebensdauer der Kabel 60 Jahre

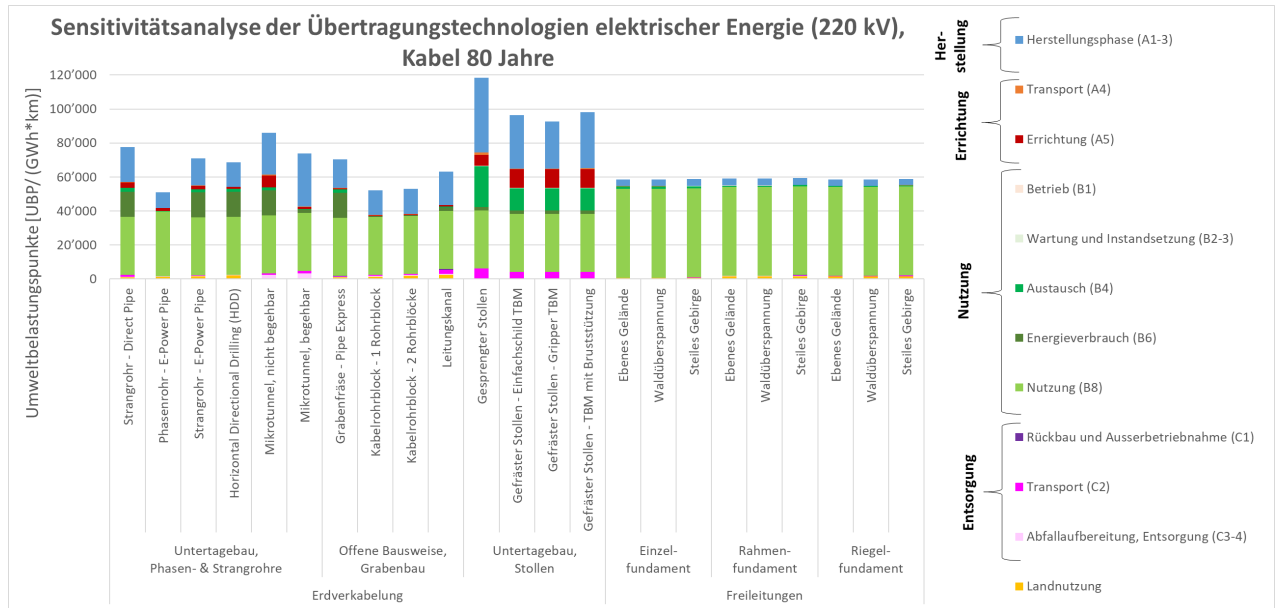


Abbildung 53: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Lebensdauer der Kabel 80 Jahre

4.3.2 Parameter 2: Strommix

Die Variation des Schweizer Verbraucherstrommixes in der Modellrechnung zeigt, dass die Umweltauswirkungen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV je nach Wahl des Strommixes sinken oder steigen. Dabei verändert sich der Umfang der Umweltauswirkungen in den Lebenszyklusphasen Energieverbrauch (B6) und Nutzung (B8). Werden die Verluste und Betriebsverbräuche der Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit dem Strommix ENTSO-E-Mix berechnet, entstehen im Vergleich zur Basisvariante mit dem Schweizer Verbraucherstrommix 1,5-mal mehr Umweltauswirkungen. Werden die Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit dem erneuerbaren Schweizer Strommix berechnet, sinken die Emissionen gegenüber der Basisvariante mit dem Schweizer Verbraucherstrommix um 62,6%: siehe Abbildungen 54, 55 und 56.

Daraus folgt, dass der Strommix für den Umfang der Umweltauswirkungen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie massgeblich ist. Je nachhaltiger der Strommix ausfällt, desto kleiner ist die Menge an anfallenden Umweltauswirkungen. Da die Umweltauswirkungen mehrheitlich auf die entstehenden Übertragungsverluste zurückzuführen sind, lassen sie sich in erster Linie stark durch einen erneuerbaren Strommix reduzieren. Jedoch verändert sich nichts an den Hauptaussagen des Variantenstudiums hinsichtlich der Wahl einer geeigneten Übertragungstechnologie elektrischer Energie. Denn das Verhältnis von Umweltauswirkungen und Übertragungstechnologie elektrischer Energie bleibt unabhängig vom gewählten Strommix unverändert. Nachzutragen bleibt, dass die Szenarien Extremfälle darstellen. So wird in naher Zukunft nicht nur erneuerbare elektrische Energie aus Schweizer Produktion im einheimischen Elektrizitätsnetz übertragen werden. Deshalb skizziert der Bericht nur eine gewisse Tendenz.

Fazit: Der Strommix ist aufgrund der Übertragungsverluste grundlegend für die Menge an anfallenden Umweltauswirkungen verantwortlich. Doch bleiben die Hauptaussagen des Variantenstudiums in Bezug auf die Wahl einer geeigneten Übertragungstechnologie elektrischer Energie unverändert.

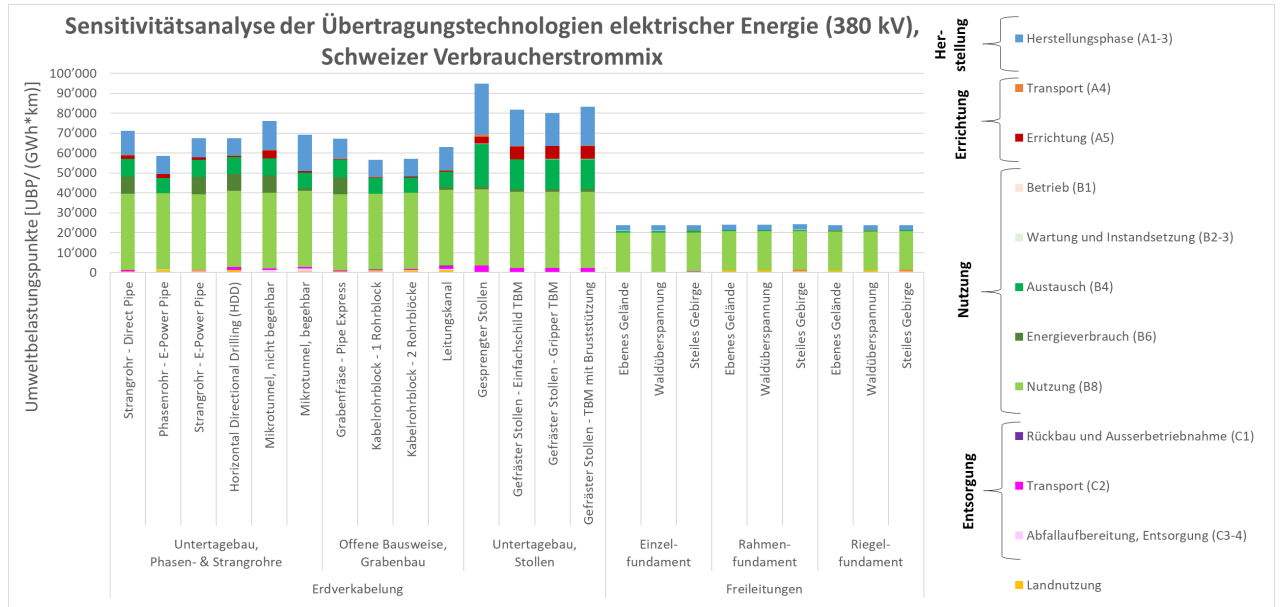


Abbildung 54: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Schweizer Verbraucherstrommix

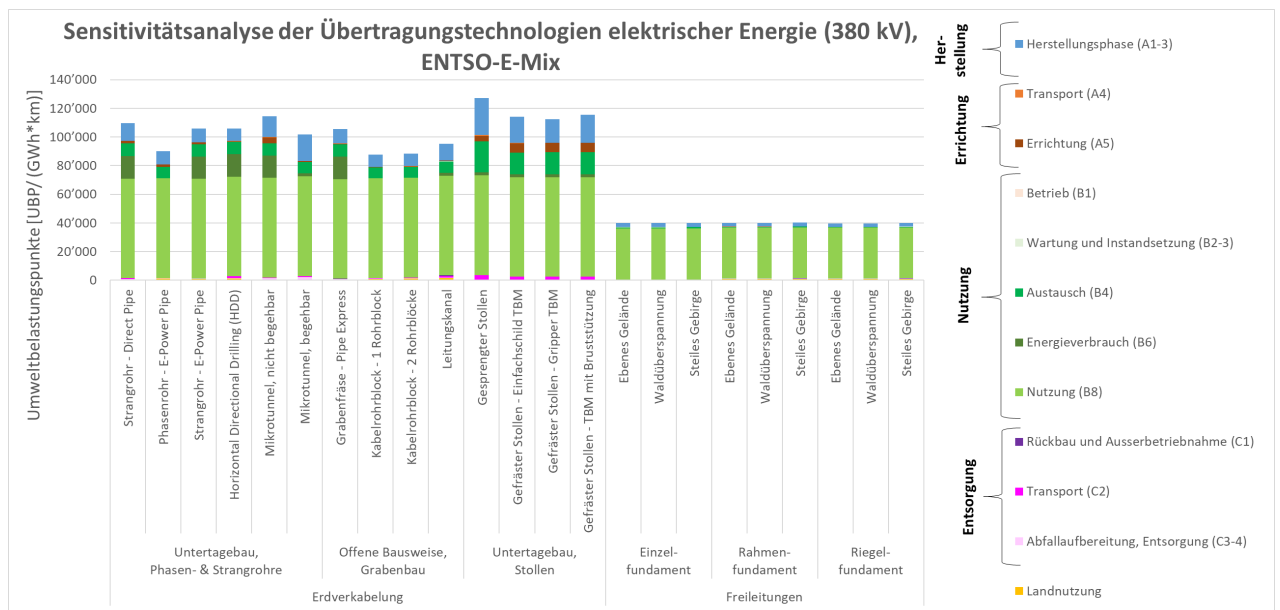


Abbildung 55: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), ENTSO-E-Mix

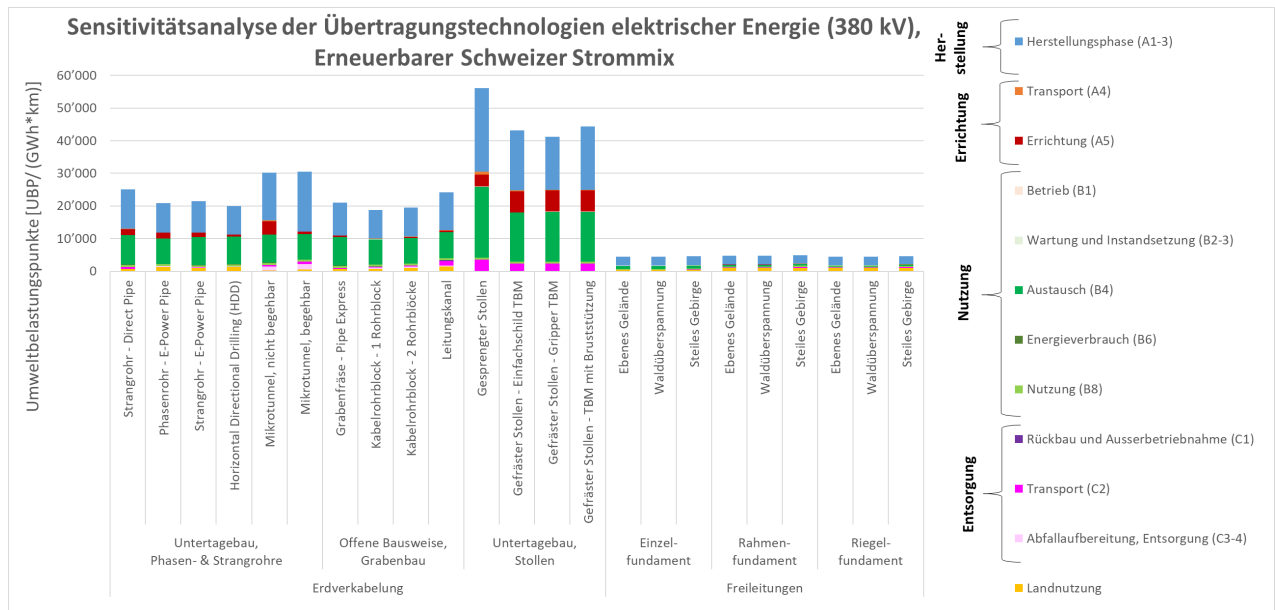


Abbildung 56: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Erneuerbarer Schweizer Strommix

Bei der Betrachtung der Höchstspannungsebene 220 kV zeigt die Variation des Schweizer Verbraucherstrommixes, dass die Umweltauswirkungen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie je nach Wahl des Strommixes stark sinken oder steigen. Dabei verändert sich der Umfang an Umweltauswirkungen in den Lebenszyklusphasen Energieverbrauch (B6) und Nutzung (B8). Werden die Umweltauswirkungen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit dem Energiemix ENTSO-E-Mix berechnet, entstehen rund 1,5-mal mehr Umweltauswirkungen als beim Schweizer Verbraucherstrommix. Werden die Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit einem erneuerbaren Schweizer Strommix bewertet, lassen sich die Emissionen gegenüber dem Schweizer Verbraucherstrommix um 51% verringern.

Die mit dem Schweizer Verbraucherstrommix und dem ENTSO-E-Mix berechneten Ergebnisse der Ökobilanz sind vergleichbar. Das Ausmass an Umweltauswirkungen der Freileitungen ist mit dem Ausmass der Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock», «Kabelrohrblock – 2 Rohrblocke» und «Leitungskanal» vergleichbar. Werden die Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit einem erneuerbaren Schweizer Strommix bewertet, sinken die Umweltauswirkungen der Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung drastisch bzw. zeigen weit tiefere Umweltauswirkungen als die Bauverfahren der Erdverkabelung. Wie bei den Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV diskutiert, ist der Eintritt des Szenarios mit einem vollständigen erneuerbaren Schweizer Strommix im heimischen elektrischen Netz in naher Zukunft höchst unwahrscheinlich. Jedoch ist die Annahme legitim, dass die Umweltauswirkungen der Freileitungen bei zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Schweizer Stromnetz sinken und Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung klar im Vorteil sind. Die Umweltauswirkungen der Bauverfahren der Erdverkabelung nehmen bei steigendem Anteil an erneuerbaren Energien im Schweizer Stromnetz ebenfalls ab. Jedoch verändert dies die Hauptaussagen der Ökobilanz nicht, da die Bauverfahren der Erdverkabelung im Vergleich zu den

Freileitungen weiterhin weit höhere Umweltauswirkungen aufweisen: siehe Abbildungen 57, 58 und 59.

Fazit: Der Strommix ist für den Umfang an anfallenden Umweltauswirkungen massgeblich und ein kritischer Parameter. Das Ergebnis der Ökobilanz verändert sich erheblich, wenn ein erneuerbarer Schweizer Strommix eingesetzt wird. Das Verhältnis der Umweltauswirkungen der Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung verschiebt sich in diesem Fall zu Gunsten der Freileitungen.

