

Ökobilanz von Unterwerken im Höchstspannungsnetz

Ein ökobilanzieller Vergleich zwischen luft- und
gasisolierten Schaltanlagen

Studie im Auftrag von Swissgrid AG



Verfasst von:

Julia Wetzel

Thomas Pohl

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

Datum: 31. Juli 2024

Hinweis zur Publikation

Dieser Bericht wurde im Auftrag der Swissgrid AG erstellt. Die Inhalte basieren auf dem zum Zeitpunkt der Datenerhebung verfügbaren Kenntnisstand (2024).

Für die vorliegende Veröffentlichung wurden im Jahr 2026 redaktionelle Anpassungen vorgenommen. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen bleiben davon unberührt.

Einzelne Annahmen (z. B. zu Technologien oder Emissionsfaktoren) können sich im Zuge technischer Weiterentwicklungen oder aktualisierter Datengrundlagen verändern.

Management Summary

Einleitung

Die Relevanz der Nachhaltigkeit in öffentlich-rechtlichen Ausschreibungen nimmt zu. Die nationale Netzgesellschaft Swissgrid sieht sich als öffentlich-rechtliche Bauherrin in einer Vorreiterrolle im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit. Aus diesem Grund hat Swissgrid in der jüngeren Vergangenheit eine umfassende Ökobilanz zu den Übertragungstechnologien elektrischer Energie im Hochspannungsbereich mittels Freileitungen oder Erdverkabelung erstellen lassen. Neben den Erkenntnissen der Ökobilanz der Übertragungstechnologien elektrischer Energie im Hochspannungsbereich kam seitens Swissgrid das Bedürfnis auf auch eine Ökobilanz für Unterwerke zu erstellen. Unterwerke beinhalten Schaltanlagen und sind Knotenpunkte zwischen den Leitungen, sie trennen und verbinden in den Netzleitstellen Leitungen durch Schalthandlungen und lenken damit Energieflüsse. Swissgrid entwickelt zwei Bauausführungen von Unterwerken: 1. «AIS – air insulated switchgear = Luftisolierte Schaltanlage» und 2. «GIS – gas insulated switchgear = Gasisolierte Schaltanlage». Die AIS-Schaltanlage ist eine Freiluftschaltanlage, bei der die Luft als Isolationsmedium dient. Alle Komponenten der AIS-Schaltanlage sind im Freien installiert. Die GIS-Schaltanlage ist eine gasisolierte Schaltanlage, die in einer Halle aufgestellt ist. Als Isolationsmedium wird SF₆-Gas verwendet. Beide Schaltanlagen weisen die gleiche Funktion und Leistung auf, unterscheiden sich jedoch in ihrem Anlagenaufbau sowie ihrem Energieverbrauch während des Betriebs. Der Flächenbedarf und der Energieverbrauch der GIS-Schaltanlage ist deutlich geringer als der der AIS-Schaltanlage. Dafür wird bei den GIS-Schaltanlagen deutlich mehr SF₆-Gas mit einem hohen Treibhauspotenzial als Isolationsgas verwendet. Problematisch sind die SF₆-Gas Verluste in der Nutzungsphase.

Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Produktökobilanz für die unterschiedlichen Unterwerke für die Höchstspannungsebene 380 kV bzw. 220 kV. Der Aufbau der Anlage eines Unterwerks auf der Höchstspannungsebene 380 kV und 220 kV ist identisch. Der Zweck dieser Studie besteht in der Erhebung und Quantifizierung der Umweltauswirkungen der einzelnen Unterwerke. Des Weiteren stellt er eine Entscheidungsgrundlage für Swissgrid dar, welche der Unterwerke künftig aus umwelttechnischer Sicht umgesetzt werden sollen.

Methodik und Vorgehen

Die Umtec Technologie 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 der Bau, Betrieb und Rückbau eines Feldes einer Schaltanlage mit drei Phasen über den Betrachtungszeitraum von 80 Jahren.
- Systemgrenze: Die Systemgrenze verläuft gemäss DIN EN 15643 [1] von der Herstellungsphase bis zur Entsorgungsphase.
- Sachbilanz (Daten): Die technischen Vordergrunddaten zu den einzelnen Unterwerken sind mittels eines Fragebogens von Swissgrid erhoben worden. Die generischen Hintergrunddaten der Ökobilanz sind dem Ökobilanzdatenbestand UVEK 2022 [2] 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

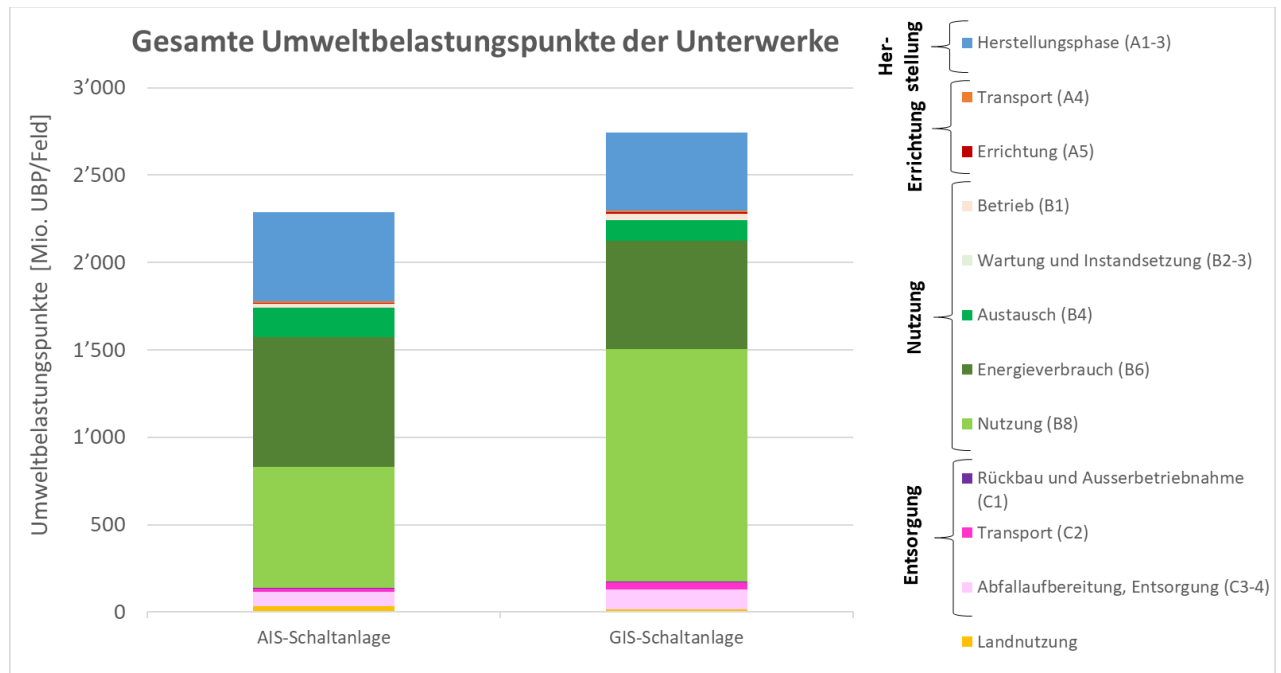


Abbildung 1: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Unterwerke

Die Auswertung der Lebenszyklusphasen belegt, dass die AIS-Schaltanlage im Vergleich zur GIS-Schaltanlage eine geringere Umweltauswirkung aufweist. Dies trifft insbesondere auf die Wirkungsabschätzungsmethoden «Treibhausgasemissionen» und «Methode der ökologischen Knappheit» zu. Die SF₆-Verluste in der Nutzung (B8) stellen dabei die wesentlichen Treiber dar, siehe Abbildung 1. Die Auswertung der Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen» ergeben, dass die resultatsbestimmenden Lebenszyklusphasen die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) sowie die Nutzung (B8) sind. Die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) sowie der Energieverbrauch (B6) weisen bei der AIS-Schaltanlage eine höhere Umweltauswirkung auf, während die Nutzung (B8) bei der GIS-Schaltanlage eine höhere Umweltauswirkung verursacht.

Bei der Wirkungsabschätzungsmethode des «kumulierten Energieaufwandes» zeigt sich, dass die AIS-Schaltanlage höhere Umweltauswirkungen aufweist als die GIS-Schaltanlage. Diese Abweichung ist auf den höheren Energieverbrauch der AIS-Schaltanlage gegenüber der GIS-Schaltanlage zurückzuführen. Die Wirkungsabschätzungsmethode des «kumulierten Energieaufwandes» bewertet den Primärenergieverbrauch als einzigen Umweltindikator, was in der Wirkungsabschätzungsmethode zu einer höheren Gewichtung desselben führt.

Weiter enthält der Bericht eine Sensitivitätsanalyse für die Unterwerke. Dabei variiert die Modellrechnung das Isoliergas (SF₆-Gas, 3M Novec 4710, CleanAir), den Strommix (Schweizer Verbraucherstrommix, nicht erneuerbarer Schweizer Strommix, erneuerbarer Schweizer Strommix), die

Lebensdauer der Anlagenkomponenten (aktuelle, halbe, doppelte Lebensdauer) sowie die Verlustrate des SF₆-Gases (Verlustrate von 0,3 %, Verlustrate von 0,1 %). Die Kernaussagen der Ökobilanz lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Ergebnisse des Variantenstudiums können durch Variation des Isoliergases sowie der Verlustrate des SF₆-Gases beeinflusst werden. Beim Einsatz alternativer Medien und einer Reduzierung der Verlustrate des SF₆-Gases zeigt sich die GIS-Schaltanlage gegenüber der AIS-Schaltanlage als überlegen. Die Kernaussagen der Ökobilanz bleiben bei einer Variation des Strommix und der Lebensdauer der Anlagenkomponenten stabil. Die Wahl des Strommix kann signifikante Umweltauswirkungen bei beiden Arten von Unterwerken zur Folge haben. Folglich können die Umweltauswirkungen durch einen möglichst hohen Anteil an erneuerbaren Energien minimiert werden. Die Erhöhung der Lebensdauer der Anlagenkomponenten erlangt erst mit der Senkung des Einsatzes der SF₆-Gase oder dem Einsatz eines Alternativmediums Relevanz, da die Materialien in den Vordergrund rücken.

Empfehlung

Die Resultate der Variantenuntersuchung sowie der Sensitivitätsanalyse lassen keine eindeutigen Schlüsse zu. Aufgrund der Unmöglichkeit, im Rahmen der Ökobilanz genaue Aussagen zu den Ergebnissen zu treffen, muss auch die Empfehlung relativiert werden.

Die Empfehlung für die reine Variantenuntersuchung wäre, die AIS-Schaltanlage der GIS-Schaltanlage vorzuziehen, sofern die Ergebnisse unter Berücksichtigung einer SF₆-Verlustrate von 0,3 % berechnet werden. Gemäss Erfahrungswerten von Swissgrid beträgt die tatsächliche Verlustrate des SF₆-Gases im Betrieb rund 0,1 %. Bei einer Verlustrate von 0,1 % für SF₆-Gase, wie von Swissgrid angegeben, ist der Einsatz einer GIS-Schaltanlage anstelle einer AIS-Schaltanlage sowohl für bestehende als auch für in Planung befindliche Unterwerke zu empfehlen. Die GIS-Schaltanlage weist mit einer Verlustrate von 0,1 % für SF₆-Gase im Vergleich zur AIS-Schaltanlage eine geringere Umweltauswirkung auf. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft Anlagenkomponenten mit alternativen Medien wie beispielsweise «3M Novec 4710» oder «CleanAir» in Unterwerken auf Höchstspannungsebene zum Einsatz kommen werden. In diesem Fall wäre die GIS-Schaltanlage unabhängig der Verlustrate gegenüber der AIS-Schaltanlage im Vorteil.

Die Reduktion der Umweltauswirkungen des Energieverbrauchs kann mittels eines Strommix mit einem möglichst hohen Anteil an erneuerbaren Energien erzielt werden. Die Implementierung dieser Massnahme führt zu einer effektiven Reduktion der Umweltauswirkungen bei der AIS- sowie bei der GIS-Schaltanlage. Die Implementierung dieser Massnahme ist auch bei bereits bestehenden Unterwerken möglich.

Die Bereitstellung der Materialien ist mit signifikanten Umweltauswirkungen verbunden. Um diesen Umstand zu kompensieren, können generelle Massnahmen ergriffen werden. Eine Massnahme wäre der Einsatz von rezyklierten Materialien. Die Wahl zertifizierter Materiallieferanten erlaubt schliesslich die Überwachung der Wertschöpfungskette sowie deren ökologische bzw. nachhaltige Gestaltung. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Beschaffungswege möglichst kurz sind. Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Hinblick auf die Umweltfreundlichkeit der Materialien ist deren Langlebigkeit. Es wird empfohlen, darauf zu achten, dass die Materialien eine hohe Qualität aufweisen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer zu gewährleisten. Es ist zudem von grosser Bedeutung, auf die Austauschbarkeit von Anlagenteilen und Komponenten zu achten, beispielsweise durch einen modularen Aufbau. Dies gewährleistet ebenfalls eine hohe Lebensdauer der Gesamtanlage.

Die Effektivität der Beeinflussung der Nachhaltigkeit eines Bauprojekts ist in einer früheren Planungsphase am grössten. Daher ist es unerlässlich, bereits in der Phase der Vorplanung die Wahl der Materialien und Anlagenkomponenten zu berücksichtigen. In Konsequenz lassen sich drei Massnahmen ableiten, die eine effiziente und umweltfreundliche Gestaltung der Unterwerke ermöglichen:

1. Der Einsatz alternativer Medien zu SF₆-Gas,
2. die Wahl eines Strommix aus erneuerbaren Energien sowie
3. der Einsatz rezyklierter Baumaterialien

stellen Massnahmen dar, die eine effiziente und umweltfreundliche Gestaltung der Unterwerke ermöglichen.

Um ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte in Einklang zu bringen, ist es zweckmässig, für bereits in der Planungsphase beabsichtigte Netzerweiterungen einen Massnahmenplan zu erstellen und die Ökoeffizienz der Massnahmen mittels einer Ökoeffizienzanalyse zu beurteilen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass nicht nur die Umweltauswirkungen der geplanten Massnahmen berücksichtigt werden, sondern auch die ökonomischen Gesichtspunkte stets im Auge behalten werden.

Inhalt

Glossar	9
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Digitaler Anhang	11
1 Einleitung	12
1.1 Ausgangslage und Problemanalyse.....	12
1.2 Aufbau des Berichts	13
2 Ziel und Untersuchungsrahmen	14
2.1 Ziel.....	14
2.1.1 Vorgehensweise	14
2.2 Methodik.....	15
2.3 Datenerhebungskonzept und Fragebogen.....	16
2.4 Beschreibung des Untersuchungsgegenstands	17
2.4.1 Einführung.....	17
2.4.2 AIS-Schaltanlagen.....	18
2.4.3 GIS-Schaltanlagen	19
2.5 Untersuchungsbereich	20
2.5.1 Wirkungsabschätzungsmethoden.....	20
2.5.2 Zeitlicher Geltungsbereich	21
2.5.3 Geographischer Geltungsbereich	22
2.5.4 Systemumfang und Gliederung.....	22
2.6 Funktionelle Einheit	24
2.7 Variantenstudium.....	24
2.8 Sensitivitätsanalyse	25
2.8.1 Parameter 1 – Isoliergas.....	25
2.8.2 Parameter 2 – Strommix	26
2.8.3 Parameter 3 – Lebensdauer Anlagenkomponenten	28
2.8.4 Parameter 4 – Verlustrate SF ₆ -Gas	29
2.9 Datengrundlage.....	29
2.9.1 Baumaterialien und Baukomponenten.....	30
2.9.2 Betriebsmittel	31

2.9.3	Baumaschinen.....	31
2.9.4	Transporte	31
2.9.5	Elektrische Energie.....	32
2.9.6	Verluste SF ₆ -Gas	32
2.9.7	Technische Infrastruktur	32
2.9.8	Abfälle und Abwässer	33
2.9.9	Landnutzung.....	33
2.9.10	Nicht berücksichtigte Aspekte	33
2.10	Datenqualität	34
3	Sachbilanz	35
4	Wirkungsabschätzung.....	36
4.1	Ergebnisse des Variantenstudiums	36
4.1.1	Wirkungsabschätzung nach Lebenszyklusphasen	36
4.1.2	Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transporte und Baumaschinen	39
4.1.3	Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen	43
4.2	Sensitivitätsanalyse	46
4.2.1	Parameter 1 – Isoliergas.....	46
4.2.2	Parameter 2 – Strommix	49
4.2.3	Parameter 3 – Lebensdauer Anlagenkomponenten	51
4.2.4	Parameter 4 – Verlustrate SF ₆ -Gas	53
5	Auswertung.....	55
5.1	Variantenstudium.....	55
5.2	Sensitivitätsanalyse	56
6	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	58
7	Empfehlung.....	61
	Literaturverzeichnis	64

