

LCA verschiedener Leitungsvarianten zwischen Mörel-Filet und Fiesch

Schlussbericht

Erstellt für:

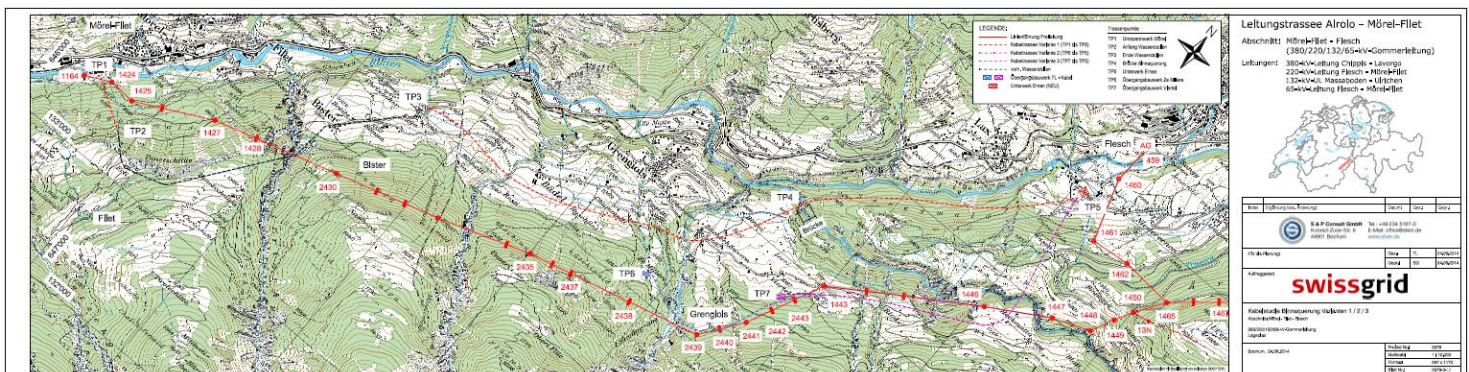
swissgrid

Erstellt durch: **Quantis**

Dr. Rainer Zah, Project Manager

Dr. Andrea Del Duce, Analyst

11.9.2014



Quantis ist ein führendes Beratungsunternehmen für Ökobilanzen (Life Cycle Assessment - LCA). Es unterstützt Unternehmen und die öffentliche Hand bei der Messung, Bewertung und Verwaltung der Umweltauswirkungen ihrer Produkte und Dienstleistungen. Quantis bildet ein globales Unternehmen mit Niederlassungen in den Vereinigten Staaten, Kanada, der Schweiz und Frankreich und beschäftigt mehr als 60 Experten, darunter international führende LCA-Forscher.

Quantis bietet *state-of-the-art* Dienstleistungen zu Ökobilanzierung, Öko-Design, nachhaltigen Lieferketten und Umweltkommunikation. Quantis entwickelt auch innovative LCA-Software - Quantis SUITE 2.0 - die es Unternehmen ermöglicht, ihren ökologischen Fußabdruck, einfach selber zu analysieren, zu bewerten und zu verwalten. Des Weiteren entwickelt Quantis Sektor-spezifische Umweltinventardatenbanken gemäss den Qualitätsrichtlinien von ecoinvent (water footprint database, world food database). Durch die enge Verbindung zur Wissenschaft mittels strategischen Forschungsk Kooperationen ist Quantis bestens gewappnet, um Kunden bei der Transformation von LCA-Resultaten in Entscheidungen und Aktionspläne zu begleiten. Weitere Informationen finden Sie unter www.quantis-intl.com. Allfällige Anfragen zu dieser Studie können direkt an die Zürcher Filiale von Quantis gerichtet werden:

Quantis Schweiz/Deutschland

Reitergasse 11

8004 Zürich

Tel. +41 78 7499741

info.schweiz@quantis-intl.com

www.quantis-intl.com

PROJEKT INFORMATION	
Projekttitel	LCA verschiedener Leitungsvarianten zwischen Mörel und Fiesch
Kunde	Swissgrid
Haftungsausschluss	Die Datengrundlagen dieser Studie beruhen auf Quellen, die als vertrauenswürdig eingestuft wurden. Die korrekte Weiterverwendung der Ergebnisse liegt in der Verantwortung des Lesers. Quantis ist nicht haftbar für allfällige Verluste oder Schäden, welche sich aus der Verwendung der Informationen dieses Berichts ergeben.
Version	Schlussversion
Projektteam	Dr. Rainer Zah, Projektleiter (rainer.zah@quantis-intl.com) Dr. Andrea Del Duce, Analyst (andrea.delduce@quantis-intl.com)
Kundenkontakt	Dr. Heinrich Zimmermann Heinrich.zimmermann@swissgrid.ch Julia Baumann Julia.Baumann@swissgrid.ch
Interne Qualitätskontrolle	Dr. Mireille Faist, LCA-Experte (mireille.faist@quantis-intl.com)
Projektdauer:	Von Juni 2014 bis Juli 2014
Erweiterung:	September 2014
Associated files	---

Management Summary

Swissgrid hat Quantis beauftragt, mittels einer Life Cycle Assessment (LCA) Studie die Umweltauswirkungen von vier Leitungsvarianten für den Teilabschnitt einer Hochspannungsleitung zwischen Mörel-Filet und Fiesch, die zurzeit in der Planungsphase steht, zu quantifizieren. Die Leitungsvarianten, die verglichen werden sollen, sind zwei 10km lange Freileitungen (eine davon auf Leitungsverluste optimiert), eine 9.5 km lange Leitung mit einer 3 km Teilverkabelung (hier als „Teilverkabelung 3 km“ bezeichnet) und eine vierte Variante mit einer ca. 9.2 km langen Verkabelung und einer kleineren parallelen Freileitung von 9.5 km für die SBB (hier als „Teilverkabelung 9.2 km“ bezeichnet). Die Ergebnisse der Studie sollen, neben weiteren technischen und wirtschaftlichen Aspekten, als Entscheidungsgrundlage zur Wahl der zu realisierenden Leitungsvariante dienen.

Die Ökobilanzierung wurde analog den ISO-Normen 14040 und 14044 durchgeführt. Die Erhebung der für die Studie relevanten Daten zu den vier Bauvarianten wurde von den Projektpartnern von Swissgrid, die für die Planung der unterschiedlichen Systeme zuständig sind, durchgeführt. Anschliessend wurden die Daten an Quantis für die Modellierung und Berechnungen weitergeleitet. Ein zentraler Aspekt der Studie ist die Berücksichtigung der möglichen Wiederverwendung der grossen Mengen an Materialien (insbesondere der Metalle), die am Ende der Nutzungsphase der Hochspannungsleitung zur Verfügung stehen. In der Studie wurde das Recycling dieser Materialien mittels Systemerweiterung und Substitution modelliert. Für den Vergleich der Bauvarianten wurden jeweils die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Umweltbelastungspunkte (UBP) gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2006 und Eco-indicator 99 berechnet. Alle Ergebnisse beziehen sich auf einen Lebenszyklus von 40 Jahren. Die Umweltauswirkungen aus den Stromverlusten wurden separat analysiert.

Die zwei Freileitungsvarianten benötigen 26 Masten und 18 Aldrey-Seile. Die optimierte Freileitung benutzt etwas dickere Seile, um geringere Leitungsverluste zu erhalten, und entsprechend robustere Masten. Die Variante mit der 3 km Teilverkabelung besteht aus zwei parallelen Abschnitten (mit jeweils 3 km Aluminium-Kupfer Kabel in einem Kabeltunnel und 3 km Freileitung mit 3 Aldrey-Seilen und 18 kleineren Masten für die SBB) und einer 6.5 km langen gemeinsamen Freileitung mit 18 Masten und 18 Aldrey-Seilen. In der Variante mit der 9.2 km langen Verkabelung werden Kupferkabel eingesetzt, die jeweils durch 3.2 km Kabeltunnel, 2.5 km Kabelrohrblöcke, einen 2.9 km langen Wasserstollen, einen 0.45 km langen bergmännischen Stollen und über eine Brücke geführt werden. Die dazu parallele SBB-Freileitung besteht aus 54 kleineren Masten mit 3 Aldrey-Seilen. Die Elektrizitätsverluste über 40 Jahre der Freileitung, optimierte Freileitung, Teilverkabelung 3 km und Teilverkabelung 9.2 km betragen jeweils 780 GWh, 562 GWh, 607 GWh und 246 GWh. In Abbildung I sind die Treibhausgasemissionen ohne Berücksichtigung der Stromverluste dargestellt. Bei den anderen Indikatoren zeigt sich ein ähnliches Muster (siehe Kapitel 4.1).

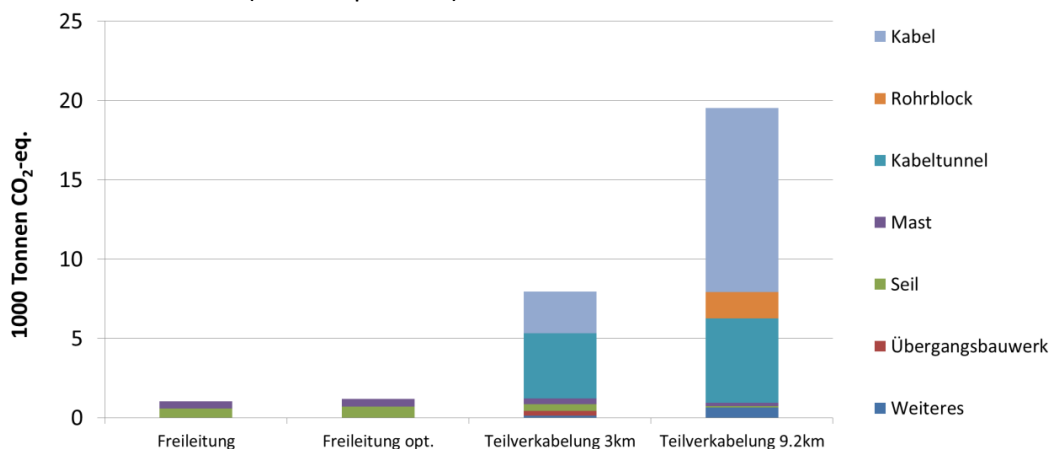


Abbildung I: Treibhausgasemissionen der vier Bauvarianten.

Allgemein schneiden die Freileitungen am besten ab, während die Teilverkabelung 9.2 km aufgrund der sehr grossen Beiträge aus der Kupferkabelproduktion die höchsten Umweltauswirkungen aufweist. In den Abbildungen III und IV sind die gleichen Indikatoren unter Berücksichtigung der Elektrizitätsverluste dargestellt.

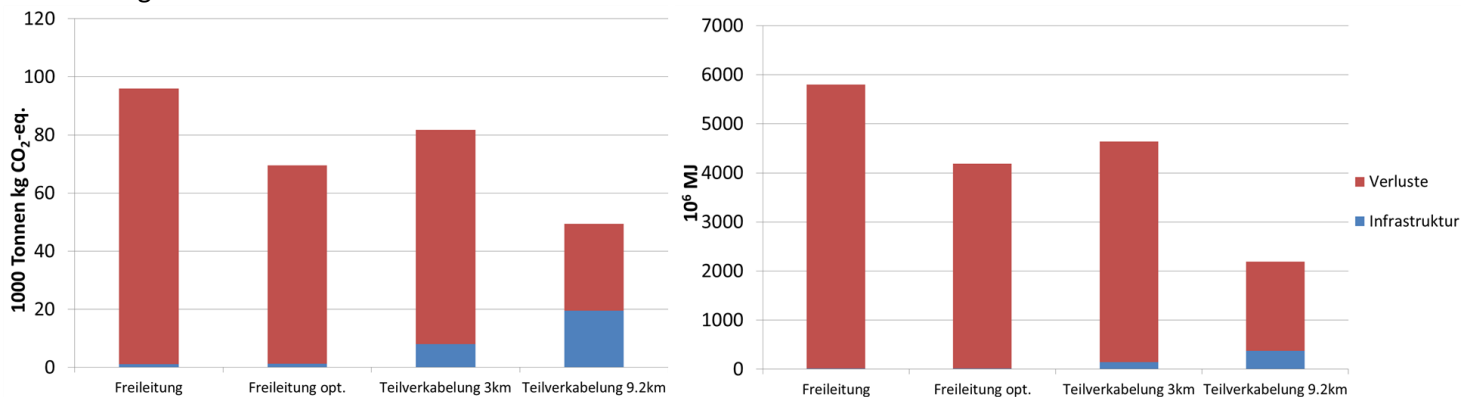


Abbildung III: Treibhausgasemissionen und kumulierter Energieaufwand (KEA) mit Berücksichtigung der Verluste.

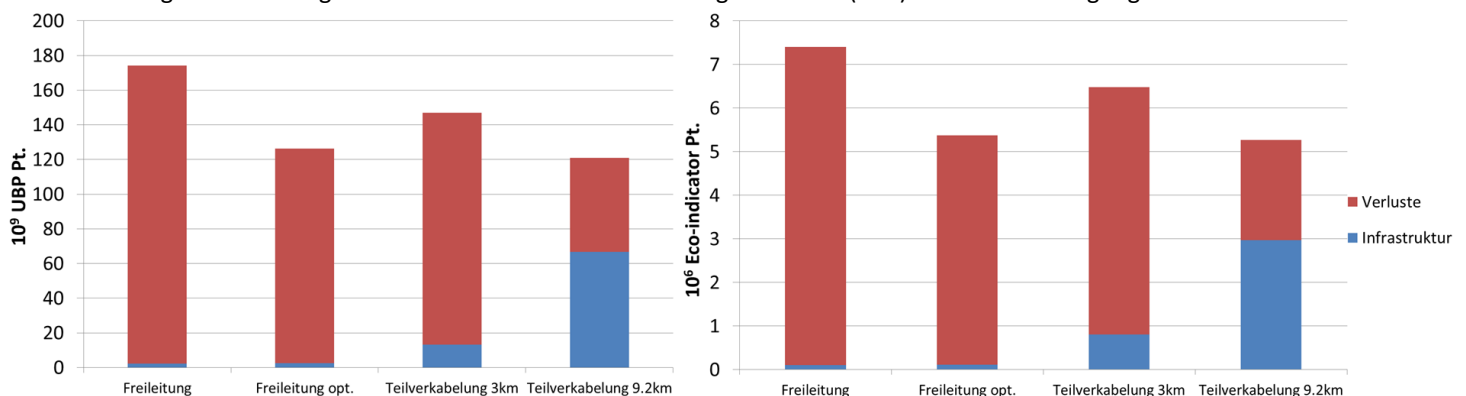


Abbildung IV: Gesamte Umweltbelastung (UBP und Eco-indicator 99) mit Berücksichtigung der Verluste.

Aus den Abbildungen oben ist deutlich zu lesen, dass die Stromverluste einen grossen Einfluss auf die Umweltauswirkungen haben. Dadurch schneidet die Teilverkabelung 9.2 km aufgrund der deutlich kleineren Verluste bei allen Indikatoren am besten ab. Nur bei der Methode der ökologischen Knappheit und beim Eco-indicator 99 weist die optimierte Freileitung ähnliche Ergebnisse wie die Teilverkabelung 9.2 km auf.