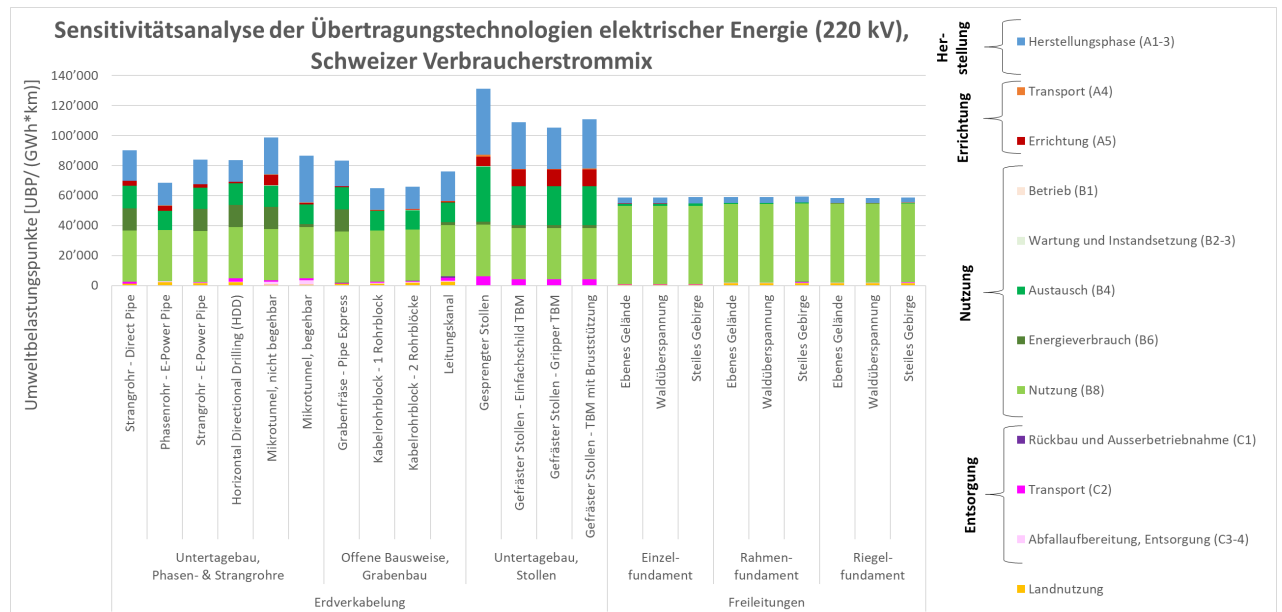


Abbildung 57: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Schweizer Verbraucherstrommix

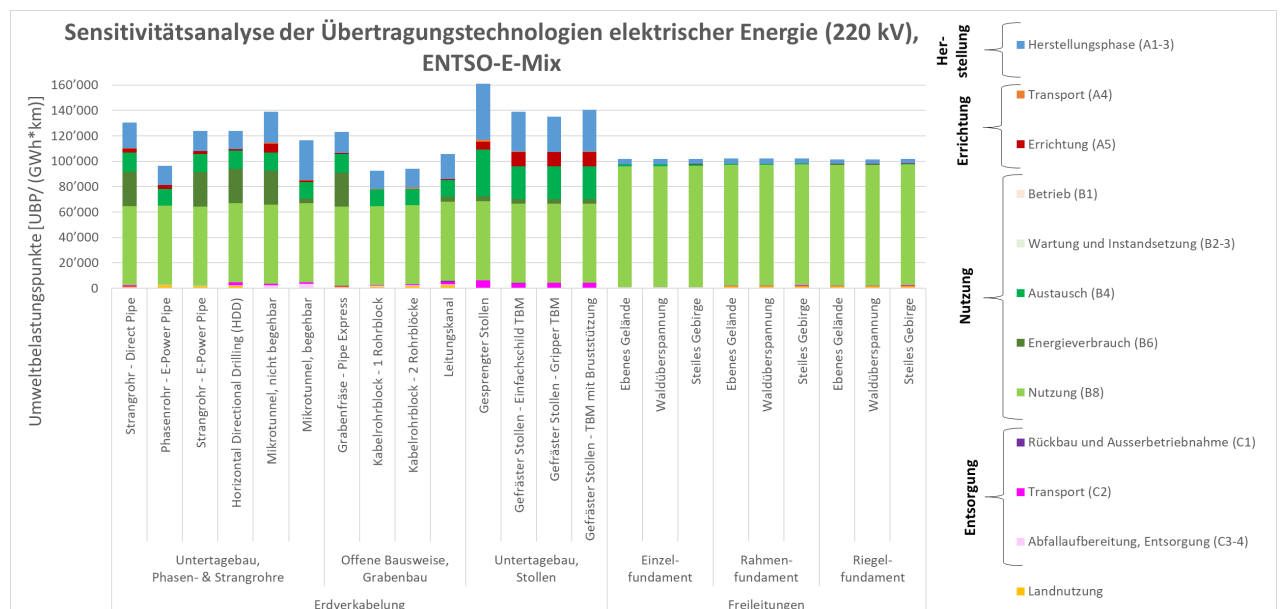


Abbildung 58: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), ENTSO-E-Mix

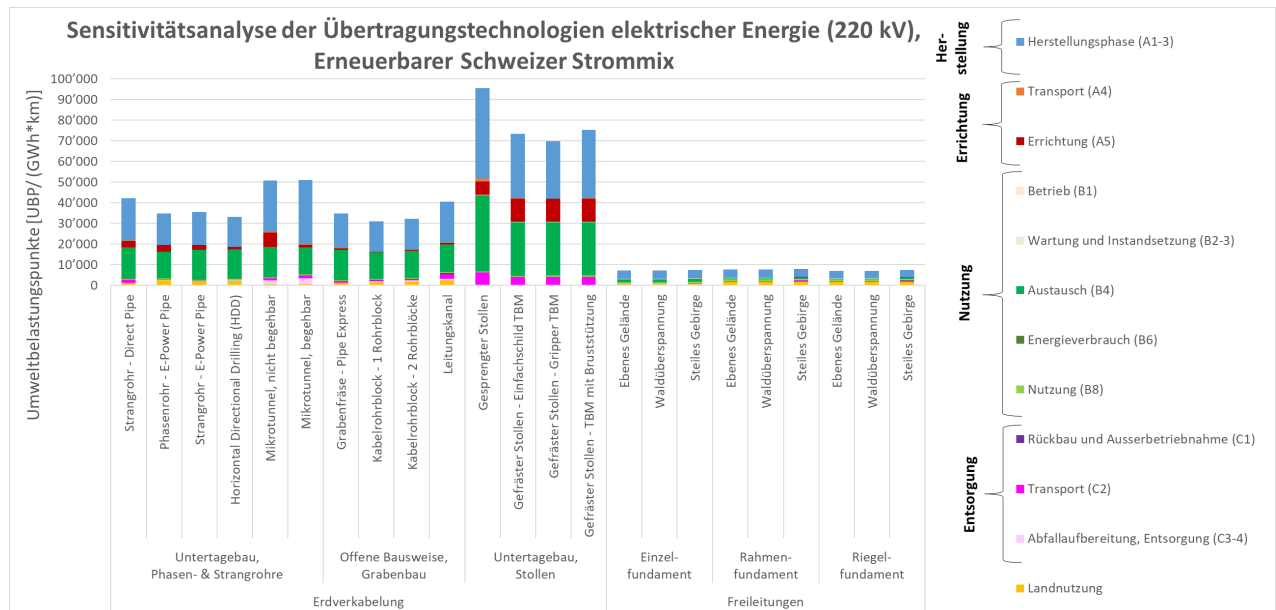


Abbildung 59: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Erneuerbarer Schweizer Strommix

4.3.3 Parameter 3: Spannweiten der Freileitungen

Die Wirkungsabschätzung belegt, dass die Variation der Spannweiten der Freileitungsmasten in der Modellrechnung zu keinem signifikanten Anstieg der Umweltauswirkungen auf beiden Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV führt: siehe Abbildung 60, Abbildung 61, Abbildung 62 und Abbildung 63. Um einen Freileitungsmast mit einer Spannweite von 600 m zu errichten, müssen zwar mehr Materialien aufgewendet werden als bei einer Spannweite von 400 m. Doch beseitigt die Vereinheitlichung auf 1 km (als Teil der funktionellen Einheit) die Bedeutung des Materialunterschieds. So sind bei einer Spannweite von 400 m 2,5 Freileitungsmasten, bei einer Spannweite von 600 m 1,7 Freileitungsmasten für eine Freileitungslänge von jeweils 1 km erforderlich.

Fazit: Die Variation der Spannweiten der Freileitungsmasten auf beiden Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV beeinflusst das Gesamtergebnis der Ökobilanz nicht.

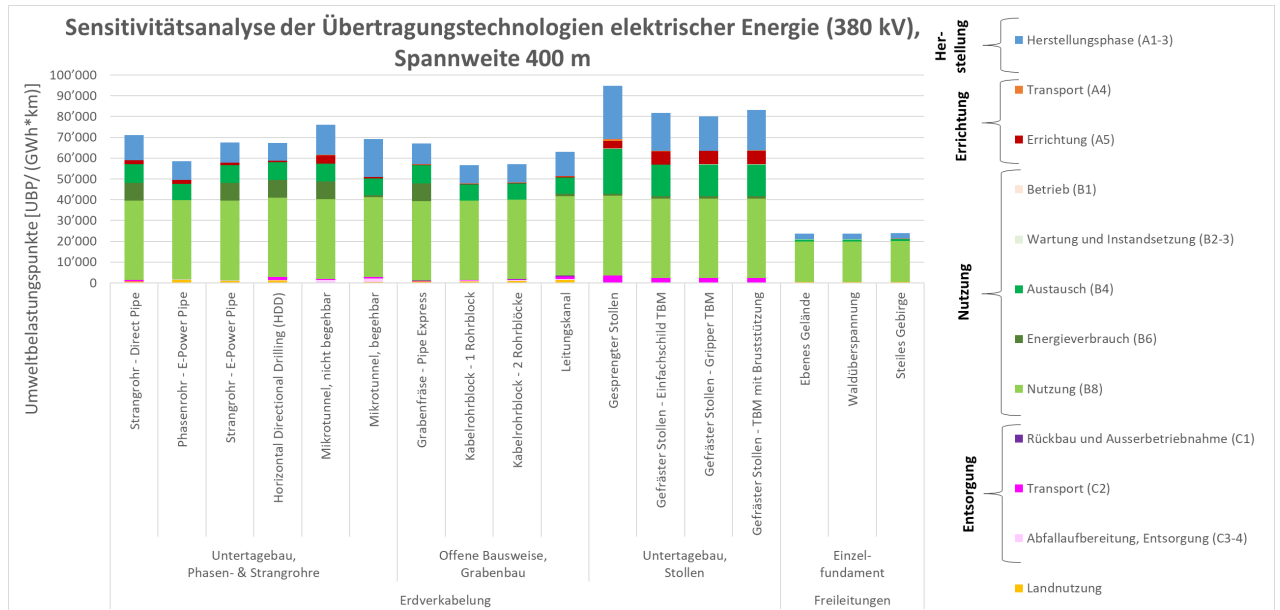


Abbildung 60: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Spannweite 400 m

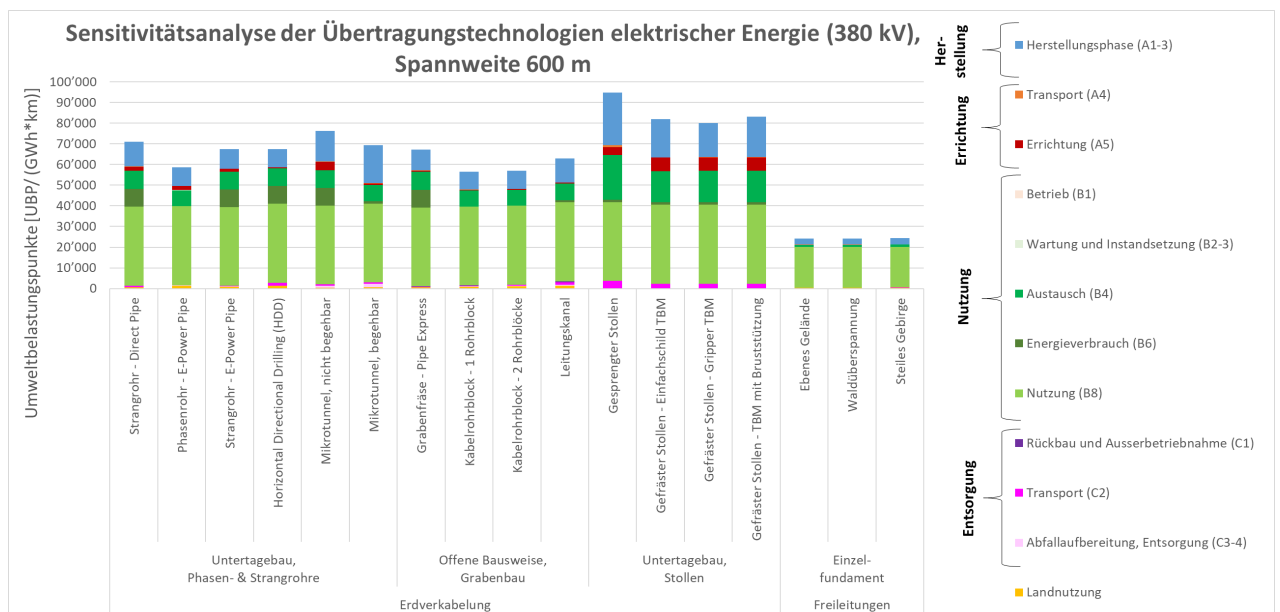


Abbildung 61: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV), Spannweite 600 m

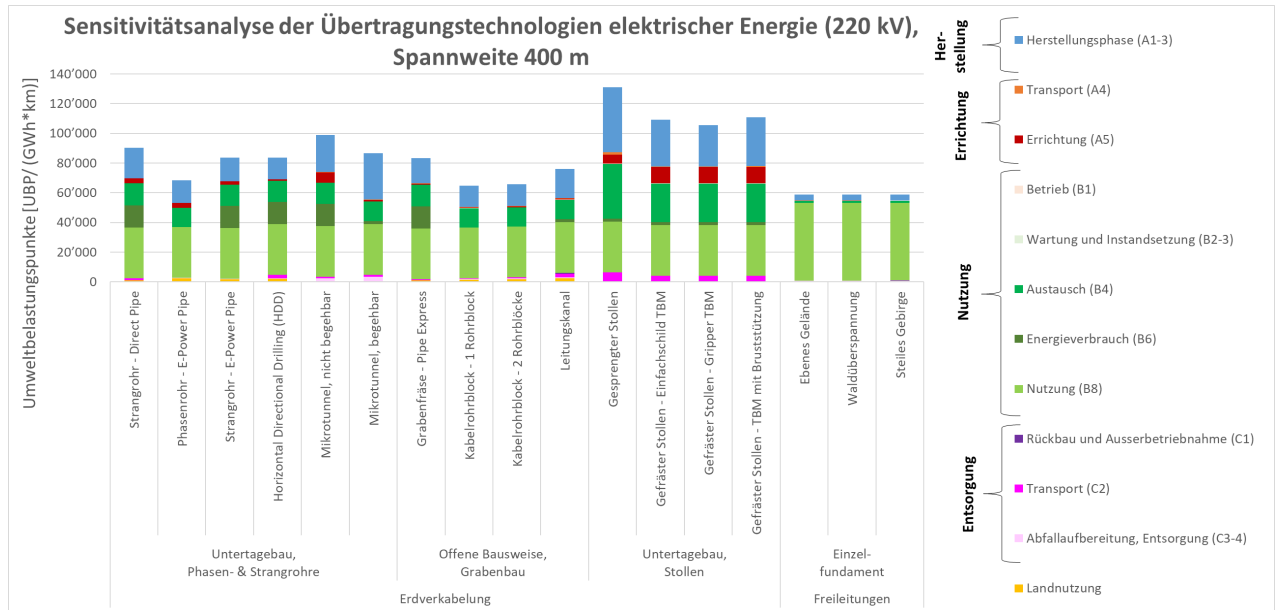


Abbildung 62: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Spannweite 400 m

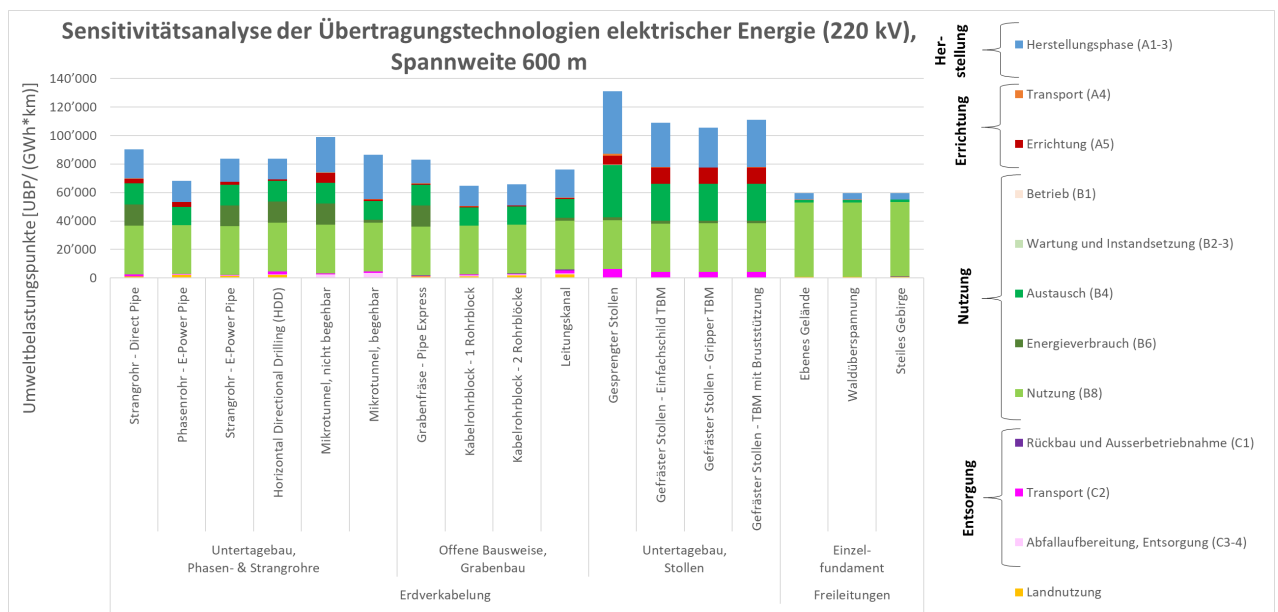


Abbildung 63: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Spannweite 600 m

4.4 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Übergangsbauwerke auf der Höchstspannungsebene 380 kV

Die funktionelle Einheit der Übergangsbauwerke unterscheidet sich von der funktionellen Einheit der Übertragungstechnologien elektrischer Energie. Die Übergangsbauwerke werden nach Stückzahl ausgewertet. Zudem entstehen bei den Übertragungsbauwerken keine Emissionen

aufgrund energetischer Aufwände, da weder energetische Aufwendungen im Betrieb noch Übertragungsverluste vorhanden sind. Es gibt zahlreiche Ausführungen von Übergangsbauwerken. Der vorliegende Bericht untersucht die drei Extremvarianten. Ebenfalls wird die Landnutzung nicht in die Systemgrenze einbezogen.