Glossar

AIS-Schaltanlagen	Luftisolierte Schaltanlagen, bestehend aus der Anlage und dem Gebäude
CO ₂ -eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente («equivalents»)
FU	Funktionelle Einheit der Ökobilanz, engl. «functional unit»
Gasisolierte Schaltanlage	Gasisolierte Schaltanlage, bestehend aus der Anlage
GIS-Schaltanlagen	Gasisolierte Schaltanlagen, bestehend aus der Anlage und dem Gebäude
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
UBP	Umweltbelastungspunkt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Unterwerke	4
Abbildung 2: Rahmen einer Ökobilanz ISO 14'040 [1]	16
Abbildung 3: AIS-Schaltanlage (Luftisolierte Schaltanlage) Laufenburg (Foto von Swissgrid).	18
Abbildung 4: GIS-Schaltanlage (Gasisolierte Schaltanlage) Laufenburg (Foto von Swissgrid).	19
Abbildung 5: Lebensdauer der Anlagekomponenten einer AIS-Schaltanlage, Betrachtungszeitraum 80 Jahre	21
Abbildung 6: Lebensdauer der Anlagekomponenten einer GIS-Schaltanlage, Betrachtungszeitraum 80 Jahre	22
Abbildung 7: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [3].	23
Abbildung 8: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld	37
Abbildung 9: Gesamte Treibhausgasemissionen der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld.....	38
Abbildung 10: Gesamter kumulierter Energieaufwand erneuerbar der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld	38
Abbildung 11: Gesamter kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld	39
Abbildung 12: Gesamte Umweltbelastungspunkte pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung	41
Abbildung 13: Gesamte Treibhausgasemissionen pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung	41
Abbildung 14: Gesamter kumulierter Energieaufwand erneuerbar pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung	42
Abbildung 15: Gesamter kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung	42
Abbildung 16: Ressourcen und Emissionen der Unterwerke, Umweltbelastungspunkte.....	45
Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 1 - Isoliergas, Methode der ökologischen Knappheit	48
Abbildung 18: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 2 -Strommix, Methode der ökologischen Knappheit	50
Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 3 – Lebensdauer der Anlagenkomponenten, Methode der ökologischen Knappheit	52
Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 4 - Verlustrate SF ₆ -Gas, Methode der ökologischen Knappheit	54
Abbildung 21: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Unterwerke nach Lebenszyklusphasen....	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wesentliche Parameter des Variantenstudiums	24
Tabelle 2:	Umweltkennwerte der Emission der Isoliergase, Sensitivitätsanalyse Parameter 1 – Isoliergas	25
Tabelle 3:	Umweltkennwerte der Strommixe, Sensitivitätsanalyse Parameter 2 - Strommix ..	26
Tabelle 4:	Zusammensetzung der Stromerzeuger des Schweizer Verbraucherstrommix	27
Tabelle 5:	Zusammensetzung der Stromerzeuger des erneuerbaren Schweizer Strommix	28
Tabelle 6:	Zusammensetzung der Stromerzeuger des nicht erneuerbaren Schweizer Strommix	28
Tabelle 7:	Verlustmenge SF ₆ -Gas pro Verlustrate, Sensitivitätsanalyse Parameter 4 – Verlustrate	29
Tabelle 8:	Relevante Baukomponenten einer AIS-Schaltanlage und einer GIS-Schaltanlage für eine 5-Feld-Schaltanlage	30
Tabelle 9:	Transportdistanzen der Baumaterialien und Baukomponenten vom Hersteller bis zur Baustelle	31
Tabelle 10:	Transportdistanzen der Baumaterialien und Baukomponenten von der Baustelle bis zur Verwertungsstätte	31
Tabelle 11:	Flächennutzungskonzept einer AIS-Schaltanlage mit 5 Feldern	33
Tabelle 12:	Flächennutzungskonzept einer GIS-Schaltanlage mit 5 Feldern	33
Tabelle 13:	Allgemeingültige Parameter	35
Tabelle 14:	Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, Methode der ökologischen Knappheit	40
Tabelle 15:	Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, Treibhausgasemissionen	40
Tabelle 16:	Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, erneuerbarer kumulierter Energieaufwand	40
Tabelle 17:	Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, nicht erneuerbarer kumulierter Energieaufwand	40
Tabelle 18:	Umweltkennwerte für die Herstellung relevanter Anlagenkomponenten	44

Digitaler Anhang

- 2024_07_31_Ökobilanzmodell_Swissgrid_Unterwerke.xlsx
- 2024_07_31_Sachbilanz_Swissgrid_Unterwerke.pdf
- Alle Datenblätter zu den Anlagenkomponenten

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemanalyse

Die Nachhaltigkeit spielt in öffentlich-rechtlichen Ausschreibungen eine zunehmend wichtigere Rolle. Die nationale Netzgesellschaft Swissgrid sieht sich als öffentlich-rechtliche Bauherrin in einer Vorreiterrolle im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit. Deswegen hat Swissgrid in der jüngeren Vergangenheit eine umfassende Ökobilanz zu den Übertragungstechnologien elektrischer Energie im Hochspannungsbereich mittels Freileitungen oder Erdverkabelung erstellen lassen.

Neben den Erkenntnissen der Ökobilanz der Übertragungstechnologien elektrischer Energie im Hochspannungsbereich kam seitens Swissgrid das Bedürfnis auf auch eine Ökobilanz für Unterwerke zu erstellen. Unterwerke beinhalten Schaltanlagen und sind Knotenpunkte zwischen den Leitungen, sie trennen und verbinden in den Netzleitstellen Leitungen durch Schalthandlungen und lenken damit Energieflüsse.

Swissgrid erstellt zwei Bauausführungen von Unterwerken: 1. «AIS – air insulated switchgear = Luft-isolierte Schaltanlage» und 2. «GIS – gas insulated switchgear = Gasisolierte Schaltanlage». Bei der AIS-Schaltanlage handelt es sich um eine Freiluftschaltanlage, bei der die Luft als Isolationsmedium dient. Alle Komponenten der AIS-Schaltanlagen stehen im Freien. Bei der GIS-Schaltanlage handelt es sich um eine gasisolierte Schaltanlage, welche in einer Halle steht. Als Isolationsmedium wird SF₆-Gas verwendet.

Beide Schaltanlagen weisen die gleiche Funktion und Leistung auf, unterscheiden sich jedoch im Anlagenaufbau und im Energieverbrauch während der Nutzung der Schaltanlagen. Die GIS-Schaltanlage hat deutlich weniger Flächenbedarf und einen tieferen Energieverbrauch als eine AIS-Schaltanlage. Dafür wird bei den GIS-Schaltanlagen deutlich mehr SF₆-Gas mit einem hohen Treibhauspotenzial als Isolationsgas verwendet.

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 Datenerhebungskonzepts und Fragebogens (Kapitel 2.3), 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), der Datengrundlage (Kapitel 2.9) sowie der Datenqualität (Kapitel 2.10). In der Folge erläutert der Bericht die Sachbilanz (Kapitel 3). Aufgrund des Datenumfangs der Sachbilanz sind die Annahmen und Daten zu den Berechnungen im digitalen Anhang «Sachbilanz» einzusehen. Nach der Sachbilanz erläutert der Bericht die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Kapitel 4). Dabei visualisiert und diskutiert er die Resultate für die einzelnen Unterwerke. Die Auswertung (Kapitel 5) gibt Aufschluss über die wichtigsten Erkenntnisse aus der Wirkungsabschätzung. Die Diskussion und Schlussfolgerung (Kapitel 6) diskutiert die wichtigsten Erkenntnisse aus der Ökobilanz und fasst diese zusammen. Der Bericht schliesst mit einer Empfehlung ab (Kapitel 7).

2 Ziel und Untersuchungsrahmen

2.1 Ziel

Die Zielsetzung der Ökobilanz besteht in der Erstellung einer Produktökobilanz für eine typische von Swissgrid betriebene AIS- und GIS-Schaltanlage. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung eines fiktiven Modells für beide Unterwerke vorgesehen, welches den durchschnittlichen Schweizer Fall bestmöglich abbildet. Die Modelle sollen zudem für zukünftige Projekte verwendbar sein.

Die Ökobilanz zielt darauf ab, die Umweltauswirkungen beider Unterwerke zu quantifizieren. Diese Ergebnisse dienen Swissgrid als Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Umsetzung einer der beiden Unterwerke aus umwelttechnischer Sicht.

Die Ökobilanz beinhaltet die ökologischen Gesichtspunkte. Nebst den ökologischen sind ebenfalls technische, rechtliche und ökonomische Gesichtspunkte in die Wahl einer geeigneten Schaltanlage miteinzubeziehen. Die Ökobilanz soll weitestgehend mit den internationalen Normen ISO 14'040 [1, S. 14040] und 14'044 [2, S. 14044] konform sein. Die Methodik, die Erarbeitung sowie die Ergebnisse der Ökobilanz sind im vorliegenden technischen Bericht festgehalten.

Das zukünftige Ziel von Swissgrid besteht in der Substitution des SF₆-Gases in den gasisolierten Schaltanlagen durch alternative Isolationsmedien. Derartige Alternativen sind gegenwärtig in Entwicklung und werden für die Netzebene 1 (220 kV, 380 kV) in den kommenden Jahren verfügbar sein. In Abhängigkeit des Einflusses des SF₆-Gases ist die Berücksichtigung einer Variante mit einem weiteren Isoliermedium in der Ökobilanz vorgesehen.

2.1.1 Vorgehensweise

1. Die Ökobilanz ist weitestgehend gemäss der ISO 14'040 [1, S. 140440] und 14'044 [2, S. 14044] erstellt worden.
2. In der Ökobilanz werden die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung betrachtet und gemäss der EN 15643-5 [3] gegliedert.
3. Die Sachbilanz wird anhand der drei im Baubereich üblichen Wirkungsabschätzungen ausgewertet:
 - ➔ Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100 a)
 - ➔ Kumulierter Energieaufwand (Cumulative Energy Demand, Version 1.09), getrennt in 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 14'040:2006 [1] bzw. ISO 14'044:2006 [2] und nach den spezifischen methodischen Anforderungen v6.0 gemäss KBOB (Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren) erarbeitet [4]. 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 funktionellen Einheit.

ii. Sachbilanz

Die Emissionen und der Ressourcenverbrauch bzw. die Ressourceninanspruchnahme werden im zweiten Schritt für sämtliche Prozesse der zu untersuchten Unterwerke 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 der Standardanalysen 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. Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung beschreibt im dritten Schritt, wie stark die unterschiedlichen Unterwerke 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 Wirkungsabschätzung der untersuchten Unterwerke 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 2 fasst die vier Schritte der Ökobilanzierung gemäss ISO 14'040:2006 [1], [2] nochmals zusammen.

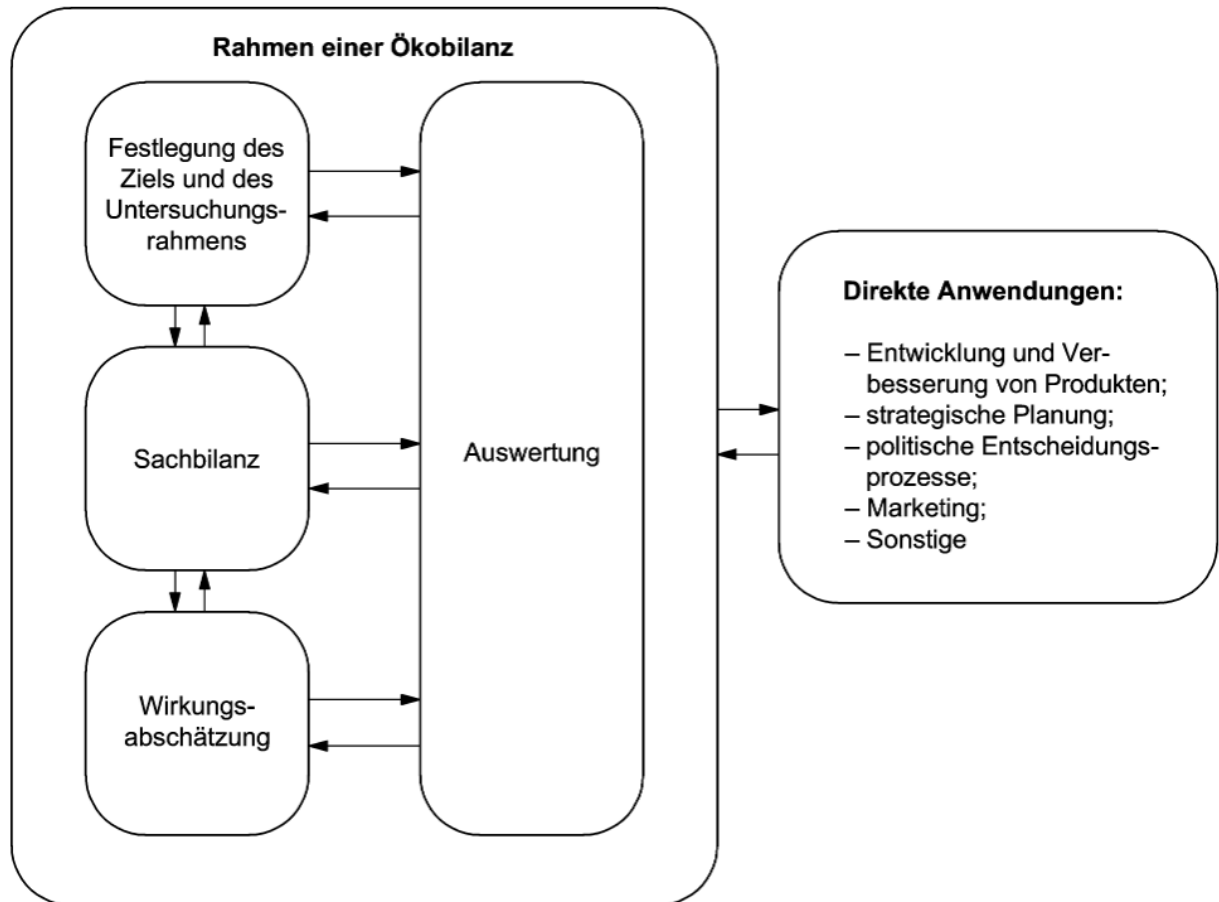


Abbildung 2: Rahmen einer Ökobilanz ISO 14'040 [1]

2.3 Datenerhebungskonzept und Fragebogen

Die Erstellung einer Ökobilanz ist mit einem signifikanten Zeitaufwand verbunden. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld eine Vorgehensweise für die Datenerhebung definiert. Der Datenerhebungsprozess erfolgt somit effizienter und zielgerichteter. Die Vorgehensweise der Datenerhebung umfasst drei Schritte:

1. Erstellung eines Modells für eine typische AIS-Schaltanlage und GIS-Schaltanlage,
2. Datenabgleich des Modells mit den bereits vorliegenden Daten von Swissgrid,
3. Erfassung der Datenlücken, die durch den Datenabgleich identifiziert wurden.

Die drei Schritte des Datenerhebungskonzepts sind iterativ und können zeitgleich stattfinden. Die Modellannahmen für eine typische Schaltanlage sind im Bericht dokumentiert. Für die Erhebung von Daten seitens Swissgrid wurde ein Fragebogen erstellt. Im Rahmen der Fragebogenuntersuchung werden die wesentlichen Material- und Energieaufwände innerhalb der einzelnen Lebenszyklusphasen analysiert. Die zugrundeliegenden Daten wurden von Swissgrid erhoben. Die Fragebögen sind im digitalen Anhang im Ordner «Fragebogen» dokumentiert.

Des Weiteren werden geeignete Datenblätter verwendet, um etwaige Datenlücken bezüglich der Materialisierung zu schliessen. Die entsprechenden Daten wurden von Swissgrid erhoben. Die

Datenblätter sind im digitalen Anhang im Ordner «Hintergrunddaten» zu den jeweiligen Unterwerken zu finden.

2.4 Beschreibung des Untersuchungsgegenstands

2.4.1 Einführung

Im Rahmen der Ökobilanz erfolgt eine Untersuchung einer typischen von Swissgrid betriebenen AIS- und GIS-Schaltanlage auf dem Höchstspannungsniveau 380 kV bzw. 220 kV. Die Unterwerke repräsentieren den Schweizer Durchschnitt und werden für die funktionelle Einheit «ein Feld mit drei Phasen» ausgewertet. Um ein Feld mit drei Phasen auszuwerten, wird ein Modell für ein typisches von Swissgrid betriebenes Unterwerk entwickelt, welches eine Schaltanlage mit fünf Feldern zu je drei Phasen umfasst. Der Schweizer Durchschnitt wird anhand von Bauausführungsangeboten von Neubauten oder Umbauten der letzten fünf Jahre bestimmt.

Der Aufbau einer Schaltanlage auf dem Spannungsniveau 380 kV und 220 kV ist identisch. Aus diesem Grund wird jeweils ein Mittelwert pro Unterwerk bestimmt, welcher für beide Spannungsniveaus Gültigkeit besitzt.

Im Rahmen der Ökobilanz erfolgt eine Sensitivitätsanalyse, welche kritische Parameter der Ökobilanz variiert, die nach einer initialen Auswertung der Ergebnisse bestimmt werden. Die Sensitivitätsanalyse umfasst alternative Isoliermedien in Bezug auf SF₆-Gas, alternative Strommische in Bezug auf den Schweizer Verbraucherstrommix, alternative Lebensdauern von Anlagenkomponenten sowie alternative Verlustraten von SF₆-Gas.