Um die Sensitivität der Schlussfolgerungen abzuschätzen, wurden die Ergebnisse neu unter Änderung einiger relevanter Annahmen berechnet. Insbesondere wurden die Ergebnisse mit höheren und tieferen Recyclingverlusten, mit Verbrennung anstatt von Recycling der sehr hohen Mengen an XLPE aus der Kabelisolation und mit Strom-Mix mit höherem Anteil an erneuerbaren Stromquellen berechnet. Alle Sensitivitätsberechnungen zeigten ein ähnliches Bild. Sowohl bei den Treibhausgasemissionen als auch bei dem KEA schliesst auch unter Änderungen der oben genannten Annahmen die Teilverkabelung 9.2 km am besten ab. Unter bestimmten Bedingungen (z.B. 5% Verluste im Kupferrecycling, Verbrennung anstelle von Recycling des XLPEs und Strom-Mix mit höherem Anteil an erneuerbaren Stromquellen) kann aber die optimierte Freileitung bei der Methode der ökologischen Knappheit und dem Eco-indicator besser abschliessen, als die Teilverkabelung 9.2 km. In diesen Situationen kann basierend auf den Ergebnissen der Ökobilanzierung keine in allen Indikatoren optimale Variante identifiziert werden. In diesen Fällen müsste die Entscheidung zur Realisierung einer spezifischen Variante, und insbesondere zwischen der Teilverkabelung 9.2km und der optimierten Freileitung, „wertorientiert“ getroffen werden.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	3
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungen und Fachbegriffe	11
1 Ausgangslage.....	12
2 Methodische Grundlagen	12
2.1 Methode der Ökobilanzierung	12
2.2 Beschreibung der Systeme.....	13
2.3 Funktionelle Einheit	15
2.4 Multifunktionalität.....	15
2.5 Systemgrenzen.....	15
3 Lebenszyklus-Inventar und Modellierung.....	17
3.1 Inventardaten: Modellierungsansätze.....	17
3.1.1 Transporte.....	17
3.1.2 Wahl von Primär- und Sekundärmaterialien	17
3.1.3 Multifunktionalität und Recycling.....	17
3.1.4 Aushub, Beton und Maschineneinsatz.....	19
3.1.5 Landflächennutzung.....	19
3.2 Inventardaten: Freileitungen	19
3.3 Inventardaten: Teilverkabelung 3 km	21
3.4 Inventardaten: Teilverkabelung 9.2km.....	25
4 Ergebnisse	28
4.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Verluste.....	28
4.1.1 Detail der Varianten: Freileitungen	30

4.1.2	Detail der Varianten: Teilverkabelung 3 km	33
4.1.3	Detail der Varianten: Teilverkabelung 9.2 km	35
4.2	Ergebnisse mit Berücksichtigung der Verluste	37
5	Auswertung	40
5.1	Schlussfolgerungen	40
5.2	Einschränkungen und Sensitivität	40
6	Referenzen	45
7	Annex A – Ergebnistabellen	46
7.1	Ergebnistabellen: Vergleich der Varianten ohne Elektrizitätsverluste	46
7.2	Ergebnistabellen – Detail der Varianten	48
7.2.1	Freileitung	48
7.2.2	Detail der Varianten: Teilverkabelung 3km	49
7.2.3	Detail der Varianten: Teilverkabelung 9.2km	50
7.3	Ergebnistabellen: Vergleich der Varianten mit Elektrizitätsverluste	52
7.4	Ergebnistabellen: Sensitivitätsanalyse – Vergleich von Elektrizitätsszenarien.....	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodische Schritte beim Life Cycle Assessment (Ökobilanz von Produkten) nach ISO 14'040.	13
Abbildung 2: Graphische Darstellung der drei Leitungsvarianten.	14
Abbildung 3: Systemerweiterung und Substitution.	15
Abbildung 4: Systemgrenzen der Studie.	16
Abbildung 5: Vergleich der Treibhausgasemissionen.	28
Abbildung 6: Vergleich des KEAs.	29
Abbildung 7: Vergleich der UBPs.	29
Abbildung 8: Vergleich des Eco-indicators 99.	30
Abbildung 9: Treibhausgasemissionen der zwei Freileitungen.	31
Abbildung 10: KEA der zwei Freileitungen.	31
Abbildung 11: UBP der zwei Freileitungen.	32
Abbildung 12: Eco-indicator 99 der zwei Freileitungen.	32
Abbildung 13: Treibhausgasemissionen der Variante „Teilverkabelung 3km“.	33
Abbildung 14: KEA der Variante "Teilverkabelung 3km".	33
Abbildung 15: UBP der Variante "Teilverkabelung 3km".	34
Abbildung 16: Eco-indicator 99 der Variante „Teilverkabelung 3km“.	34
Abbildung 17: Treibhausgasemissionen der Variante „Teilverkabelung 9.2km“.	35
Abbildung 18: KEA der Variante "Teilverkabelung 9.2km".	35
Abbildung 19: UBP der Variante "Teilverkabelung 9.2km".	36
Abbildung 20: Eco-indicator 99 der Variante „Teilverkabelung 9.2km“.	36
Abbildung 21: Vergleich der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Verluste.	38
Abbildung 22: Vergleich des KEAs unter Berücksichtigung der Verluste.	38
Abbildung 23: Vergleich der UBPs unter Berücksichtigung der Verluste.	39
Abbildung 24: Vergleich des Eco-indicators 99 unter Berücksichtigung der Verluste.	39
Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse der Recyclingrate (ökologische Knappheit) bei 2%, 5% und 1% Verluste.	42

Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Entsorgung des XLPEs in der Teilverkabelung 9.2km. ...	43
Abbildung 27:Eco-indicator 99 der vier Varianten bei der Abbildung der „C&E“ und „E“ Szenarien für den Strom-Mix in 2050.	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modellierung der Systemerweiterung.	18
Tabelle 2: Inventardaten eines Masten für jeweils die erste Freileitung und die optimierte (Freileitung opt.).....	19
Tabelle 3: Inventardaten der Seile	20
Tabelle 4: Inventardaten eines Masts in der SBB-Freileitung.....	22
Tabelle 5: Inventardaten der Seile in der SBB-Freileitung.	22
Tabelle 6: Inventardaten der Aluminium-Kupfer Kabel.....	23
Tabelle 7: Inventardaten zum bergmännischen Kabeltunnel.....	23
Tabelle 8: Inventardaten des Übergangsbauwerk und der Schaltanlage.	24
Tabelle 9: Inventardaten der Muffen und Muffenschächte.	24
Tabelle 10: Inventardaten der Kupferkabel.	25
Tabelle 11: Inventardaten zum Kabelrohrblock.....	26
Tabelle 12: Inventardaten zum bergmännischen Stollen.	26
Tabelle 13: Inventardaten der Muffen und Muffen-Schachten.	26
Tabelle 14: Inventardaten zur Brücke.....	27
Tabelle 15: Strom-Mix für das Jahr 2050 basierend auf (Prognos 2012).....	37
Tabelle 16: Vergleich Treibhausgasemissionen (ohne Stromverluste).....	46
Tabelle 17: Vergleich des KEAs (ohne Stromverluste).	46
Tabelle 18: Vergleich UBP Pt. (ohne Stromverluste).	47
Tabelle 19: Vergleich Eco-indicator 99 (ohne Stromverluste).	47
Tabelle 20: Treibhausgasemissionen der Freileitung.	48
Tabelle 21: KEA der Freileitung.	48
Tabelle 22: UBPs der Freileitung.	48
Tabelle 23: Eco-indicator 99 der Freileitung.....	49
Tabelle 24: Treibhausgasemissionen der Teilverkabelung 3km.	49
Tabelle 25: KEA der Teilverkabelung 3km.....	49
Tabelle 26: UBP der Teilverkabelung 3km.	50

Tabelle 27: Eco-indicator 99 der Teilverkabelung 3km.....	50
Tabelle 28: Treibhausgasemissionen der Teilverkabelung 9.2km.	50
Tabelle 29: KEA der Teilverkabelung 9.2km.....	51
Tabelle 30: UBP der Teilverkabelung 9.2km.	51
Tabelle 31: Eco-indicator 99 der Teilverkabelung 9.2km.....	52
Tabelle 32: Vergleich der Treibhausgasemissionen (mit Stromverluste).	52
Tabelle 33: Vergleich des KEAs (mit Stromverluste).....	52
Tabelle 34: Vergleich UBP Pt. (mit Stromverluste).	52
Tabelle 35: Vergleich Eco-indicator 99 Pt. (mit Stromverluste).....	53
Tabelle 36: Vergleich der UBP Pt. für unterschiedliche Recyclingraten (5%, 1% und 2% Verluste im Recyclingprozess).....	53
Tabelle 37: Vergleich (Eco-indicator 99) der Gesamtweltauswirkungen bei Recycling und Verbrennung des XLPEs in der Kabelisolation der Teilverkabelung 9.2km.....	53
Tabelle 38: Vergleich der Gesamtwirkungen im „C&E“ und „E“ Elektrizitätsszenario.....	53

Abkürzungen und Fachbegriffe

KEA	Kumulierter Energieaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
LKW	Lastkraftwagen
SF6	Schwefelhexafluorid
UBP	Umweltbelastungspunkte (bei der Methode der ökologischen Knappheit)
tkm	Tonnen-km

1 Ausgangslage

Swissgrid ist die Nationale Netzgesellschaft der Schweiz und hat den gesetzlichen Auftrag, einen diskriminierungsfreien, zuverlässigen und leistungsfähigen Betrieb des Übertragungsnetzes sicherzustellen. Anfang 2013 hat Swissgrid zusätzlich zur Betriebsverantwortung auch die Eigentümerverantwortung für das Übertragungsnetz der Schweiz übernommen. In dieser Rolle hält die Swissgrid das bestehende Höchstspannungsnetz instand und verantwortet die Erneuerung und den Ausbau des schweizerischen Höchstspannungsnetzes. Bei Um- und Ausbauprojekten von Höchstspannungsleitungen werden neben wirtschaftlichen und technischen Aspekten auch immer die Auswirkungen auf Raum und Umwelt berücksichtigt.

In diesem Rahmen hat Swissgrid Quantis beauftragt, mittels einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) die Umweltauswirkungen von vier Leitungsvarianten für den Teilabschnitt einer Hochspannungsleitung zwischen Mörel-Filet und Fiesch, die zurzeit in der Planungsphase steht, zu quantifizieren. Die Ergebnisse der Studie sollen, neben weiteren technischen und wirtschaftlichen Aspekten, als Entscheidungsgrundlage zur Wahl der zu realisierenden Leitungsvariante dienen.

2 Methodische Grundlagen

2.1 Methode der Ökobilanzierung

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen durch

- Zielsetzung und Darstellung des Untersuchungsrahmens (Grenzen der Studie)
- Zusammenstellung einer Sachbilanz von relevanten Input- und Outputflüssen eines Produktsystems;
- Beurteilung der mit diesen Inputs und Outputs verbundenen potentiellen Umweltwirkungen;
- Auswertung der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung hinsichtlich der Zielsetzung der Studie.

Die Ökobilanz-Studie untersucht die potentiellen Umweltbelastungen im Verlauf des Lebenswegs eines Produktes von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion, Anwendung (Nutzung) bis zur Beseitigung,

d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“. Die vorliegende Untersuchung ist in weitgehender Übereinstimmung mit der internationalen Normenreihe ISO 14'040ff (ISO 14040: 2006; ISO 14044: 2006) erarbeitet worden.

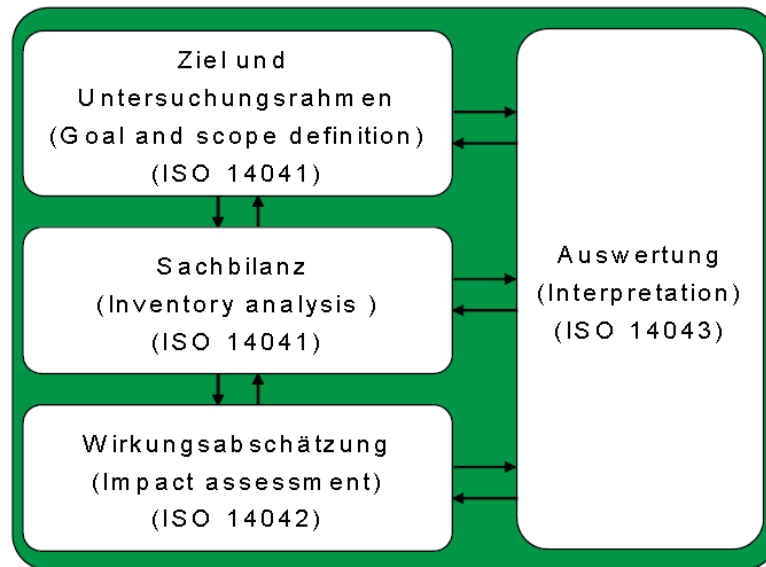


Abbildung 1: Methodische Schritte beim Life Cycle Assessment (Ökobilanz von Produkten) nach ISO 14'040.

Zur Bewertung der Sachbilanz im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden in dieser Untersuchung das Treibhauspotential (IPCC GWP 100a), der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Methode der Ökologischen Knappheit 2006 (UBP) sowie der Eco-indicator 99 herangezogen. Basierend auf den Anforderungen zur Durchführung der Studie seitens Swissgrid wurden nur die Endpunkte dieser Wirkungsabschätzungsmethoden in Betracht genommen.

2.2 Beschreibung der Systeme

Die Studie analysiert die Umweltauswirkungen von vier Leitungsvarianten zwischen Mörel-Filet und Fiesch: eine Freileitung, eine auf Leitungsverluste optimierte Freileitung und zwei unterschiedliche Teilverkabelungen. Die wichtigsten Elemente der vier Varianten sind in Abbildung 2 aufgezeigt, wobei zu beachten ist, dass bei der Variante „Teilverkabelung 9.2 km“ die Längen der unterschiedlichen Teilabschnitten aggregiert wurden (Tunnel/Rohrblock/Stollen), obwohl im Plan diese in mehrere Unterabschnitte aufgeteilt sind.

10km Freileitungsvariante

10km Freileitungsvariante – Verluste optimiert

Teilverkabelung 3km



Teilverkabelung 9.2km



Abbildung 2: Graphische Darstellung der drei Leitungsvarianten.

Die erste Freileitung basiert auf Standard-Werten, während die Zweite durch den Einsatz von dickeren Seilen kleinere Leitungsverluste aufzeigt. Beide sind 10 km lang, verlaufen überirdisch und bestehen jeweils aus 18 Aldrey-Seilen die von 26 Stahlmasten getragen werden. Zwei der 18 Seile dienen zur Übertragung von Elektrizität für die SBB. In der Variante „Teilverkabelung 3 km“ verläuft ein Teil der Leitung über Aluminium- und Kupfer-Kabel in einem 3 km langen bergmännischen Kabeltunnel, während parallel dazu die Elektrizität für die SBB über eine dezidierte Freileitung transportiert wird. Nach dem Kabeltunnel werden die Kabel (über ein Übergangswerk) und die SBB-Freileitung in eine 6.5 km gemeinsame Freileitung zusammengeführt, die die gleichen Baueigenschaften der ersten Freileitung hat. Bei der „Teilverkabelung 9.2 km“ ist für den SBB-Teil eine 9.5 km Freileitung geplant, während die restliche Elektrizität unterirdisch über Kupferkabel transportiert wird. Insgesamt verlaufen die Kupferkabel durch 3.2 km bergmännische Kabeltunnel, 2.5 km Kabelrohrblöcke, einen 2.9 km Wasserstollen und einen 0.45 km langen, steil abfallenden bergmännischen Stollen. Ein Teil der verkabelten Leitung verläuft ausserdem über eine 102 m lange Brücke. Genauere Daten zu den Varianten sind in Kapitel 3 „Lebenszyklus-Inventar und Modellierung“ zusammengefasst.

2.3 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit der Ökobilanzierung ist „Der Betrieb der entsprechenden Übertragungsleitungsvariante (inkl. Herstellung, nötige Transportdienstleistungen, Installation, Wartung, Erneuerung und Rückbau sowie der Rezyklierung bzw. dem End-of-Life) während 40 Jahren“.

2.4 Multifunktionalität

Neben der Dienstleistung der Übertragung der Elektrizität entstehen im Lebenszyklus der Leitungsvarianten auch weitere Ko-Produkte. Insbesondere kann der sehr grosse Anteil an Materialien, die im System benutzt werden, am Ende der Nutzungsphase wieder rezykliert werden. Um die spezifischen Umweltauswirkungen der Leitungsvarianten in Bezug auf die Übertragung von Elektrizität berechnen zu können, muss aus den Gesamtauswirkungen der Beitrag der Koprodukte herausgerechnet werden. In dieser Studie wurden die Umweltauswirkungen der rezyklierbaren Materialien durch Systemerweiterung und Substitution mitbetrachtet (Abbildung 3).

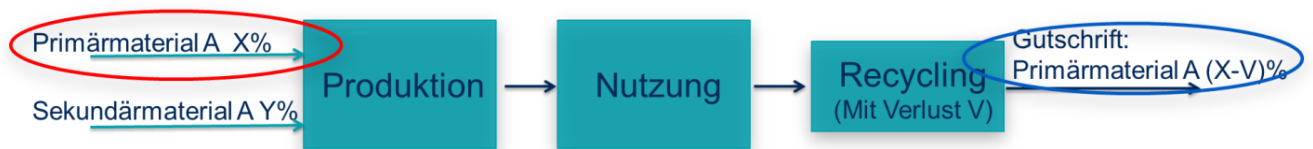


Abbildung 3: Systemerweiterung und Substitution.

Wie aus Abbildung 3 entnommen werden kann, werden die Umweltauswirkungen von rezyklierbarem Material aus den Gesamtauswirkungen entkoppelt, in dem die Systemgrenzen erweitert werden und die Ressourcen für das Recycling der Primärmaterialien mitbilanziert werden. Dadurch steht das dem Ökosystem entnommene Primärmaterial wieder zur Verfügung und kann in der Ökobilanz als Gutschrift gerechnet werden. Da typischerweise in Recyclingprozessen ein kleiner Teil des Materials nicht zurückgewonnen werden kann, wird die Gutschrift nicht für die Gesamtmenge berücksichtigt.

2.5 Systemgrenzen

In der nachfolgenden Abbildung 4 sind die Systemgrenzen der Studie zusammengefasst.