4.4.1 Kumulierte Wirkungsabschätzung (380 kV)

Die Wirkungsabschätzung zeigt bei allen drei Methoden, dass das Übergangsbauwerk «Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase» die höchsten Umweltauswirkungen aufweist. Es folgen das Übergangsbauwerk «Abspannportal ohne Kabelkeller: 1 Kabel pro Phase» und das «Übergangsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast»: siehe Abbildung 64, Abbildung 65, Abbildung 66 und Abbildung 67.

Es erweist sich ferner, dass das «Übergangsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast» je nach Wirkungsabschätzungsmethode um 80-88% geringere Umweltauswirkungen als das «Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase» aufweist sowie um 76-84% tiefere Umweltauswirkungen als das «Abspannportal ohne Kabelkeller: 1 Kabel pro Phase». Grund hierfür ist die Materialisierung. Beim «Übergangsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast» werden wesentlich weniger Materialien als bei den anderen zwei Ausführungen von Übergangsbauwerken verbaut.

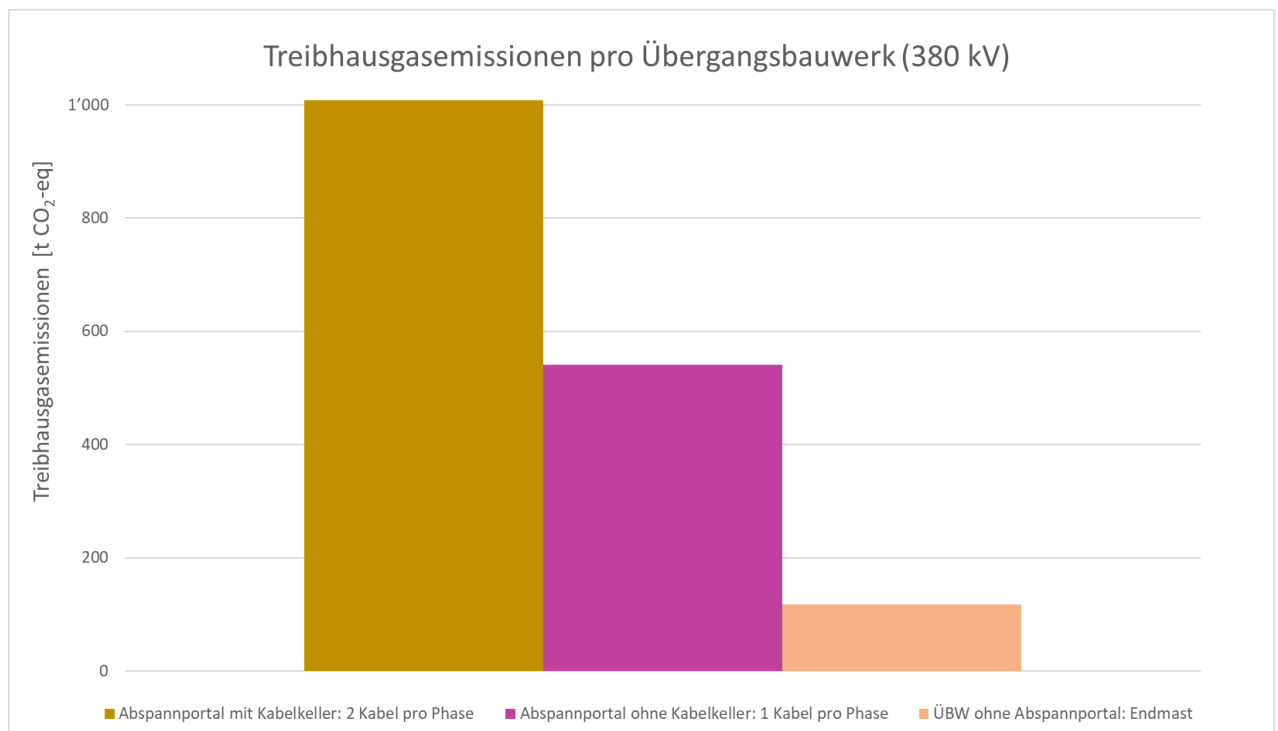


Abbildung 64: Treibhausgasemissionen pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert

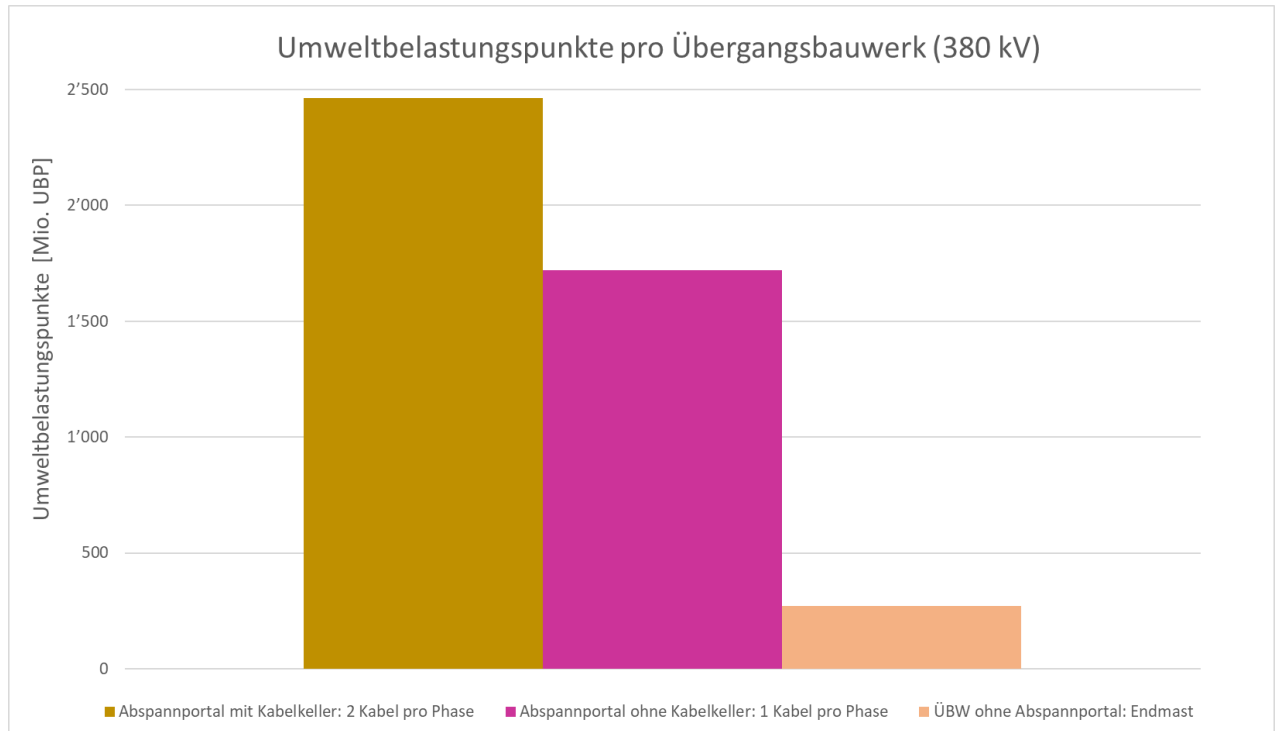


Abbildung 65: Umweltbelastungspunkte pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert

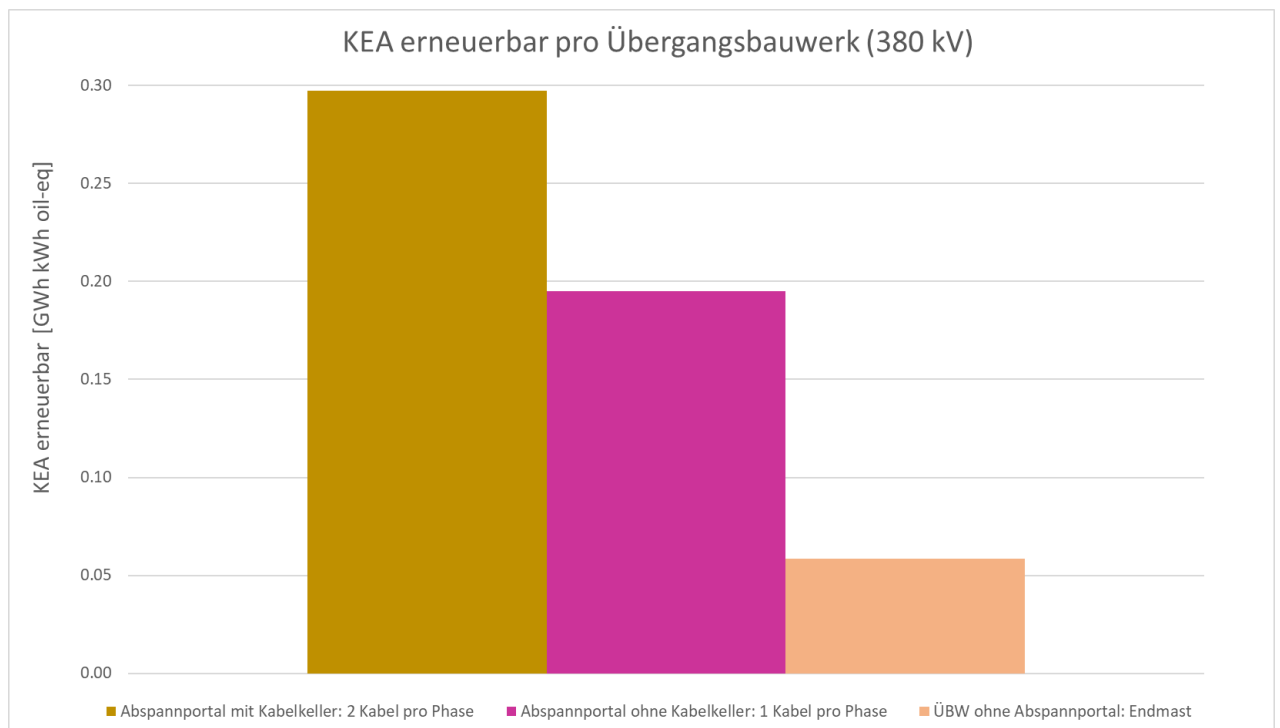


Abbildung 66: KEA erneuerbar pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert

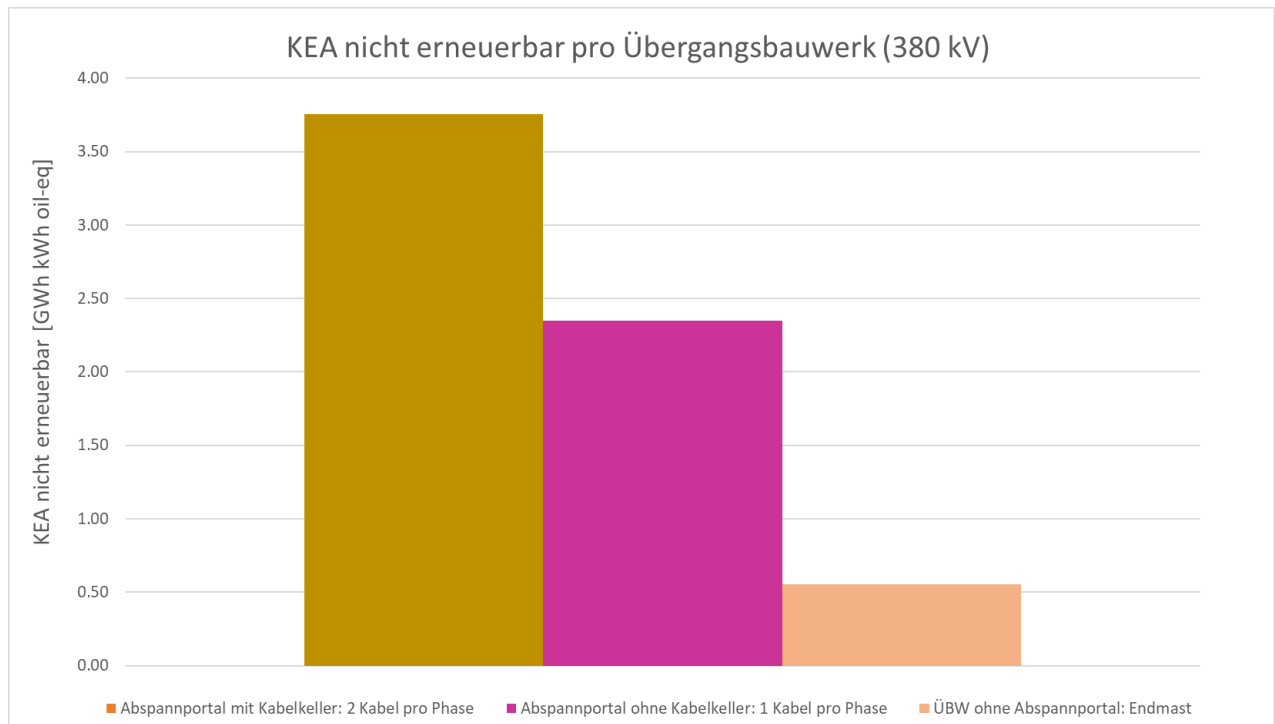


Abbildung 67: KEA nicht erneuerbar pro Übergangsbauwerk (380 kV), kumuliert

4.4.2 Wirkungsabschätzung nach Lebenszyklusphasen (380 kV)

Die wichtigsten Lebenszyklusphasen in allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden sind die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) und der Transport (C2): siehe Abbildung 68, Abbildung 69, Abbildung 70 und Abbildung 71. Bei den Wirkungsabschätzungsmethoden der Treibhausgasemissionen und der Umweltbelastungspunkte trägt die Herstellungsphase 60% der Umweltauswirkungen zum Gesamtergebnis bei. Bei der Methode des kumulierten Energieaufwands sind 50-60% der Umweltauswirkungen auf die Herstellungsphase (A1-3) zurückzuführen. Der Austausch (B4) ist je nach Wirkungsabschätzungsmethode für 15-40% der Umweltauswirkungen verantwortlich, wobei er bei der Methode der Treibhausgasemissionen weniger ins Gewicht fällt als bei den anderen Wirkungsabschätzungsmethoden. Der Transport (C2) ist für 2-16% aller Umweltauswirkungen des Gesamtergebnisses verantwortlich.

Der Transport (C2) ist im Gegensatz zum Transport (A4) mit höheren Umweltauswirkungen verbunden. Der Grund hierfür liegt in der Menge der zu transportierenden Materialien und Komponenten: In der Lebenszyklusphase Transport (C2) werden mehr Materialien als in Transport (A4) transportiert, da Materialien und Komponenten aus den Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-3), Austausch (B4), Entsorgung, Abfallaufbereitung (C3-4) anfallen. Diese Materialien und Komponenten müssen von der Baustelle bzw. vom Bauwerk zur jeweiligen Entsorgungsstelle transportiert werden. Im Vergleich dazu werden beim Transport (A4) nur die Materialien aus der Herstellungsphase (A1-3) vom Hersteller zur Baustelle transportiert.

In der Gesamtbetrachtung der Wirkungsabschätzung nehmen die folgenden Lebenszyklusphasen eine untergeordnete Rolle ein: Errichtung (A5), Betrieb (B1), Wartung und Instandsetzung (B2-3), Rückbau und Ausserbetriebnahme (C1) sowie Abfallaufbereitung, Entsorgung (C3-4). Gar keinen

Einfluss auf das Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung haben die Lebenszyklusphasen Energieverbrauch (B6) und Nutzung (B8), da dort keine Aufwände entstehen.