Diese Studie präsentiert die Ökobilanz der nachfolgend aufgeführten Bauausführungen der Schaltanlagen im Kontext der Unterwerke.

2.4.2 AIS-Schaltanlagen



Abbildung 3: AIS-Schaltanlage (Luftisolierte Schaltanlage) Laufenburg (Foto von Swissgrid).

Freiluftschaltanlagen (AIS, Air Insulated Switchgear) sind aus Primärkomponenten aufgebaut, die als massgebliches Isoliermedium die natürliche Umgebungsluft verwenden und im Aussenbereich aufgestellt werden. Des Weiteren sind Systeme (Erdungsanlage, SAS («Substation Automation Systems») und Nebenanlagen) sowie Infrastrukturbauten für Instandhaltung, Betrieb, Anlagen- und Personensicherheit erforderlich. Die Primärtechnik umfasst alle anlagenspezifischen Komponenten, darunter Transformatoren, Kombiwandler, Leistungs- und Trennschalter, Isolatoren, Generatoren, Abgangstrenner und -erder, Sammelschienen und Leiterseile. Ein kleines Betriebsgebäude beinhaltet die Nebenanlage und die Sekundärtechnik und dient als Steuerungs- und Schutzzentrale, als Werkstatt sowie als Aufenthaltsraum für das Personal.

2.4.3 GIS-Schaltanlagen



Abbildung 4: GIS-Schaltanlage (Gasisolierte Schaltanlage) Laufenburg (Foto von Swissgrid).

Die GIS-Schaltanlage (GIS, Gas Insulated Switchgear) ist in einer Halle untergebracht, die an ein Betriebsgebäude angeschlossen ist. Das Betriebsgebäude ist darüber hinaus mit einer Anlage zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HLK) ausgestattet, um die Halle mit der gasisolierten Schaltanlage entsprechend den Jahreszeiten zu temperieren. Im Betriebsgebäude sind die Steuerungs- und Kommunikationstechnik sowie die Personalaufenthaltsräume untergebracht. Des Weiteren wurde ein Keller unter der Halle mit der gasisolierten Schaltanlage errichtet. Im Untergeschoss sind die Hochspannungskabel sowie die Steuerung- und Messtechnik untergebracht.

2.5 Untersuchungsbereich

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. Sachstandsberichts 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 Ökobilanz gibt Aufschluss über die aktuelle Situation der umgesetzten Unterwerke der vergangenen fünf Jahre. Die Aktualität der Daten ist somit gewährleistet und kann für Einschätzungen zukünftiger Projekte herangezogen werden. Bei der Erstellung der Ökobilanz wurde der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt, insbesondere hinsichtlich der Herstellung, Materialbereitstellung, Transporte, Baumaschineneinsätze sowie Entsorgungsprozesse.

Der Betrachtungszeitraum der Ökobilanz erstreckt sich über einen Zeitraum von 80 Jahren. Gemäss Swissgrid ist der Ersatz einiger Anlagenkomponenten der AIS-Schaltanlage nach 40 Jahren fällig, wohingegen die gasisolierte Schaltanlage der GIS-Schaltanlage 50 Jahre ohne Ersatz von Anlagenkomponenten im Betrieb ist.

Die Lebensdauern der weiteren Anlagen- und Baukomponenten der Unterwerke sind in den Abbildung 5 und Abbildung 6 abgebildet.

AIS-Schaltanlage		Betrachtungszeitraum									
Anlagen- und Baukomponenten		10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Schaltanlage	Abspannportal (80 Jahre)										
	Drehtrenner mit Erder (Abgangstrenner) (40 Jahre)										
	Fundament Abspannportal (80 Jahre)										
	Fundament Primärkomponenten (80 Jahre)										
	Gerätgerüst (80 Jahre)										
	Isolatorenkette (60 Jahre)										
	Kabel (40 Jahre)										
	Kabelendverschluss (40 Jahre)										
	Klemmen (80 Jahre)										
	Leistungsschalter (40 Jahre)										
	Leiterseile 220 kV (80 Jahre)										
	SF ₆ -Kombiwandler (40 Jahre)										
	Silicon-Stützisolatoren (40 Jahre)										
	Trennschalter-Erdschalter (40 Jahre)										
	Überspannungsableiter (40 Jahre)										
Gebäude	Rohbau (80 Jahre)										
	Fassade (80 Jahre)										
	Fenster (80 Jahre)										
	HLK (25 Jahre)										
Gebäudeumgebung	Kabelrohrblock (80 Jahre)										
	Tor (80 Jahre)										
	Zaun (80 Jahre)										
	Zufahrtswege (80 Jahre)										
Erdseil	Erdseil mit LWL (25 Jahre)										

Abbildung 5: Lebensdauer der Anlagekomponenten einer AIS-Schaltanlage, Betrachtungszeitraum 80 Jahre



Abbildung 6: Lebensdauer der Anlagekomponenten einer GIS-Schaltanlage, Betrachtungszeitraum 80 Jahre

2.5.3 Geographischer Geltungsbereich

Die Ökobilanz berücksichtigt einzig die von Swissgrid betriebenen Unterwerke in der Schweiz. Die Unterwerke sind über die gesamte Schweiz verteilt. Die Standorte der zu untersuchenden Unterwerken wurden im Verlauf der Studie von Swissgrid bestimmt.

2.5.4 Systemumfang und Gliederung

Gemäss EN 15643-5 [3] (siehe dazu Abbildung 7) 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). Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D aus Abbildung 7) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt, da die Schweizer Bilanzierungsregeln der Ökobilanzplattform KBOB [3] dies nicht zulassen.

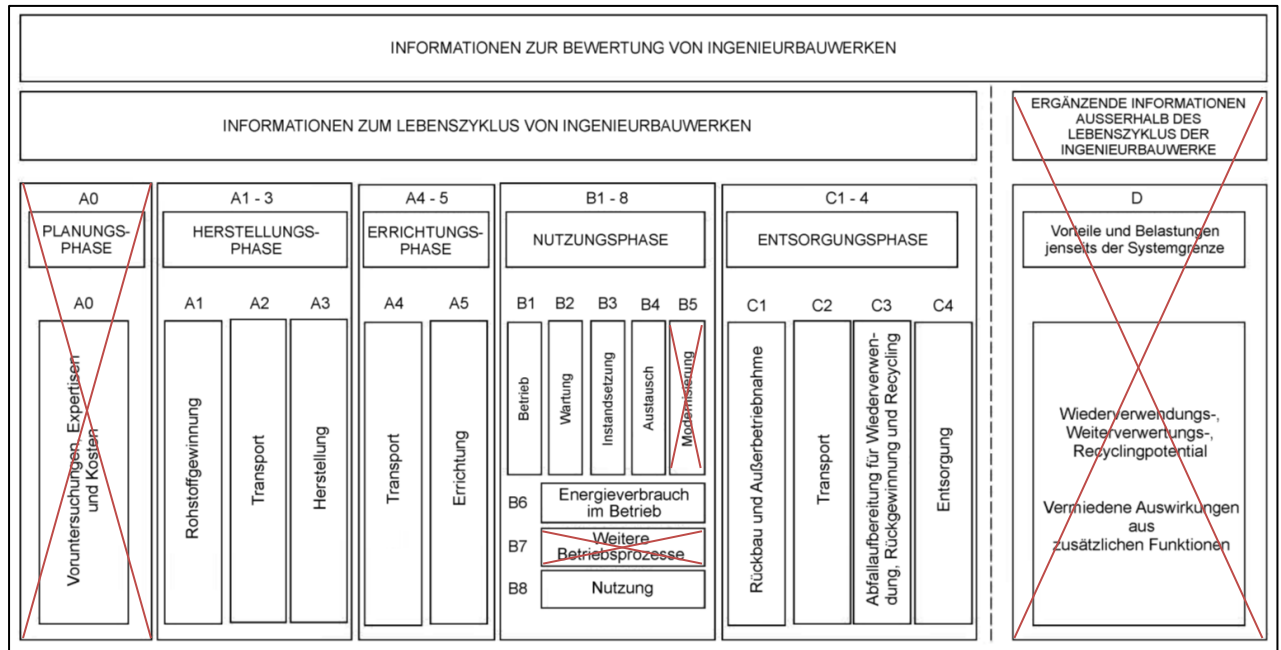


Abbildung 7: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [3].

In Rahmen der **Herstellungsphase** betrachtet die Studie die Rohstoffgewinnung, den Transport und die Herstellung der mengenmässig wichtigsten verwendeten Baumaterialien bzw. Bauelemente. Diese sind in Kapitel 2.5.2 in Abbildung 5 und Abbildung 6 zu entnehmen.

In Rahmen der **Errichtungsphase** betrachtet die Studie den Transport der Baumaterialien vom Hersteller bis zur Baustelle und die einzelnen Bauprozesse. Der Schwerpunkt der Analyse liegt bei den Schaltanlagen in der Installierung der Anlagekomponenten und im Gebäudebau. Ebenfalls berücksichtigt die Studie die Maschinenstunden allfälliger Baustellen-internen Transporte (Radlader, Dumper).

In Rahmen der **Nutzungsphase** betrachtet die Studie diejenigen Auswirkungen, die sich aus dem Betrieb (Modul B1), der Wartung (Modul B2), der Instandsetzung (Modul B3), dem Austausch (Modul B4), des Energieverbrauchs im Betrieb (Modul B6) und der Nutzung (Modul B8) der Unterwerke ergeben. Der Begriff Betrieb meint somit alle Material- und Energieaufwände, die erforderlich sind, um die Schaltanlagen zu betreiben. Die Wartung umfasst die Wartungsarbeiten und Reparaturen (z.B. die Sichtkontrolle der Kontaktsysteme usw.). Die Instandsetzung beinhaltet alle wesentlichen Bauvorhaben während der Nutzung, die einen Eingriff verursachen (z.B. Reparaturarbeiten an der gasisolierten Schaltanlage, Instandsetzungsarbeiten am Betriebsgebäude usw.). Im Rahmen des Austausches werden ganze Anlagenteile ersetzt (z.B. Ersatz einer Anlagenkomponente nach Ende der Lebensdauer, Austausch von Isolatoren usw.). Der Eigenverbrauch der Unterwerke fällt unter das Modul Energieverbrauch im Betrieb. Unter die Nutzung fallen die Verluste des SF₆-Gases als Isolationsmedium. Hingegen vernachlässigt der Bericht die Modernisierung sowie die weiteren Betriebsprozesse der Unterwerke.

Im Rahmen der **Entsorgungsphase** werden die Unterwerke vollständig rückgebaut und die dabei anfallenden Abfälle entsorgt (Deponie Typ A oder B, je nach Belastungssituation, sowie abfallfraktionsgetrenntes Recycling oder thermische Verwertung). Es werden alle damit verbundenen Prozesse (inkl. Transporte) unter Annahme des aktuellen Stands der Technik betrachtet. Gemäss EN 15643-5 [3] werden die Prozessketten der Entsorgungsphase soweit betrachtet bis das

rückgebaute Material den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht. Die vorliegende Studie verwendet den Ökobilanzdatenbestand UVEK 2022 [5] mit den entsprechenden methodischen Setzungen, wobei der Lebenszyklus dann endet, wenn ein Produkt den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht hat. Diese methodische Vorgabe wird als «Recycled Content»-Modell bezeichnet [14] [15]. 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: Bau, Betrieb und Rückbau eines Feldes einer Schaltanlage mit drei Phasen über den Betrachtungszeitraum von 80 Jahren.

2.7 Variantenstudium

Der Bericht untersucht jeweils zwei Varianten: eine Variante 1 für eine AIS-Schaltanlage (auf der Höchstspannungsebene 380 kV bzw. 220 kV) sowie eine Variante 2 (für eine GIS-Schaltanlage (auf der Höchstspannungsebene 380 kV bzw. 220 kV)). Dabei vergleicht er den Einfluss der unterschiedlichen Anlagenaufbauten und prüft die Korrektheit der Ergebnisse.

Bei der AIS-Schaltanlage sind alle Anlagenkomponenten einzeln im Freien aufgestellt, während bei der GIS-Schaltanlage die Anlagenkomponenten zu einer Schaltanlage im Innenbereich verbaut sind. Die Isolation der Anlagenkomponenten der AIS-Schaltanlage erfolgt mittels Umgebungsluft, mit Ausnahme der Leistungsschalter und der SF₆-Kombiwandler. Deren Isolationsmedium ist SF₆-Gas. Die gesamte gasisolierte Schaltanlage der GIS-Schaltanlage wird mit dem Isoliermedium SF₆-Gas betrieben. Die SF₆-Verluste sind wegen grösseren verbauten Mengen bei der GIS-Schaltanlage höher als bei der AIS-Schaltanlage.

Aufgrund der Unterbringung der gasisolierten Schaltanlage der GIS-Schaltanlage in einer Halle ist das Betriebsgebäude grösser dimensioniert als das der AIS-Schaltanlage. Des Weiteren ist die Aussenfläche der AIS-Schaltanlage grösser als die der GIS-Schaltanlage, da die Anlagenkomponenten im Freien aufgestellt sind. Der betriebliche Energieverbrauch der AIS-Schaltanlage ist höher als der betriebliche Energieverbrauch der GIS-Schaltanlage. Die Parameter aus Tabelle 1 sind für eine fünf-Feld-Schaltanlage mit drei Phasen.

Tabelle 1: Wesentliche Parameter des Variantenstudiums

Parameter	AIS-Schaltanlage (Variante 1)	GIS-Schaltanlage (Variante 2)
Anlagenkomponenten	Einzeln im Freien	Schaltanlage in der Halle
Betriebsgebäude [m ³]	1'062.00	7'348.00
Gesamtfläche Schaltanlagen [m ²]	8'448.00	2'625.00

Isolationsmedium SF ₆ -Gas	Leistungsschalter und SF ₆ -Kombiwandler	Gasisolierte Schaltanlage
Jährlicher Stromverbrauch [kWh/a]	90'000.00	75'000.00
SF ₆ -Verluste während 80 Jahren [kg/80 a]	144.00	276.00

2.8 Sensitivitätsanalyse

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

2.8.1 Parameter 1 – Isoliergas

Die Variation des Isoliergases der Schaltanlagen erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird bei der GIS-Schaltanlage das Isoliergas der gasisolierten Schaltanlage variiert, während im zweiten Schritt bei der AIS-Schaltanlage das Isoliergas der Leistungsschalter und der SF₆-Kombiwandler variiert werden. Als Basisszenario wird in beiden Fällen (AIS- und GIS-Schaltanlage) die Verwendung von SF₆-Gas als Isoliergas definiert. Zusätzlich werden jeweils ein Szenario für das Isoliergas «3M Novec 4710» und «CleanAir» berechnet. Die durchgeführte Analyse ermöglicht die Untersuchung der vielversprechenden Alternativmedien hinsichtlich der Wirkung des Isoliergases SF₆.

Die Umweltauswirkungen der Isoliergase werden einzig bei den Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und den «Treibhausgasemissionen» abgebildet, siehe Tabelle 2. Mittels der Methode der kumulierten Energieaufwände ist eine Luftemission nicht abbildbar, weshalb die Werte in der Tabelle 2 Null sind.

Tabelle 2: Umweltkennwerte der Emission der Isoliergase, Sensitivitätsanalyse Parameter 1 – Isoliergas

Isoliergas	Umweltkennwerte			
	[kg CO ₂ – eq/kg]	[UBP/kg]	[kWh oil-eq, nicht erneuerbar/kg]	[kWh oil-eq erneuerbar/kg]
SF ₆ -Gas	25'334.52	24'135'882.00	0.00	0.00
3M Novec 4710	2'100.00	2'100'000.00	0.00	0.00
CleanAir	0.07	131.85	0.00	0.00

Darüber hinaus wird angenommen, dass die Variation des Isoliergases mit einer Vergrösserung der gasisolierten Schaltanlage der GIS-Schaltanlage und des GIS-Gebäudes einhergeht. Bei Einsatz des «3M Novec 4710» als Isoliergas vergrössern sich die gasisolierte Schaltanlage und das GIS-Gebäude um 5 %, während bei Verwendung der «CleanAir» als Isoliergas eine Vergrösserung um 20 % zu beobachten ist. Beide Prozentangaben stammen von Swissgrid. Die Variation des Isoliergases bei den Anlagenkomponenten der AIS-Schaltanlage hat nur einen geringen Einfluss auf deren Grösse.

Die angenommenen Veränderungen der Dimensionierung der GIS-Schaltanlage sowie der zugehörigen Gebäude beim Einsatz alternativer Isoliergase (z. B. +5 % für «3M Novec 4710» bzw. +20 % für «CleanAir») basieren auf dem zum Zeitpunkt der Datenerhebung verfügbaren Kenntnisstand sowie auf projektspezifischen Annahmen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass sich diese Annahmen im Zuge der technologischen Weiterentwicklung sowie aufgrund unterschiedlicher Auslegungsansätze der Hersteller verändern können. Die dargestellten Werte sind daher als indikative Grössen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zu verstehen.