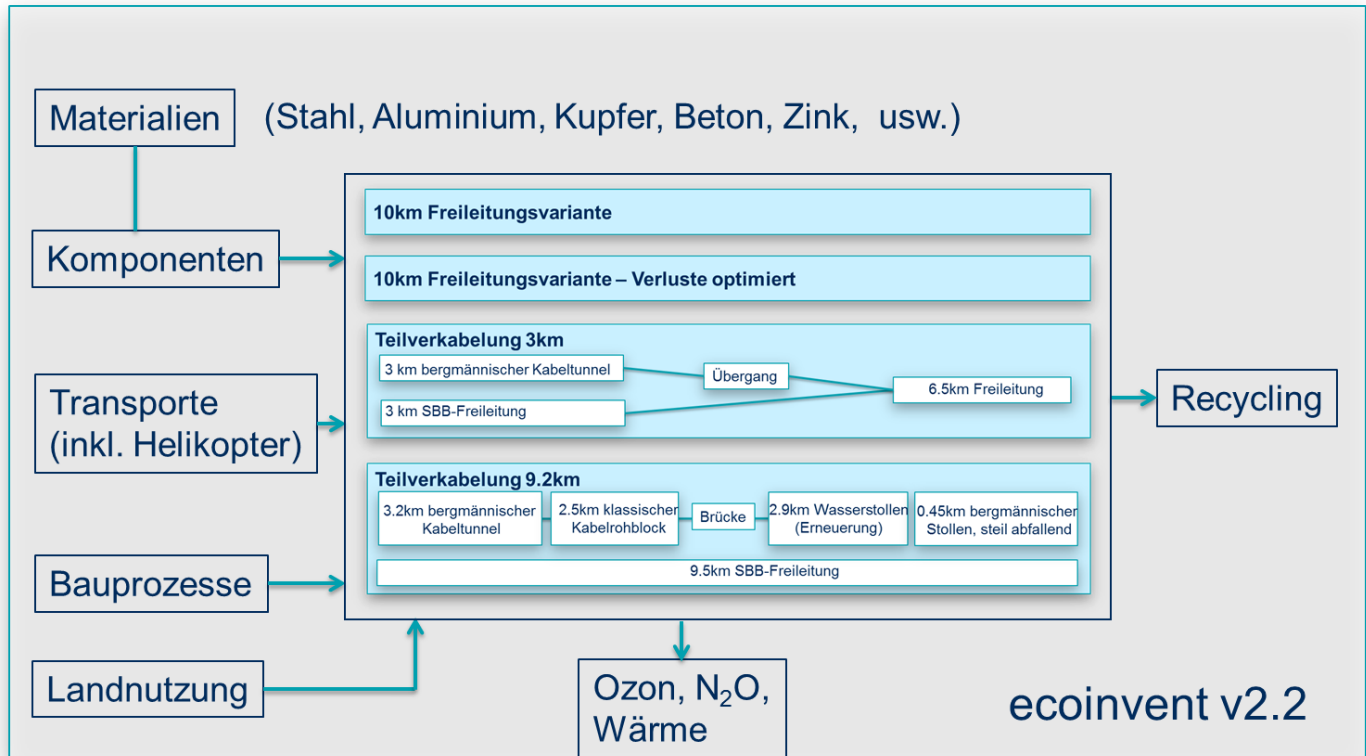


Abbildung 4: Systemgrenzen der Studie.

Im Vordergrund steht die Produktion, Nutzung und Entsorgung der Leitungsvarianten. Für die Hintergrundprozesse wurde die Datenbank ecoinvent in der Version 2.2 benutzt. Soweit Daten zur Verfügung standen, wurden in der Studie (wie im Detail in Kapitel 3 beschrieben) sowohl die Produktion aller relevanten Materialien als auch deren Verarbeitung zu entsprechenden Komponenten in Betracht gezogen. Weiterhin wurden die Umweltauswirkungen aus dem Transport der nötigen Materialien und Komponenten bilanziert, inklusive dem Einsatz von Helikoptern beim Bau in schlecht zugänglichen Ortschaften, sowie den Beiträgen aus den Bau- und Recyclingprozessen, aus der Landnutzung und den Emissionen, die durch die Nutzung der Leitungen entstehen können.

Hier ist zu beachten, dass Emissionen aus der Nutzung nur für die Elektrizitätsverluste in den Leitungen bilanziert wurden. Die Umweltauswirkungen der Elektrizität, die zu den Nutzern gelangt, werden in dieser Studie der Nutzung der Elektrizität zugerechnet und liegen ausserhalb unseres Betrachtungssystems.

3 Lebenszyklus-Inventar und Modellierung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Informationen zu den Inventardaten und zu deren Modellierung in SimaPro dargestellt. Die nötigen Daten zum Lebenszyklus der Varianten wurden unter der Leitung von Swissgrid von den entsprechenden Projektpartnern, die für den Bau oder Planung der Teilabschnitte verantwortlich sind, erhoben.

3.1 Inventardaten: Modellierungsansätze

3.1.1 Transporte

Für die Inventarisierung der Transporte wurden vorwiegend Standard-Distanzen aus der ecoinvent Datenbank benutzt (Frischknecht et al. 2007) oder Abschätzungen der Projektpartner. Der Transport der Materialien und Komponenten wird sowohl bei deren Produktion als auch bei der Entsorgung berücksichtigt. Bei den Freileitungen und der Brücke wird ein Helikopter eingesetzt, um die nötigen Materialien von einem für LKWs zugänglichem Lagerplatz zum Bauort zu fliegen. Eine Rotation (Flug vom Lagerplatz zum Bauort und zurück) dauert im Durchschnitt 4 bis 5 Minuten, wobei der Helikopter ungefähr nach 10 Rotationen zum Tanken landen muss. In der Studie wurde also pauschal eine Rotation als ein Flug von 5 Minuten modelliert mit einer Start/Landung-Sequenz nach 10 Rotationen.

3.1.2 Wahl von Primär- und Sekundärmaterialien

Aufgrund der sehr hohen Verlässlichkeit, die bei einem komplexen System wie eine Hochspannungsleitung nötig ist, werden bei vielen Komponenten nur Primärmaterialien eingesetzt. Entsprechend wurden in dieser Studie der Stahl in den Masten, das Aluminium in den Kabeln und Aldrey-Seilen und das Kupfer in den Kabeln als Primärmaterialien modelliert.

3.1.3 Multifunktionalität und Recycling

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, wird in dieser Studie Multifunktionalität in den Systemen durch Systemerweiterung und Substitution adressiert. Das System wird erweitert, indem die Ressourcen für das Recycling der Primärmaterialien und die entsprechende Gutschrift mitbilanziert werden, wobei bei der Anrechnung der Gutschrift ein Verlust im Recyclingprozess berücksichtigt wird. Dieser Ansatz wird bei allen relevanten rezyklierbaren Materialien angewandt, ist aber aufgrund der sehr grossen Mengen in den Leitungsvarianten besonders bei Stahl, Aluminium, Kupfer und das XLPE in der Isolierung der

Kabel bedeutend. Hier ist ausserdem zu beachten, dass, da es in der ecoinvent Datenbank keinen Datensatz für XLPE gibt, die Isolierung in den Kabeln durch HDPE mit einem Zuschlagsfaktor von 5% (Harrison et al. 2010) modelliert wurde. In Tabelle 1 sind die Prozesse aufgezeigt, die für die Modellierung der Primärmaterialien und des Recyclings verwendet wurden, sowie die Verluste, die dabei berücksichtigt wurden.

Primärmaterial	Recycling-Modellierung	Verluste im Recycling
Steel, converter, low-alloyed, at plant (RER)	Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant (RER)	2%
Aluminium, primary, at plant (RER)	Aluminium, secondary, from old scrap (RER)	2%
Copper, primary, at refinery (GLO)	Copper, secondary, at refinery (RER)	2%
Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER	Disposal, treatment of cables/GLO U (angepasst)	40%

Tabelle 1: Modellierung der Systemerweiterung.

Bei Aluminium und Stahl bietet die ecoinvent Datenbank nur Datensätze für einen Europäischen Durchschnitt (RER) an. Bei Kupfer steht auch ein globaler Datensatz zur Verfügung. Aufgrund der allgemeinen Unsicherheit in der Herkunft von Kupfer wurde in dieser Studie der globale Datensatz verwendet. Die ecoinvent Datenbank verfügt ausserdem nicht über einen Datensatz zum Recycling von XLPE oder HDPE. Um die Ressourcen diesbezüglich abzubilden, wurde der Datensatz „Disposal, treatment of cables/GLO“ entsprechend angepasst. Insbesondere wurden die Umweltauswirkungen aus der Verbrennung von plastischen Materialien in einer Kehrrichtverbrennungsanlage entfernt und nur die Ressourcen behalten, die für die Trennung der unterschiedlichen Materialien nötig sind. Zusätzlich wurde konservativ eine Gutschrift von nur 60% der eingesetzten XLPE Menge eingeführt, um die fehlenden Ressourcen für das komplette Recycling des Materials in Betracht zu ziehen.

Auch der Beton wird zum Teil rezykliert. Hier wurde angenommen, dass der zermahlene Beton als Kiessubstitut verwendet werden kann. Entsprechend wurde in diesem Fall eine Gutschrift für „Gravel, round, at mine/CH“ bilanziert. Auch hier wurde konservativ mit einem Verlust von 10% gerechnet, da angenommen wird, dass ein Teil des Betons beim Abriss verloren geht.

3.1.4 Aushub, Beton und Maschineneinsatz

Für das Ausbaggern von Material beim Bau und der Entsorgung von Fundamente und Gebäude wurde der ecoinvent Datensatz „Excavation, hydraulic digger/RER“ benutzt. Beim Aushub wurde ein Gewicht von 1.7 Tonnen pro m³ angenommen (HAUER 2007), während beim Beton mit 2.4 Tonnen pro m³ gerechnet wurde (basierend auf Gewichten in ecoinvent Beton Datensätzen). Für den Einsatz von weiteren Maschinen wie zum Beispiel Tunnelbohr- oder Seilzugmaschinen wurde der Datensatz „Diesel, burned in building machine/GLO“ benutzt. Dieser berücksichtigt sowohl die Umweltauswirkungen aus der Verbrennung von Diesel als auch die Infrastruktur einer Baumaschine.

3.1.5 Landflächennutzung

Der Bau der Masten und des Übergangswerks führt zu einer Änderung in der Landflächennutzung. Um die Auswirkungen davon abzuschätzen wurde jeweils eine Landtransformation der besetzten Fläche von Wald zu industriellem Areal („Transformation, from forest“ und „Transformation, to industrial area, vegetation“) und diese Nutzungsänderung über die Lebensdauer der Systeme (Occupation, industrial area, vegetation) mitbilanziert.

3.2 Inventardaten: Freileitungen

Die 10 km lange Freileitungen bestehen jeweils aus 18 Aldrey-Seilen und 26 Masten (einer alle 400 m und ein weiterer am Anfang der Leitung). Die optimierte Freileitung benutzt dickere Seile, um die Leitungsverluste zu reduzieren. Entsprechen ist das Gerüst der Masten etwas robuster und die Fundamente 15% schwerer. Es wurde angenommen, dass einige weniger relevante Systemaspekte (z.B. die Dimension der Abspann- und Tragkette und der Verbrauch von Diesel für den Einsatz von Baumaschinen) gleich bleiben würden. Die Länge der Aldrey-Seile beträgt bei beiden Freileitungen 10.1 km, da mit einem Zuschlag von etwa 1% aufgrund des Durchhängens gerechnet werden muss. Die wichtigsten Inventardaten zu den Masten (angegeben pro Mast) und Seilen (angegeben pro km Leitung inklusive aller Seile) sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Inventardaten eines Masten für jeweils die erste Freileitung und die optimierte (Freileitung opt.).

	Menge pro Stück		Einheit
	Freileitung	Freileitung opt.	
Fundament			
Fläche	100	115	m ²

Jetziger Flächentyp	Wald	Wald	
Aushub	50	57.5	m ³
Beton	120	138	Tonnen
Armierung (Stahl)	1.5	1.725	Tonnen
Restmüll	50	50	kg
Mastgerüst			
Stahl	30	31.2	Tonnen
Feuerverzinkung	550	572	m ²
Korrosionsschutzfarbe	0.165	0.172	Tonnen
Diesel für Baumaschineneinsatz (kein Transport, kein Baggern)	17.5	17.5	Liter
Abspann- Tragketten			
Armaturen Stahl	0.2	0.2	Tonnen
Armaturen Aluminium	0.05	0.05	Tonnen
Isolatoren Stahl	0.144	0.144	Tonnen
Isolatoren Glasfaser-Kunststoff	0.09	0.09	Tonnen
Isolatoren Silikon	0.108	0.108	Tonnen
Isolatoren Epoxy	0.018	0.018	Tonnen
Transporte			
Transport LKW	4017.16	4448.7	tkm
Transport Zug	19258.6	20117.6	tkm
Helikopterrotationen	193	214	

Tabelle 3: Inventardaten der Seile

	Menge pro km		Einheit
	Freileitung	Freileitung opt.	
Aluminium (Aldrey)	35.2	42.08	Tonnen
Magnesium (Aldrey)	0.178	0.213	Tonnen
Silizium (Aldrey)	0.178	0.213	Tonnen

Diesel für Montagemaschinen (Seilzugmaschine)	27		Liter
Transporte			
LKW	3555.6	4250.4	tkm
Zug	14222.4	17001.6	tkm

Bei der Entsorgung der Masten wird nur der oberflächliche Teil des Fundaments abgerissen, was ungefähr 4m^3 an Material entspricht. Entsprechend wurde nur dieser Anteil an Materialrecycling beim Beton und Armierungsstahl des Fundaments berücksichtigt. Alle Metalle im Mastgerüst, in den Abspann- und Tragketten und in den Seilen kommen ins Recycling. Die plastischen Materialien in den Isolatoren werden in einer Kehrrichtverbrennungsanlage entsorgt. Die Mengen an Diesel für Montagemaschinen/ Baumaschineneinsatz werden sowohl im Bau als auch in der Entsorgung berücksichtigt. Neben den Materialien wurde für die Fertigstellung der Seile der Datensatz „Aluminium product manufacturing, average metal working“ benutzt. Dieser wurde so verändert, dass die Systemerweiterung für den Aluminium-Produktionsschrott konsistent mit dem Rest der Studie bilanziert wird. Die Elektrizitätsverluste über 40 Jahre der ersten Freileitung und der optimierten betragen jeweils 780.5GWh und 562 GWh. Dank der dickeren Seile weist die optimierte Freileitung also ungefähr 30% kleinere Verluste im Gegensatz zur ersten Freileitung auf.

3.3 Inventardaten: Teilverkabelung 3 km

Die wichtigsten Elemente dieser Teilverkabelung sind die 3 km Freileitung für die SBB, der 3 km Kabeltunnel, die 6.5 km Standard-Freileitung, das Übergangsbauwerk, welches eine Schaltanlage beinhaltet, und die Muffen und Muffen-Schächte, die bei der Verbindung der Kabel eingesetzt werden. Da in der Freileitung für die SBB nur 3 Seile benutzt werden, werden kleinere Masten eingesetzt. Insgesamt werden 18 kleine Masten und 18 Standard-Masten benutzt. Weiterhin sind auch in der SBB-Freileitung die Gesamtmengen an Materialien pro km Seil entsprechend kleiner. Für die Leitung im Kabeltunnel werden Kabel aus Aluminium und Kupfer eingesetzt. In Tabelle 4 bis Tabelle 8 sind die wichtigsten Inventardaten zur Teilverkabelung zusammengefasst.

Tabelle 4: Inventardaten eines Masts in der SBB-Freileitung.

	Menge pro Stück	Einheit
Fundament		
Jetziger Flächentyp	Wald	
Aushub	10	m ³
Beton	24	Tonnen
Armierung (Stahl)	0.3	Tonnen
Restmüll	50	kg
Mastgerüst		
Stahl	8	Tonnen
Feuerverzinkung	60	m ²
Korrosionsschutzfarbe	0.018	Tonnen
Abspann- Tragketten		
Armaturen Stahl	3.00E-02	Tonnen
Armaturen Aluminium	1.00E-02	Tonnen
Isolatoren Stahl	1.32E-02	Tonnen
Isolatoren GFK	8.25E-03	Tonnen
Isolatoren Silikon	9.90E-03	Tonnen
Isolatoren Epoxy	1.65E-03	Tonnen
Transporte		
LKW	1101	tkm
Zug	5022.7	tkm
Helikopterrotationen	43	

Tabelle 5: Inventardaten der Seile in der SBB-Freileitung.

	Menge	Einheit
Aluminium (Aldrey)	5.247	Tonnen

Magnesium (Aldrey)	0.0265	Tonnen
Silizium (Aldrey)	0.0265	Tonnen
Diesel für Montagemaschinen (Seilzugmaschine)	3	Liter
Transporte		
LKW	530	tkm
Zug	2120	tkm

Tabelle 6: Inventardaten der Aluminium-Kupfer Kabel.

	Menge pro km	Einheit
Aluminium	94.5	Tonnen
Kupfer	48	Tonnen
XLPE Isolierung	346	Tonnen
Diesel Seilzugmaschinen	42	Liter
Transporte		
LKW	15210	tkm
Zug	76200	tkm

Tabelle 7: Inventardaten zum bergmännischen Kabeltunnel.