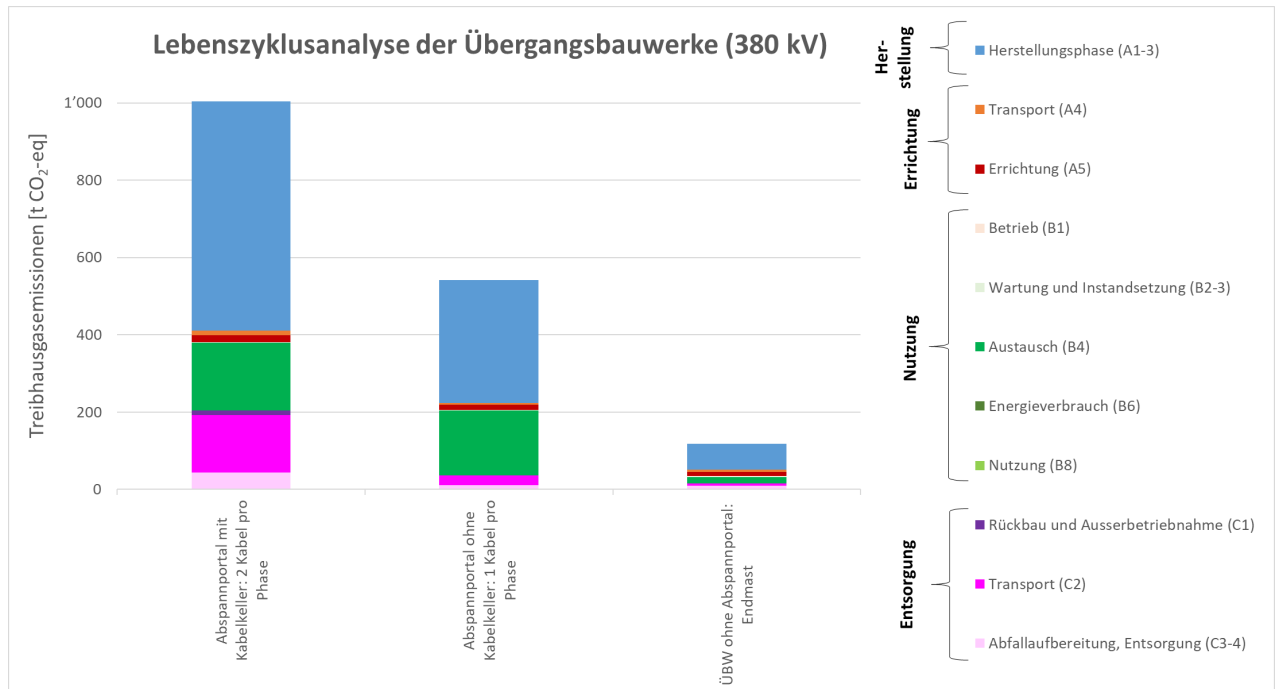


Abbildung 68: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), Treibhausgasemissionen

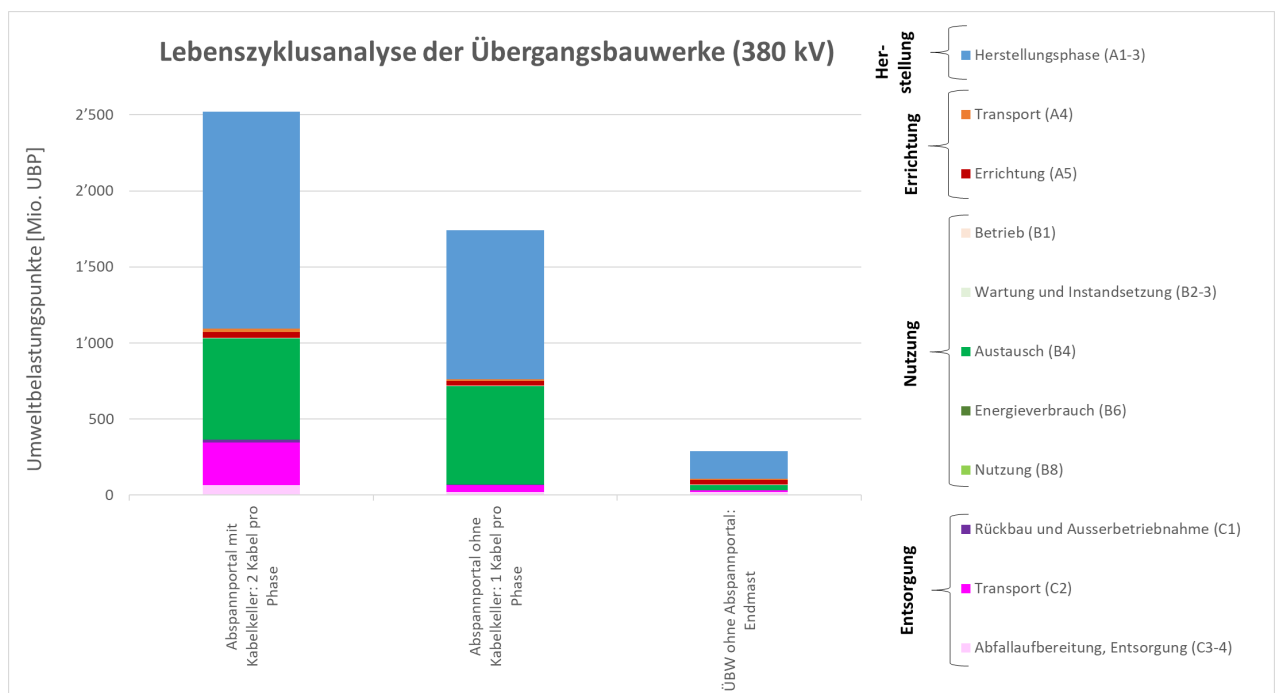


Abbildung 69: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), Umweltbelastungspunkte

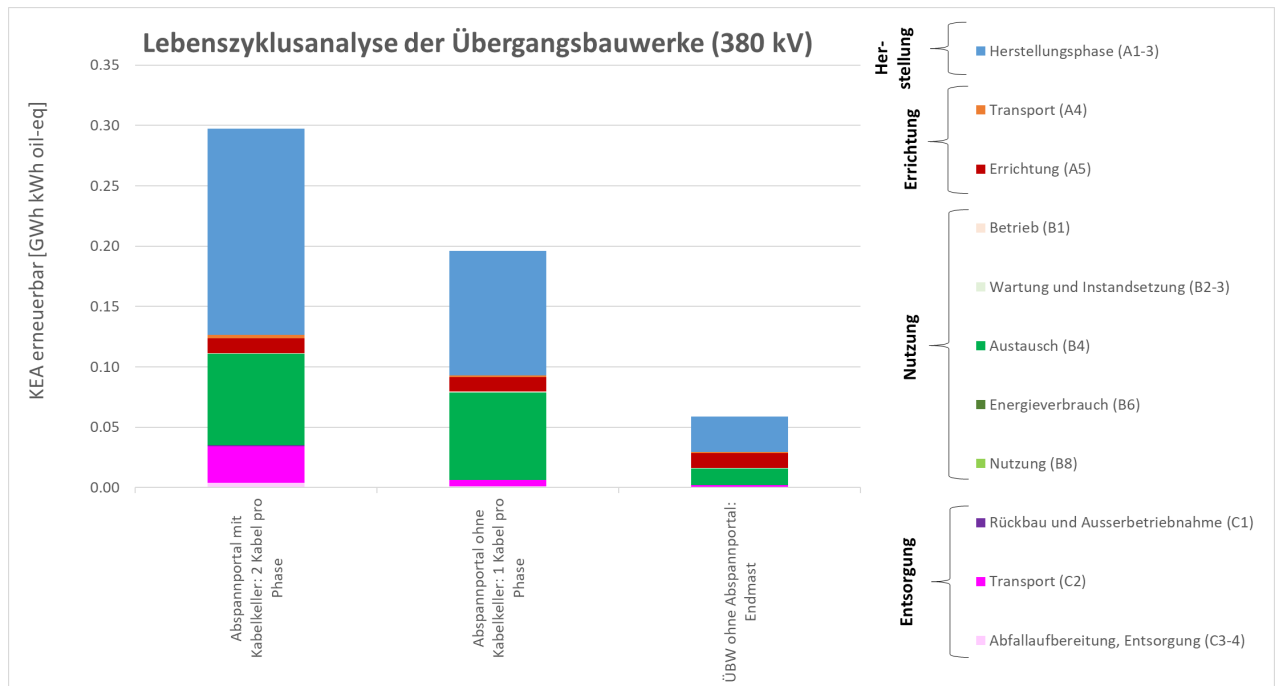


Abbildung 70: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), KEA erneuerbar

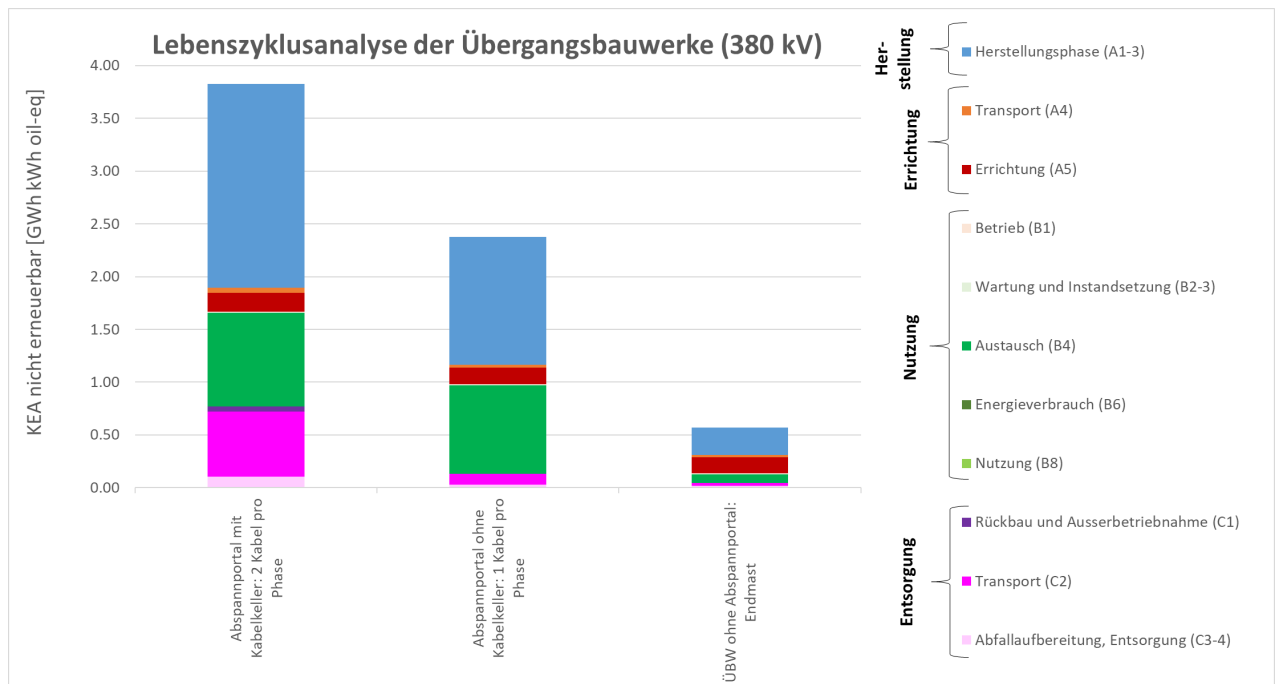


Abbildung 71: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), KEA nicht erneuerbar

4.4.3 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport (380 kV)

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung ergeben, dass die Ressourcen und Emissionen für den Grossteil der Umweltauswirkungen – d.h. für 79-96% bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden – verantwortlich sind: siehe Abbildung 72, Abbildung 73, Abbildung 74 und Abbildung 75. Der Transport trägt je nach Wirkungsabschätzungsmethode 3-18% zum Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung bei. Er steht dabei in Korrelation mit den Ressourcen und Emissionen. Der Einfluss des Transports vergrössert sich, wenn mehr Materialien in den Bauverfahren eingesetzt werden. Die Baumaschinen nehmen einen kleinen Anteil (1-3%) am Gesamtergebnis ein und sind daher vernachlässigbar.

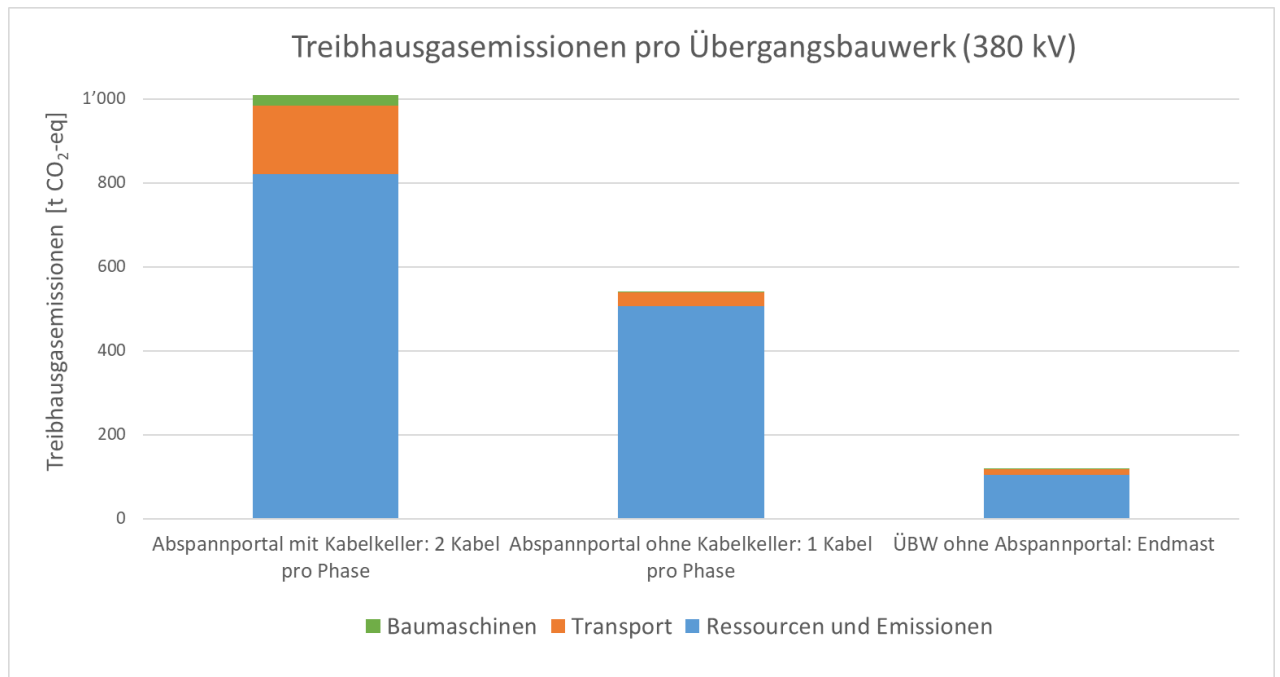


Abbildung 72: Treibhausgasemissionen pro Übergangsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen

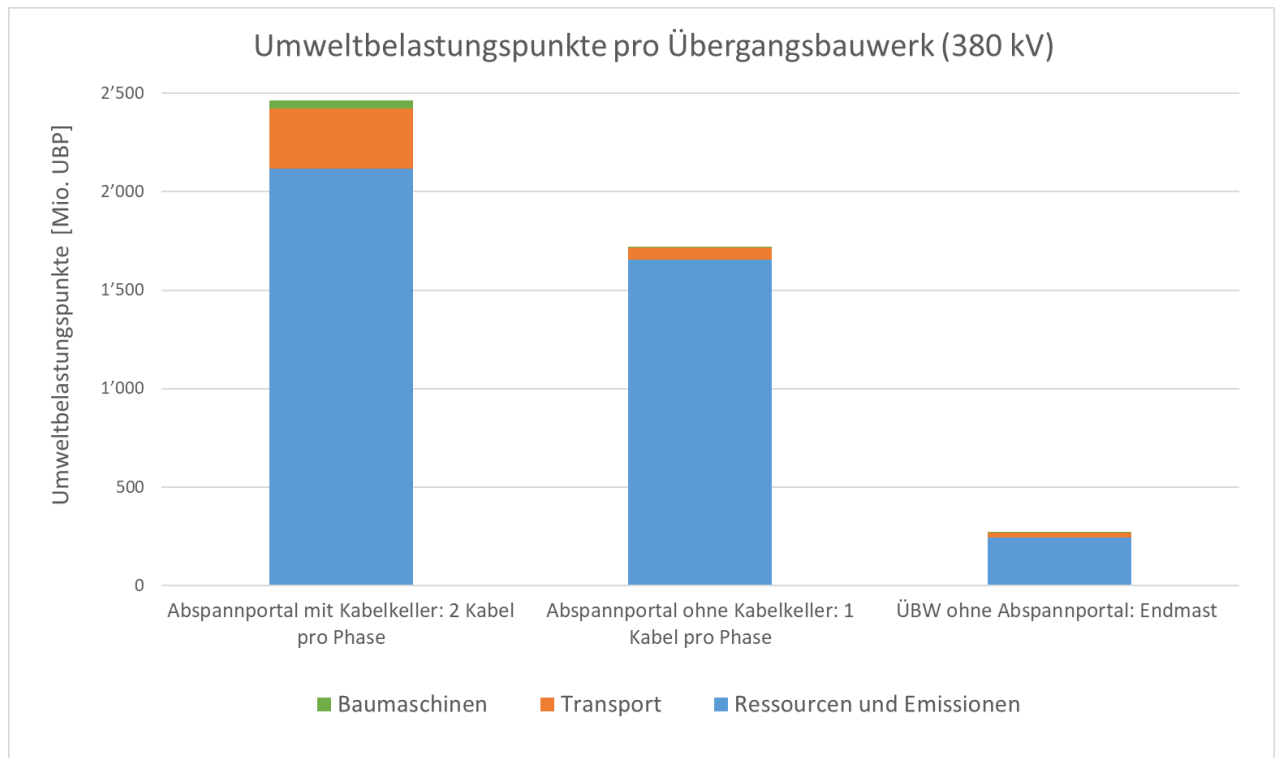


Abbildung 73: Umweltbelastungspunkte pro Übertragungsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen

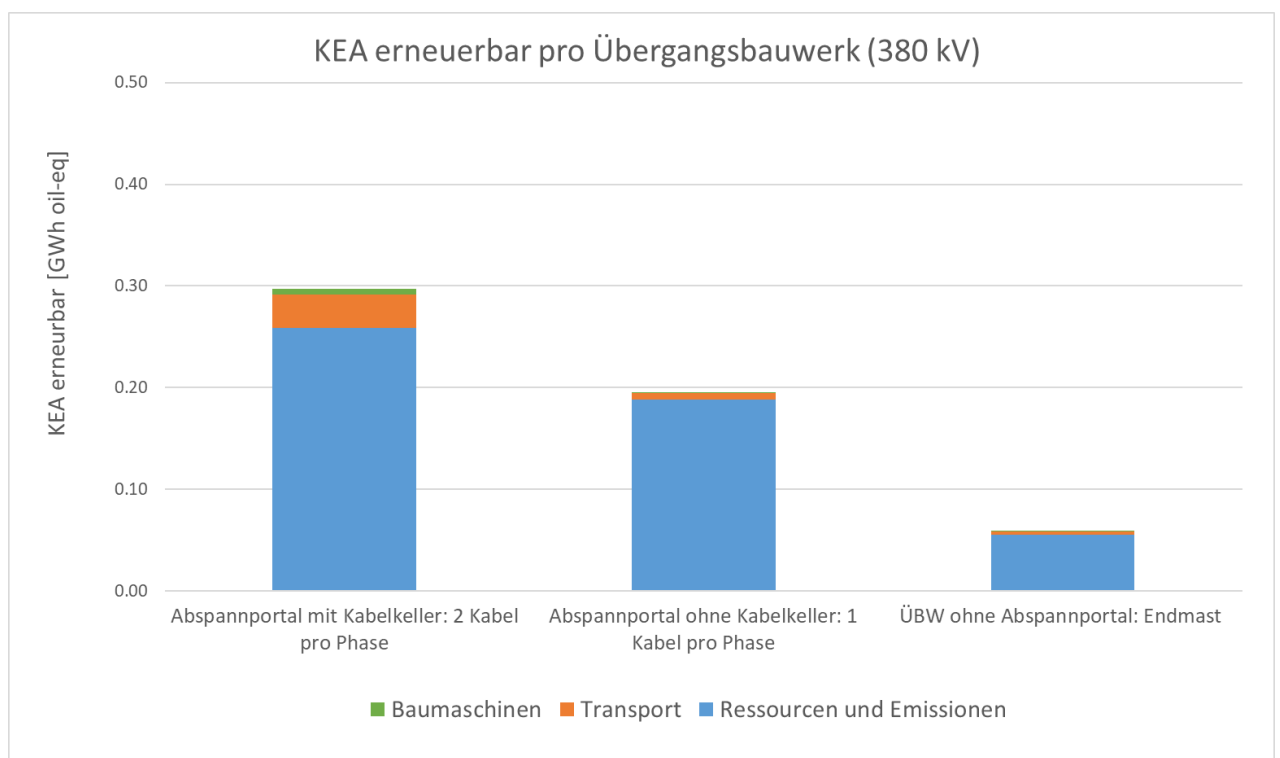


Abbildung 74: KEA erneuerbar pro Übertragungsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen

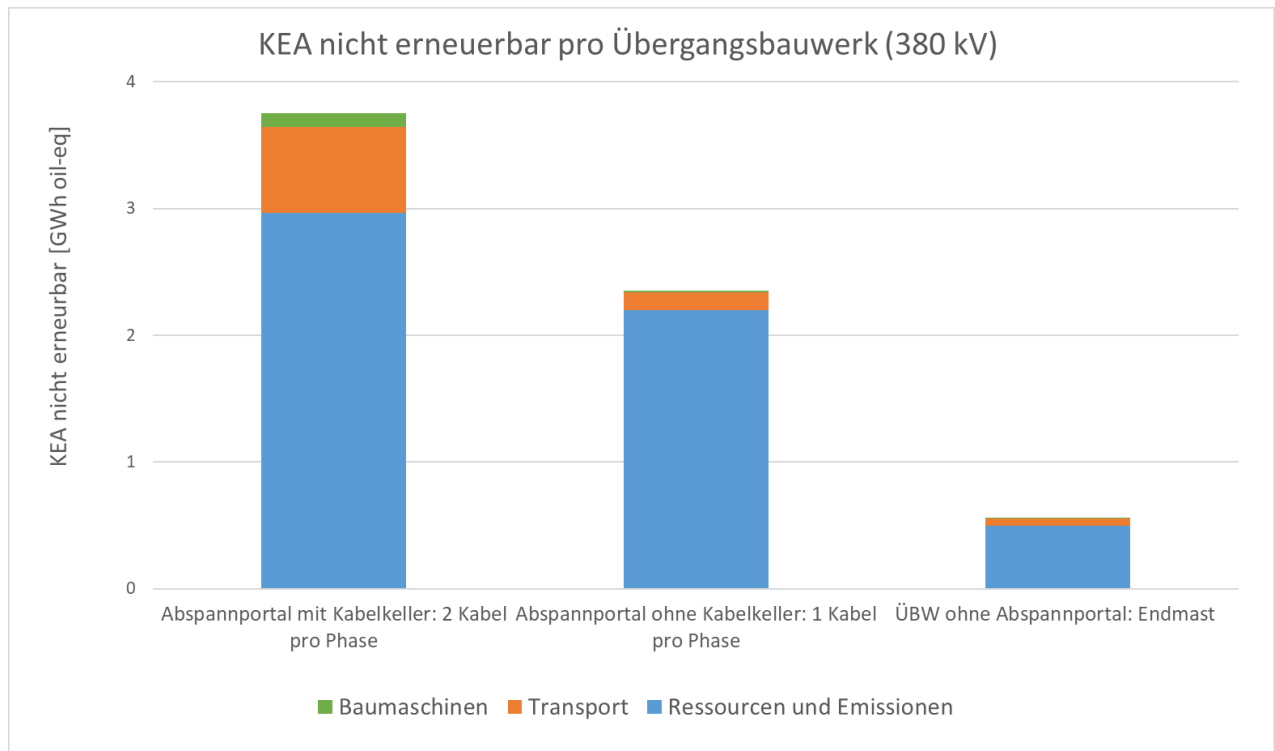


Abbildung 75: KEA nicht erneuerbar pro Übertragungsbauwerk (380 kV), nach Ressourcen und Emissionen, Transport, Baumaschinen

4.4.4 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen, Energie bei den Übergangsbauwerken (380 kV)

Wie die Wirkungsabschätzung zeigt, besitzt das Übertragungsbauwerk «Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase» den komplexesten Aufbau und somit den grössten Materialaufwand aller drei Bauverfahren: siehe Abbildung 76.

Die Komponenten mit einem hohen Metallanteil weisen bei allen drei Bauverfahren die höchsten Umweltauswirkungen auf. Dazu gehören der Schutzkasten, der Stahl für das Abspannportal sowie die Umzäunung. Ein Schaltschrank und ein Abspannportal sind nur bei den zwei Übergangsbauwerken «Abspannportal mit Kabelkeller» und «Abspannportal ohne Kabelkeller» vorhanden. Die Umzäunung ist bei allen drei Bauwerken installiert. Sie weist beim Übergangsbauwerk «Ohne Abspannportal» die höchsten Umweltauswirkungen auf, da dort die anderen zwei Komponenten wegfallen.

Weitere Komponenten mit hohen Umweltauswirkungen sind der Kranbeton sowie der Bewehrungsstahl für den Kabelkeller und die Endverschlüsse. Komponenten mit tieferen Umweltauswirkungen sind die Asphalte, der Betonkies, die Beschichtungen und Verschalungen, die Infrastruktur für den Kabelkeller und der Beton für die Kabelrohrblöcke der Übergangsbauwerke «Abspannportal ohne Kabelkeller» und «Ohne Abspannportal».

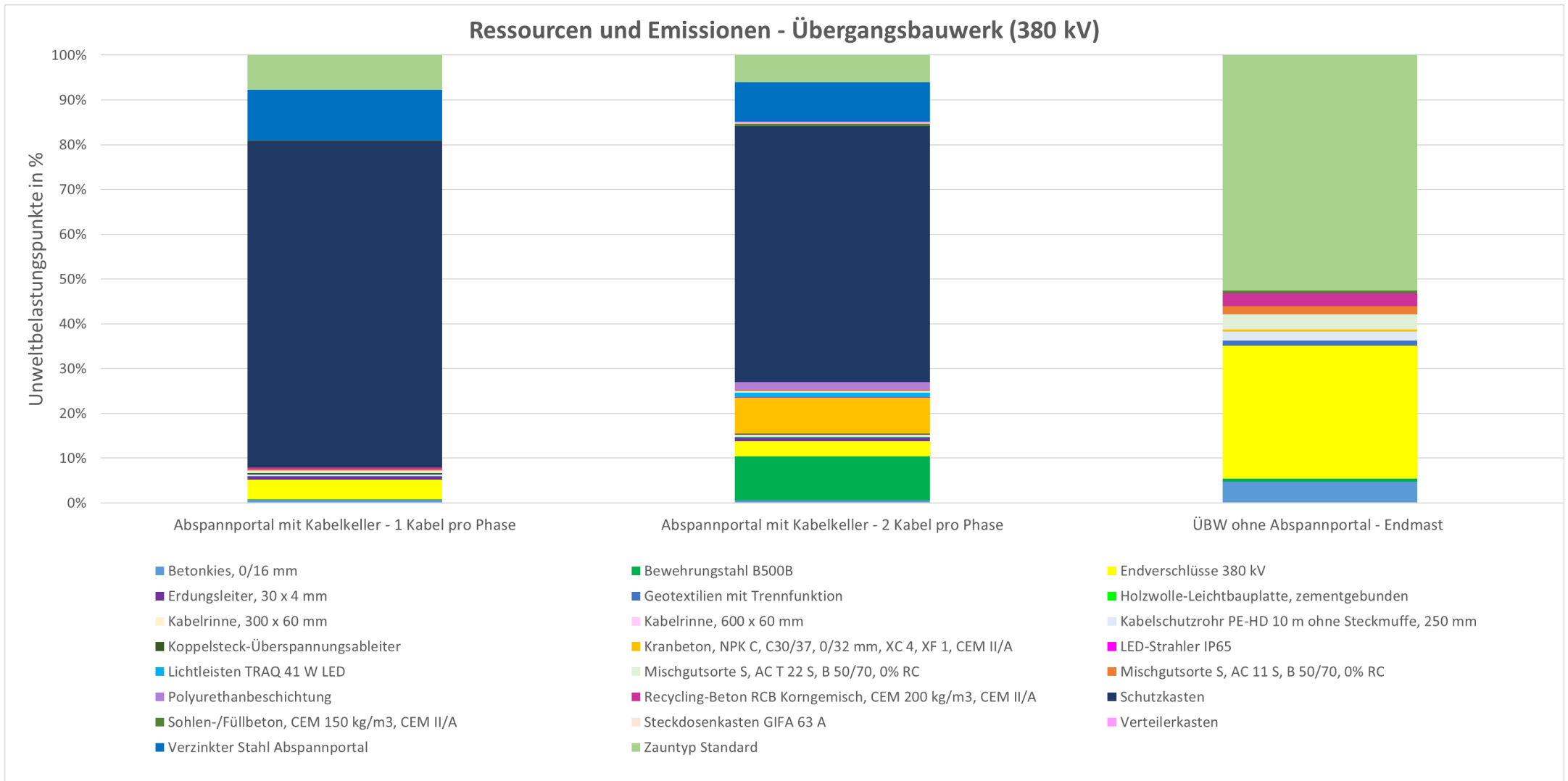


Abbildung 76: Ressourcen und Emissionen – Übergangsbauwerke (380 kV)

5. Auswertung

5.1 Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV

Die Ökobilanz belegt, dass die Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV tiefere Umweltauswirkungen als die Bauverfahren der Erdverkabelung besitzen: siehe Abbildung 77. Konkret weisen die Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV nur rund einen Drittel der Umweltauswirkungen der Bauverfahren der Erdverkabelung auf. Das Bauverfahren «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» bei den Bauverfahren der Erdverkabelung und «Freileitung mit Riegelfundament – Waldüberspannung» bei den Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV weisen in allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden die tiefsten Umweltauswirkungen auf.

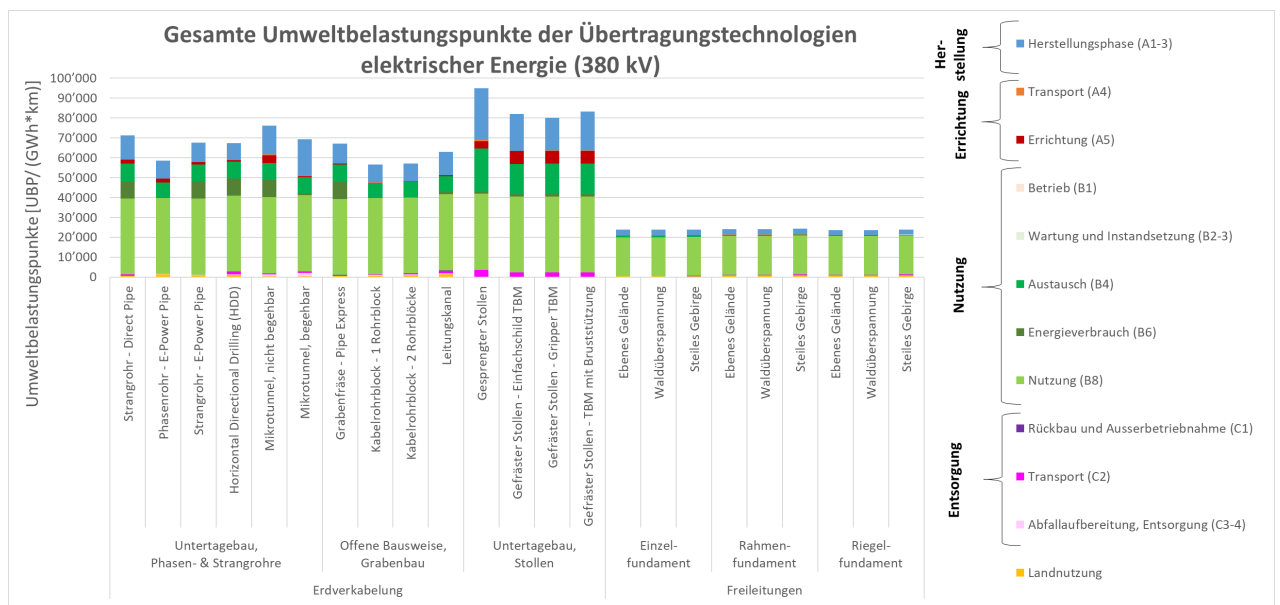


Abbildung 77: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (380 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

Die höchsten Umweltauswirkungen bei den Bauverfahren der Erdverkabelung weisen auf der Höchstspannungsebene 380 kV alle Stollen, die Mikrotunnel und das «Strangrohr – Direct Pipe» auf. Je nach Wirkungsabschätzungsmethode variiert die Reihenfolge. Der Grund für die erhöhten Umweltauswirkungen liegt in den verbauten Materialmengen und deren Zusammensetzung in der Errichtungsphase. Besonders Elektrokomponenten (Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) und Einbruchmeldeanlagen (EMA) der Stollen) sowie Komponenten aus einem oder mehreren Metallen (Kabelschutzrohre aus Stahl bei den Bauverfahren «Strangrohr – Direct Pipe» und «Strangrohr – Pipe Express», Mikrotunnel aus Betonstahl bei den Mikrotunnel) sind mit erhöhten Umweltauswirkungen verbunden. Weiter müssen die Elektrokomponenten bei den Stollen regelmässig ersetzt werden, weshalb die Lebenszyklusphase Austausch (B4) bei den Stollen etwa doppelt so hohe Umweltauswirkungen erzeugt wie bei den anderen Bauverfahren der Erdverkabelung. Zudem müssen einige der Bauverfahren der Erdverkabelung durch eine mechanische Lüftung gekühlt werden, was zusätzliche energetische Aufwände mit sich bringt. Diese Aufwände variieren und unterscheiden sich von Bauverfahren zu Bauverfahren.

Neben den Materialien tragen die Übertragungsverluste am meisten zum Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung bei. Die Übertragungsverluste liegen jeweils bei allen Bauverfahren der Erdverkabelung und bei allen Bauvarianten der Freileitungen gleich hoch. Deshalb spielen sie für die Wahl der optimalen Übertragungstechnologie elektrischer Energie keine wesentliche Rolle.