Aufgrund fehlender Datengrundlage wurde der Umweltkennwert für die Treibhausgasemissionen des Isoliergases «3M Novec 4710» der Studie «Alternative Gase» und Gasmischungen, Teil 1» [16] entnommen. Der Umweltkennwert für die Umweltbelastungspunkte wurde über die aktuellen Ökofaktoren 2021, dass 1000 Umweltbelastungspunkte einem Kilogramm CO₂-Äquivalent [10] entsprechen, mit dem entsprechenden Umweltkennwert für die Treibhausgasemissionen für das Isoliergas «3M Novec 4710» in der Studie hochgerechnet. Des Weiteren wurde angenommen, dass die Produktion von «3M Novec 4710» dem Prozess der Herstellung von SF₆-Gas ähnelt. Aus diesem Grund sind die Umweltauswirkungen für die Herstellung der Anlagenkomponenten bei dem Basisszenario sowie bei dem Szenario mit «3M Novec 4710» identisch.

Das Isoliergas «CleanAir» weist bei Austritt in die Atmosphäre keine Umweltauswirkungen auf, da es sich um trockene Luft handelt. Im Bericht wird angenommen, dass die Herstellung von «Clean Air» mit einer Kompression (Drucklufterzeugung) einhergeht.

2.8.2 Parameter 2 – Strommix

Das Basisszenario beruht auf der Annahme, dass der jährliche Energieverbrauch der Unterwerke mit dem Schweizer Verbraucherstrommix modelliert wird. In der Folge werden jeweils ein Szenario mit einem nicht erneuerbaren Schweizer Strommix sowie ein Szenario mit einem Schweizer Mix von Stromprodukten aus erneuerbaren Energien errechnet. Dies gewährleistet, dass die Analyse die ganze Spannweite der Möglichkeiten abbildet: vom erneuerbaren Strommix mit geringen Umweltauswirkungen bis hin zu einem Strommix mit einem hohen Anteil an nicht erneuerbaren Energien.

Tabelle 3: Umweltkennwerte der Strommixe, Sensitivitätsanalyse Parameter 2 - Strommix

Strommix	Umweltkennwerte			
	[kg CO ₂ - eq/kWh]	[UBP/kWh]	[kWh oil-eq, erneuerbar/kWh]	[kWh oil-eq nicht erneuerbar/kWh]
Schweizer Verbraucherstrommix	0.125	513.00	0.56	2.08
Nicht erneuerbarer Schweizer Strommix	0.27	749.41	0.16	3.04
Erneuerbarer Schweizer Strommix	0.002	7.91	0.30	0.01

Die einzelnen Strommixe setzen sich aus folgenden Stromerzeugern zusammen:

Tabelle 4: Zusammensetzung der Stromerzeuger des Schweizer Verbraucherstrommix

Stromerzeuger	Prozentualer Anteil [%]
Braunkohle, DE	2.57
Erdgas, DE	0.76
Erdgas, FR	1.47
Erdgas, IT	0.36
Erdgas, AT	1.35
Industriegas, AT	0.03
Industriegas, DE	0.14
Industriegas, IT	0.29
Kommunalen Müllverbrennungsanlagen, CH	1.29
Kraft-Wärme-Kopplung mit Biogasmotor, CH	0.22
KWK 300kWth, Biomethan, CH	0.51
KWK 300kWth, Diesel, CH	0.02
KWK 300kWth, Erdgas, CH	0.50
KWK 1MWth, Hackschnitzel, CH	1.47
KWK mit Biogasmotor, CH	0.57
Nuklear, CH	19.6
Nuklear, DE	1.47
Nuklear, FR	18.97
Öl, DE	0.05
Öl, FR	0.08
Öl, IT U	5.46E-05
Photovoltaik, AT	0.16
Photovoltaik, CH	1.70
Photovoltaik, DE	0.71
Photovoltaik, FR	0.38
Photovoltaik, IT	0.06
Steinkohle, AT	0.26
Steinkohle, DE	1.60
Steinkohle, FR	0.27
Steinkohle, IT	0.13
Wasserkraft, AT	0.46
Wasserkraft, CH	30.66
Wasserkraft, DE	0.18
Wasserkraft, FR	0.23
Wasserkraft, IT	9.33E-05
Wasserkraft, RER (Europa)	6.64
Windkraft, CH	0.10
Windkraft, RER (Europa)	4.34
Windkraft, OCE (Oceanic)	0.40

Tabelle 5: *Zusammensetzung der Stromerzeuger des erneuerbaren Schweizer Strommix*

Stromerzeuger	Prozentualer Anteil [%]
Kraft-Wärme-Kopplung mit Biogasmotor, CH	0.24
KWK 300kWth, Biomethan, CH	0.37
KWK 1MWth, Hackschnitzel, CH	0.51
Photovoltaik, CH	2.66
Wasserkraft, CH	94.41
Windkraft, CH	0.75
Windkraft, RER (Europa)	1.06

Tabelle 6: *Zusammensetzung der Stromerzeuger des nicht erneuerbaren Schweizer Strommix*

Stromerzeuger	Prozentualer Anteil [%]
Braunkohle, UCTE	6.70
Erdgas, UCTE	17.12
KWK 1MWth, Hackschnitzel, CH	0.11
Nuklear, UCTE	56.69
Öl, UCTE	0.70
Photovoltaik, DE	8.21
Steinkohle, UCTE	4.62
Wasserkraft, RER (Europa)	5.35
Windkraftanlage, RER (Europa)	0.53

Der verwendete Emissionsfaktor für den Schweizer Verbraucherstrommix (125 g CO₂-eq/kWh) basiert auf den zum Zeitpunkt der Datenerhebung verfügbaren Referenzdaten (Datenstand 2018).

Aktuellere Auswertungen weisen je nach Systemgrenze und Bilanzierungsmethodik tiefere Werte aus (z. B. ca. 50 g CO₂-eq/kWh für Scope 2 bzw. ca. 90 g CO₂-eq/kWh für Scope 2 + 3).

Die Wahl des Emissionsfaktors beeinflusst insbesondere die Höhe der Umweltauswirkungen in der Betriebsphase (B6). Die in der vorliegenden Studie verwendeten Werte sind jedoch konsistent mit der zugrunde gelegten Datenbasis und Methodik und erlauben eine transparente und vergleichbare Bewertung der untersuchten Varianten.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich die relative Bedeutung der Betriebsphase bei Verwendung aktuellerer Emissionsfaktoren reduzieren kann.

2.8.3 Parameter 3 – Lebensdauer Anlagenkomponenten

Das Basisszenario beruht auf der aktuellen Lebensdauer der Anlagenkomponenten, siehe Abbildung 5 und Abbildung 6 in Kapitel 2.5.2. Zusätzlich wird ein Szenario mit halber Lebensdauer und ein Szenario mit doppelter Lebensdauer der Anlagenkomponenten berechnet. Die Analyse beschränkt sich auf die Anlagenkomponenten, die im Rahmen des Variantenstudiums ausgetauscht werden müssen. In der Praxis erweist sich die Annahme, dass Komponenten, die eine Lebensdauer von 80 Jahren aufweisen, wie beispielsweise Gebäude, plötzlich eine stark reduzierte oder

verlängerte Lebensdauer aufweisen, als wenig sinnvoll. Daher beschränkt sich die Analyse auf den Einfluss der Umweltwirkung der Anlagenkomponenten.

2.8.4 Parameter 4 – Verlustrate SF₆-Gas

Das Basisszenario basiert auf der jährlichen Verlustrate des SF₆-Gases, welche in den Anlagenherstellerangaben mit 0,3 % angegeben ist. In der Folge wird ein weiteres Szenario mit der jährlichen Verlustrate des SF₆-Gases von 0,1 % gemäss Erfahrungswerten von Swissgrid berechnet. In der Folge dessen reduziert sich die Menge des austretenden SF₆-Gases um zwei Drittel. In Tabelle 7 sind die SF₆-Verluste einer fünf-Feld-Schaltanlage abgebildet.

Tabelle 7: Verlustmenge SF₆-Gas pro Verlustrate, Sensitivitätsanalyse Parameter 4 – Verlustrate

Verlustrate SF ₆ -Gas	Austretende Menge SF ₆ -Gas AIS-Schaltanlage [kg/5-Feld]	Austretende Menge SF ₆ -Gas GIS-Schaltanlage [kg/5-Feld]
Verlustrate von 0,3 % (Herstellerangabe)	144.00	276.00
Verlustrate von 0,1 % (Erfahrungswerte Swissgrid)	48.00	92.00

Die Anlagenkomponenten, die mit dem Isoliergas SF₆ ausgestattet sind, umfassen die Leistungsschalter sowie die SF₆-Kombiwandler bei der AIS-Schaltanlage und die gasisolierte Schaltanlage bei der GIS-Schaltanlage.

2.9 Datengrundlage

Die Datengrundlage der einzelnen Unterwerke ist sehr umfassend, deswegen ist eine Auswahl der Daten erforderlich. In den folgenden Kapiteln sind die bereits vorhandenen technischen Vordergrunddaten aufgelistet. Die Ökobilanz erfasst die folgenden Daten:

1. Baumaterialien und Baukomponenten: Der Bericht umfasst alle relevanten Baumaterialien und Bauelemente der Herstellungs- (A1-3) und Errichtungsphase (A4-5), des Betriebs und der Wartung (B1-2), der Instandsetzung (B3), des Austausches (B4) und des Rückbaus und der Ausserbetriebnahme (C1).
2. Betriebsmittel: Der Bericht umfasst alle relevanten Betriebsmittel der Errichtungs- (A4-5), der Nutzungs- (B1-8) und der Entsorgungsphase (C1-4).
3. Baumaschinen: Der Bericht umfasst alle Baumaschinen, die während der Errichtungs- (A4-5), der Nutzungs- (B1-8) und der Entsorgungs- (B1-8) im Betrieb sind.
4. Transporte: Der Bericht umfasst alle Transporte, welche während der Errichtungs- (A4-5), der Nutzungs- (B1-8) und der Entsorgungsphase (C1-4) anfallen.
5. Elektrische Energie: Der Bericht umfasst die elektrischen Energieverbräuche während der Errichtungs- (A4-5), der Nutzungs- (B1-8) und der Entsorgungsphase (C1-4).

6. SF₆-Gas Verluste: Der Bericht umfasst die Verluste von SF₆-Gas der Anlagenkomponenten während der Nutzungsphase (B1-8).
7. Technische Infrastruktur: Der Bericht umfasst die technische Infrastruktur für den Betrieb der Unterwerke aus der Herstellungs- (A1-3), Errichtungs- (A4-5), Nutzungs- (B1-8) und der Entsorgungsphase (C1-4).
8. Abfälle und Abwässer: Der Bericht umfasst alle relevanten Abfälle und Abwässer aus der Errichtungs- (A4-5), der Nutzungs- (B1-8) und der Entsorgungsphase (C1-4).

Die Daten zu den Baumaterialien, Betriebsmitteln, elektrischer Energie, SF₆-Gas Verlusten, technische Infrastruktur sowie zu den Abfällen und Abwässern werden von Swissgrid bereitgestellt, die Daten zu den Baumaschinen und Transporten von der Umtec Technologie AG (basierend auf den Standardanalysen des TB-Viewers des Schweizerischen Baumeisterverbandes).

2.9.1 Baumaterialien und Baukomponenten

Der Bericht berücksichtigt in erster Linie die Baumaterialien und -komponenten sowie die Anlagenkomponenten mit hohen Mengenanteilen. In Tabelle 8 sind die Anlagenkomponenten und deren Mengen für jeweils eine 5-Feld-Schaltanlage aufgeführt.

Tabelle 8: Relevante Baukomponenten einer AIS-Schaltanlage und einer GIS-Schaltanlage für eine 5-Feld-Schaltanlage

Anlagenkomponenten	AIS-Schaltanlage, Mengen	GIS-Schaltanlage, Mengen
Abspannportal inkl. Fundament	2.00 St	1.00 St
AIS-Gebäude inkl. Fundament	1.00 St	-
Drehtrenner mit Erder (Abgangstrenner)	4.00 St	-
Erdseil mit LWL	120.00 m	60.00 m
Gasisolierte Schaltanlage	-	1.00 St
Gerätegerüste und Fundamente für Primärkomponenten	72.00 St, 72.00 St	24.00 St, 24.00 St
GIS-Gebäude inkl. Fundament	-	1.00 St
Isolatorenketten	36.00 St	6.00 St
Kabel	60.00 m	240.00 m
Kabelendverschlüsse	6.00 St	12.00 St
Kabelrohrblock	150.00 m	200.00 m
Klemmen	180.00 St	6.00 St
Kontaktsystem	5.00 St	5.00 St
Kran	-	1.00 St
Leistungsschalter	15.00 St	-
Leiterseile (220 kV)	1500.00 m	60.00 m
Trennschalter-Erdschalter	10.00 St	-
SF ₆ -Kombiwandler	15.00 St	-
Silicon-Stützisolatoren	10.00 St	6.00 St
Überspannungsableiter	12.00 St	6.00 St

Zäune und Schiebetore	1.00 St, 1.00 St	1.00 St, 1.00 St
-----------------------	------------------	------------------

Als Datenbasis dienen Datenblätter und Mengenangaben aus den Ausführungsprojektofferten von Swissgrid.

2.9.2 Betriebsmittel

Der Bericht umfasst keine Betriebsmittel. Die Unterwerke sind fast wartungsfrei und die Mengen an anfallenden Betriebsmitteln sind vernachlässigbar klein.

2.9.3 Baumaschinen

Der Bericht umfasst alle Baumaschinen und deren Verbrauch für eine 5-Feld-Schaltanlage während der betrachteten Lebenszyklusphasen. Die Baumaschinenstunden sind anhand der Standardanalysen des «Technik & Betriebswirtschafts- Viewer des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV)» (TB-Viewer) geschätzt und zusammen mit den Materialaufwänden der Unterwerke verbucht.

2.9.4 Transporte

Der Bericht umfasst alle für eine 5-Feld-Schaltanlage externen Transportaufwände vom Hersteller bis zur Baustelle und von der Baustelle bis zur Entsorgungsstelle. Ferner umfasst er alle internen Transporte direkt auf der Baustelle.

Als Datenbasis dienen die Transportdistanzen aus der bereits abgeschlossenen Swissgrid Studie «Übertragungstechnologien elektrischer Energie auf der Höchstspannungsebene» (2023). Die Transportdistanzen (Tabelle 9 und Tabelle 10) für die wesentlichen Baumaterialien bzw. Bauelemente sind:

Tabelle 9: Transportdistanzen der Baumaterialien und Baukomponenten vom Hersteller bis zur Baustelle

Baumaterialien und Baukomponenten	Transportdistanz [km]
Beton	20.00
Asphalte, Gesteinskörnungen	30.00
Stahl	150.00
Anlagenkomponenten ab Regionallager	100.00
Betriebsmittel	50.00

Tabelle 10: Transportdistanzen der Baumaterialien und Baukomponenten von der Baustelle bis zur Verwertungsstätte

Baumaterialien und Baukomponenten	Transportdistanz [km]
Deponie	80.00
KVA (Kehrichtverbrennungsanlage)	50.00
Betonrecycling	50.00
Kabel & Elektro(nik)teile - Recycling	100.00

2.9.5 Elektrische Energie

Der Bericht umfasst den gesamten elektrischen Energieverbrauch (Eigenbedarf) während des gesamten Lebenszyklus der Unterwerke. Hierzu gehören der Stromverbrauch der Anlagenkomponenten und Steuerung, der Beleuchtung und der Gebäudeklimatisierung. Der elektrische Energieverbrauch der Unterwerke wird als jährlicher Energieverbrauch angegeben. Die Zuteilung der elektrischen Energie auf verschiedene Verbraucher hat sich als schwierig erwiesen. Als Datenbasis dient eine durchschnittliche Stromrechnung von bereits bestehenden Unterwerken von Swissgrid.

Der jährliche elektrische Energieverbrauch einer AIS-Schaltanlage mit fünf Feldern beträgt 90'000 kWh und einer GIS-Schaltanlage mit fünf Feldern 75'000 kWh. Der elektrische Energieverbrauch (Eigenbedarf) der AIS-Schaltanlage ist rund 20 % höher als der der GIS-Schaltanlage. Dies ist zum einen den längeren Speiseleitungen für Antriebsmotoren, Beleuchtung, etc. geschuldet und andererseits müssen Primärapparate wie Leistungsschalter, Trenner, Verteilschränke im Aussenbereich durch elektrische Widerstandsheizungen vor Feuchtigkeitsschäden geschützt werden. Neben dem Eigenbedarf der AIS-Schaltanlage sind auch die Verluste im Primärsystems höher. Diese lassen sich auf die längeren Wege der stromführenden Teile zurückführen.

2.9.6 Verluste SF₆-Gas

Der Bericht umfasst die SF₆-Verluste der Anlagenkomponenten während des gesamten Lebenszyklus der Unterwerke. Die GIS- und die AIS-Schaltanlage (in kleinen Mengen gegenüber GIS) verwenden SF₆-Gas als Isoliermedium. Es liegen für beide Schaltanlage Messwerte für das SF₆-Gas bei Swissgrid vor.

Die Anlagenkomponenten Leistungsschalter und SF₆-Kombiwandler der AIS-Schaltanlage weisen einen SF₆-Gasverlust von 144 kg über den Betrachtungszeitraum von 80 Jahren auf (für fünf Felder). Die gasisierte Schaltanlage (mit fünf Feldern) der GIS-Schaltanlage zeigt einen SF₆-Gasverlust von 276 kg während des Betrachtungszeitraums von 80 Jahren. Die Berechnungen basieren auf den Herstellerangaben für die Verlustrate von 0,3 %.