	Menge	Einheit
Bautechnik	Rohrvortrieb	
Aushub	13850	m ³
Beton	8820	Tonnen
Armierung Stahl	735	Tonnen
Diesel für Rohrvortrieb	100000	Liter
Transporte		
LKW	684050	tkm
Zug	441000	tkm

Tabelle 8: Inventardaten des Übergangsbauwerk und der Schaltanlage.

	Menge	Einheit
Bauwerk		
Fläche	400	m ²
Aushub	1550	m ³
Beton	2410	Tonnen
Armierung Stahl	79	Tonnen
Gerüst		
Stahl	35	Tonnen
Feuerverzinkung	641.55	m ²
Korrosionsschutzfarbe	0.192	Tonnen
Schaltanlage		
Aluminium	9.8	Tonnen
SF6 Gas	5	m ³
Transporte		
LKW	178391.7	tkm
Zug	70363.3	tkm

Tabelle 9: Inventardaten der Muffen und Muffenschächte.

	Menge	Einheit
Muffen		
Silikon	938	kg
Muffenschacht		
Aushub	520	m ³
Beton	530	Tonnen
Stahl	45	Tonnen

Transporte		
LKW	12962.56	tkm
Zug	27187.6	tkm

Alle methodologischen Kommentare zum Standard-Mast und -Seil gelten auch für die SBB-Freileitung. Für die 6.5 km Freileitung werden die gleichen Komponenten benutzt, die in Tabelle 2 und Tabelle 3 beschrieben sind. Der Kabeltunnel bleibt am Ende des Lebenszyklus bestehen, während das Übergangsbauwerk komplett rückgebaut wird. Für die Schaltanlage wurden basierend auf ecoinvent (Frischknecht, Tuchschnid, and Faist-Emmenegger 2007) Emissionen von 1% der Füllmenge an SF6 Gas berücksichtigt. Für die Fertigstellung der Kabel wurden zusätzlich zu den Materialien auch die zwei Verarbeitungsprozesse „Aluminium product manufacturing, average metal working“ und „Wire drawing, copper“ benutzt. Auch hier wurden die Standard-ecoinvent Datensätze so verändert, dass die Systemerweiterung konsistent mit dem Rest der Methodik ist. Es werden 2 Muffen-Stellen im Kabeltunnel benötigt. Die Verluste bei der Teilverkabelung betragen 606.8GWh.

3.4 Inventardaten: Teilverkabelung 9.2km

Die wichtigsten Elemente dieser Teilverkabelung sind die 9.5 km SBB-Freileitung, die 3.2 km lange bergmännische Kabeltunnel, die 2.5 km Kabelrohrblöcke, der 2.9 km Wasserstollen, der 0.45 km bergmännische Stollen und die Brücke. Die Daten zum bergmännischen Kabeltunnel und der SBB-Freileitung sind die gleichen der Variante „Teilverkabelung 3 km“ mit Ausnahme der Anzahl an kleinen Masten, die hier 54 Stück beträgt. In Tabelle 10 bis Tabelle 14 sind die Inventardaten zu den Kupferkabeln, dem Kabelrohrblock, dem bergmännischen Stollen und der Brücke zusammengefasst. Der Wasserstollen besteht schon seit längerer Zeit. Zurzeit sind keine Massnahmen für dessen Renovierung und Entsorgung geplant. Des Weiteren bleiben auch der Kabelrohrblock und der bergmännische Stollen am Ende des Lebenszyklus bestehen.

Tabelle 10: Inventardaten der Kupferkabel.

	Menge pro km	Einheit
Kupfer	325	Tonnen
XLPE Isolierung	346	Tonnen
Diesel für Seilzugmaschine	42	Liter

Transporte		
LKW	39000	tkm
Zug	260000	tkm

Tabelle 11: Inventardaten zum Kabelrohrblock.

	Menge pro km	Einheit
Aushub	11000	m ³
Beton	6600	Tonnen
Kabelschutzrohr (HDPE)	155	Tonnen
Transporte		
LKW	478300	tkm

Tabelle 12: Inventardaten zum bergmännischen Stollen.

	Menge für 0.5 km	Einheit
Bautechnik	Bergmännisch ausgebrochen	Annahme: 90% Bohren 10% Sprengen
Bohren - Diesel für Maschine	65000*0.9	Liter
Sprengen - Sprengmaterial	13000*0.1	kg
Aushub	14000	m ³
Beton	6500	Tonnen
Armierung Stahl	550	Tonnen
Transporte		
LKW	634150	tkm
Zug	337800	tkm

Tabelle 13: Inventardaten der Muffen und Muffen-Schachten.

	Menge	Einheit
Muffen		
Silikon	938	kg

Muffenschacht		
Aushub	520	m ³
Beton	530	Tonnen
Stahl	45	Tonnen
Transporte		
LKW	12962.56	tkm
Zug	27187.6	tkm

Tabelle 14: Inventardaten zur Brücke.

	Mengen	Einheit
Aushub	300	m ³
Beton	325	Tonnen
Stahl / Überbau	50	Tonnen
Stahlseile	8	Tonnen
Korrosionsschutz Überbau	1'065	m ²
Transporte		
LKW	19'605	tkm
Zug	11'620	tkm
Helikopterrunden	160	

Alle methodologischen Kommentare zu den gleichen Komponenten, die in der anderen Teilverkabelung benutzt werden, gelten auch hier. In dieser Variante werden jeweils 4 Muffen-Stellen im Kabeltunnel, 2 im Kabelrohrblock und 3 im Wasserstollen eingesetzt. Für den Bau des Rohrblocks wird ausserdem eine Baupiste fertiggestellt. Diese benötigt 1620 Tonnen Kies und 1.5 Tonnen Vlies pro km und verursacht einen Aushub von 900 m³ pro km. Nach dem Bau des Rohrblocks wird die Baupiste entsorgt und die Materialien recycelt. Die Verluste in der Vollverkabelung betragen 245.7GWh.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Ökobilanzierung zu den vier analysierten Varianten dargestellt. Zuerst werden die Ergebnisse ohne Mitberücksichtigung der Elektrizitätsverluste aufgezeigt. Im Anhang sind für alle vorgestellten Abbildungen die entsprechenden Ergebnistabellen dargestellt. Anschliessend werden die Ergebnisse inklusive der Beiträge aus den Verlusten diskutiert. In Abbildung 5 bis Abbildung 8 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit und der Eco-indicator 99 dargestellt.

4.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Verluste

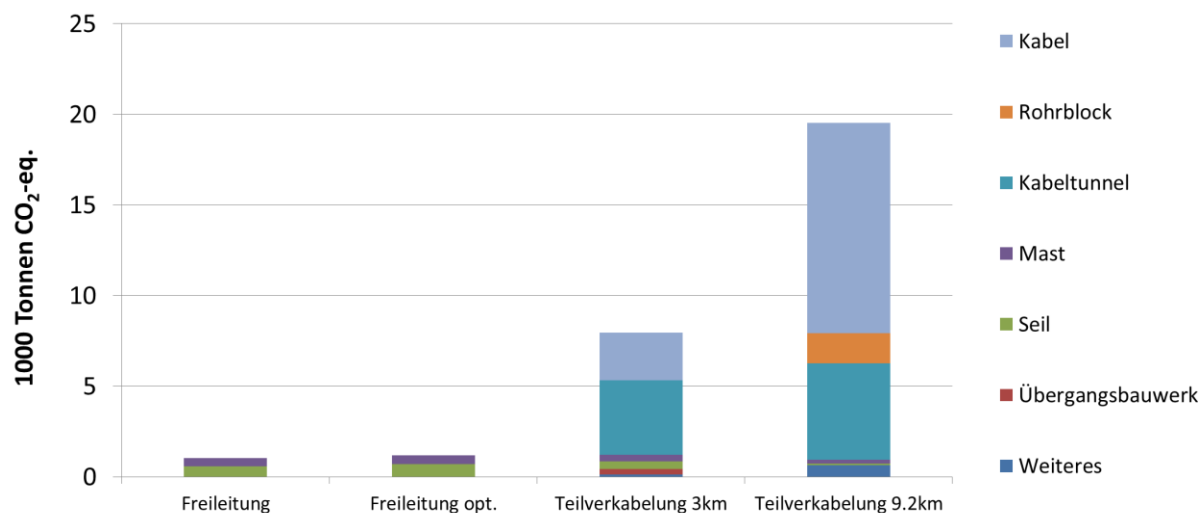


Abbildung 5: Vergleich der Treibhausgasemissionen.

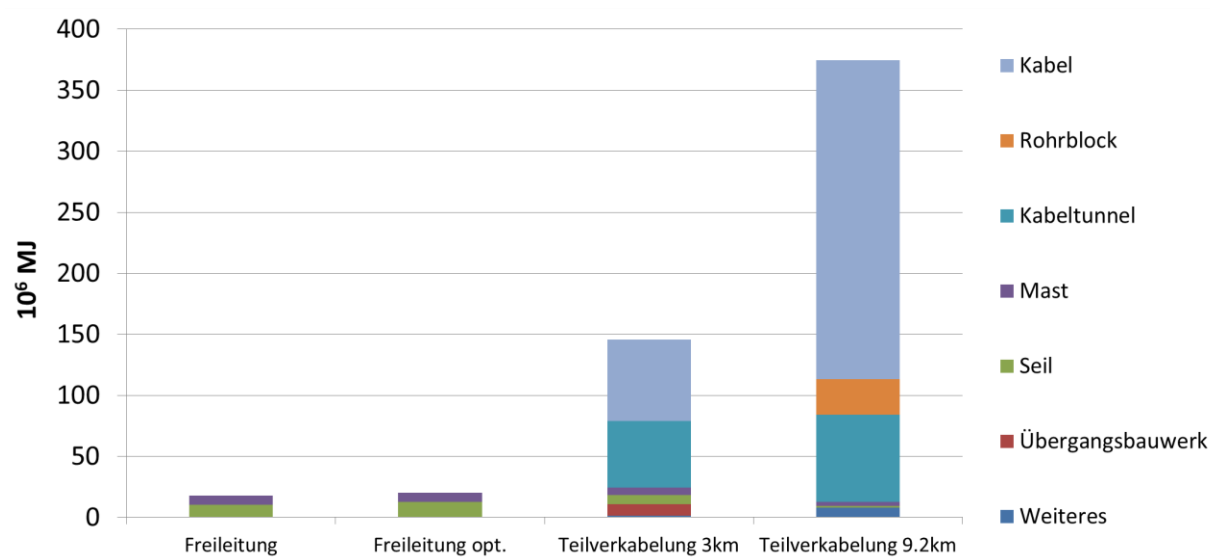


Abbildung 6: Vergleich des KEAs.

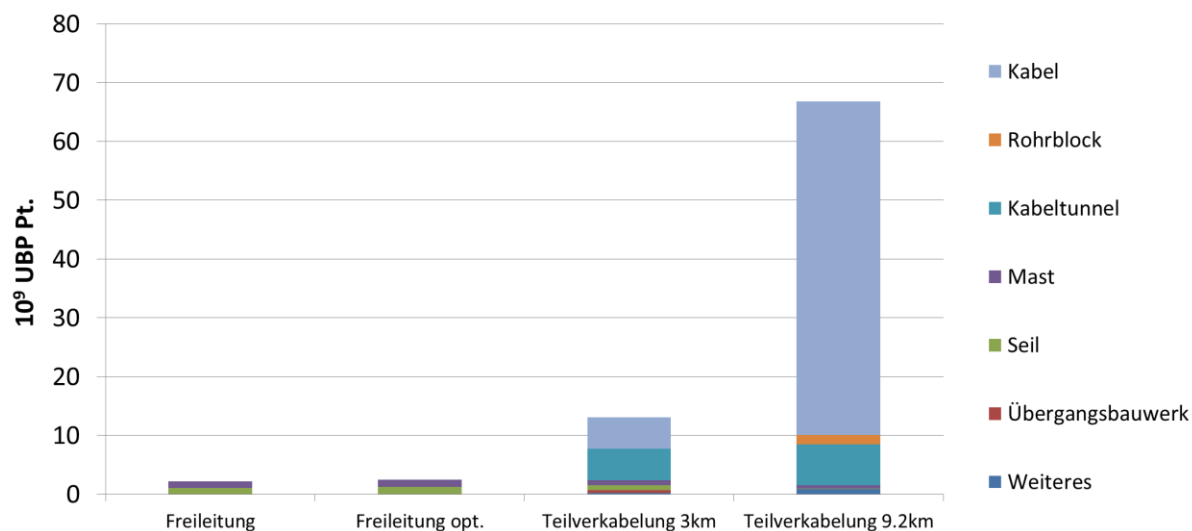


Abbildung 7: Vergleich der UBPs.

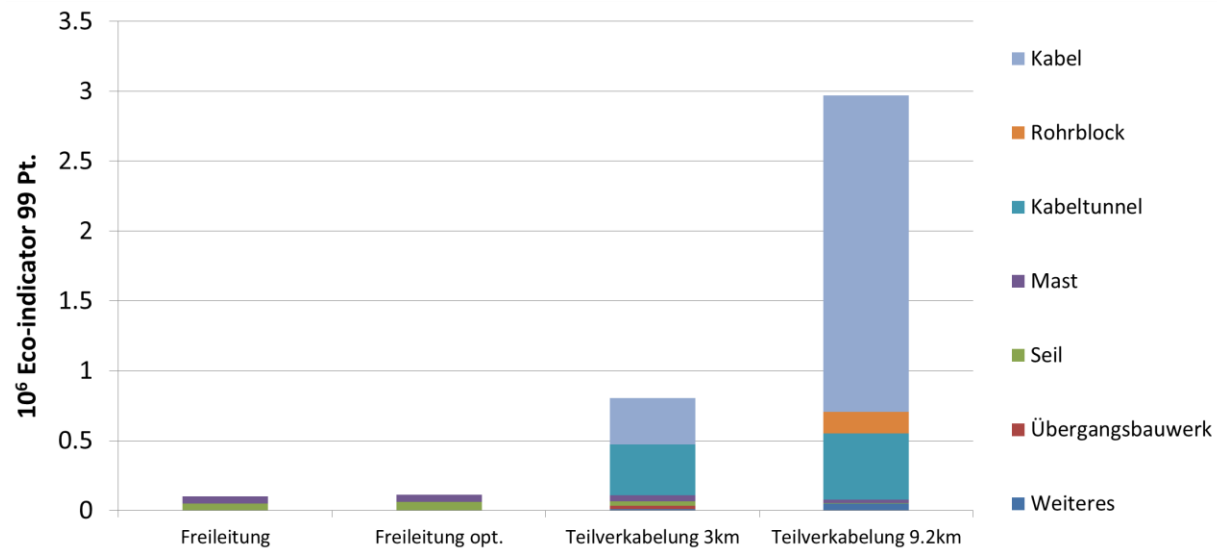


Abbildung 8: Vergleich des Eco-indicators 99.

Die spezifischen Beiträge der einzelnen Varianten werden in den nächsten Abschnitten genauer analysiert. Aus Abbildung 5 bis Abbildung 8 ist aber klar zu sehen, wie unter Vernachlässigung der Verluste die Variante „Teilverkabelung 9.2 km“ bei allen Indikatoren am schlechtesten abschneidet, gefolgt von der „Teilverkabelung 3 km“ und anschliessend von den Freileitungen. Letztere weisen im Gegensatz zu den Teilverkabelungen so kleine Beiträge auf, dass im Gesamtbild die Unterschiede in den Freileitungen graphisch kaum nachvollziehbar sind. Der grosse Unterschied zwischen der „Teilverkabelung 9.2 km“ und den anderen Varianten stammt aus der Produktion der Kupferkabel.

4.1.1 Detail der Varianten: Freileitungen

In Abbildung 9 bis Abbildung 12 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit und der Eco-indicator 99 für die zwei Freileitungen aufgezeigt. Die Gesamtauswirkungen sind unterteilt auf die spezifischen Komponenten.

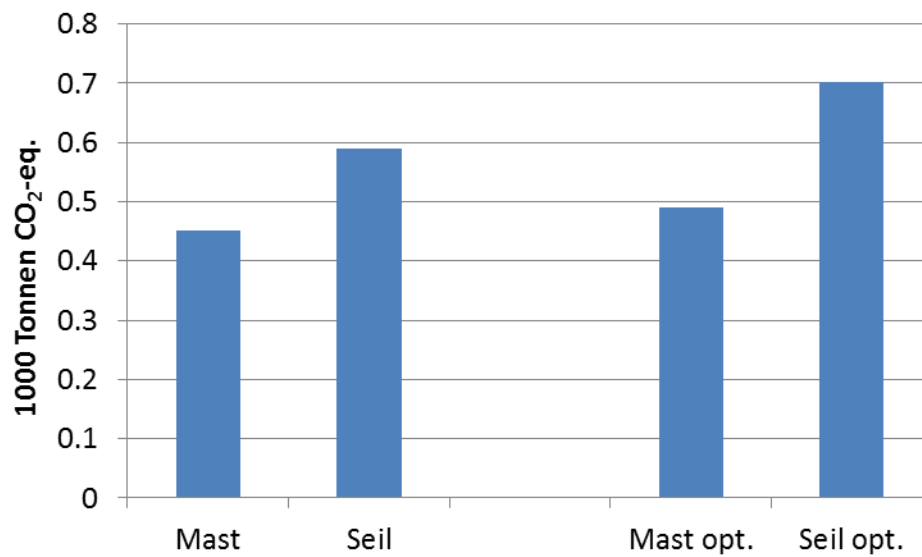


Abbildung 9: Treibhausgasemissionen der zwei Freileitungen.