Bei den Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV führt die Freileitung mit Einzelfundament zu den höchsten Umweltauswirkungen, die Freileitung mit Riegelfundament zu den niedrigsten Umweltauswirkungen. Zudem weisen die Geländetypen je Fundament vergleichbar hohe Umweltauswirkungen auf. Der Geländetyp «steiles Gebirge» führt zu minimal höheren Umweltauswirkungen als die zwei anderen Geländetypen, weil der Rückbau und die Errichtung durch das Gelände erschwert sind und mit einem erhöhten Baumaschinen- und Transportaufwand gerechnet werden muss.

Die ökologisch relevanten Lebenszyklusphasen bei den Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV sind die Herstellung (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) und die Nutzung (B8). In der Herstellungsphase (A1-3) und im Austausch (B4) ist der Ressourcenverbrauch für das Gesamtergebnis von Bedeutung. In der Lebenszyklusphase Energieverbrauch (B6) sind die energetischen Aufwände für die mechanische Lüftung, den Betrieb, die Instandsetzung und den Austausch für die entstandenen Umweltauswirkungen entscheidend. In der Nutzungsphase (B8) sind die Übertragungsverluste für die Umweltauswirkungen verantwortlich. Die Übertragungsverluste bestimmen im Falle der Freileitungen – anders als im Falle der Bauverfahren der Erdverkabelung – das Gesamtergebnis vollumfänglich. Denn bei den Freileitungen ist der Materialaufwand geringer als bei den Bauverfahren der Erdverkabelung, weshalb die Übertragungsverluste bei den Freileitungen mehr zu Buche schlagen.

Die Landnutzung ist separat in der Abbildung 77 ausgewiesen, um ihre Umweltauswirkung zu illustrieren. Ein Teil der Landnutzung fällt in der Lebenszyklusphase Errichtung (A5) an, ein anderer in der Nutzungsphase (B1-B8). Die Lebenszyklusphasen Transport (A4), Errichtung (A5), Betrieb (B1), Wartung und Instandsetzung (B2-3), Rückbau und Ausserbetriebnahme (C1), Transport (C2), Abfallaufbereitung, Entsorgung (C3.4) sowie die Landnutzung nehmen eine untergeordnete Rolle in der Gesamtbetrachtung der Ökobilanz ein.

5.2 Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV

Die Ökobilanz der Höchstspannungsebene 220 kV zeigt, dass das Bauverfahren «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» bei den Bauverfahren der Erdverkabelung und «Freileitung mit Riegelfundament – Waldüberspannung» bei den Freileitungen in allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden die tiefsten Umweltauswirkungen aufweisen: siehe Abbildung 78.

Die Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV zeigen je nach Wirkungsabschätzungsmethode die höheren oder gleich hohen Umweltauswirkungen wie einige der Bauverfahren der Erdverkabelung. Bei den Methoden der Treibhausgasemissionen sowie der Umweltbelastungspunkte weisen die Freileitungen vergleichbar hohe Umweltauswirkungen wie die Bauverfahren der Erdverkabelung mit den tiefsten Umweltauswirkungen auf («Phasenrohr – E-Power Pipe», «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock», «Kabelrohrblock – 2 Kabelrohrblöcke»). Bei der Methode des

kumulierten Energieaufwands weisen die Freileitungen gleich hohe bis leicht erhöhte Umweltauswirkungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung auf.

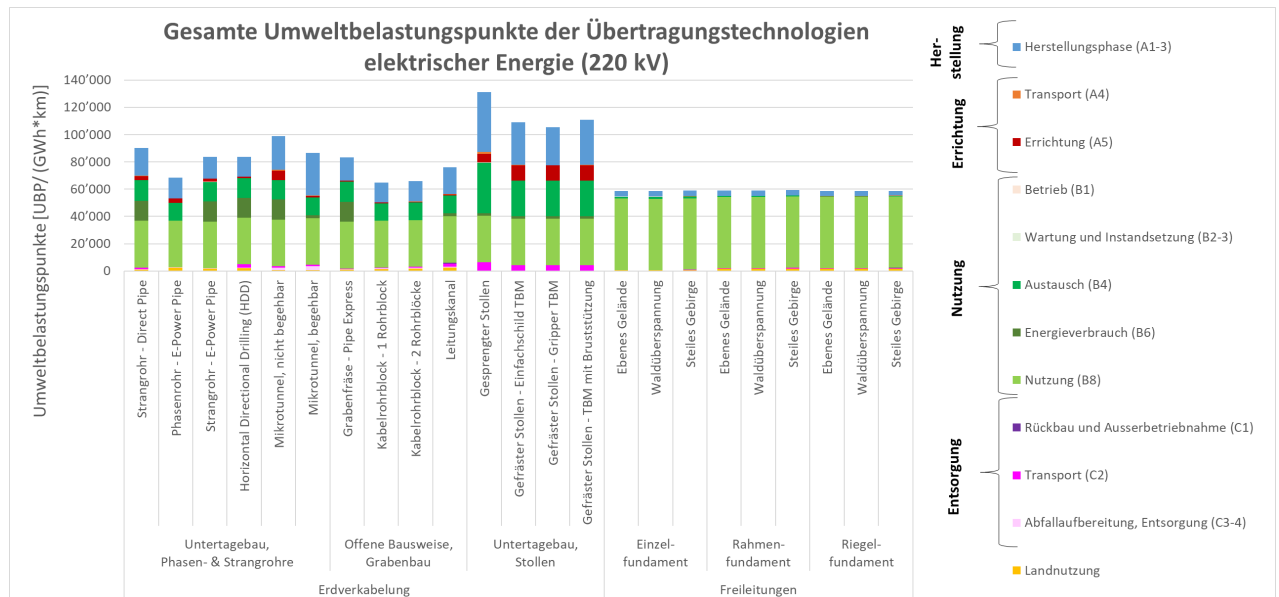


Abbildung 78: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV) pro 1 GWh übertragener elektrischer Energie über 1 km

Die für die Menge der Umweltauswirkungen relevanten Lebenszyklusphasen bei den Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV sind die Herstellung (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) und die Nutzung (B8). In der Herstellungsphase (A1-3) und im Austausch (B4) ist der Ressourcenverbrauch für das Gesamtergebnis wesentlich; in der Lebenszyklusphase Energieverbrauch (B6) sind die energetischen Aufwände für die mechanische Lüftung, den Betrieb, die Instandsetzung und den Austausch für die entstandenen Umweltauswirkungen entscheidend. In der Lebenszyklusphase Nutzung (B8) sind die Übertragungsverluste für die Umweltauswirkungen verantwortlich. Die Umweltauswirkungen der Nutzung (B8) machen nur noch rund die Hälfte der gesamten Umweltauswirkungen aus; dadurch steigt die Relevanz der anderen Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-3), Austausch (B4), Energieverbrauch (B6). Grund dafür ist der Umstand, dass sich die Übertragungsverluste bei der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV verringern. Bei den Freileitungen verhält es sich umgekehrt: Hier nehmen die Übertragungsverluste auf der Höchstspannungsebene 220 kV gegenüber der Höchstspannungsebene 380 kV zu und verdrängen vollumfänglich die Effekte der anderen Lebenszyklusphasen.

Das Variantenstudium ergibt, dass die Bauverfahren der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV 1,2-mal bis 1,4-mal höhere Umweltauswirkungen als auf der Höchstspannungsebene 380 kV aufweisen, die Freileitungen 2,5-mal höhere Umweltauswirkungen: siehe Abbildung 78.

5.3 Materialien und Komponenten der Übertragungstechnologien elektrischer Energie

Die Ergebnisse der Analyse der Materialien/Komponenten gelten für alle Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf beiden Höchstspannungsebenen, da sich die Materialisierung nur im Querschnitt der Kabel und der Leiterseile unterscheiden.

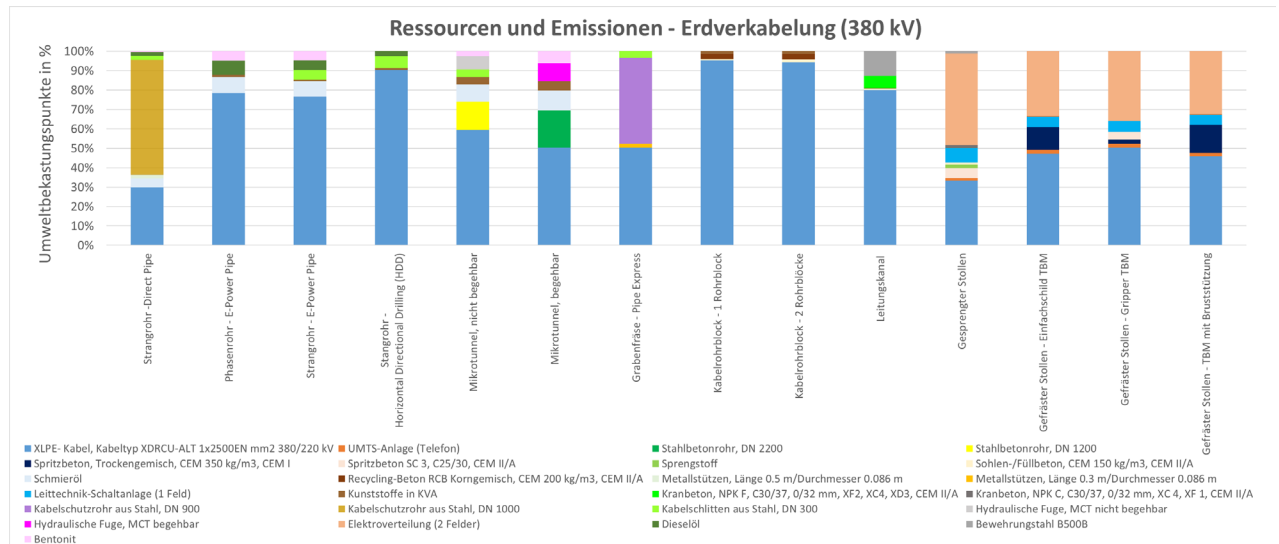


Abbildung 79: Ressourcen und Emissionen - Erdverkabelung (380 kV)

Alle Materialien/Komponenten der Bauverfahren der Erdverkabelung, die einen erhöhten Metall- bzw. Elektroanteil aufweisen, sind mit hohen Umweltauswirkungen verbunden. Dies gilt gleichermassen für die Materialien der Höchstspannungsebene 380 kV und der Höchstspannungsebene 220 kV. Die Kabel weisen bei allen Bauverfahren hohe Umweltauswirkungen auf, da die enthaltenen Basismetalle (Kupfer und Aluminium) in der Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte) zu Buche schlagen: siehe Abbildung 79. Weitere Komponenten mit hohen Umweltauswirkungen sind die Elektroverteilung der Stollen, die Kabelschutzrohre aus Stahl bei den Bauverfahren «Strangrohr – Direct Pipe» und «Grabenfräse – Pipe Express», Bewehrungsstahl beim Bauverfahren «Leitungskanal» und die Stahlbetonrohre der Bauverfahren «Mikrotunnel, begebar» und «Mikrotunnel, nicht begebar».

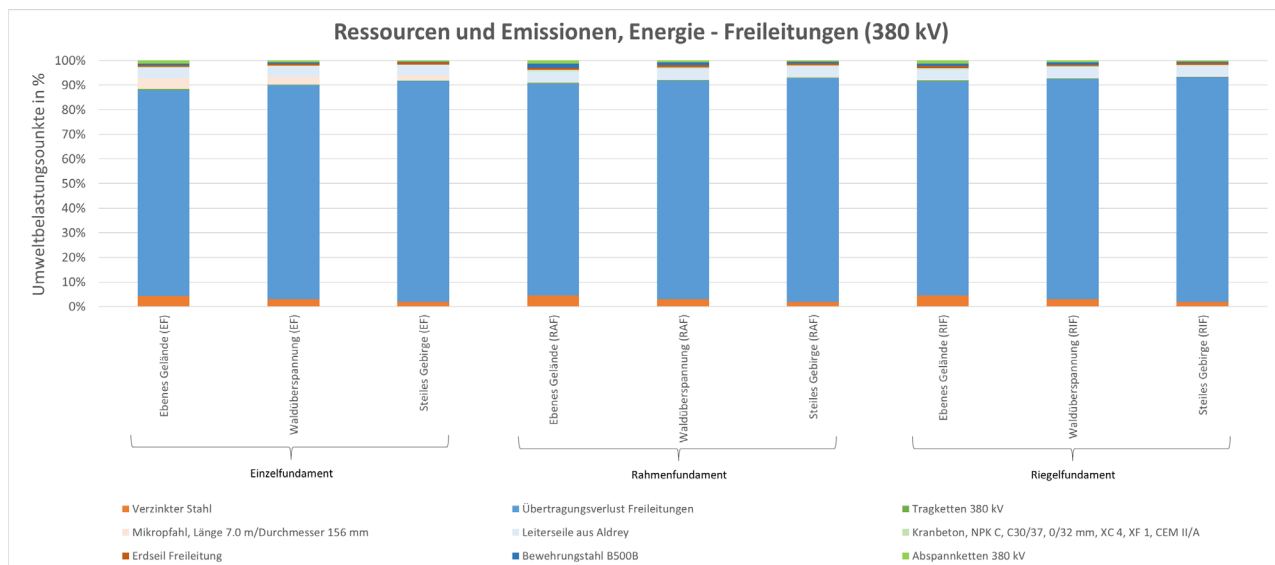


Abbildung 80: Ressourcen und Emissionen. Energie – Freileitungen (380 kV)

Relevante Materialien bzw. Komponenten der Freileitungen sind die Leiterseile aus Aldrey, der verzinkte Stahl für die Masten sowie der Bewehrungsstahl und die Mikropfähle der Fundamente, die für einen Grossteil der Umweltauswirkungen verantwortlich sind: siehe Abbildung 80. Einen kleinen Anteil der Umweltauswirkungen verursachen Komponenten wie Abspann- und Tragketten, das Erdseil sowie der Beton für die Fundamente.

5.4 Sensitivitätsanalyse

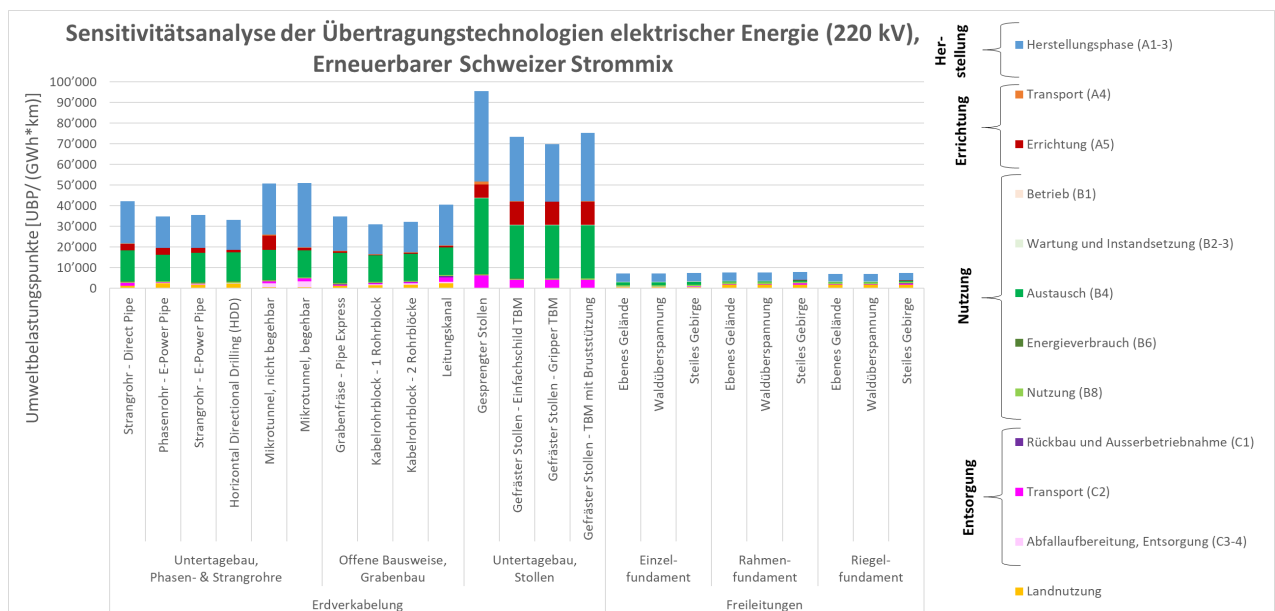


Abbildung 81: Sensitivitätsanalyse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie (220 kV), Erneuerbarer Schweizer Strommix

Weiter enthält der Bericht eine Sensitivitätsanalyse für die Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf den Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV. Dabei variiert die Modellrechnung die Lebensdauer der Kabel (40 Jahre, 60 Jahre, 80 Jahre), den Strommix (Schweizer Verbraucherstrommix, ENTSO-E-Mix, erneuerbarer Schweizer Strommix) sowie die Spannweiten

der Freileitungsmasten (Spannweite 400 m, Spannweite 600 m). Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, bleiben die Hauptaussagen zuhanden der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV bei Variation aller drei Parameter sowie auf der Höchstspannungsebene 220 kV bei Variation der Parameter 1 (Lebensdauer der Kabel) und 3 (Spannweiten) unverändert: siehe Abbildung 81.