2.9.7 Technische Infrastruktur

Der vorliegende Bericht umfasst die technische Infrastruktur der Unterwerke. Die Sekundärtechnik, bestehend aus Steuerungen, Servern und Beleuchtung, ist bei beiden Unterwerken identisch. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Darstellung dieser Komponenten verzichtet. Im Folgenden wird die technische Infrastruktur zur Raumklimatisierung und Wärmebereitstellung der Unterwerksgebäude näher betrachtet.

Beide Betriebsgebäude der Unterwerke sind mit einer Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK) ausgestattet. Die Berechnung der HLK erfolgte für eine 5-Feld-GIS-Schaltanlage und eine 5-Feld-AIS-Schaltanlage, ausgehend vom Unterwerk Fällanden. Für die GIS-Schaltanlage wurde eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 22 kW und einer Kälteleistung von 32 kW berechnet. Das Lüftungssystem ist für den Transport von Wärme bzw. Kälte in die GIS-Halle, in die SAS-Räume («Substation Automation Systems»), in die Batterieräume sowie in die Aufenthaltsräume des GIS-Gebäudes ausgelegt. In diesem Kontext wurde ein Gesamtvolumenstrom von 6'210 m³/h für die Zuluft und die Abluft ermittelt. Das AIS-Gebäude ist mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ausgestattet, welche eine Heizleistung von 12 kW und eine Kälteleistung von 17 kW aufweist. Das Lüftungssystem ist zudem in der Lage, Wärme und Kälte in die SAS-Räume, die Batterieräume sowie

die Aufenthaltsräume zu transportieren. Für das AIS-Gebäude wurde ein Volumenstrom von 3'210 m³/h für die Zuluft und Abluft berechnet.

2.9.8 Abfälle und Abwässer

Der Bericht umfasst alle für eine 5-Feld-Schaltanlage relevanten Abfälle und Abwässer, die während des gesamten Lebenszyklus der Unterwerke anfallen. Im Rahmen der Errichtung, Nutzung sowie des Rückbaus von Bauwerken entstehen Bauabfälle. Im Betrieb fallen keine Abfälle an. Im Rahmen der Errichtung, Nutzung und des Rückbaus fallen keine Abwässer an.

2.9.9 Landnutzung

Der Bericht berechnet für jedes Unterwerk (mit fünf Feldern) die Landnutzung. Dabei erhebt er die Umweltauswirkungen der Landnutzung für die Gesamtfläche der Unterwerke. Ein Teil der Fläche der Unterwerke wird während der Nutzungsphase als Industrieareal genutzt, während die Restfläche in ihrem ursprünglichen Zustand belassen wird. Aus diesem Grund wurde die Restfläche nicht in das Flächennutzungskonzept integriert.

Die Flächennutzungskonzepte für die Unterwerke sind wie folgt in der Tabelle 11 und Tabelle 12 definiert:

Tabelle 11: Flächennutzungskonzept einer AIS-Schaltanlage mit 5 Feldern

Flächennutzungsphasen	Flächennutzungsart	Flächennutzungsjahre [a]
Transformation Errichtung der AIS-Schaltanlage	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Errichtung der AIS-Schaltanlage	Transformation, to industrial area, CH	-
Nutzung der Fläche der AIS-Schaltanlage	Occupation, industrial area, CH	80.00

Tabelle 12: Flächennutzungskonzept einer GIS-Schaltanlage mit 5 Feldern

Flächennutzungsphasen	Flächennutzungsart	Flächennutzungsjahre [a]
Transformation Errichtung der GIS-Schaltanlage	Transformation, from annual crop, CH	-
Transformation Errichtung der GIS-Schaltanlage	Transformation, to industrial area, CH	-
Nutzung der Fläche der GIS-Schaltanlage	Occupation, industrial area, CH	80.00

2.9.10 Nicht berücksichtigte Aspekte

Der Bericht berücksichtigt keine kleinen Aufwände, wie zum Beispiel Papier, Arbeitskleidung, Schreibutensilien, etc., die während des gesamten Lebenszyklus der Unterwerke entstehen. Unterwerke von Mitbewerbern sind ebenfalls aus der Ökobilanz ausgeschlossen. Zudem wird die Begrünung der Anlagenflächen nicht in der Ökobilanz berücksichtigt.

2.10 Datenqualität

Die Datenqualität der Ökobilanz ist als zuverlässig und detailliert zu bezeichnen. Die technischen Vordergrunddaten zu den Unterwerken weisen eine hohe Genauigkeit und Aktualität auf, da sie auf Basis bereits realisierter Bauprojekte erhoben wurden. Somit enthält dieser Bericht alle Aufwände für die Sachbilanz zielgerichtet und mit einer hohen Zuverlässigkeit. Aufwendungen, die das Ergebnis der Ökobilanz nicht beeinflussen, beispielsweise Papier im Betrieb, wurden nicht in die Sachbilanz aufgenommen. Die Datenqualität der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik ist ausreichend, da noch kein Baustandard von Swissgrid existiert.

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 basierend auf den aus dem Fragebogen resultierenden Mengenangaben abgebildet sind. Die generischen Hintergrunddaten stammen aus der Datenbank UVEK LCI Data 2022 [5], die eine zuverlässige Datenquelle darstellt.

Für die Unterwerke existiert noch kein Baustandard, weshalb Swissgrid und UTech einen Standard entwickelt haben. Die Datengrundlage für gewisse Materialisierungen und Energieverbräuche erwies sich als schwieriger zu erheben als angenommen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Heizung, Lüftung und Klimatisierung der Gebäude sowie den Jahresenergieverbrauch der Unterwerke. Nicht immer stand eine geeignete 5-Felder-Anlage zur Verfügung oder die Daten wurden noch nicht erhoben. Dennoch wurde auf möglichst ähnliche Anlagen zurückgegriffen und der Aufwand an das Ökobilanzmodell angepasst. In diesen Fällen ist die Datenbasis für eine erste Aussage ausreichend. Zu einem späteren Zeitpunkt sollte das Grundmodell überarbeitet werden.

3 Sachbilanz

Das Kapitel Sachbilanz erläutert die Berechnungen und deren Annahmen zu Materialien, Transporten, Baumaschinen, technischer Infrastruktur, elektrischer Energie und Abfallaufbereitung sowie Entsorgung der zu untersuchenden Unterwerken und listet die entsprechende Sachbilanz auf. Aufgrund des Datenumfangs der Sachbilanz wurde ein separater Anhang mit allen Berechnungen, Daten sowie Annahmen zur Sachbilanz erstellt. Das Dokument kann im digitalen Anhang «Sachbilanz» eingesehen werden.

Es werden die folgenden Annahmen in Tabelle 13 getroffen, die jeweils für beide Unterwerke gelten:

Tabelle 13: Allgemeingültige Parameter

Parameter	Annahme
Betrachtungszeitraum	80.00 a
Lebensdauer der Unterwerke	80.00 a

Die Betrachtung der Ökobilanz erfolgt über einen Zeitraum von 80 Jahren (Betrachtungszeitraum), welcher der Lebensdauer der Unterwerke entspricht.

4 Wirkungsabschätzung

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung. Es stellt Variante 1 (AIS-Schaltanlage) und Variante 2 (GIS-Schaltanlage) vergleichend gegenüber. Ferner enthält es die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung gemäss den drei Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit», «Treibhausgasemissionen» sowie Methode des «kumulierten Energieaufwands» – und zwar unterteilt in erneuerbar und nicht erneuerbar.

4.1 Ergebnisse des Variantenstudiums

In diesem Kapitel erfolgt eine Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der einzelnen Unterwerke. Zunächst werden die Ergebnisse nach Lebenszyklusphasen präsentiert, anschliessend erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung. Schliesslich erfolgt eine detaillierte Visualisierung der Ergebnisse hinsichtlich Ressourcen und Emissionen.

4.1.1 Wirkungsabschätzung nach Lebenszyklusphasen

In der Abbildung 8, Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Gesamtumweltauswirkungen der beiden Unterwerke ausgewertet. Die Auswertung der Lebenszyklusphasen belegt, dass die AIS-Schaltanlage im Vergleich zur GIS-Schaltanlage eine geringere Umweltauswirkung aufweist. Dies trifft insbesondere auf die Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen» zu. Die Auswertung der Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen» ergibt, dass die resultatbestimmenden Lebenszyklusphasen die Herstellungsphase (A1-3), der Energieverbrauch (B6) sowie die Nutzung (B8) sind. Die Lebenszyklusphase Nutzung (B8) sowie die darin enthaltenen SF₆-Gasverluste stellen insbesondere einen wesentlichen Treiber dar. Die Herstellungsphase (A1-3) sowie der Energieverbrauch (B6) weisen bei der AIS-Schaltanlage eine höhere Umweltauswirkung auf, während die Nutzung (B8) bei der GIS-Schaltanlage eine höhere Umweltauswirkung verursacht.

Die Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4) sowie der Energieverbrauch (B6) sind bei der «Methode der ökologischen Knappheit» höher gewichtet als bei den «Treibhausgasemissionen». Die Herstellungsphase (A1-3) ist für 16–22 % der Gesamtumweltbelastungspunkte verantwortlich. Dabei weist die AIS-Schaltanlage mit 22 % einen höheren Anteil als die GIS-Schaltanlage mit 16 % auf. Die Herstellungsphase (A1-3) ist für 13-19 % der Treibhausgase verantwortlich. Der Austausch (B4) ist gemäss den vorliegenden Erkenntnissen für einen Anteil von 3-7 % der Gesamtumweltauswirkungen beider Wirkungsabschätzungsmethoden verantwortlich. Der Energieverbrauch weist bei der AIS-Schaltanlage mit 32 % einen höheren Anteil an den Gesamtumweltbelastungspunkten auf als bei der GIS-Schaltanlage mit 22 %. während der Energieverbrauch (B6) 8-14 % der gesamten Treibhausgasemissionen umfasst.

Die Nutzung (B8), welche die SF₆-Verluste beinhaltet, stellt die entscheidende Lebenszyklusphase bei der Wirkungsabschätzungsmethode der «Treibhausgasemissionen» dar und wird höher gewichtet als bei der Wirkungsabschätzungsmethode der «Methode der ökologischen Knappheit». Die Wirkungsabschätzungsmethode der «Treibhausgasemissionen» fokussiert sich ausschliesslich auf die Klimawirkung der Treibhausgase. Aufgrund des 22'800-mal höheren Treibhauseffekts des

SF₆-Gases im Vergleich zu CO₂ (Kohlendioxid) stellen die SF₆-Verluste einen entscheidenden Faktor für die Ergebnisse der Treibhausgasemissionen dar. Die Nutzung (B8) ist für 56 % der Treibhausgasemissionen bei der AIS-Schaltanlage und 73 % bei der GIS-Schaltanlage verantwortlich. Hinsichtlich der Umweltbelastungspunkte ist festzustellen, dass die Nutzung (B8) bei der AIS-Schaltanlage für 30 % und bei der GIS-Schaltanlage für 49 % der Gesamtumweltbelastungspunkte verantwortlich ist.

Bei der Wirkungsabschätzungsmethode des «kumulierten Energieaufwandes» zeigt sich, dass die AIS-Schaltanlage höhere Umweltauswirkungen aufweist als die GIS-Schaltanlage. Diese Abweichung ist auf den höheren Energieverbrauch in der Lebenszyklusphase Energieverbrauch (B6) der AIS-Schaltanlage gegenüber der GIS-Schaltanlage zurückzuführen. Die Wirkungsabschätzungsmethode des «kumulierten Energieaufwandes» bewertet den Primärenergieverbrauch als einzigen Umweltindikator, was in der Wirkungsabschätzungsmethode zu einer höheren Gewichtung desselben führt, wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Die Lebenszyklusphase Energieverbrauch (B6) ist resultatbestimmend und ist für 71–86 % der Gesamtumweltauswirkungen beim «kumulierten Energieaufwand» verantwortlich. Des Weiteren sind die Lebenszyklusphasen Herstellungsphase (A1–3) und Austausch (B4) von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis der Ökobilanz.

Die Auswertung der Lebenszyklusphasen zeigt, dass die Lebenszyklusphasen Transport (A4), Errichtung (A5), Betrieb (B1), Wartung und Instandsetzung (B2-3), Rückbau und Ausserbetriebnahme (C1), Transport (C2), Abfallaufbereitung und Entsorgung (C3-4) sowie die Landnutzung mit geringen Gesamtumweltauswirkungen in jeder Wirkungsabschätzungsmethode einhergehen und deswegen eine untergeordnete Rolle in der Ökobilanz einnehmen.

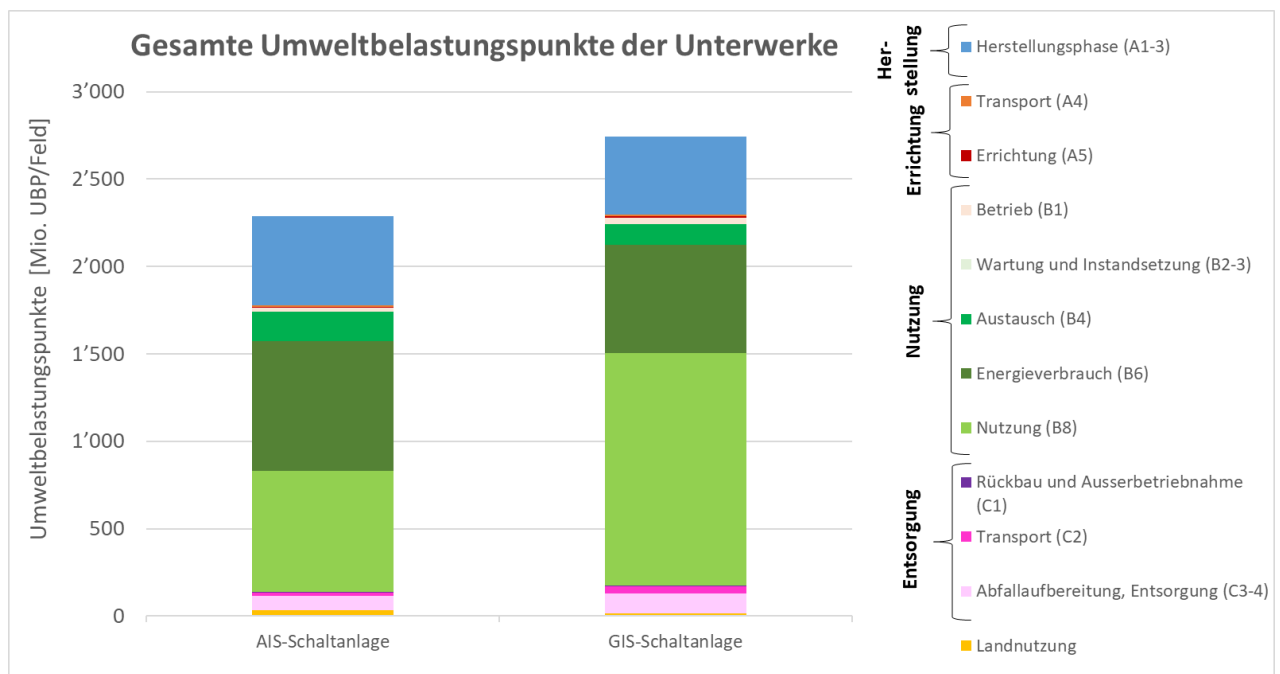


Abbildung 8: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld

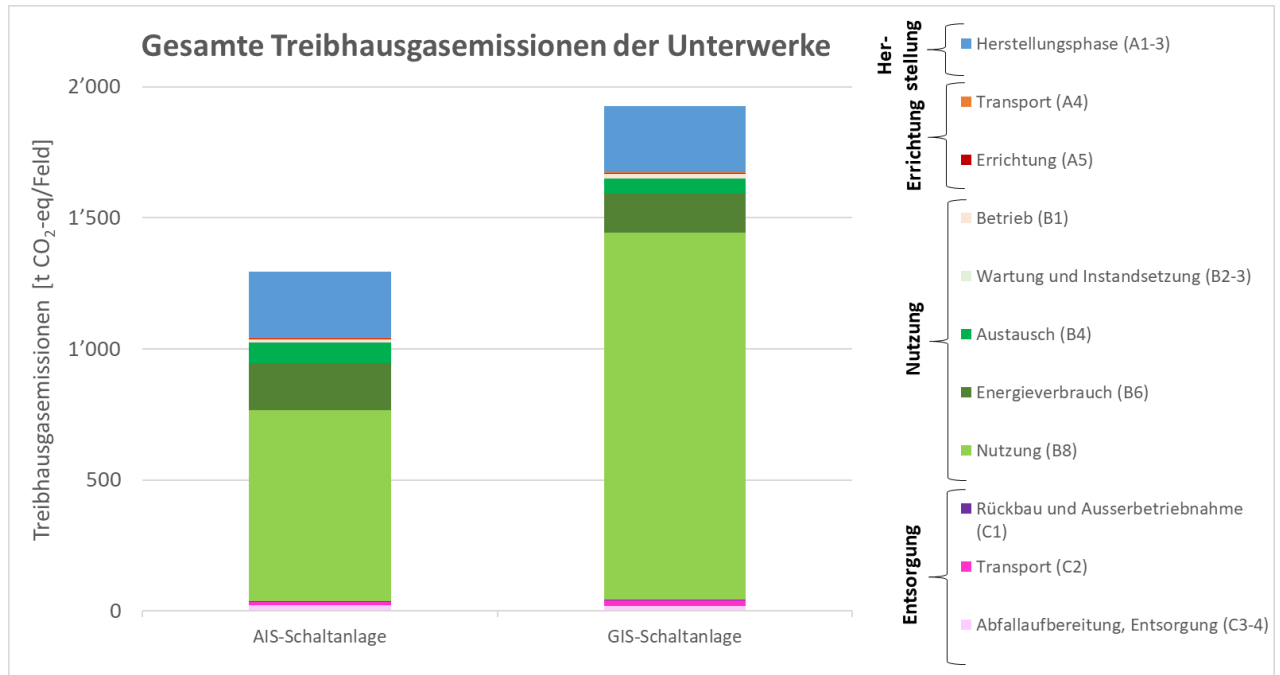


Abbildung 9: Gesamte Treibhausgasemissionen der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld

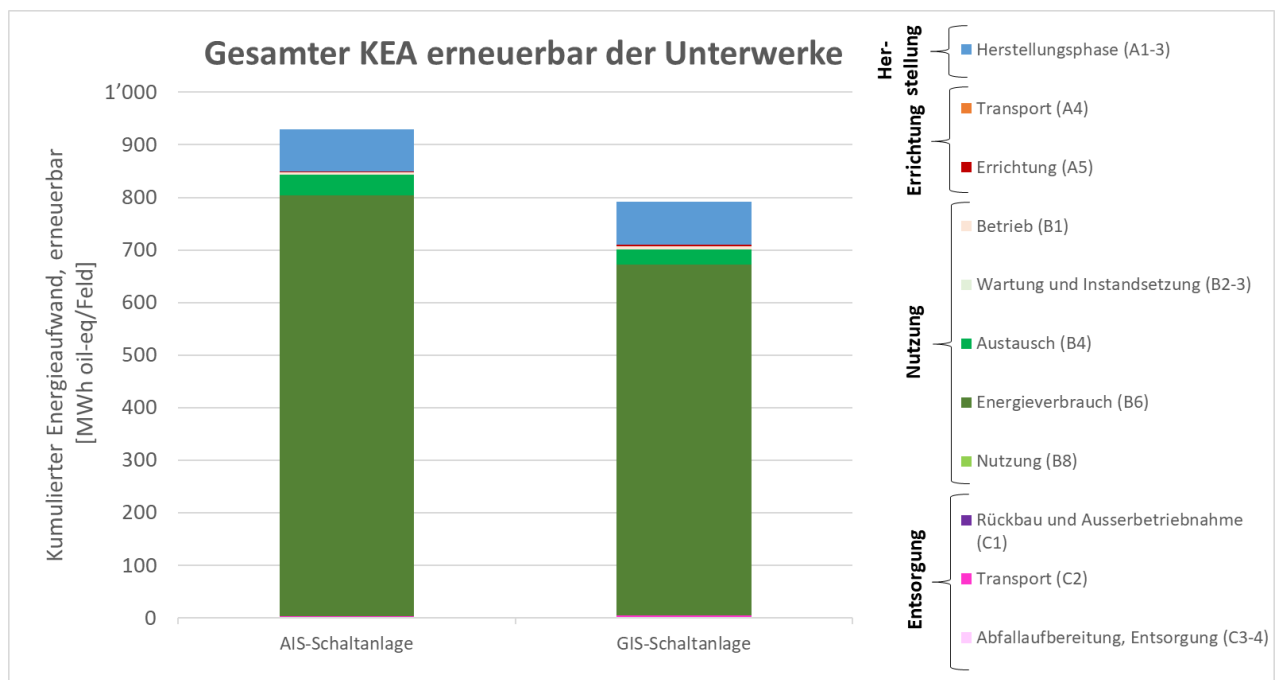


Abbildung 10: Gesamter kumulierter Energieaufwand erneuerbar der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld

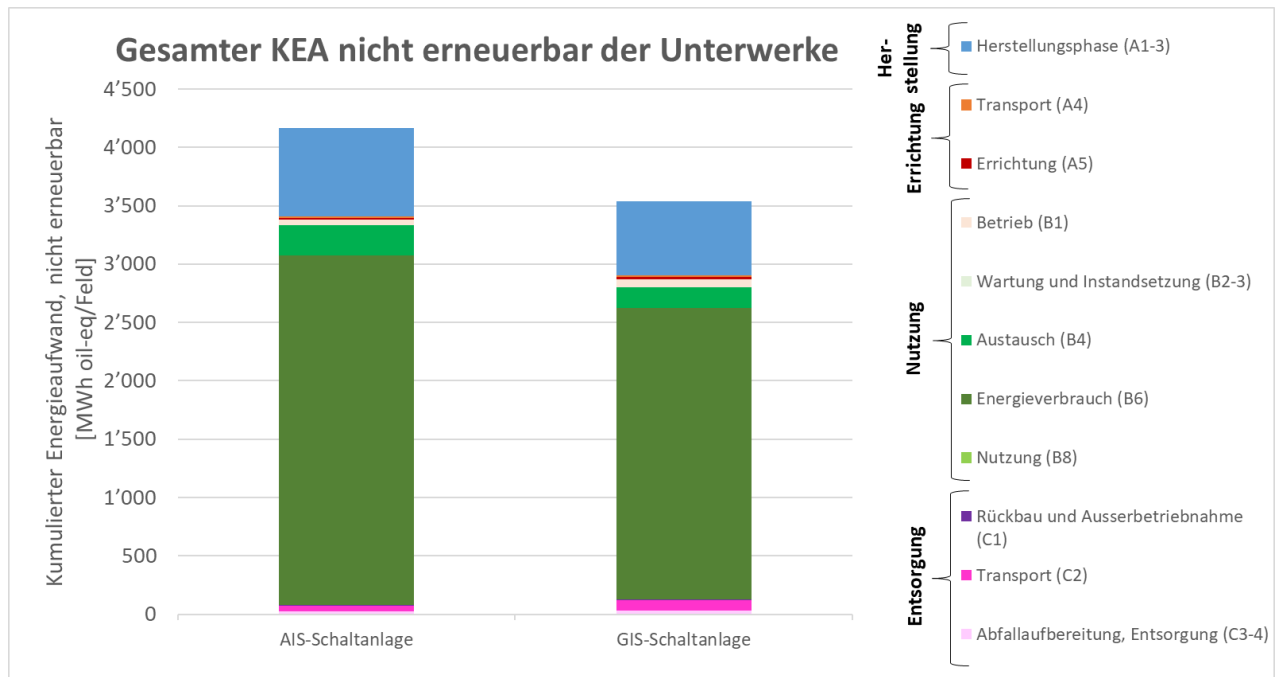


Abbildung 11: Gesamter kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar der Unterwerke pro Schaltanlagenfeld

4.1.2 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transporte und Baumaschinen

Die Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15 präsentieren die Gesamtumweltauswirkungen der Unterwerke unterteilt in «Ressourcen und Emissionen», «Energie», «Transport» und «Baumaschinen». Die Kategorie «Ressourcen und Emissionen» verbucht alle Materialaufwände, die während eines gesamten Lebenszyklus verbaut werden. Des Weiteren umfasst die Kategorie «Ressourcen und Emissionen» die während des gesamten Lebenszyklus entstehenden Bauabfälle. Darüber hinaus sind die SF₆-Verluste der Unterwerke in der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» verbucht. Die Kategorie «Energie» enthält den Energieverbrauch der Unterwerke. 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.

Die Auswertung ergibt, dass die Kategorien «Ressourcen und Emissionen» sowie «Energie» für die Gesamtbetrachtung der Ökobilanz die höchste Relevanz aufweisen. Die Kategorie «Ressourcen und Emissionen» hat den grössten Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz bei den Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen». Der Grund hierfür ist zum einen das verbaute Material bei den Unterwerken sowie die SF₆-Verluste der Anlagenkomponenten, welche innerhalb des Zeitraums von 80 Jahren entstehen. Die SF₆-Verluste stellen dabei den massgeblichen Faktor dar. Die Kategorie «Energie» ist ebenfalls entscheidend für die Umweltauswirkungen der Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen». Die Kategorien «Transport», «Baumaschinen» und «Landnutzung» weisen bei beiden Wirkungsabschätzungsemissionen tiefe Umweltauswirkungen auf. Das prozentuale Verhältnis der einzelnen Kategorien zueinander der

Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen» ist in Tabelle 14 und Tabelle 15 ersichtlich.

Tabelle 14: Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, Methode der ökologischen Knappheit

Kategorie	AIS-Schaltanlage [%]	GIS-Schaltanlage [%]
Ressourcen und Emissionen	64.00	75.00
Energie	32.00	22.00
Transport	2.00	2.00
Baumaschinen	0.00	0.00
Landnutzung	2.00	1.00

Tabelle 15: Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, Treibhausgasemissionen

Kategorie	AIS-Schaltanlage [%]	GIS-Schaltanlage [%]
Ressourcen und Emissionen	84.00	90.00
Energie	14.00	8.00
Transport	2.00	2.00
Baumaschinen	0.00	0.00

Bei der Wirkungsabschätzungsmethode «Kumulierter Energieaufwand» manifestiert sich ein divergentes Bild. Die Kategorie «Energie» spielt für die Wirkungsabschätzungsmethode «Kumulierter Energieaufwand» eine wesentliche Rolle. Rund zwei Drittel der Umweltauswirkungen lassen sich auf die Kategorie «Energie» zurückführen, siehe Tabelle 16 und Tabelle 17. Die Untersuchung des Primärenergiebedarfs der Unterwerke offenbart, dass die AIS-Schaltanlage im Vergleich zur GIS-Schaltanlage eine suboptimale Performance aufweist. Der erhöhte Energieverbrauch der AIS-Schaltanlage ist hierfür verantwortlich. Die Kategorie «Ressourcen und Emissionen» zeigt im Gegensatz zur Kategorie «Energie» eine geringe Umweltauswirkung auf. Die Kategorien «Transport» und «Baumaschinen» weisen so geringe Umweltauswirkungen auf, dass sie für die Ökobilanz vernachlässigbar sind.

Tabelle 16: Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, erneuerbarer kumulierter Energieaufwand

Kategorie	AIS-Schaltanlage [%]	GIS-Schaltanlage [%]
Ressourcen und Emissionen	13.50	15.00
Energie	86.00	84.00
Transport	0.50	1.00
Baumaschinen	0.00	0.00

Tabelle 17: Prozentuales Verhältnis der Kategorien zueinander, nicht erneuerbarer kumulierter Energieaufwand

Kategorie	AIS-Schaltanlage [%]	GIS-Schaltanlage [%]
Ressourcen und Emissionen	26.00	25.00
Energie	72.00	71.00
Transport	2.00	4.00

Baumaschinen	0.00	0.00
--------------	------	------

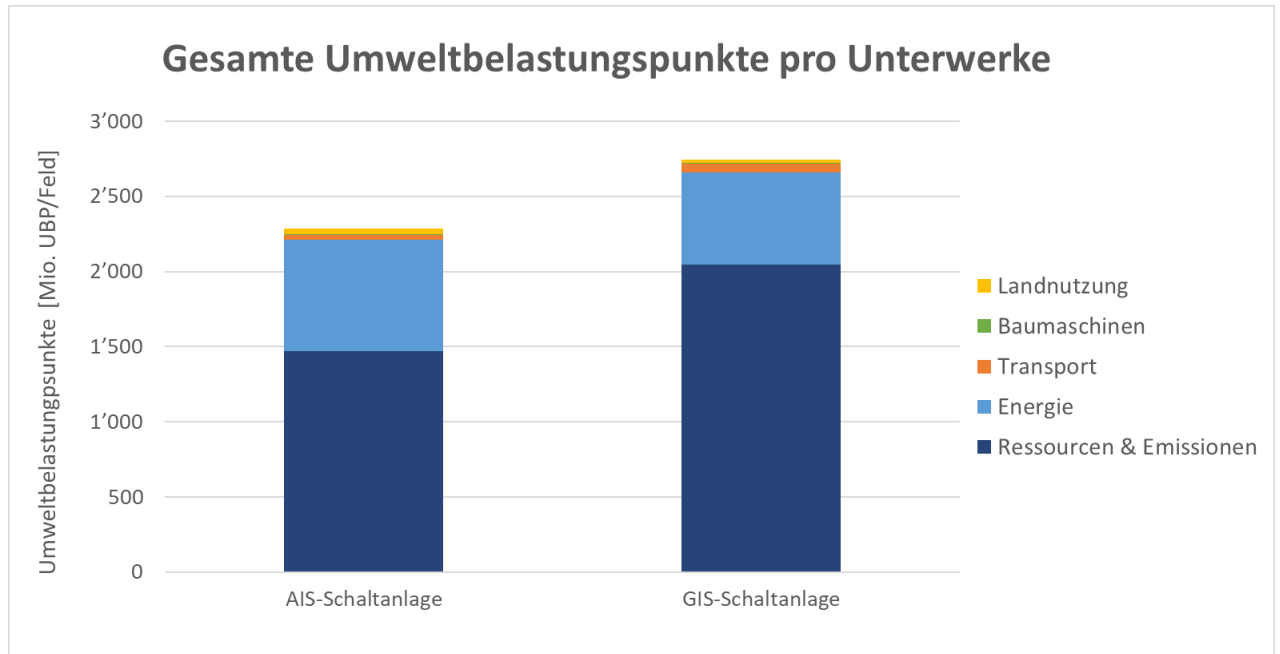


Abbildung 12: Gesamte Umweltbelastungspunkte pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung

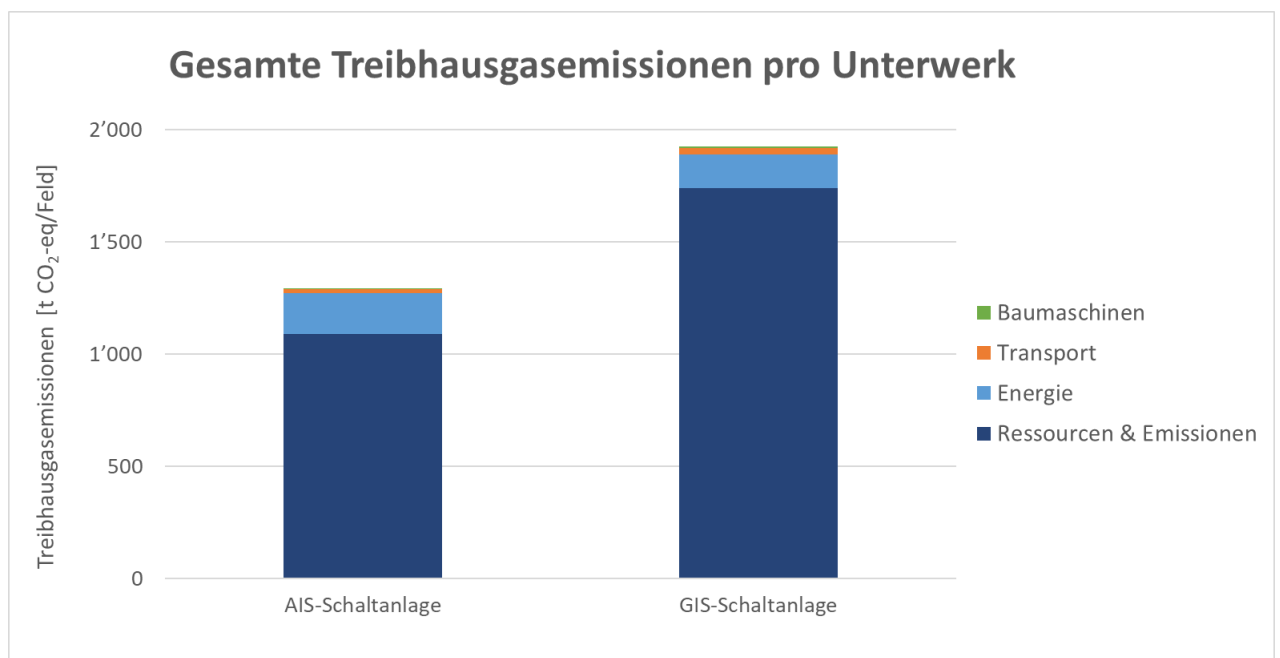


Abbildung 13: Gesamte Treibhausgasemissionen pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung

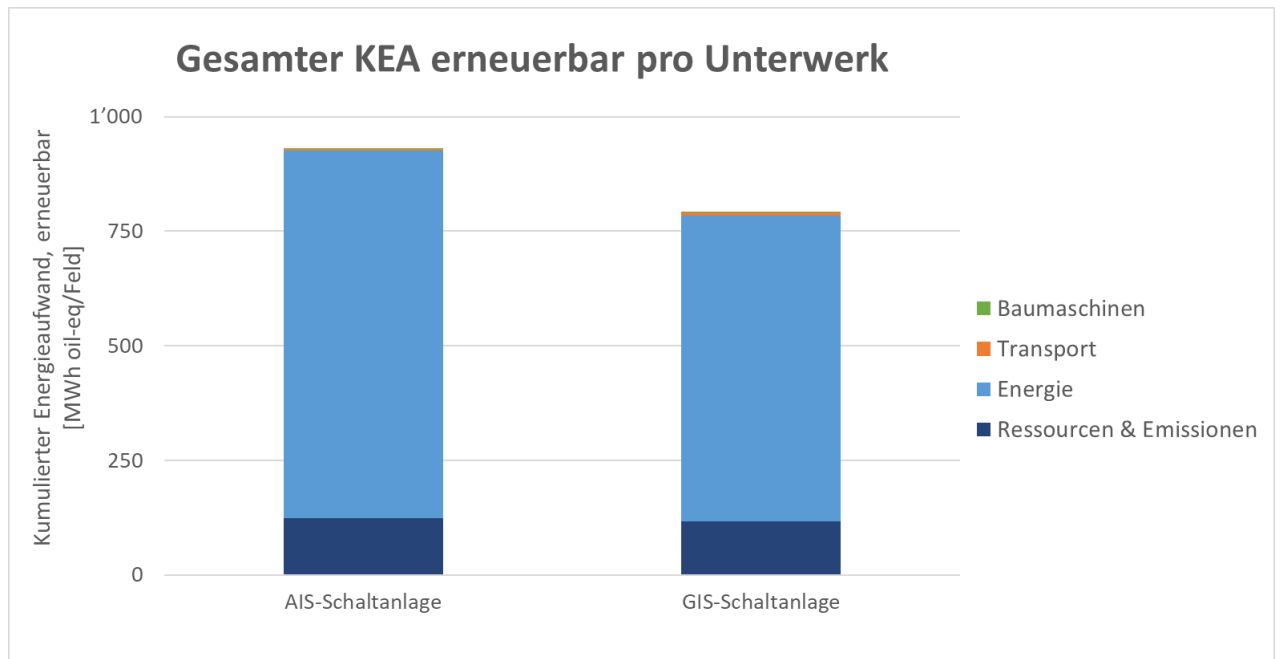


Abbildung 14: Gesamter kumulierter Energieaufwand erneuerbar pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung

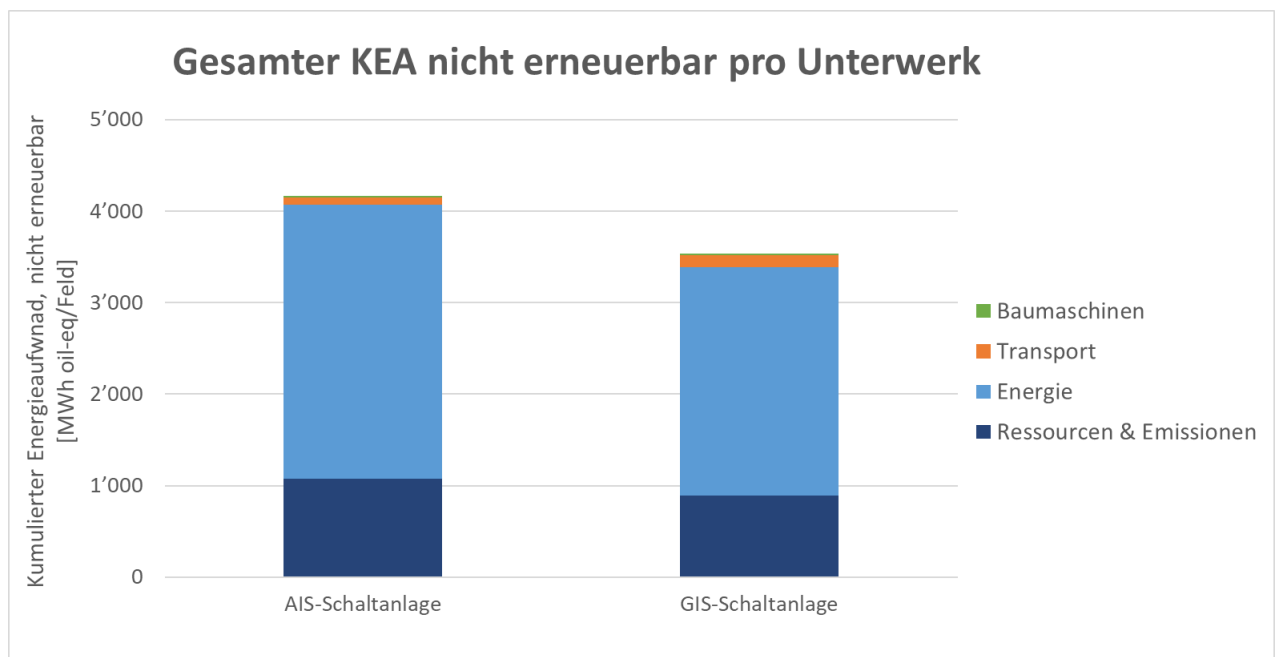


Abbildung 15: Gesamter kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar pro Unterwerk, nach Ressourcen und Emissionen, Energie, Transport, Baumaschinen und Landnutzung

4.1.3 Wirkungsabschätzung nach Ressourcen und Emissionen

Die Abbildung 16 präsentiert die Gesamtumweltauswirkungen der «Ressourcen und Emissionen». Die Anlagenkomponenten, die eine Umweltauswirkung von unter einer Million Umweltbelastungspunkten aufweisen, wurden nicht in die Abbildung aufgenommen. Die Betrachtung der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» erfolgt bei den Unterwerken mittels der Wirkungsabschätzungsmethode «Methode der ökologischen Knappheit» gemäss der Einheit «Umweltbelastungspunkte, UBP». Denn diese Wirkungsabschätzungsmethode berücksichtigt die meisten für die Umwelt relevanten Gesichtspunkte. Die «Ressourcen und Emissionen» beinhalten die Materialaufwände und die SF₆-Verluste der Unterwerke.

Die Auswertung der Wirkungsabschätzung ergibt, dass insbesondere die SF₆-Verluste bei beiden Unterwerken von Relevanz sind. Die SF₆-Gasverluste der GIS-Schaltanlage sind für 75 % der Umweltauswirkungen in der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» verantwortlich, während die SF₆-Gasverluste der AIS-Schaltanlage für 58 % der Umweltauswirkungen in dieser Kategorie verantwortlich sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der GIS-Schaltanlage nahezu doppelt so viele SF₆-Verluste entstehen wie bei der AIS-Schaltanlage. Die Anlagenkomponenten und Baumaterialien sind für 25 % der Umweltauswirkungen bei der GIS-Schaltanlage und für 42 % der Umweltauswirkungen bei der AIS-Schaltanlage verantwortlich.

Die durchgeführte Wirkungsabschätzung hat ergeben, dass alle Anlagenkomponenten, die eine hohe Menge an Materialien oder aus einem oder mehreren Metallen bestehen, hohe Umweltauswirkungen aufweisen. Bei der AIS-Schaltanlage sind dies das AIS-Gebäude, der Kabelrohrblock, die Leistungsschalter, die Stahlkonstruktion der Trennschalter-Erdschalter, während bei der GIS-Schaltanlage das GIS-Gebäude, die gasisolierte Schaltanlage, der Kabelrohrblock und die Kabelendverschlüsse die Komponenten mit einer hohen Umweltauswirkung darstellen.

Die Komponenten mit einer mittleren Umweltauswirkung sind bei der AIS-Schaltanlage der Trennschalter-Erdschalter, die Säule des SF₆-Kombiwandlers und der SF₆-Kombiwandler, der Zaun, die Säule des Überspannungsableiters/Trafo und die Säule des Leistungsschalters. Bei der GIS-Schaltanlage sind dies die Kabelendverschlüsse, die Kabel, der Zaun, die Säulen für den Überspannungsableiter/Trafo und den Kabelendverschluss.

Die ökologische Relevanz der genannten Komponenten ist deutlich geringer als die der zuvor genannten Elemente. Dazu zählen der Überspannungsableiter, die Leiterseile (220 kV), die Klemmen, das Abspannportal, das Erdseil mit LWL sowie die Gebäudefundamente.

Die Tabelle 18 zeigt die Umweltkennwerte für die Herstellung der relevantesten Anlagenkomponenten:

Tabelle 18: Umweltkennwerte für die Herstellung relevanter Anlagenkomponenten

Anlagenkomponenten	Einheit	Umweltkennwerte			
		[Mio. UBP/ Einheit]	[t CO ₂ -eq/ Einheit]	[MWh oil- eq erneuer- bar / Ein- heit]	[MWh oil- eq nicht er- neuerbar / Einheit]
AIS-Gebäude	St	237.37	144.04	36.49	318.70
AIS-Fundament	St	13.28	5.13	1.47	12.88
Abspannportal	St	6.20	3.17	0.72	8.61
Fundament des Abspann- portals	St	7.33	5.18	0.69	7.15
Fundamente Primärkom- ponenten	St	0.65	0.43	0.06	0.60
GIS-Gebäude	St	760.89	465.54	119.89	1'008.85
GIS-Fundament	St	19.36	7.48	2.15	18.78
Gasisolierte Schaltanlage	Ein Feld	115.95	62.63	25.41	146.97
Isolatorenkette	St	0.99	0.58	0.31	2.56
Kabelendverschluss	St	12.17	5.86	4.64	27.60
Kabelrohrblock	m	1.57	1.02	0.27	2.98
Kabel (XDRCU-ALT 1x1600 mm ² 220/127 kV (245 kV))	m	0.35	0.04	0.03	0.26
Kran	St	27.68	14.15	3.22	38.44
Leistungsschalter	St	22.85	10.95	5.18	36.28
Säule Kabelendverschluss	St	4.43	2.27	0.52	6.16
Säule Leistungsschalter	St	11.76	6.01	1.37	16.34
Säule SF ₆ -Kombiwandler	St	11.76	6.01	1.37	16.34
Säule Silicon-Stützisolator	St	4.43	2.27	0.52	6.16
Säule Überspannungsab- leiter/Trafo	St	8.32	4.25	0.97	11.55
SF ₆ -Kombiwandler	St	11.90	5.73	3.30	17.96
Silicon-Stützisolator	St	4.37	2.48	1.21	10.40
Stahlkonstruktion Erd- schalter. Trennschalter	St	35.85	11.74	0.42	49.78
Trennschalter-Erdschalter	St	14.20	5.26	2.29	22.54
Zaun	m	0.46	0.24	0.06	0.65

Die Umweltkennwerte der Anlagenkomponenten werden pro Stück, pro Meter und pro Feld und nicht pro funktionelle Einheit angegeben.

Ressourcen und Emissionen der Unterwerke

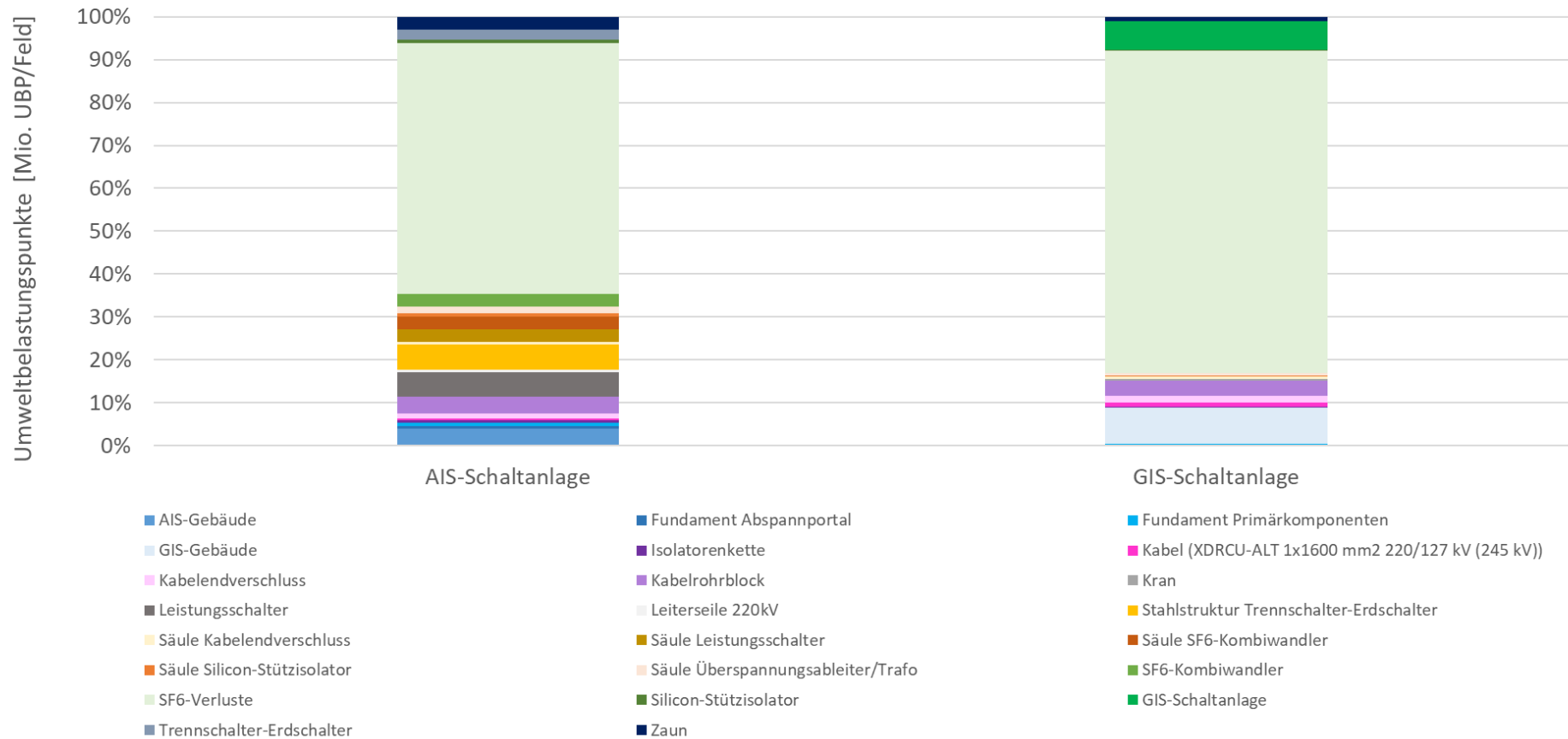


Abbildung 16: Ressourcen und Emissionen der Unterwerke, Umweltbelastungspunkte

4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse evaluiert die kritischen Parameter der Ökobilanz hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Die kritischen Parameter sind das Isoliergas der Schaltanlagen, der Strommix, die Lebensdauer der Anlagenkomponenten sowie die Verlustrate des SF₆-Gases der Schaltanlagen.

4.2.1 Parameter 1 – Isoliergas

Die Abbildung 17 veranschaulicht die Umweltauswirkungen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse für den «Parameter 1 – Isoliergas» ausgewertet mit der «Methode der ökologischen Knappheit».

Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass die Umweltauswirkungen in Abhängigkeit von der Wahl des Isoliergases der beiden Unterwerke signifikant variieren. Eine Reduktion der Umweltauswirkungen des Isoliergases ist möglich, sofern eine Substitution des SF₆-Gases durch ein Alternativmedium erfolgen kann. Die Isoliergase «3M Novec 4710» sowie «CleanAir» weisen deutlich weniger Umweltauswirkungen auf als das SF₆-Gas. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der Umweltauswirkungen in der Nutzung (B8). Der Einsatz des Isoliergases «3M Novec 4710» führt zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen bei der AIS-Schaltanlage um 28 % und bei der GIS-Schaltanlage um 44 % gegenüber dem Basisszenario. Der Einsatz des Isoliergases «CleanAir» führt zu einer weiteren Reduktion der Umweltauswirkungen. Bei der AIS-Schaltanlage beträgt diese 32 %, bei der GIS-Schaltanlage 48 %. Der Einsatz von «CleanAir» führt zu leicht tieferen Gesamtumweltauswirkungen als der Einsatz des Isoliergases «3M Novec 4710».

Die GIS-Schaltanlage weist demnach nicht mehr die höchsten Umweltauswirkungen auf, wenn die Isoliergase «3M Novec 4710» und «CleanAir» zum Einsatz kommen, sondern die AIS-Schaltanlage. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Energieverbrauch und die Materialaufwände in den Vordergrund rücken, da die Umweltauswirkungen in der Nutzung (B8) drastisch gesenkt werden können. Die Umweltauswirkungen des Energieverbrauchs sowie der Materialaufwände sind bei der AIS-Schaltanlage höher als bei der GIS-Schaltanlage.

Die Dimensionierung der GIS-Schaltanlage und des Gebäudes muss aufgrund des Einsatzes des Isoliergases «3M Novec 4710» um 5 % und aufgrund des Einsatzes des Isoliergases «CleanAir» um 20 % erhöht werden. Der zusätzliche Materialaufwand ist zwar als ungünstig zu bewerten, jedoch kann sein Einfluss auf den positiven Effekt durch das Isoliergas vernachlässigt werden. Um Zeitpunkt der Datenerhebung (2024) befanden sich entsprechende Anwendungen für die Netzebene 1 noch in Entwicklung bzw. Prüfung durch verschiedene Hersteller. Ihre Eignung wird derzeit von verschiedenen Herstellern getestet. Aus diesem Grund stellen die beiden durchgeführten Szenarien insbesondere für die Spannungsebene 1, Zukunftsaussichten dar, die jedoch für das Planen zukünftiger Unterwerke von Relevanz sind.