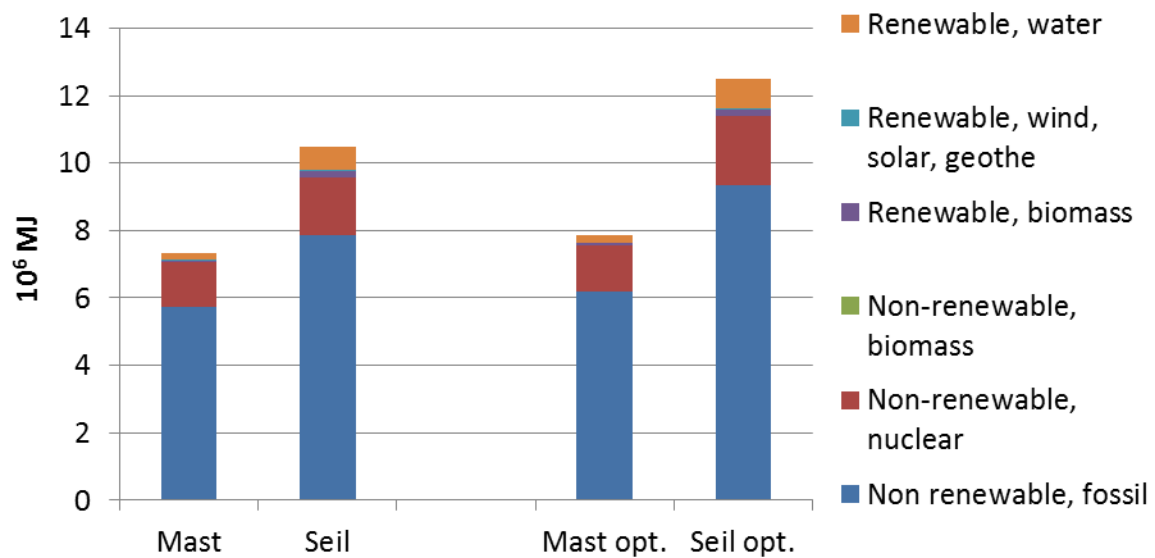


Abbildung 10: KEA der zwei Freileitungen.

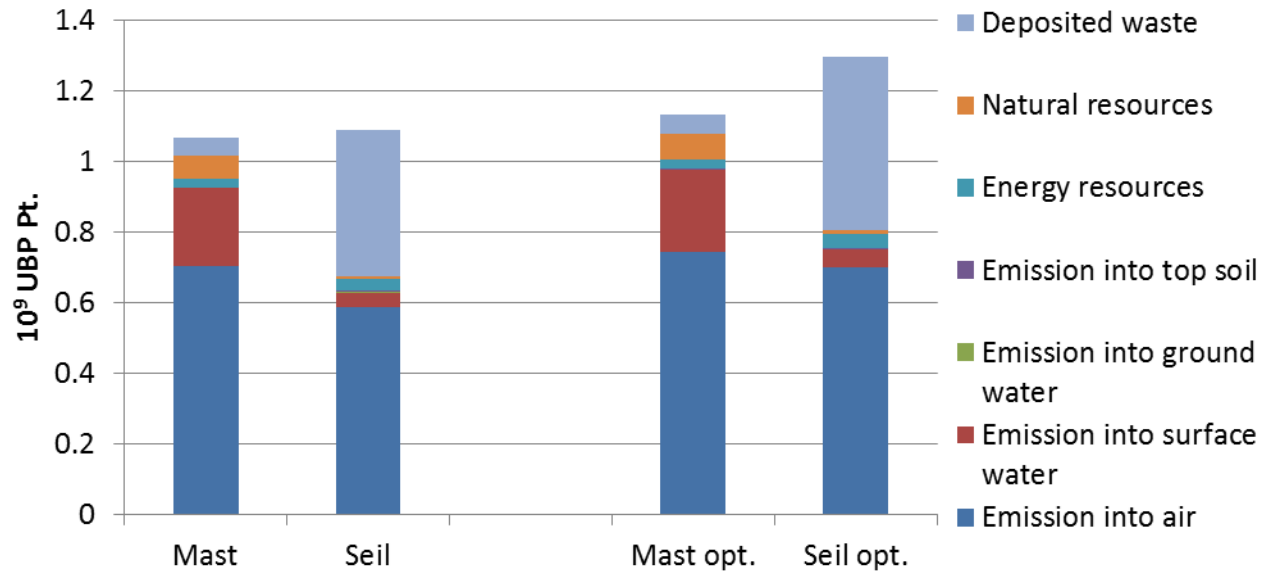


Abbildung 11: UBEP der zwei Freileitungen.

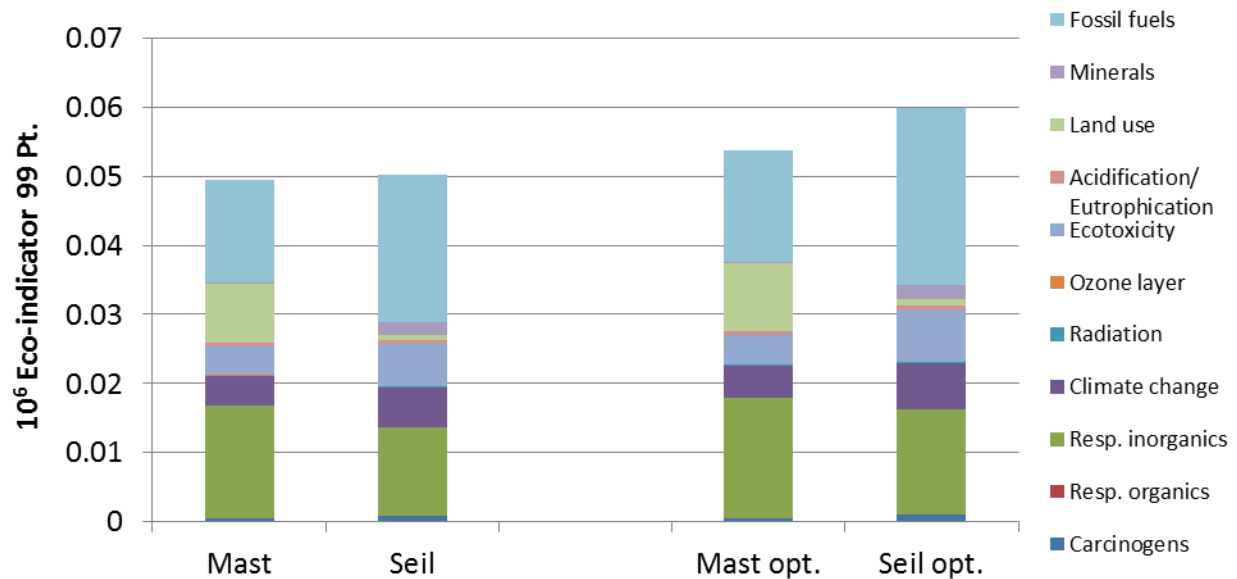


Abbildung 12: Eco-indicator 99 der zwei Freileitungen.

Grundsätzlich sind die Umweltauswirkungen der zwei Freileitungen sehr ähnlich, mit etwas höheren Beiträgen bei der optimierten Freileitung aufgrund der grösseren Mengen an Materialien. Auch die Beiträge der Masten und Seile sind relativ ähnlich und stammen zum grössten Teil aus dem Lebenszyklus der Metalle.

4.1.2 Detail der Varianten: Teilverkabelung 3 km

In Abbildung 13 bis Abbildung 16 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit und der Eco-indicator 99 aufgezeigt. Die Gesamtauswirkungen sind unterteilt auf die spezifischen Komponenten.

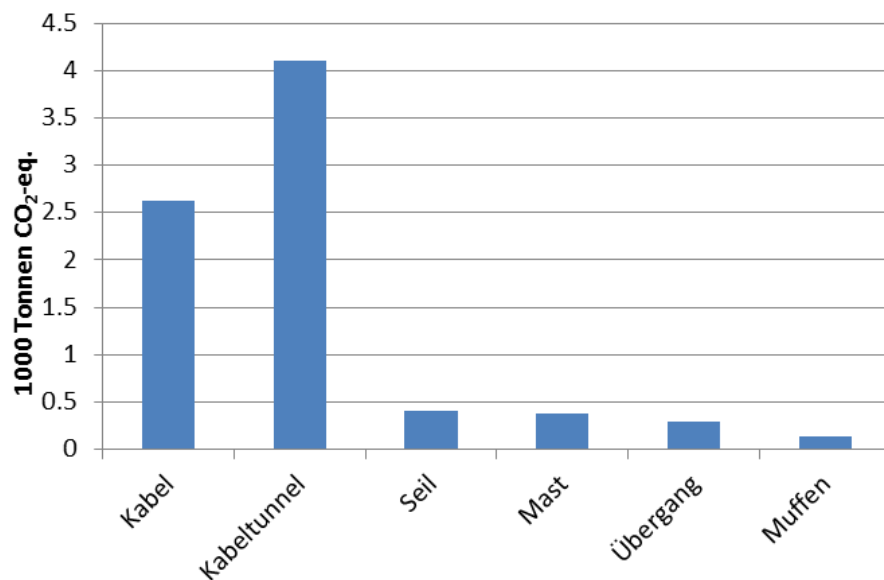


Abbildung 13: Treibhausgasemissionen der Variante „Teilverkabelung 3km“.

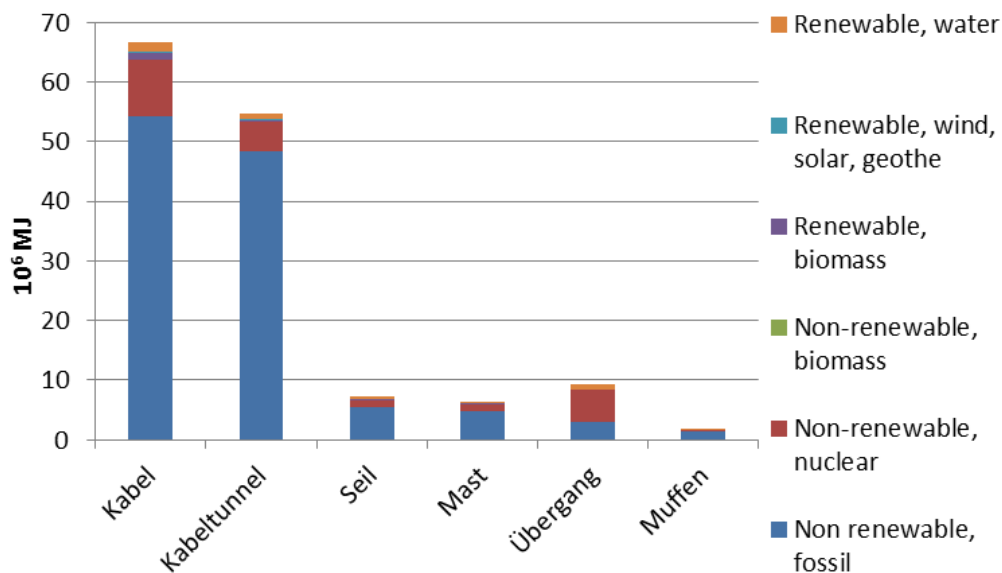


Abbildung 14: KEA der Variante "Teilverkabelung 3km".

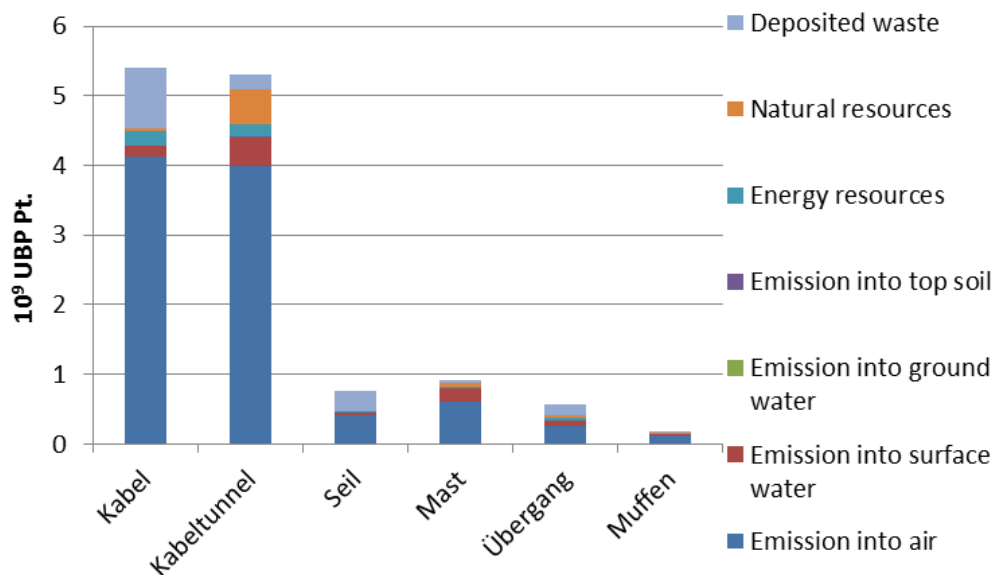


Abbildung 15: UBP der Variante "Teilverkabelung 3km".

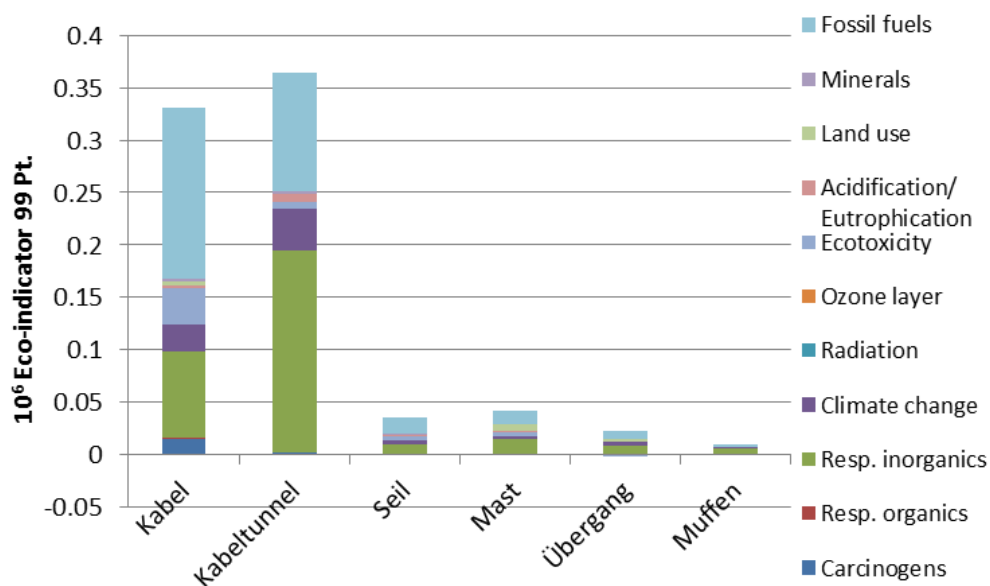


Abbildung 16: Eco-indicator 99 der Variante „Teilverkabelung 3km“.

Die wichtigsten Beiträge stammen aus den Kabeln und dem Kabeltunnel, wo im allgemeinen die Hauptverursacher bei den Kabeln das XLPE/HDPE und die Metalle sind während beim Kabeltunnel der Beton und die Armierung dominieren.

4.1.3 Detail der Varianten: Teilverkabelung 9.2 km

In Abbildung 17 bis Abbildung 20 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit und der Eco-indicator 99 für die Vollverkabelung dargestellt. Die Gesamtauswirkungen sind unterteilt auf die spezifischen Komponenten.