Die Ergebnisse der Ökobilanz verändern sich hingegen stark, wenn bei den Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV von einem erneuerbaren Schweizer Strommix ausgegangen wird. In diesem Fall unterschreitet der Umfang an Umweltauswirkungen der Freileitungen erheblich den Umfang der Bauverfahren der Erdverkabelung.

5.5 Übergangsbauwerke

Hinsichtlich der Übergangsbauwerke zeigt die Ökobilanz, dass das «Übergangsbauwerk ohne Abspannportal: Endmast» die tiefsten Umweltauswirkungen aufweist: siehe Abbildung 82. Denn es geht mit dem geringsten Ressourcenverbrauch einher. Die höchsten Umweltauswirkungen erzeugt das Übergangsbauwerk «Abspannportal mit Kabelkeller: 2 Kabel pro Phase», da es mit Abstand den höchsten Materialaufwand benötigt.

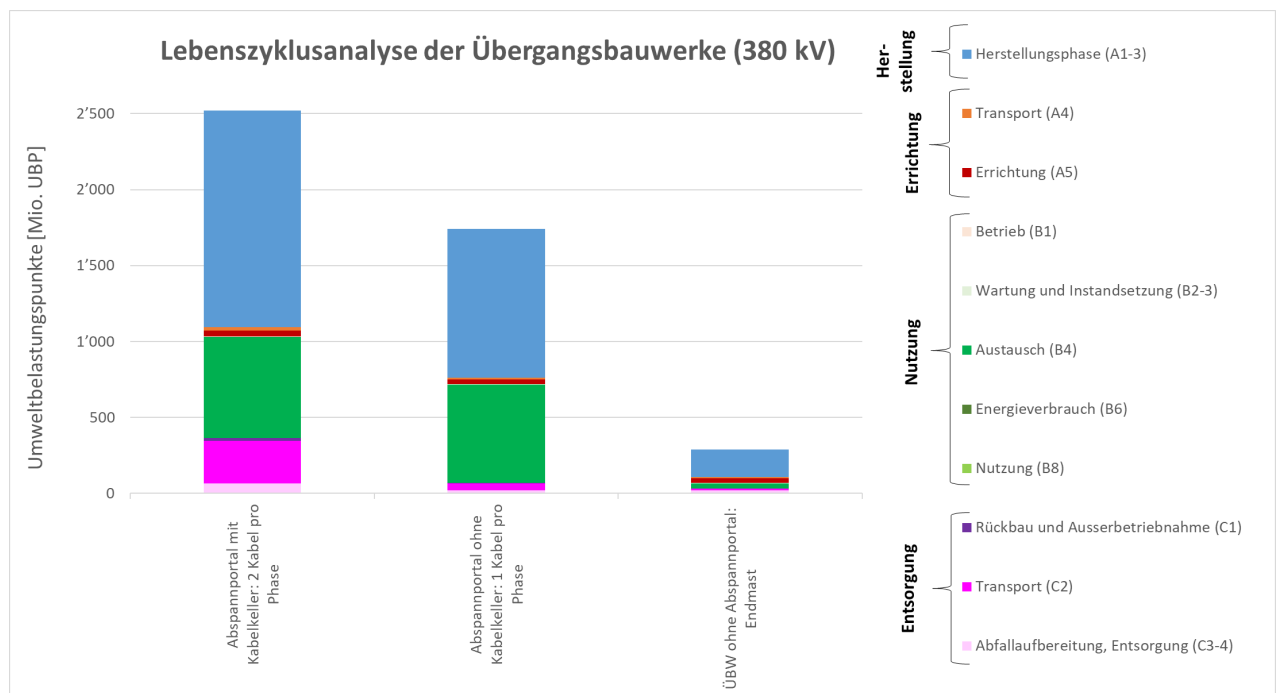


Abbildung 82: Lebenszyklusanalyse der Übergangsbauwerke (380 kV), Umweltbelastungspunkte

Die wichtigen Lebenszyklusphasen der Übergangsbauwerke sind die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) und der Transport (C2). Bei den Übergangsbauwerken fallen keine Energieaufwände und -verluste an, weshalb die Lebenszyklusphasen Energieverbrauch (B6) und Nutzung (B8) keine Emissionen aufweisen. Deshalb sind die eingesetzten Materialien für die Errichtung der Übergangsbauwerke von entscheidender Bedeutung. Die Komponenten, die einen hohen Metallanteil aufweisen, weisen die höchsten Umweltauswirkungen auf. Dazu gehören der Schaltkasten, der Stahl für das Abspannportal sowie die Umzäunung: siehe Abbildung 82. Ein Schaltschrank und ein Abspannportal sind nur bei den zwei Übergangsbauwerken «Abspannportal

mit Kabelkeller» und «Abspannportal ohne Kabelkeller» vorhanden. Die Umzäunung ist bei allen drei Übergangsbauwerken installiert. Sie weist beim Übergangsbauwerk «Ohne Abspannportal» die höchsten Umweltauswirkungen auf, da die anderen zuvor genannten Komponenten bei ihr entfallen.

6. Diskussion

Die in diesem Abschnitt diskutierten Ergebnisse gelten für alle drei Wirkungsabschätzungsmethoden. Allenfalls vorhandene Abweichungen sind im Text genannt.

6.1 Variantenstudium – Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf den Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV

Die Ökobilanz liefert klare Ergebnisse in Bezug auf die Übertragungstechnologien elektrischer Energie der Höchstspannungsebene 380 kV. Selbst bei Variation wesentlicher Parameter sind die Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung klar im Vorteil. Die Ergebnisse der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV sind nicht eindeutig. Werden die Ergebnisse mit der Wirkungsabschätzungsmethode «Methode der ökologischen Knappheit» ausgewertet, weisen die Freileitungen gleich hohe Umweltauswirkungen wie das Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe» und die Kabelrohrblöcke auf. Die Wirkungsabschätzungsmethode «Methode der ökologischen Knappheit» umfasst alle wesentlichen umweltrelevanten Gesichtspunkte, weshalb diese am aussagekräftigsten ist.

Wird nur die aufgewendete Primärenergie der Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit der Methode «kumulierter Energieaufwand» betrachtet, sind die Bauverfahren der Erdverkabelung mit geringem Primärenergieaufwand («Phasenrohr – E-Power Pipe» und die Kabelrohrblöcke) im Vorteil. Die unterschiedlichen Ergebnisse, die sich je Wirkungsabschätzungsmethode für die Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 220 kV ergeben, sind auf die unterschiedliche Gewichtung des Energieverbrauchs zurückzuführen. Die Umweltauswirkungen der Freileitungen stammen fast ausschliesslich aus Übertragungsverlusten, und diese Verluste liegen fast doppelt so hoch wie bei den Bauverfahren der Erdverkabelung. Dies erklärt den starken Anstieg der Umweltauswirkungen von Freileitungen unter der Wirkungsabschätzungsmethode des kumulierten Energieaufwands. Der Einfluss der Übertragungsverluste auf die Ökobilanz lässt sich allerdings verringern, wenn vermehrt erneuerbare elektrische Energie ins Schweizer-Übertragungsnetz aufgenommen wird. Dies senkt den Primärenergieaufwand sowie alle anderen Umweltauswirkungen der Freileitungen drastisch, wodurch die Freileitungen gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung wieder klar im Vorteil liegen. Die Menge an erneuerbarer Energie im Schweizer-Übertragungsnetz ist in den kommenden Jahren nicht abzuschätzen. Einzig die Angabe von Tendenzen ist möglich. Zudem ist Swissgrid nicht in der Lage, den Anteil an erneuerbaren Energie im Schweizer Übertragungsnetz zu beeinflussen.

Die Wirkungsabschätzungsmethode «kumulierter Energieaufwand» genügt demnach nicht für ein aussagekräftiges Analyseergebnis. Sie vermag die Frage nicht verbindlich zu beantworten, ob auf der Höchstspannungsebene 220 kV Freileitungen oder die Bauverfahren der Erdverkabelung weniger Umweltauswirkungen aufweisen. Vielmehr sollte auf die Ergebnisse der umfassenden «Methode der ökologischen Knappheit» zurückgegriffen werden.

Die Ökobilanz zeigt, dass die Umweltauswirkungen der Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene 380 kV tiefer liegen als die Umweltauswirkungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV. Die erhöhten Umweltauswirkungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV sind in der Systemeffizienz begründet. Zwar liegt die Materialisierung bei der Höchstspannungsebene fast gleich hoch, doch wird auf der tieferen

Nennspannung 220 kV etwa die Hälfte weniger elektrische Energie pro Leitung übertragen. Die Übertragungsverluste der Erdverkabelungsvarianten halbieren sich auf der Höchstspannungsebene bei 220-kV-Leitungen, jedoch können die niedrigeren Übertragungsverluste den Effekt der geringeren übertragbaren elektrischen Energie nicht aufheben. Bei den Freileitungen sind die Übertragungsverluste bei 220-kV-Freileitungen doppelt so hoch wie die der 380-kV-Freileitungen. Dies erklärt den signifikanten Anstieg der Umweltauswirkungen auf der 220-kV-Seite, da die Übertragungsverluste sehr hohe Umweltauswirkungen aufweisen.

Die Lebenszyklusphasen mit den meisten Umweltauswirkungen sind die Herstellung (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) und die Nutzung (B8). Die meisten dieser Umweltauswirkungen stammen aus den verbauten Materialien und den Energieaufwänden während des gesamten Lebenszyklus. Die Baumaschinen weisen generell bei allen Übertragungstechnologien elektrischer Energie geringe Umweltauswirkungen auf. Einen kleinen Anteil an den Umweltauswirkungen haben die Baumaschinen bei den Stollenverfahren bzw. der Einsatz der Vortriebspresen. Die Vortriebspresen und die Baustelleneinrichtung sind zahlreiche Stunden im Betrieb (10'000-20'000 h) und haben zugleich einen hohen Bedarf an elektrischer Energie pro Stunde (900-1'600 kWh). Die Umweltauswirkungen aus dem Transport und der Landnutzung sind vernachlässigbar klein. Die Transportstrecken sind kurz und erfolgen von den Zwischenlagern an die Baustelle sowie von der Baustelle zur Endentsorgungsstelle. Aufgrund der kurzen Transportstrecken fallen nur geringe Umweltauswirkungen an. Werden die Umweltauswirkungen des Transports ins Verhältnis zu den Auswirkungen der anderen Kategorien gesetzt, besitzen sie nur einen sehr kleinen bis vernachlässigbaren Anteil. Die genutzte Fläche ist bei allen Übertragungstechnologien elektrischer Energie gering, und die Landnutzungsart führt ebenso zu keinen erheblichen Emissionen. Daher fallen die Umweltauswirkungen der Landnutzung im Gegensatz zu den Auswirkungen von Materialien und Energien gering aus.

Die Materialien schlagen aufgrund der verbauten Menge und der daraus resultierenden Umweltauswirkungen ins Gewicht. Zusätzlich zu den in der Herstellungsphase (A1-3) verbauten Materialien werden während des gesamten Lebenszyklus immer wieder Materialien für den Betrieb (B1), die Wartung und Instandsetzung (B2-3), den Austausch (B4) und die Ausserbetriebnahme und Rückbau (C1) aufgewendet. Schon kleinste Mengen von Metallen sowie Komponenten mit einem hohen Mengenanteil, zum Beispiel das PE-HD Kabelschutzrohr, sind mit erhöhten Umweltauswirkungen verbunden. Die Materialien bzw. Komponenten der Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit den höchsten Umweltauswirkungen sind:

- XLPE-Kabel (alle Bauverfahren der Erdverkabelung)
- Kabelschutzrohr aus PE-HD (Phasenrohr – E-Power Pipe, Strangrohr – E-Power Pipe, Kabelrohrblock – 1 Rohrblock, Kabelrohrblock – 2 Kabelrohrblöcke)
- Bentonit (Phasenrohr – E-Power Pipe, Strangrohr – E-Power Pipe)
- Kabelschlitten aus Stahl (Strangrohr – E-Power Pipe, Strangrohr – Direct Pipe, Strangrohr – Horizontal Directional Drilling (HDD), Grabenfräse – Pipe Express)
- Kabelschutzrohre aus Stahl (Strangrohr – Direct Pipe, Grabenfräse – Pipe Express)
- Metallstützen (Strangrohr – Direct Pipe, Strangrohr – Horizontal Directional Drilling (HDD))
- Bewehrungsstahl B500B (Leitungskanal, Freileitung mit Riegelfundament)

- Stahlbetonrohre (Mikrotunnel, begehbar und nicht begehbar)
- Hydraulische Fuge (Mikrotunnel, begehbar und nicht begehbar)
- Beton (Kabelrohrblock – 1 Rohrblock, Kabelrohrblock – 2 Kabelrohrblöcke, Leitungskanal, Gesprengter Stollen, Gefräster Stollen – Einfachschild TBM, Gefräster Stollen – Gripper TBM, Gefräster Stollen – Bruststützung mit TBM, Freileitung mit Rahmenfundament)
- Elektroverteilung (2 Felder) (Gesprengter Stollen, Gefräster Stollen – Einfachschild TBM, Gefräster Stollen – Bruststützung mit TBM)
- Mikropfahl (Freileitung mit Einzelfundament)
- Verzinkter Stahl (Freileitung mit Einzelfundament, Freileitung mit Rahmenfundament, Freileitung mit Riegelfundament)
- Leiterseile aus Aldrey (Freileitung mit Einzelfundament, Freileitung mit Rahmenfundament, Freileitung mit Riegelfundament)

Der vorliegende Bericht berücksichtigt zahlreiche weitere Materialien. Diese tragen ebenfalls einen Teil der Umweltauswirkungen zur Gesamtbilanz bei. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, beschränkt sich die Auflistung auf die jeweils drei relevantesten Materialien pro Übertragungstechnologie elektrischer Energie.

Die Energie ist wie die Materialien ein entscheidender Indikator für den Umfang der anfallenden Umweltauswirkungen. Die Energie besteht aus den Übertragungsverlusten während der Nutzung und aus dem Bedarf an elektrischer Energie während des Betriebs (B1), der Wartung und Instandsetzung (B2-3) und des Austausches (B4). Die Freileitungen sowie die Bauverfahren der Erdverkabelung weisen Übertragungsverluste auf, wobei bei den Freileitungen während der Nutzungsdauer praktisch kein weiterer Bedarf an elektrischer Energie anfällt. Die hohen Umweltauswirkungen des elektrischen Bedarfs erklären sich aufgrund des kontinuierlichen Energieverbrauchs während einer Lebensdauer von 80 Jahren und der hohen Umweltkennwerte pro verbrauchter elektrischer Energie. Wird der Schweizer Verbraucherstrommix zugrunde gelegt, führt dies bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden zu sehr hohen Umweltauswirkungen. Während einer Lebensdauer von 80 Jahren benötigen die Bauverfahren der Erdverkabelung kontinuierlich elektrische Energie für die Aufrechterhaltung der Bauwerke. Hierfür sind im Wesentlichen der Strombedarf der mechanischen Lüftung bei den Bauverfahren «Strangrohr – Direct Pipe», «Strangrohr – E-Power Pipe», «Horizontal Directional Drilling (HDD)» sowie «Mikrotunnel, nicht begehbar» verantwortlich, da bei diesen Bauverfahren ein erhöhter Kühlbedarf aufgrund der Abwärme der Kabel besteht.

Die durch Koronaentladungen verursachten Lachgas- und Ozonemissionen weisen in der Gesamtbetrachtung einen geringen Anteil an Umweltauswirkungen auf und sind vernachlässigbar klein. Koronaentladungen finden nur bei Freileitungen statt. Es gibt keine aktuelle Literatur oder Messwerte zu den Lachgas- und Ozonemissionen von Freileitungen, was die Bezifferung der tatsächlich entstandenen Emissionen erschwert. Aus diesem Grund beruht die Menge der bilanzierten Emissionen auf einer Annahme, die sich auf wenige, bereits verjährte Fachbeiträge stützt.