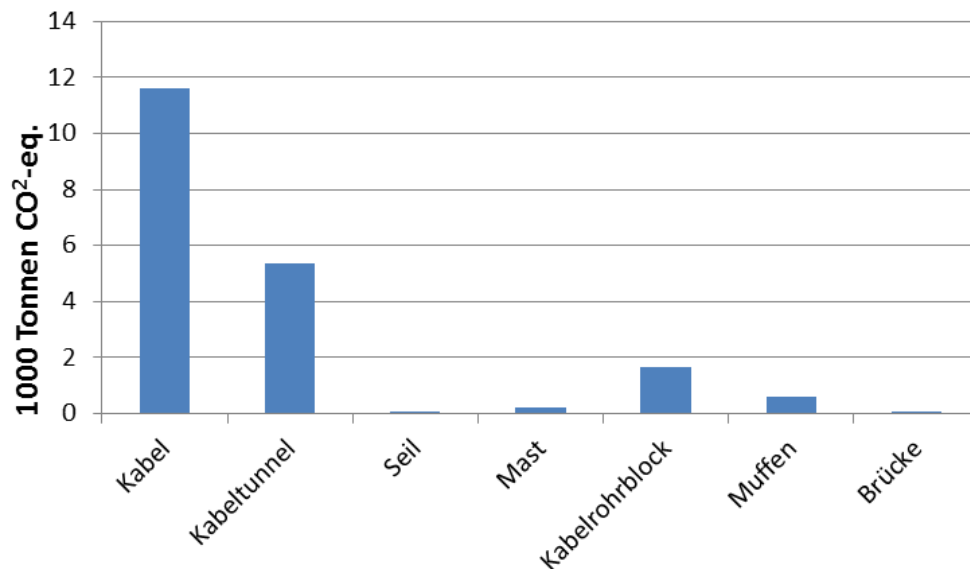


Abbildung 17: Treibhausgasemissionen der Variante „Teilverkabelung 9.2km“.

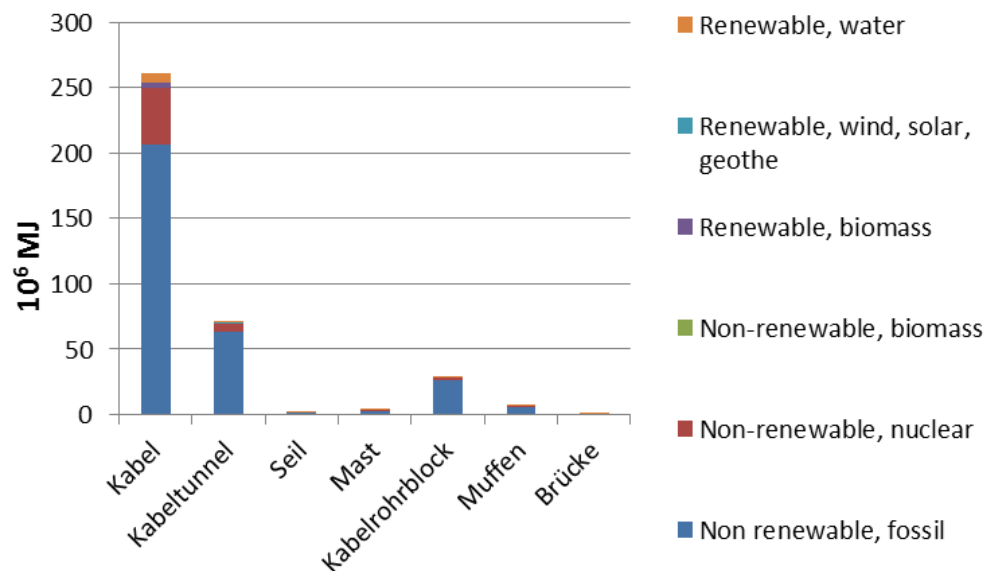


Abbildung 18: KEA der Variante "Teilverkabelung 9.2km".

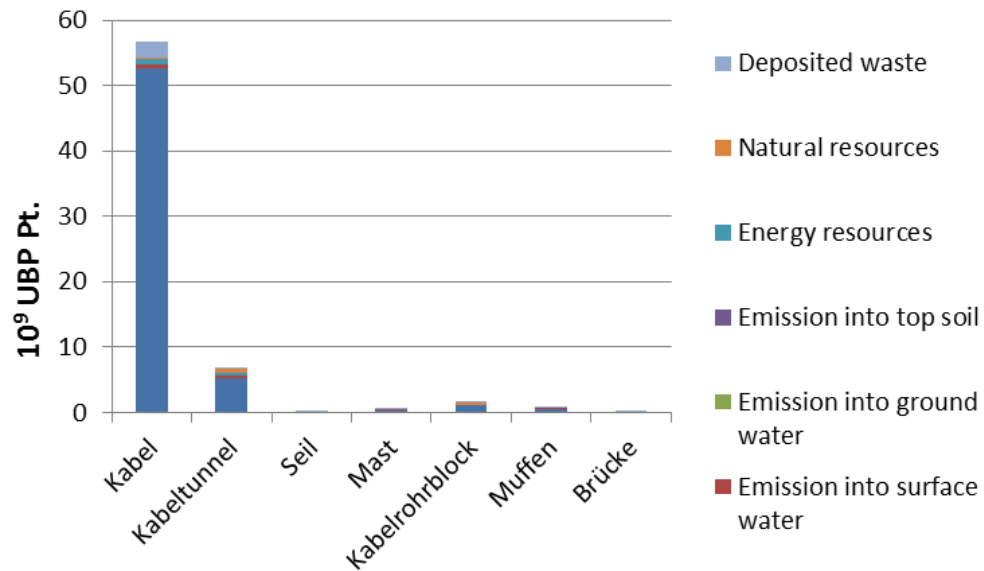


Abbildung 19: UBP der Variante "Teilverkabelung 9.2km".

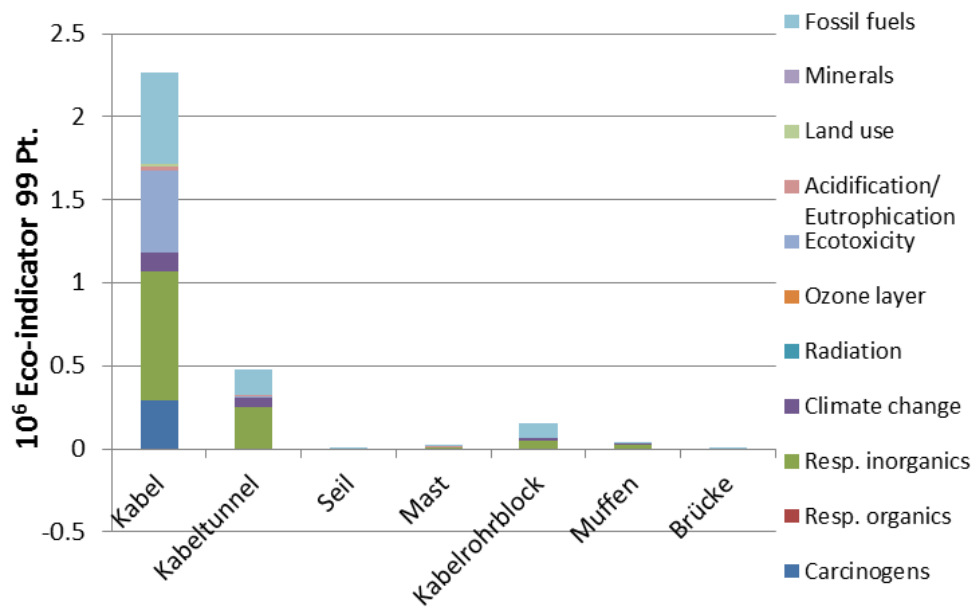


Abbildung 20: Eco-indicator 99 der Variante „Teilverkabelung 9.2km“.

Die grössten Umweltauswirkungen stammen bei allen Indikatoren aus den Kabeln, wo wiederum die grössten Beiträge aus dem Lebenszyklus des Kupfers und aus dem XLPE/HDPE kommen.

4.2 Ergebnisse mit Berücksichtigung der Verluste

Bei der Berechnung der Umweltauswirkungen aus dem Verbrauch der Elektrizität durch die Leitungsverluste muss berücksichtigt werden, dass sich der Strom-Mix über die betrachtete Zeitspanne von 40 Jahren verändern wird. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wurde basierend auf den Prognosen des Bundesamt für Energie (Prognos 2012) folgender Strom-Mix für das Jahr 2050 angenommen:

Tabelle 15: Strom-Mix für das Jahr 2050 basierend auf (Prognos 2012).

Wasserkraft	44.15	TWh/a
Verbrauch Speicherpumpen	7.54	TWh/a
Fossile Kraftwerke	10.65	TWh/a
Photovoltaik	11.12	TWh/a
Wind	4.26	TWh/a
Biomasse (Holz)	1.24	TWh/a
Biogas	1.88	TWh/a
Kehrrichtverbrennungsanlagen	1.33	TWh/a

Um die durchschnittlichen Umweltauswirkungen aus den Stromverlusten über 40 Jahre abzubilden, wurden diese zu 50% mit dem Standard-ecoinvent Datensatz zum Schweizer Strom-Mix und zu 50% mit dem oben beschriebenen Strom-Mix abgeschätzt.

Neben den Auswirkungen aus der Produktion des Stroms wurden auch die Auswirkungen der Ozonbildung, der Lachgas-Emissionen und der Abwärme mitbilanziert. Dies Emissionsfaktoren dazu sind Standard-ecoinvent Daten und betragen jeweils $4.5E-6$ kg Ozon pro kWh Elektrizität, $5E-6$ kg Lachgas pro kWh Elektrizität und $3.34E-2$ MJ Wärme pro kWh Elektrizität.

In Abbildung 21 bis Abbildung 24 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand (KEA), die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit und der Eco-indicator 99 aufgezeigt, wenn auch die Umweltauswirkungen der Elektrizitätsverluste mitberücksichtigt werden.

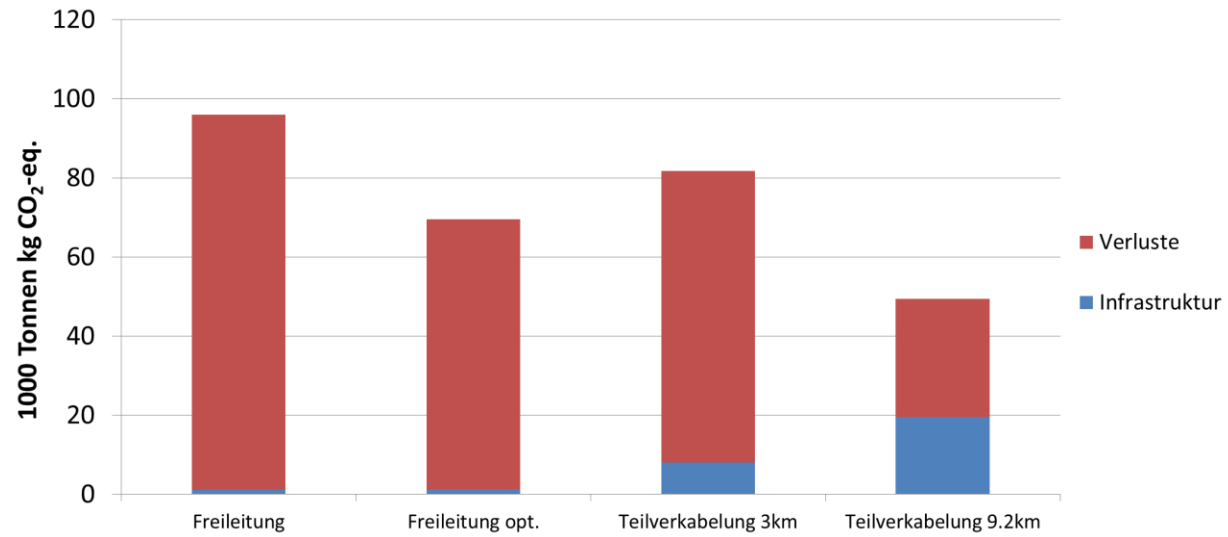


Abbildung 21: Vergleich der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Verluste.

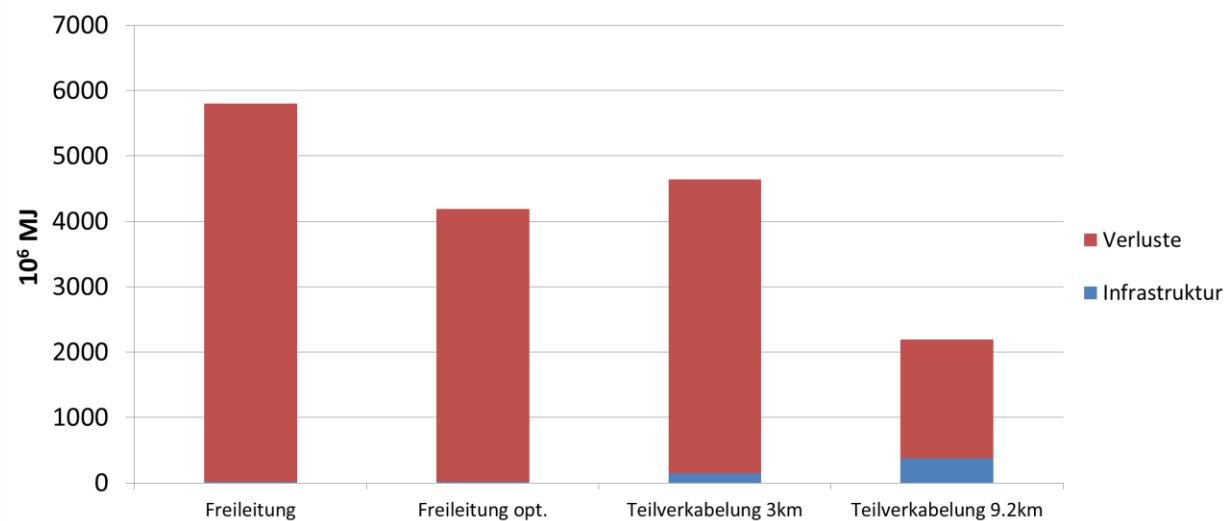


Abbildung 22: Vergleich des KEAs unter Berücksichtigung der Verluste.

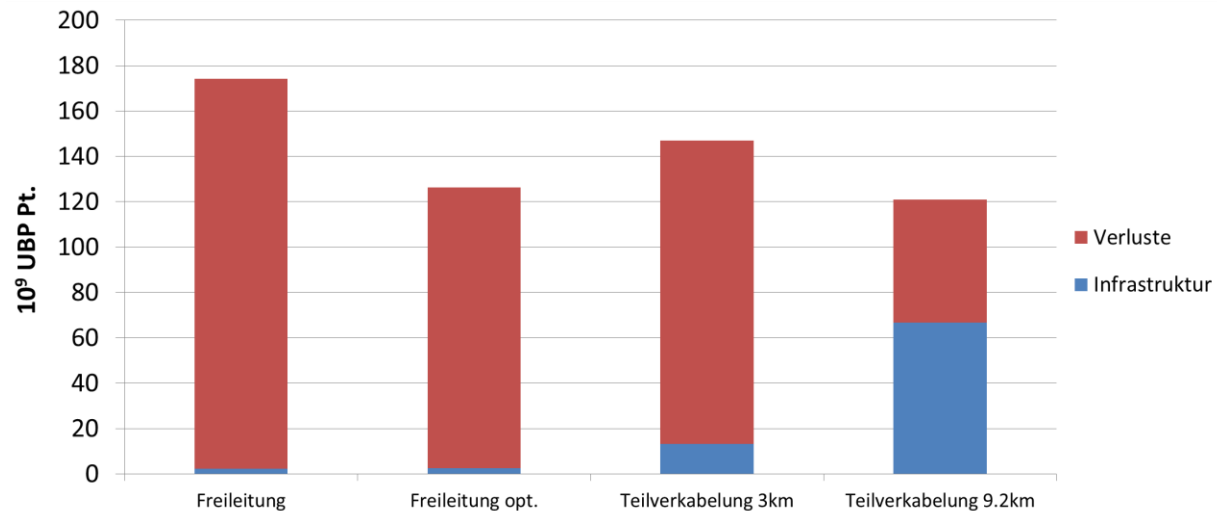


Abbildung 23: Vergleich der UBPs unter Berücksichtigung der Verluste.

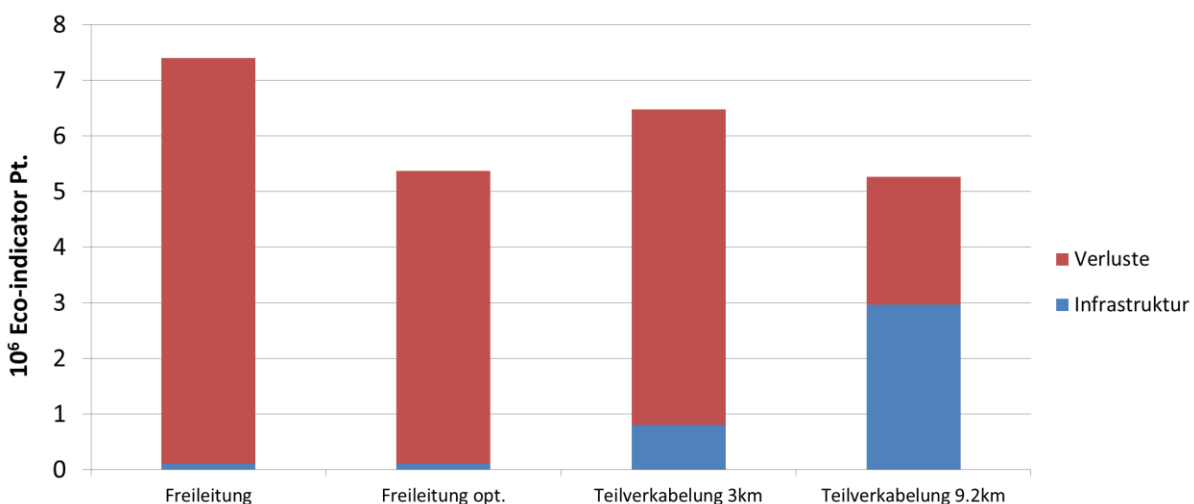


Abbildung 24: Vergleich des Eco-indicators 99 unter Berücksichtigung der Verluste.

Aus den Abbildungen ist deutlich zu sehen, wie die Beiträge aus den Verlusten bei den Freileitungen und der „Teilverkabelung 3 km“ die Gesamtergebnisse dominieren und so gross sind, dass sich das Bild im Gegensatz zu der Bilanzierung ohne Verluste komplett verändert. Bei Berücksichtigung der Verluste schneidet nun die Variante „Teilverkabelung 9.2 km“ aufgrund der signifikant tieferen Verluste bei allen Indikatoren am besten ab. Nur bei der Methode der ökologischen Knappheit und beim Eco-indicator 99 sind die Ergebnisse der optimierten Freileitung sehr ähnlich mit denen der „Teilverkabelung 9.2km“. Die optimierte Freileitung schneidet auch bei allen Indikatoren besser als die „Teilverkabelung 3km“ ab. Die erste Freileitung weist dagegen bei allen Indikatoren die grössten Umweltauswirkungen auf.

5 Auswertung

5.1 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie zeigen unter den getroffenen Annahmen ein deutliches Bild: ohne Bilanzierung der Umweltauswirkungen aus den Elektrizitätsverlusten schneiden die Freileitungen bei allen Indikatoren am besten ab, während die „Teilverkabelung 9.2 km“ bei Weitem die grössten Auswirkungen aufweist. Grund dafür sind die hohen Beiträge aus der Herstellung der Kupferkabel. Dagegen schliesst aber bei Berücksichtigung der Elektrizitätsverluste die Variante „Teilverkabelung 9.2 km“ bei allen Indikatoren am besten ab, da grundsätzlich die Auswirkungen der Elektrizitätsverluste einen grossen Einfluss auf das Endergebnis haben und die Kupferleitung die kleinsten Verluste aufweist. Nur die optimierte Freileitung erreicht bei der Methode der ökologischen Knappheit und beim Eco-indicator 99 ähnliche Ergebnisse, wie die „Teilverkabelung 9.2 km“. Hierbei ist zu beachten, wie die relativ kleinen Beiträge aus den zusätzlichen Materialien in der optimierten Freileitung bei weitem von den viel kleineren Leitungsverlusten kompensiert werden, so dass die optimierte Freileitung nicht nur besser als die andere Freileitung, sondern auch besser als die „Teilverkabelung 3km“ abschneidet. Da die Variante „Teilverkabelung 3 km“ die Vorteile und Nachteile der ersten Freileitung und der „Teilverkabelung 9.2 km“ aufweist, schliesst diese Variante immer zwischen den zwei anderen ab.

5.2 Einschränkungen und Sensitivität

Um die Sensitivität der Schlussfolgerungen auf relevante Eingangsparameter zu testen, wurden ausgewählte Annahmen variiert und deren Relevanz analysiert. Da bei den zwei Freileitungen und zum Teil auch bei der „Teilverkabelung 3 km“ die Ergebnisse von den Umweltauswirkungen der Leitungsverluste dominiert sind, wird nicht erwartet, dass Änderungen in den Annahmen bei den Material- und Bauressourcen dieser Varianten einen relevanten Einfluss auf die Schlussfolgerungen der Studie haben können. Anders ist es bei der „Teilverkabelung 9.2 km“ wo die Beiträge aus der Infrastruktur relevant sind und deswegen Änderungen bei den Annahmen zu den Materialien und Ressourcen das Gesamtbildverändern könnten. Insbesondere geht es darum, plausible Situationen zu identifizieren, bei denen sich die Ergebnisse dieser Variante deutlich verschlechtern könnten, so dass zum Beispiel die optimierte Freileitung dann am besten abschneiden könnte. Diesbezüglich wurden zwei Annahmen identifiziert, die einen Einfluss auf einen grossen Teil der Materialien in der Teilverkabelung haben könnten: die Recyclingverluste bei den Metallen und die Entsorgung des XLPE bei den Kabeln. Des

Weiteren wurde auch analysiert, wie sich die Gesamtergebnisse unter einem anderen Szenario für den zukünftigen Strom-Mix ändern würden.

Bei den Verlusten im Metallrecycling wurde pauschal mit 2% in den oben besprochenen Ergebnissen gerechnet. Das entspricht in der Grössenordnung den Werten, die auch in anderen Studien mit hohem Anteil an Metallrecycling benutzt wurden (siehe z.B. Althaus and Gauch (2010)). Hätte aber das Kupfer einen höheren Recyclingverlust im Gegensatz zu den anderen Metallen, dann könnte sich das Bild bei Berücksichtigung der Elektrizitätsverluste ändern. Um die Belastbarkeit der Ergebnisse zu testen, wurden die Ergebnisse mit einer Verlustrate von jeweils 1% und 5% für alle Varianten nachgerechnet und die daraus entstehenden Bandbreiten der Umweltauswirkungen analysiert. Unter Berücksichtigung der Leitungsverluste konnten bei den Treibhausgasemissionen und dem KEA keine relevanten Änderungen in den Ergebnissen beobachtet werden. Dagegen zeigt sich für eine Verlustrate von 5% eine spürbare Verschlechterung der Ergebnisse bei der Methode der ökologischen Knappheit und dem Eco-indicator 99. Bei diesem Szenario schneidet die optimierte Freileitung bei diesen Indikatoren am besten ab während die „Teilverkabelung 9.2 km“ ähnliche Umweltauswirkungen wie die „Teilverkabelung 3 km“ aufweist. Weiterhin ist zu beachten, dass grundsätzlich relevante Änderungen nur bei der „Teilverkabelung 9.2 km“ erkennbar sind, da diese einen deutlich höheren Anteil an Metallen hat. Die grösste Änderung wurde bei der Methode der ökologischen Knappheit beobachtet (Abbildung 25). Diese Ergebnisse zeigen, dass Recyclingverluste unter ungefähr 2% nötig sind, um die ursprünglichen Schlussfolgerungen einhalten zu können.

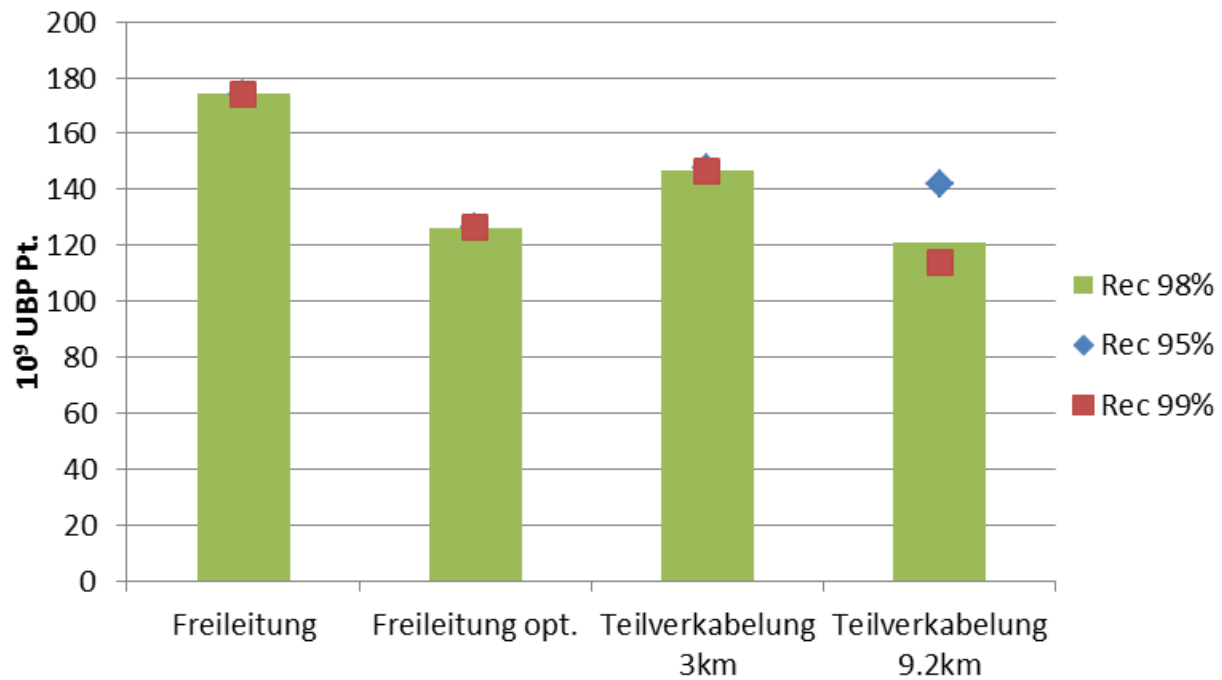


Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse der Recyclingrate (ökologische Knappheit) bei 2%, 5% und 1% Verluste.

Bezüglich der grossen Menge an XLPE, die am Ende des Lebens der Kabel in der Variante Teilverkabelung 9.2km entsorgt werden müssen, wurde analysiert, wie sich die Ergebnisse ändern würden, wenn das Material nicht recycelt, sondern in einer Kehrrichtverbrennungsanlage entsorgt wird. Im Verbrennungsprozess wurde eine Gutschrift für die in der Anlage erzeugten Elektrizität mitbilanziert. Grundsätzlich ist das Bild ähnlich wie bei der Sensitivitätsanalyse der Recyclingverluste. Nur bei der Methode der ökologischen Knappheit und beim Eco-indicator 99 gibt es Änderungen in den Schlussfolgerungen, da bei Verbrennung des XLPEs die optimierte Freileitung bei diesen zwei Indikatoren am besten abschliesst. In diesem Fall wurden die grössten Änderungen beim Eco-indicator 99 beobachtet (Abbildung 26). Unter den getroffenen Annahmen ist es also aus ökologischer Sicht wünschenswert, wenn das XLPE recycelt wird, damit mit der „Teilverkabelung 9.2 km“ die kleinsten Umweltauswirkungen erreicht werden können.

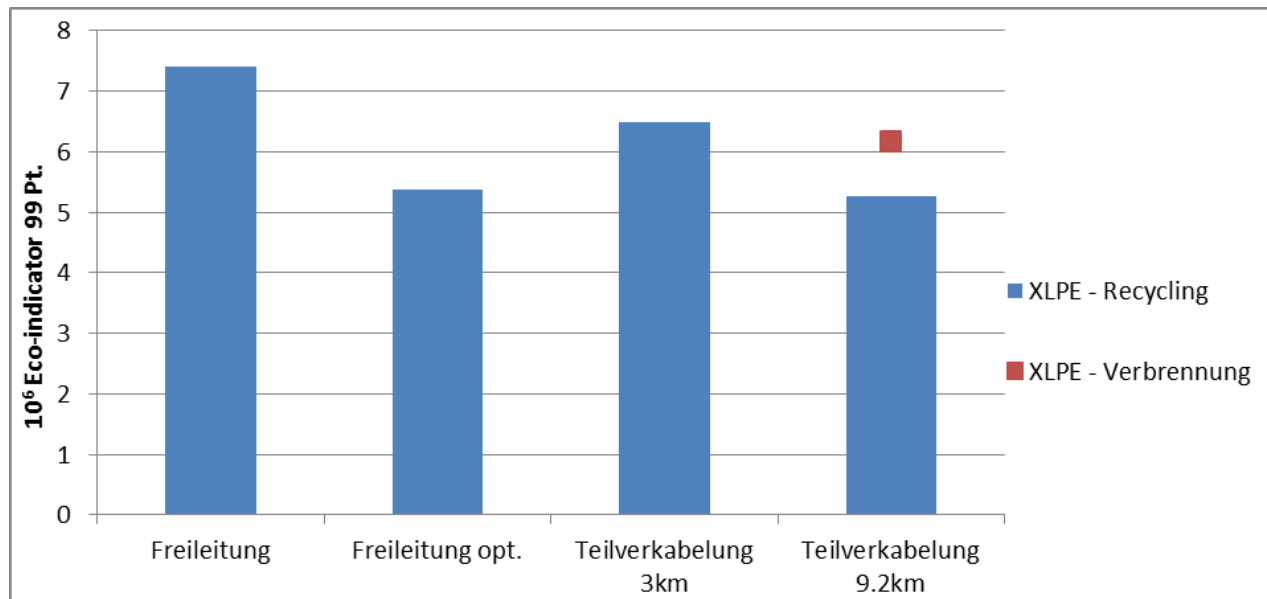


Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Entsorgung des XLPEs in der Teilverkabelung 9.2km.

Zuletzt ist bei den Beiträgen aus den Elektrizitätsverlusten folgendes zu beobachten. Die Umweltauswirkungen aus den Stromverlusten hängen vom abgebildeten Strom-Mix ab. Bei einem Strom-Mix mit sehr kleinen Umweltauswirkungen sind die Beiträge aus den Verlusten natürlich entsprechend kleiner. In dieser Studie wurde der Strom-Mix basierend auf dem Szenario „Politische Massnahmen C&E“ der BFE Studie (Prognos 2012) abgebildet. In diesem Szenario wird angenommen, dass neben einem starken Ausbau der erneuerbaren Energien auch fossile Technologien für die Deckung von Stromlücken eingesetzt werden. Die BFE-Studie betrachtet aber auch ein Szenario „E“, in dem der Anteil an fossiler Energie deutlich kleiner ist (von ungefähr 13% auf ca. 4.6% reduziert). Um die Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf den Strom-Mix zu analysieren, wurden die Gesamtumweltauswirkungen inklusive der Beiträge aus den Stromverlusten neu berechnet und zwar mit einem durchschnittlichen Strom-Mix über 40 Jahre in dem der Anteil für 2050 basierend auf dem „E“-Szenario nur 4.6% an fossiler Elektrizität beträgt. Bei den Treibhausemissionen und dem KEA wurden zwar insgesamt tiefere Umweltauswirkungen erzielt, aber die Schlussfolgerungen in Bezug auf diese Indikatoren änderten sich nicht. Bei der Methode der ökologischen Knappheit zeigt die optimierte Freileitung und die „Teilverkabelung 9.2km“ ähnliche gute Ergebnisse auf, während beim Eco-indicator 99 die optimierte Freileitung etwas besser abschneidet als die „Teilverkabelung 9.2km“ (Abbildung 27).

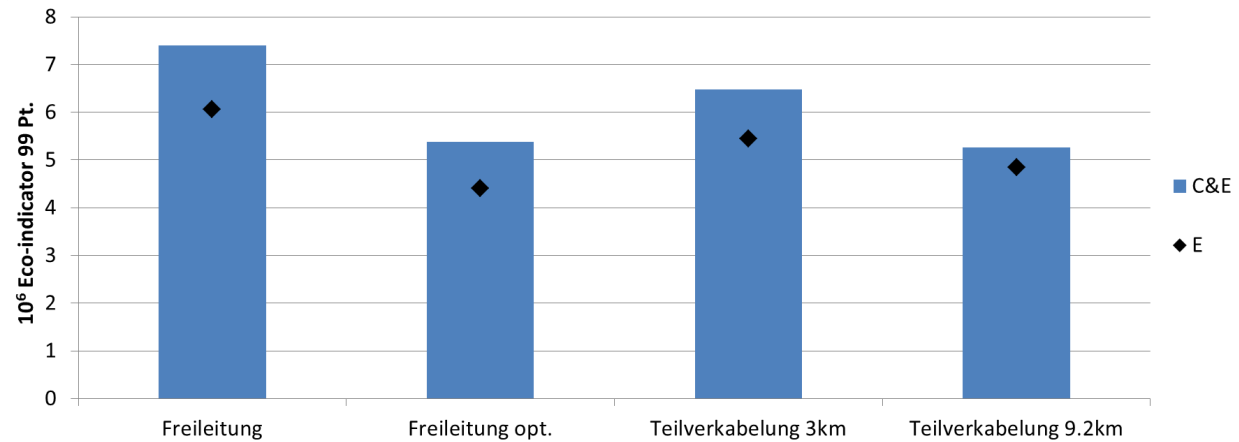


Abbildung 27:Eco-indicator 99 der vier Varianten bei der Abbildung der „C&E“ und „E“ Szenarien für den Strom-Mix in 2050.

Im allgemeinen zeigen diese Sensitivitätsanalysen, dass die Variante „Teilverkabelung 9.2 km“ bei den Treibhausgasemissionen und dem KEA auch bei Änderung einiger relevanter Annahmen weiterhin am besten abschliesst, dass aber die optimierte Freileitung bei der Methode der ökologischen Knappheit und dem Eco-indicator 99 unter bestimmten Bedingungen bessere Ergebnisse aufzeigen kann.