6.2 Sensitivitätsanalyse

Wie gezeigt lassen sich die Umweltauswirkungen der Bauverfahren zur Übertragung elektrischer Energie bei zunehmender Lebensdauer der Kabel senken. Diese Erkenntnis verändert zwar nicht die Hauptaussagen der Ökobilanz. Doch belegt sie, dass die Langlebigkeit der Baumaterialien bzw. Baukomponenten die untersuchten Übertragungstechnologien elektrischer Energie umweltfreundlicher gestaltet. Deswegen ist nicht nur die Wahl des Materials, sondern auch dessen Qualität und Langlebigkeit für das Ergebnis der Ökobilanz entscheidend. Die Sensitivitätsanalyse veranschaulicht ferner, dass die Abstände der Freileitungsmasten keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz haben. Die Umweltauswirkungen der Freileitungen mit einem Masten-Abstand von 400 m und einem Masten-Abstand von 600 m unterscheiden sich kaum. Es wird zwar für den Bau der Masten bei einer geringeren Spannweite weniger Material verbaut, jedoch erhöht sich die Anzahl der Masten für die jeweils vorgegebene Strecke. Dieses Verhältnis trifft ebenso auf weitere Spannweiten zu. Somit ist die Frage nach dem optimalen Abstand zwischen den Masten in der Planung vernachlässigbar.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass sich die Umweltauswirkungen mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien im Schweizer Übertragungsnetz stark senken lassen. Da die Übertragungsverluste für einen Grossteil der Umweltauswirkungen der untersuchten Übertragungstechnologien elektrischer Energie verantwortlich sind, spielt der Strommix indirekt eine wichtige Rolle. Wann das Szenario des erneuerbaren Schweizer Strommixes künftig eintritt, ist allerdings schwierig abzuschätzen – und zudem von politischen und technischen Gegebenheiten abhängig, die Swissgrid nicht beeinflussen kann. Darüber hinaus werden die technischen Grenzen der jeweiligen Übertragungstechnologien elektrischer Energie von physikalischen Gesetzen bestimmt und sind nur wenig beeinflussbar. Klar ist jedoch, dass die Umweltauswirkungen der Freileitungen bei zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien im Schweizer Übertragungsnetz abnehmen. Freileitungen sind in diesem Fall gegenüber den Bauverfahren der Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene 220 kV klar im Vorteil.

6.3 Datenqualität und Unsicherheiten

Die Datenqualität der Ökobilanz ist zuverlässig und detailliert. Die technischen Vordergrunddaten zu den Übertragungstechnologien elektrischer Energie verfügen über eine hohe Genauigkeit und Aktualität, da sie anhand bereits erfolgter Bauprojekte erhoben sind. So enthält dieser Bericht alle Aufwände für die Sachbilanz zielgerichtet und mit einer hohen Zuverlässigkeit. Kleine Aufwände (beispielsweise Papier im Betrieb), die das Ergebnis der Ökobilanz nicht beeinflussen, sind nicht in der Sachbilanz aufgenommen.

Die Datenqualität bei den Übergangsbauwerken entspricht nicht dem Detaillierungsgrad der Daten zu den Technologien der Übertragung elektrischer Energie. Dies liegt zum einen darin begründet, dass viele unterschiedliche Ausführungsvarianten von Übergangsbauwerken existieren; zum anderen darin, dass der Schwerpunkt des Berichts auf den Umweltauswirkungen der Technologien der Übertragung elektrischer Energie liegt. Dennoch reicht die Datengrundlage aus, um die Unterschiede der drei untersuchten Extremvarianten von Übertragungsbauwerken aus Sicht der Ökobilanz abzubilden.

Im Rahmen dieses Berichts ist keine Unsicherheitsanalyse durchgeführt worden, weil diese das Ergebnis nicht beeinflusst. Die Stabilität der Ergebnisse aus dem Variantenstudium wird durch die Sensitivitätsanalyse bestätigt.

7. Schlussfolgerungen

Aus der Ökobilanz ergibt sich als wichtigste Erkenntnis, dass Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 380 kV tiefere Umweltauswirkungen als Bauverfahren der Erdverkabelung aufweisen. Hingegen zeigen Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV vergleichbar hohe Umweltauswirkungen wie die Bauverfahren der Erdverkabelung mit niedrigen Umweltauswirkungen (Kabelrohrblöcke, «Phasenrohr – E-Power Pipe»). Dies gilt bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden. Entscheidend für das Ergebnis ist die Höhe der Übertragungsverluste und die übertragbare elektrische Energie je Nennspannung in der Höchstspannungsebene. Weiter beeinflusst die Wahl des Strommixes das Ergebnis der Ökobilanz massgeblich. Es gilt: Je höher der Anteil an erneuerbaren Energien ist, desto weniger Umweltauswirkungen fallen an.

Weiter zeigt der Bericht, dass die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) und die Nutzungsdauer (B6) auf beiden Höchstspannungsebenen und bei allen drei Wirkungsabschätzungsmethoden die relevantesten Lebenszyklusphasen darstellen. Diesen Lebenszyklusphasen sind die Materialaufwände und der Energieverbrauch zuzuordnen, welche die höchsten Umweltauswirkungen aufweisen. Hingegen spielen die Baumaschinen, der Transport und die Landnutzung in der Gesamtbetrachtung der Ökobilanz eine untergeordnete Rolle.

Die Erkenntnisse aus der Ökobilanz bieten Swissgrid eine Möglichkeit, nachhaltige Bauentscheidungen zu treffen und die ökologisch vorteilhafteste Technologie der Übertragung elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene zu wählen. Zusätzlich schaffen die Ergebnisse Transparenz für mögliche Handlungsfelder in der Vorplanung wie auch im Bau der zur Übertragung elektrischer Energie dienenden Bauwerke, um künftige Optimierungsmassnahmen zur Minimierung von Umweltauswirkungen von Beginn an festzulegen.

Ein nächster Schritt kann darin bestehen, den Datensatz des vorliegenden Berichts aufzubereiten und damit die Datenlage der UVEK-Datenbank «transmission network, electricity, high voltage/km/CH/I UV» zu aktualisieren. Der in der UVEK-Datenbank ausgewiesene Prozess umfasst über die Energieverteilung hinaus weitere wesentliche Elemente des elektrischen Übertragungsnetzes wie Schaltanlagen und Transformatoren. Der Datensatz des vorliegenden Berichts weist hinsichtlich der Übertragung elektrischer Energie einen höheren Detaillierungsgrad als die UVEK-Datenbank auf. Ein Folgebericht kann sich den Umweltauswirkungen von Schaltanlagen widmen. Ein Fernziel könnte darin bestehen, den Datensatz «transmission network, electricity, high voltage/km/CH/I UV» vollständig zu ersetzen.

In ihrer Vorreiterrolle könnte Swissgrid ferner die Lachgas- sowie Ozonemissionen im Übertragungsnetz messen, um die – angesichts der veralteten Fachliteratur – gegenwärtige Datenlücke zu schliessen. Zudem gestattet es die Datenqualität des vorliegenden Berichts, nach Bedarf eine detaillierte Ökobilanz der Unterwerke zu erstellen, um das Gesamtsystem des Übertragungsnetzes bilanzieren zu können.

In Zukunft könnten andere Netzbetreiber eine weitere Ökobilanz für das Mittel- und Niederspannungsnetz erstellen. Denn das Variantenstudium belegt, dass bei einem tieferen Spannungsbereich höhere Umweltauswirkungen pro übertragene elektrische Energie entstehen. Es stellt sich dabei die Frage, in welchem Umfang sich die Aussagen des Variantenstudiums auf ein Mittel- oder Niederspannungsnetz übertragen lassen – zumal die Übertragungsverluste und die übertragene elektrische Energie stark von den Werten der Höchstspannungsebene abweichen.

8. Empfehlung

Generell gilt, dass für alle Geländetypen unterschiedlich geeignete Übertragungstechnologien elektrischer Energie existieren. Das Ziel kann demnach nicht darin bestehen, unabhängig von den technischen Gegebenheiten die aus ökologischer Sicht umweltfreundlichste Übertragungstechnologie elektrischer Energie zu wählen. Vielmehr muss es darum gehen, im Hinblick auf das jeweilige Gelände die geeignete Technologie einzusetzen und zu optimieren. Besteht für einen Geländetyp die Wahl zwischen mehreren Übertragungstechnologien elektrischer Energie, ist es sinnvoll, diejenige Technologie einzusetzen, welche die geringsten Umweltauswirkungen aufweist. Die Grundlage für die Wahl einer geeigneten Technologie ist multifaktoriell. Sie umfasst zusätzlich zu den ökologischen ebenso technische, rechtliche, ökonomische sowie soziale Kriterien. Die über die ökologischen Kriterien hinausgehenden Kriterien müssen gleichfalls sorgfältig ermittelt und im Sinne einer Nutzenabwägung kritisch hinterfragt werden.

Nach Möglichkeit sollten auf der Höchstspannungsebene 380 kV Freileitungen anstelle von Bauverfahren der Erdverkabelung eingesetzt werden, da sie tiefere Umweltauswirkungen aufweisen. Die unterschiedlichen Typen von Freileitungen weisen vergleichbar hohe Umweltauswirkungen auf, weshalb das Fundament nach Belieben für den jeweiligen Zweck ausgewählt werden kann. Bestehen mehrere Möglichkeiten für die Wahl des Fundamenttyps, empfiehlt es sich auf Grund der leicht niedrigeren Umweltauswirkungen, eine Freileitung mit Riegelfundament zu bevorzugen. Ist eine Erdverkabelung vorgesehen, sollte nach Möglichkeit das Bauverfahren «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» eingesetzt werden. Denn dieses Verfahren zeigt gegenüber allen anderen Bauverfahren der Erdverkabelung die niedrigsten Umweltauswirkungen. Ist ein Stollen vorgesehen, so ist das Bauverfahren «Gefräster Stollen – Gripper TBM» zu empfehlen. Bei Unterfahrungen mittels eines Bauverfahrens des Untertagebaus sollte nach Möglichkeit das Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe» eingesetzt werden.

Die Umweltauswirkungen von Freileitungen auf der Höchstspannungsebene 220 kV variieren je nach Wirkungsabschätzungsmethode. Wird nur die aufgewendete Primärenergie der Übertragungstechnologien elektrischer Energie mit der Methode «kumulierter Energieaufwand» betrachtet, liegen die Bauverfahren der Erdverkabelung mit geringem Primärenergieaufwand («Phasenrohr – E-Power Pipe» und die Kabelrohrblöcke) gegenüber Freileitungen im Vorteil. Bei Anwendung der beiden anderen Wirkungsabschätzungsmethoden trifft diese Aussage nicht zu. Das Kriterium des Primärenergieaufwands ist für sich alleine allerdings nicht aussagekräftig genug, da es nur eine Umweltauswirkung betrifft. Aus diesem Grund wird empfohlen, auf der Höchstspannungsebene 220 kV künftig je nach Rahmenbedingungen sowohl Freileitungen wie auch die Bauverfahren «Phasenrohr – E-Power Pipe», «Kabelrohrblock – 1 Rohrblock» und «Kabelrohrblock – 2 Rohrblöcke» in Betracht zu ziehen. Sollte ein Stollen vorgesehen sein, ist aus ökologischer Sicht das Bauverfahren «Gefräster Stollen – Gripper TBM» sinnvoll.

Wie die Ökobilanz belegt, sind die Übertragungsverluste für einen hohen Anteil der Umweltauswirkungen verantwortlich. Das Optimierungspotenzial ist allerdings durch technische und politische Rahmenbedingungen beschränkt bzw. bereits erschöpft. Daher scheint der Ansatz verfehlt, sich verstärkt auf die Minimierung der Übertragungsverluste auszurichten.

Zielführender ist es, die Umweltauswirkungen der energetischen Aufwände während des Baus und der Nutzung zu verringern. Die wohl einfachste Massnahme, um Umweltauswirkungen

energetischer Herkunft zu reduzieren, ist der Einsatz von erneuerbaren Energien. Diese Massnahme verhindert nach Ausweis der Sensitivitätsanalyse einen Grossteil der Emissionen aus der herkömmlichen Produktion elektrischer Energie. Zudem ist das Vermeidungsprinzip vorrangig, um die Umweltauswirkungen effektiv einzudämmen. Somit ist es sinnvoll, während des Einsatzes von Bauverfahren der Erdverkabelung möglichst wenig elektrische Energie zu verbrauchen. Möglichkeiten hierzu bieten ein effizientes Beleuchtungssystem mit LED-Sparlampen und Bewegungsmeldung oder eine Temperaturüberwachung der Bauverfahren, die den elektrischen Energiebedarf der mechanischen Lüftung optimiert. Weiter lässt sich vor Ort durch PV-Module elektrische Energie erzeugen, um die Anlagen mit selbst erzeugter Energie zu betreiben. Schliesslich könnten elektrifizierte, mit einem erneuerbaren Energiemix betriebene Baumaschinen zum Einsatz kommen. Dies sind nur einige von vielen Möglichkeiten, den Bauprozess energetisch zu optimieren.

Die Umweltauswirkungen der Materialien lassen sich bereits mittels geringer Innovationen verringern, die das Gesamtsystem rasch verbessern. Bei den Materialien gilt es vor allem Metalle jeglicher Art zu meiden, da diese die höchsten Umweltauswirkungen aufweisen. Einfach zu ersetzen sind Komponenten, die (im Gegensatz zu Komponenten aus komplexen Verbundmaterialien) aus nur einem oder maximal zwei Materialien bestehen. So lassen sich anstelle von Kabelschutzrohren aus Stahl PE-HD Kabelschutzrohre verwenden.

Als weitere Massnahme zur Vermeidung von Umweltauswirkungen bietet sich (wo möglich) der Einsatz rezyklierter Materialien an, der den Primärabbau von Rohstoffen eindämmt. Beispielsweise lässt sich für Auffüllungen, als Bettungsmaterial, für die Aushubsicherung der Stollen oder für die Fundamente der Freileitungen Beton mit einem hohen Recyclinganteil an Gesteinskörnungen verwenden. Die Wahl zertifizierter Materiallieferanten macht es schliesslich möglich, die Wertschöpfungskette zu überwachen und ökologisch bzw. nachhaltig zu gestalten.

Die Nachhaltigkeit eines Bauprojekts lässt sich in einer früheren Planungsphase am besten beeinflussen. Deshalb ist es grundsätzlich erforderlich, schon in der Phase der Vorplanung die Wahl der Materialien zu bedenken. Zusammenfassend bieten sich drei Massnahmen an, um die Übertragungstechnologien elektrischer Energie mittels einer ökologischen Materialwahl auf effiziente Weise möglichst umweltfreundlich zu gestalten: der Ersatz von Komponenten aus Metallen, der Einsatz von Recycling-Materialien und die Gewährleistung der Qualität sowie der Langlebigkeit der Komponenten.

Um ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte in Einklang zu bringen, ist es zweckmässig, bereits in der Planungsphase beabsichtigte Übertragungsnetznetzerweiterungen einen Massnahmenplan zu erstellen und die Ökoeffizienz der Massnahmen mittels einer Ökoeffizienzanalyse zu beurteilen. Dies bietet den Vorteil, nicht nur die Umweltauswirkungen der beabsichtigten Massnahmen zu beachten, sondern stets auch die ökonomischen Gesichtspunkte im Auge zu behalten.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Finkbeiner, «Commentaries: The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044», 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.02.002>.
- [2] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), «Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)», Nov. 2006.
- [3] «Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken – Teil 5: Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke», SN EN 15643-5:2017, Nov. 2018.
- [4] Rolf Frischknecht, «Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 6», 2022.
- [5] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, «UVEK-Datenbank 2022: UVEK LCI Data DQRv2:2022», 2022.
- [6] Rolf Frischknecht, «LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency», *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15, 2010, S. 666–671.
- [7] Rolf Frischknecht, Franziska Wyss, Sybille Büsser Knöpfel, Thomas Lützkendorf, Maria Baloutski, «Cumulative energy demand in LCA: the energy harvest approach», *Int. J. Life Cycle Assess.*, Bd. 20, Nr. 7, S. 957–969, Okt. 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>.
- [8] «Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», Cambridge University Press, Cambridge/New York, 2021.
- [9] «Climate Change 2022: Synthesis Report», Genf, 2022.
- [10] Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) u. a., «Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit – Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz», Bundesamt für Umwelt, Bern, 2021.
- [11] A. Gautschi, «Green Economy – The Method of Ecological Scarcity in Policy making, in Economics and Environmental Monitoring Division», 2013.
- [12] «Methode der ökologischen Knappheit», Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2022.
- [13] ETH Zürich, Prof. Dr. Stefanie Hellweg, «Vorlesung: Grundzüge ‚Ökologische Systemanalyse‘», gehalten auf der Methodik Ökobilanz Wirkungsbilanz, Zürich, 2017.
- [14] R. Frischknecht, «Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 5», KBOB, ecobau, IPB, Bern, Juni 2021.
- [15] R. Frischknecht u. a., «Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, ecoinvent report No. 3», Zürich, 2007.
- [16] Atheron, J., «Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles», S. 59–60, 2007.
- [17] A. Pit, «Why reduce reactive power? More power – less copper | forttop UK». <https://forttop.co.uk/knowledge/white-papers/reactive-power-reducing-compensating> (zugegriffen am 17. Mai 2023).
- [18] Sebastian Bothor, «Prognose von Netzverlusten», 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/10566/4/Dissertation_Sebastian%20Bothor_Prognose%20von%20Netzverlusten.pdf.
- [19] René Itten, Rolf Frischknecht, Matthias Stucki, «Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid – Version 1.3», Juni 2014.