6 Referenzen

- Althaus, H. J., and M. Gauch. 2010. *Vergleichende Ökobilanz Individueller Mobilität: Elektromobilität versus Konventionelle Mobilität Mit Bio- Und Fossilen Treibstoffen*. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Report available from http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/104369/---/l=1.
- Frischknecht, R. et al. 2007. "Overview and Methodology - Data v2.0." *ecoinvent report no.1*.
- Frischknecht, Rolf, M. Tuchschild, and Mireille Faist-Emmenegger. 2007. *Strommix Und Stromnetz - Ecoinvent Reoirt No. 6*.
- Harrison, Gareth P., Edward N. J. Maclean, Serafeim Karamanlis, and Luis F. Ochoa. 2010. "Life Cycle Assessment of the Transmission Network in Great Britain." *Energy Policy* 38:3622–31.
- HAUER, Technisches Büro. 2007. *Entsorgung von Nicht Gefährlichem Bodenaushub Und Nicht Gefährlichen Baurestmassen in Vorarlberg*.
- ISO 14040: 2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*.
- ISO 14044: 2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*.
- Prognos. 2012. *Die Energieperspektiven Für Die Schweiz Bis 2050*.

7 Annex A – Ergebnistabellen

7.1 Ergebnistabellen: Vergleich der Varianten ohne Elektrizitätsverluste

	kg CO ₂ -eq.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Weiteres	0.00E+00	0.00E+00	1.34E+05	6.38E+05
Übergangsbauwerk	0.00E+00	0.00E+00	2.97E+05	0.00E+00
Seil	5.91E+05	7.02E+05	4.10E+05	8.35E+04
Mast	4.52E+05	4.89E+05	3.82E+05	2.08E+05
Kabeltunnel	0.00E+00	0.00E+00	4.11E+06	5.34E+06
Rohrblock	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.67E+06
Kabel	0.00E+00	0.00E+00	2.63E+06	1.16E+07

Tabelle 16: Vergleich Treibhausgasemissionen (ohne Stromverluste).

	MJ			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Weiteres	0.00E+00	0.00E+00	1.60E+06	7.75E+06
Übergangsbauwerk	0.00E+00	0.00E+00	9.36E+06	0.00E+00
Seil	1.05E+07	1.25E+07	7.29E+06	1.49E+06
Mast	7.34E+06	7.86E+06	6.24E+06	3.48E+06
Kabeltunnel	0.00E+00	0.00E+00	5.46E+07	7.13E+07
Rohrblock	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.92E+07
Kabel	0.00E+00	0.00E+00	6.67E+07	2.61E+08

Tabelle 17: Vergleich des KEAs (ohne Stromverluste).

	UBP Pt.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Weiteres	0.00E+00	0.00E+00	1.72E+08	8.62E+08
Übergangsbauwerk	0.00E+00	0.00E+00	5.61E+08	0.00E+00
Seil	1.09E+09	1.30E+09	7.56E+08	1.54E+08
Mast	1.07E+09	1.13E+09	9.16E+08	5.32E+08
Kabeltunnel	0.00E+00	0.00E+00	5.31E+09	6.93E+09
Rohrblock	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.57E+09
Kabel	0.00E+00	0.00E+00	5.41E+09	5.67E+10

Tabelle 18: Vergleich UBP Pt. (ohne Stromverluste).

	Eco-indicator 99 Pt.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Weiteres	0.00E+00	0.00E+00	9.63E+03	4.79E+04
Übergangsbauwerk	0.00E+00	0.00E+00	2.25E+04	0.00E+00
Seil	5.03E+04	5.99E+04	3.50E+04	7.12E+03
Mast	4.96E+04	5.37E+04	4.14E+04	2.13E+04
Kabeltunnel	0.00E+00	0.00E+00	3.64E+05	4.75E+05
Rohrblock	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.52E+05
Kabel	0.00E+00	0.00E+00	3.31E+05	2.27E+06

Tabelle 19: Vergleich Eco-indicator 99 (ohne Stromverluste).

7.2 Ergebnistabellen – Detail der Varianten

7.2.1 Freileitung

	Mast	Seil	Mast opt.	Seil opt.
kg CO ₂ -eq.	4.52E+05	5.91E+05	4.89E+05	7.02E+05

Tabelle 20: Treibhausgasemissionen der Freileitung.

	MJ			
	Mast	Seil	Mast opt.	Seil opt.
Non renewable, fossil	5.75E+06	7.86E+06	6.17E+06	9.34E+06
Non-renewable, nuclear	1.30E+06	1.73E+06	1.38E+06	2.05E+06
Non-renewable, biomass	9.24E+00	9.89E+00	1.00E+01	1.18E+01
Renewable, biomass	6.96E+04	1.75E+05	7.32E+04	2.08E+05
Renewable, wind, solar, geothe	1.99E+04	2.95E+04	2.09E+04	3.49E+04
Renewable, water	2.00E+05	7.14E+05	2.14E+05	8.51E+05

Tabelle 21: KEA der Freileitung.

	UBP Pt.			
	Mast	Seil	Mast opt.	Seil opt.
Emission into air	7.02E+08	5.87E+08	7.43E+08	6.99E+08
Emission into surface water	2.22E+08	4.16E+07	2.31E+08	4.94E+07
Emission into ground water	1.35E+06	1.63E+05	1.40E+06	1.94E+05
Emission into top soil	1.64E+06	4.62E+06	1.74E+06	5.47E+06
Energy resources	2.38E+07	3.33E+07	2.55E+07	3.96E+07
Natural resources	6.54E+07	9.10E+06	7.53E+07	1.08E+07
Deposited waste	5.13E+07	4.12E+08	5.43E+07	4.92E+08

Tabelle 22: UBPs der Freileitung.

	Eco-indicator 99 Pt.			
	Mast	Seil	Mast opt.	Seil opt.
Carcinogens	4.32E+02	7.99E+02	4.57E+02	9.53E+02
Resp. organics	1.66E+01	1.66E+01	1.79E+01	1.97E+01
Resp. inorganics	1.63E+04	1.29E+04	1.74E+04	1.53E+04
Climate change	4.33E+03	5.62E+03	4.69E+03	6.69E+03
Radiation	1.22E+02	1.62E+02	1.29E+02	1.93E+02
Ozone layer	2.10E+00	2.58E+00	2.25E+00	3.07E+00
Ecotoxicity	4.16E+03	6.17E+03	4.35E+03	7.37E+03
Acidification/ Eutrophication	5.45E+02	5.58E+02	5.89E+02	6.64E+02
Land use	8.56E+03	7.82E+02	9.80E+03	9.29E+02
Minerals	1.10E+02	1.77E+03	1.17E+02	2.11E+03
Fossil fuels	1.50E+04	2.15E+04	1.61E+04	2.56E+04

Tabelle 23: Eco-indicator 99 der Freileitung.

7.2.2 Detail der Varianten: Teilverkabelung 3km

	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Übergang	Muffen
kg CO2 eq.	2.63E+06	4.11E+06	4.10E+05	3.82E+05	2.97E+05	1.34E+05

Tabelle 24: Treibhausgasemissionen der Teilverkabelung 3km.

	MJ					
	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Übergang	Muffen
Non renewable, fossil	5.42E+07	4.84E+07	5.46E+06	4.88E+06	2.90E+06	1.36E+06
Non-renewable, nuclear	9.49E+06	4.98E+06	1.20E+06	1.12E+06	5.41E+06	1.88E+05
Non-renewable, biomass	2.79E+01	6.70E+01	6.87E+00	7.82E+00	5.13E+00	1.78E+00
Renewable, biomass	1.14E+06	2.53E+05	1.21E+05	5.87E+04	6.00E+04	1.18E+04
Renewable, wind, solar, geothe	1.32E+05	6.19E+04	2.05E+04	1.72E+04	1.64E+04	2.41E+03
Renewable, water	1.65E+06	9.39E+05	4.96E+05	1.71E+05	9.68E+05	3.95E+04

Tabelle 25: KEA der Teilverkabelung 3km.

	UBP Pt.					
	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Übergang	Muffen
Emission into air	4.13E+09	3.99E+09	4.08E+08	6.03E+08	2.48E+08	1.27E+08
Emission into surface water	1.48E+08	4.06E+08	2.89E+07	1.93E+08	8.96E+07	1.59E+07
Emission into ground water	1.26E+06	5.01E+05	1.13E+05	1.04E+06	1.17E+05	1.88E+04
Emission into top soil	1.01E+07	8.26E+06	3.21E+06	1.36E+06	8.49E+05	1.72E+05
Energy resources	2.17E+08	1.79E+08	2.32E+07	2.03E+07	2.87E+07	5.22E+06
Natural resources	2.73E+07	5.15E+08	6.32E+06	5.30E+07	4.02E+07	1.55E+07
Deposited waste	8.77E+08	2.12E+08	2.86E+08	4.39E+07	1.53E+08	8.19E+06

Tabelle 26: UBP der Teilverkabelung 3km.

	Eco-indicator 99 Pt.					
	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Übergang	Muffen
Carcinogens	1.55E+04	1.99E+03	5.55E+02	3.70E+02	1.67E+02	6.26E+01
Resp. organics	1.71E+02	1.90E+02	1.15E+01	1.40E+01	8.87E+00	4.00E+00
Resp. inorganics	8.30E+04	1.93E+05	8.96E+03	1.39E+04	8.77E+03	5.26E+03
Climate change	2.49E+04	3.95E+04	3.91E+03	3.66E+03	2.84E+03	1.29E+03
Radiation	6.95E+02	4.73E+02	1.13E+02	1.05E+02	5.26E+02	1.78E+01
Ozone layer	6.24E+00	1.49E+01	1.79E+00	1.75E+00	1.25E+00	3.92E-01
Ecotoxicity	3.45E+04	6.58E+03	4.29E+03	3.56E+03	-1.18E+01	2.41E+02
Acidification/ Eutrophication	3.04E+03	7.13E+03	3.88E+02	4.63E+02	3.68E+02	1.41E+02
Land use	2.88E+03	6.87E+02	5.43E+02	6.56E+03	2.73E+03	5.71E+01
Minerals	2.90E+03	1.37E+03	1.23E+03	9.18E+01	2.81E+01	5.53E+01
Fossil fuels	1.63E+05	1.14E+05	1.50E+04	1.27E+04	7.08E+03	2.50E+03

Tabelle 27: Eco-indicator 99 der Teilverkabelung 3km.

7.2.3 Detail der Varianten: Teilverkabelung 9.2km

	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Kabelrohrblock	Muffen	Brücke
kg CO2-eq.	1.16E+07	5.34E+06	8.35E+04	2.08E+05	1.67E+06	6.04E+05	3.41E+04

Tabelle 28: Treibhausgasemissionen der Teilverkabelung 9.2km.

	MJ						
	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Kabelrohrblock	Muffen	Brücke
Non renewable, fossil	2.06E+08	6.32E+07	1.11E+06	2.69E+06	2.63E+07	6.14E+06	4.09E+05
Non-renewable, nuclear	4.32E+07	6.49E+06	2.44E+05	6.50E+05	2.37E+06	8.44E+05	1.02E+05
Non-renewable, biomass	1.60E+02	8.79E+01	1.40E+00	4.26E+00	3.01E+01	8.02E+00	8.22E-01
Renewable, biomass	4.04E+06	3.30E+05	2.47E+04	3.17E+04	1.07E+05	5.32E+04	4.05E+03
Renewable, wind, solar, geother	6.80E+05	8.06E+04	4.17E+03	1.03E+04	6.87E+03	1.08E+04	1.37E+03
Renewable, water	7.10E+06	1.22E+06	1.01E+05	9.72E+04	4.30E+05	1.78E+05	1.62E+04

Tabelle 29: KEA der Teilverkabelung 9.2km.

	UBP Pt.						
	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Kabelrohrblock	Muffen	Brücke
Emission into air	5.26E+10	5.20E+09	8.31E+07	3.53E+08	1.07E+09	5.73E+08	5.33E+07
Emission into surface water	6.70E+08	5.27E+08	5.89E+06	1.19E+08	2.79E+07	7.15E+07	1.58E+07
Emission into ground water	1.72E+07	6.60E+05	2.31E+04	3.26E+05	8.48E+04	8.44E+04	5.38E+03
Emission into top soil	1.80E+07	1.10E+07	6.53E+05	6.68E+05	4.58E+06	7.73E+05	1.16E+05
Energy resources	8.47E+08	2.33E+08	4.71E+06	1.13E+07	9.62E+07	2.35E+07	1.73E+06
Natural resources	1.23E+08	6.78E+08	1.29E+06	2.30E+07	3.26E+08	6.98E+07	1.13E+07
Deposited waste	2.50E+09	2.76E+08	5.84E+07	2.51E+07	4.87E+07	3.69E+07	3.62E+06

Tabelle 30: UBP der Teilverkabelung 9.2km.

	Eco-indicator 99 Pt.						
	Kabel	Kabeltunnel	Seil	Mast	Kabelrohrblock	Muffen	Brücke
Carcinogens	2.88E+05	2.59E+03	1.13E+02	2.12E+02	4.62E+02	2.82E+02	3.15E+01
Resp. organics	7.51E+02	2.50E+02	2.34E+00	7.65E+00	1.09E+02	1.80E+01	1.30E+00
Resp. inorganics	7.81E+05	2.51E+05	1.82E+03	7.99E+03	4.47E+04	2.37E+04	1.48E+03
Climate change	1.10E+05	5.13E+04	7.95E+02	1.99E+03	1.59E+04	5.81E+03	3.27E+02
Radiation	3.47E+03	6.16E+02	2.30E+01	6.13E+01	1.37E+02	7.99E+01	9.70E+00
Ozone layer	2.43E+01	1.96E+01	3.65E-01	8.90E-01	5.98E+00	1.76E+00	1.53E-01
Ecotoxicity	4.96E+05	8.58E+03	8.74E+02	2.02E+03	8.31E+02	1.09E+03	3.08E+02

Acidification/ Eutrophication	2.22E+04	9.37E+03	7.89E+01	2.57E+02	2.44E+03	6.35E+02	4.84E+01
Land use	1.41E+04	8.00E+02	1.11E+02	1.88E+03	-4.31E+02	2.57E+02	1.28E+03
Minerals	9.91E+02	1.78E+03	2.51E+02	4.74E+01	7.47E+01	2.49E+02	6.27E+00
Fossil fuels	5.49E+05	1.49E+05	3.04E+03	6.82E+03	8.81E+04	1.12E+04	1.11E+03

Tabelle 31: Eco-indicator 99 der Teilverkabelung 9.2km.

7.3 Ergebnistabellen: Vergleich der Varianten mit Elektrizitätsverluste

	kg CO ₂ -eq.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Infrastruktur	1.04E+06	1.19E+06	7.96E+06	1.95E+07
Verluste	9.49E+07	6.83E+07	7.38E+07	2.99E+07

Tabelle 32: Vergleich der Treibhausgasemissionen (mit Stromverluste).

	MJ			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Infrastruktur	1.78E+07	2.03E+07	1.46E+08	3.75E+08
Verluste	5.78E+09	4.16E+09	4.50E+09	1.82E+09

Tabelle 33: Vergleich des KEAs (mit Stromverluste).

	UBP Pt.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Infrastruktur	2.15E+09	2.43E+09	1.31E+10	6.68E+10
Verluste	1.72E+11	1.24E+11	1.34E+11	5.41E+10

Tabelle 34: Vergleich UBP Pt. (mit Stromverluste).

	Eco-indicator 99 Pt.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Infrastruktur	9.99E+04	1.14E+05	8.04E+05	2.97E+06
Verluste	7.31E+06	5.26E+06	5.68E+06	2.30E+06

Tabelle 35: Vergleich Eco-indicator 99 Pt. (mit Stromverluste).

7.4 Ergebnistabellen: Sensitivitätsanalyse – Vergleich von Elektrizitätsszenarien

	UBP Pt.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
Rec 95%	1.74E+11	1.26E+11	1.48E+11	1.42E+11
Rec 99%	1.74E+11	1.26E+11	1.46E+11	1.14E+11
Rec 98%	1.74E+11	1.26E+11	1.47E+11	1.21E+11

Tabelle 36: Vergleich der UBP Pt. für unterschiedliche Recyclingraten (5%, 1% und 2% Verluste im Recyclingprozess)

	Eco-indicator 99 Pt.			
	Freileitung	Freileitung opt.	Teilverkabelung 3km	Teilverkabelung 9.2km
XLPE - Recycling	7.41E+06	5.37E+06	6.48E+06	5.27E+06
XLPE - Verbrennung				6.17E+06

Tabelle 37: Vergleich (Eco-indicator 99) der Gesamtumweltauswirkungen bei Recycling und Verbrennung des XLPEs in der Kabelisolation der Teilverkabelung 9.2km.

	Eco-indicator 99 Pt.	
	Szenario C&E	Szenario E
Freileitung	7.41E+06	6.07E+06
Freileitung opt.	5.37E+06	4.41E+06
Teilverkabelung 3km	6.48E+06	5.44E+06
Teilverkabelung 9.2km	5.27E+06	4.85E+06

Tabelle 38: Vergleich der Gesamtauswirkungen im „C&E“ und „E“ Elektrizitätsszenario.