Die dargestellten Ergebnisse sind als indikative Bewertung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zu verstehen. Die tatsächliche Ausgestaltung zukünftiger Schaltanlagen mit alternativen Isoliermedien kann je nach Hersteller, Anlagendesign und Betriebsbedingungen variieren. Der Vergleich stellt daher keine produktspezifische Beurteilung einzelner Technologien dar.

Fazit: Die Wahl des Isoliergases für die Anlagenkomponenten der AIS-Schaltanlage und der GIS-Schaltanlage beeinflusst das Gesamtergebnis der Ökobilanz massgeblich.

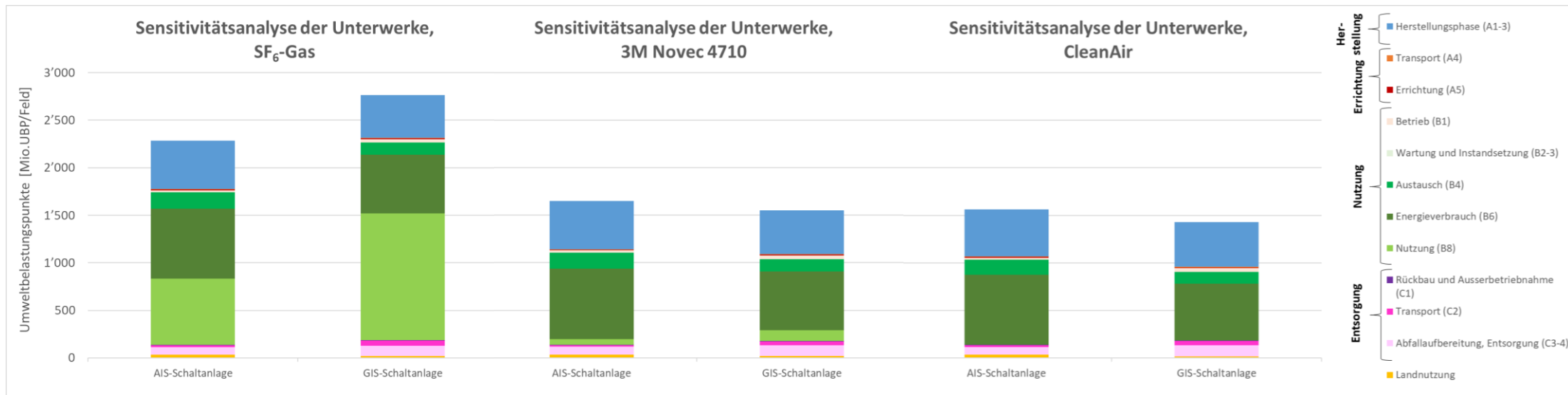


Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 1 - Isoliergas, Methode der ökologischen Knappheit

4.2.2 Parameter 2 – Strommix

Die Abbildung 18 veranschaulicht die Umweltauswirkungen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse für den «Parameter 2 – Strommix» ausgewertet mit der «Methode der ökologischen Knappheit».

Die Variation des Schweizer Verbraucherstrommixes in der Modellrechnung offenbart, dass die Umweltauswirkungen der Unterwerke in Abhängigkeit von der Wahl des Strommixes variieren. In der Lebenszyklusphase des Energieverbrauchs (B6) manifestieren sich hingegen Veränderungen hinsichtlich des Umfangs der Umweltauswirkungen. Unter Berücksichtigung der Betriebsverbräuche der Unterwerke, welche mit dem nicht erneuerbaren Schweizer Strommix berechnet werden, zeigt sich, dass im Vergleich zur Basisvariante mit dem Schweizer Verbraucherstrommix bei der AIS-Schaltanlage 13 % und bei der GIS-Schaltanlage 9 % mehr Umweltauswirkungen entstehen. Bei einer Berechnung der Unterwerke mit dem erneuerbaren Schweizer Strommix zeigen sich gegenüber der Basisvariante mit dem Schweizer Verbraucherstrommix deutlich geringere Emissionen. Bei der AIS-Schaltanlage sind dies 32 % und bei der GIS-Schaltanlage 22 % weniger. Bei der AIS-Schaltanlage sind die Reduktionen höher, da ihr Energieverbrauch höher ist.

Daraus folgt, dass der Strommix für den Umfang der Umweltauswirkungen der Unterwerke massgeblich ist. Je nachhaltiger der Strommix ausfällt, desto kleiner ist die Menge an anfallenden Umweltauswirkungen. Da die Umweltauswirkungen mehrheitlich auf die entstehenden Energieverbräuche 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 eines geeigneten Unterwerks. Denn das Verhältnis von Umweltauswirkungen der Unterwerke bleibt unabhängig vom gewählten Strommix unverändert.

Fazit: Der Strommix ist aufgrund des Energieverbrauchs der Unterwerke grundlegend für die Menge an anfallenden Umweltauswirkungen verantwortlich. Doch bleiben die Hauptaussagen des Variantenstudiums in Bezug auf die Wahl eines geeigneten Unterwerks unverändert.

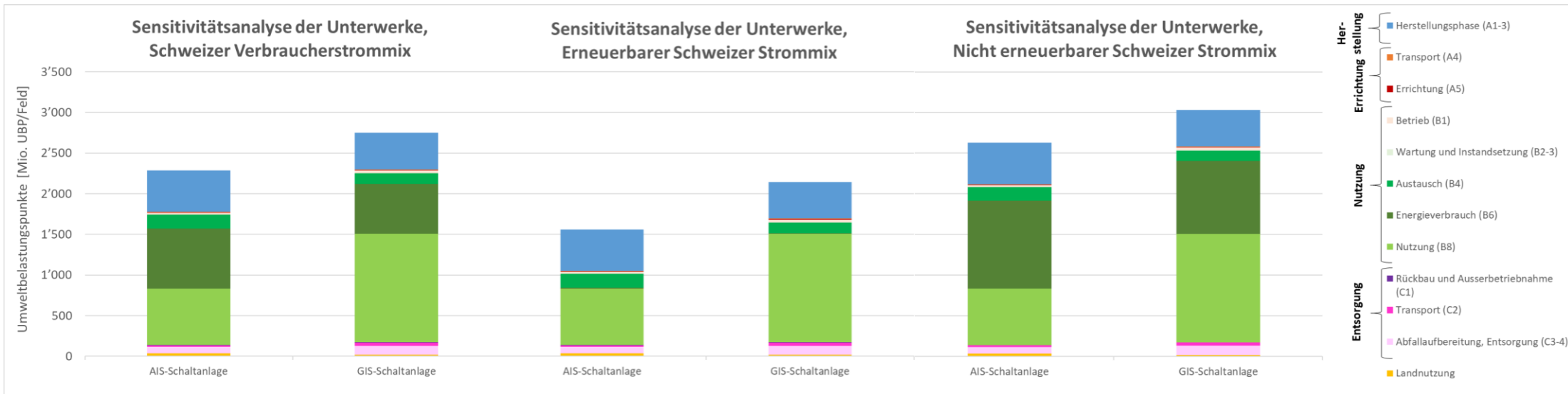


Abbildung 18: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 2 - Strommix, Methode der ökologischen Knappheit

4.2.3 Parameter 3 – Lebensdauer Anlagenkomponenten

Die Abbildung 19 veranschaulicht die Umweltauswirkungen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse für den «Parameter 3 – Lebensdauer Anlagenkomponenten» ausgewertet mit der «Methode der ökologischen Knappheit».

Die Variation der Lebensdauer der Anlagenkomponenten offenbart, dass die Gesamtumweltauswirkungen weder signifikant zunehmen noch abnehmen. Folglich können die Hauptaussagen des Variantenstudiums bestätigt werden. Mit dem Variieren der Lebensdauer der Anlagenkomponenten ändern sich die Lebenszyklusphasen Austausch (B4), Transport (C2) sowie die Abfallaufbereitung und Entsorgung (C3-4). Es lässt sich erkennen, dass die Umweltauswirkungen im Austausch (B4) durch das Variieren der Lebensdauer signifikant beeinflusst werden können. Demgegenüber zeigen sich bei den Lebenszyklusphasen Transport (C2) und Abfallaufbereitung und Entsorgung (C3-4) keine signifikanten Veränderungen der Umweltauswirkungen.

Die Reduktion der Lebensdauer der Anlagenkomponenten um die Hälfte führt zu einer Steigerung der Umweltauswirkungen gegenüber dem Basisszenario um 14 % bei der AIS-Schaltanlage und um 10 % bei der GIS-Schaltanlage. Eine Verdoppelung der Lebensdauer der Anlagenkomponenten führt zu einer Reduktion der Gesamtumweltauswirkungen bei der AIS-Schaltanlage um 8 % und bei der GIS-Schaltanlage um 5 % gegenüber dem Basisszenario. Die durchgeführte Analyse offenbart, dass die Verkürzung der Lebensdauer von Anlagenkomponenten einen höheren Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat als die Verlängerung der Lebensdauer von Anlagenkomponenten.

Die höchsten Umweltauswirkungen sind jedoch zu Beginn des Lebenszyklus bei den Unterwerken in der Herstellungsphase (A1-3) zu verzeichnen. Die Umweltauswirkungen der Herstellungsphase (A1-3) können jedoch auch durch das Variieren der Lebensdauer der Anlagenkomponenten nicht modifiziert werden.

Fazit: Die Variation der Lebensdauer der Anlagekomponenten der Unterwerke beeinflusst das Gesamtergebnis der Ökobilanz nicht.

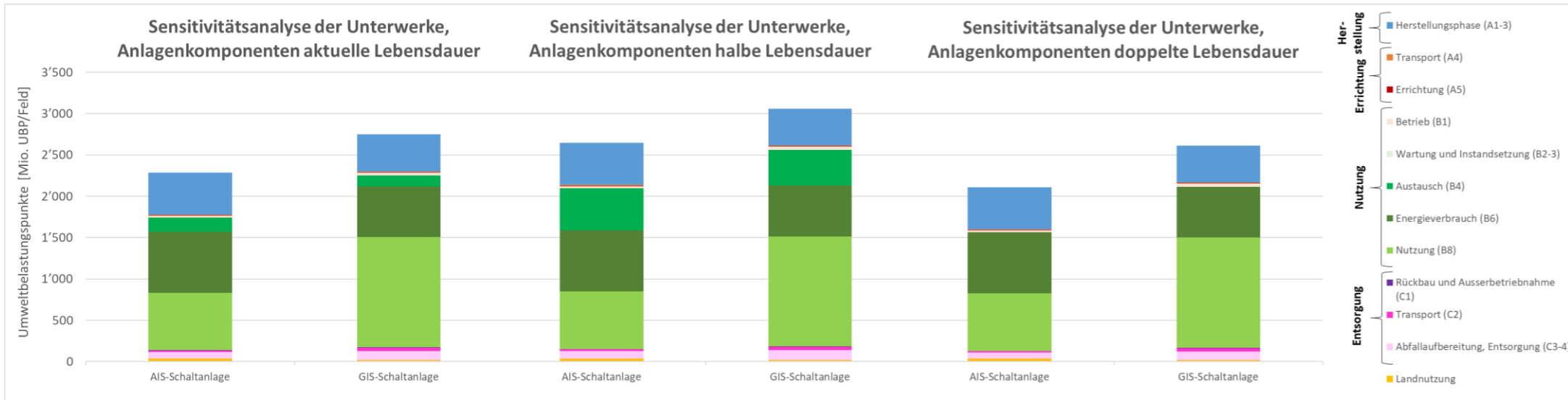


Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 3 – Lebensdauer der Anlagenkomponenten, Methode der ökologischen Knappheit

4.2.4 Parameter 4 – Verlustrate SF₆-Gas

Die Abbildung 20 veranschaulicht die Umweltauswirkungen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse für den «Parameter 4 – Verlustrate SF₆-Gas» ausgewertet mit der «Methode der ökologischen Knappheit».

Die Wirkungsabschätzung der Variation der Verlustrate des SF₆-Gases verdeutlicht, dass die Umweltauswirkungen in Abhängigkeit von der Höhe der Verlustrate des SF₆-Gases signifikant beeinflusst werden können. Eine Verringerung der Verlustrate führt dazu, die Umweltauswirkungen der Lebenszyklusphase Nutzung (B8) zu reduzieren, die restlichen Lebenszyklusphasen bleiben gleich.

Die von den Herstellern angegebene Verlustrate beträgt 0,3 %. Gemäss Messungen von Swissgrid liegt die Verlustrate jedoch lediglich bei 0,1 %. Der Vergleich zwischen der Verlustrate von 0,1 % und dem Basisszenario mit einer Verlustrate von 0,3 % zeigt, dass bei der AIS-Schaltanlage 20 % und bei der GIS-Schaltanlage 32 % der Gesamtumweltauswirkungen eingespart werden können. Bei der GIS-Schaltanlage fällt die Einsparung höher aus, da in den Anlagen eine grössere Menge an SF₆-Gas zum Einsatz kommt. Bei einer Verlustrate von 0,3 % weist die AIS-Schaltanlage geringere Umweltauswirkungen als die GIS-Schaltanlage auf. Nach einer Reduzierung der Verlustrate auf 0,1 % sind die Umweltauswirkungen beider Unterwerke vergleichbar hoch. Dabei weist die GIS-Schaltanlage tendenziell leicht tiefere Umweltauswirkungen als die AIS-Schaltanlage auf.

Fazit: Die Verlustrate des SF₆-Gases der Anlagenkomponenten der AIS-Schaltanlage und der GIS-Schaltanlage hat einen massgeblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Ökobilanz.

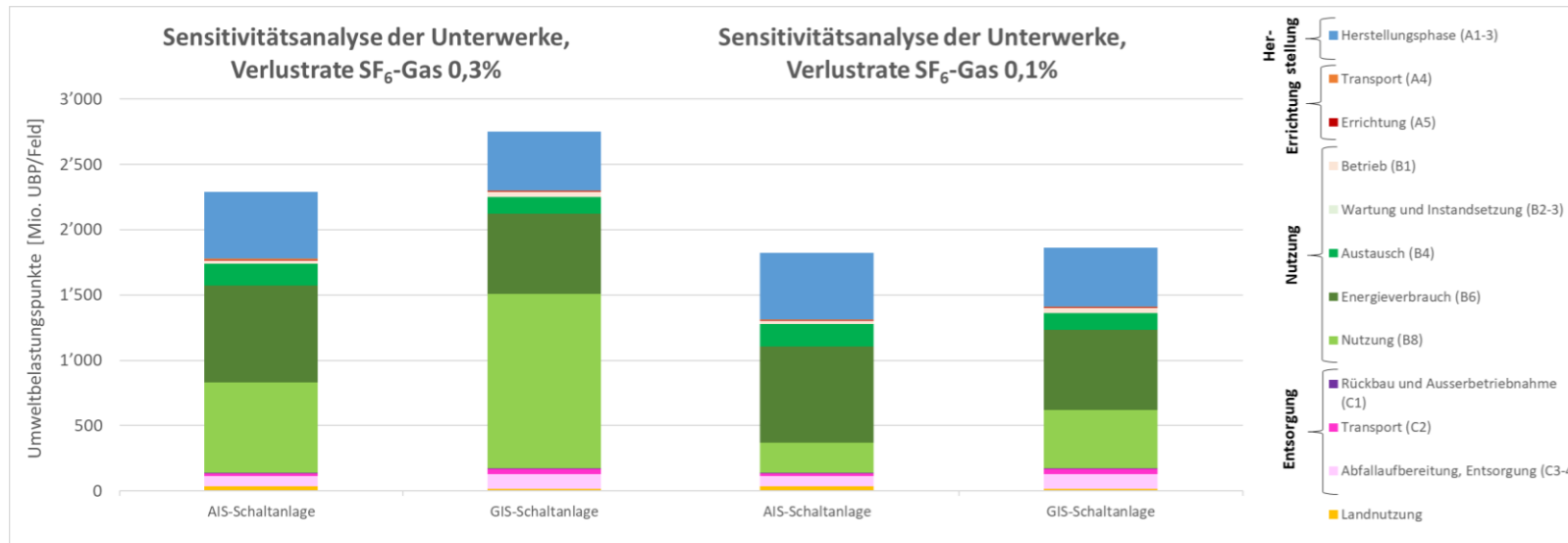


Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse Unterwerke, Parameter 4 - Verlustrate SF₆-Gas, Methode der ökologischen Knappheit

5 Auswertung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse aus der Ökobilanz präsentiert.

5.1 Variantenstudium

Die Ökobilanz belegt, dass die AIS-Schaltanlage im Vergleich zur GIS-Schaltanlage bei den Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» (Abbildung 21) und «Treibhausgasemissionen» geringere Umweltauswirkungen aufweist. Bei der Wirkungsabschätzungsmethode «kumulierter Energieaufwand» zeigt sich, dass die GIS-Schaltanlage einen klaren Vorteil gegenüber der AIS-Schaltanlage aufweist. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dieser Wirkungsabschätzungsmethode lediglich um eine Analyse eines Teilumweltindikators handelt, nämlich des Primärenergiebedarfs, sind die daraus resultierenden Aussagen für die Bewertung einer umfassenden Ökobilanz unzureichend.

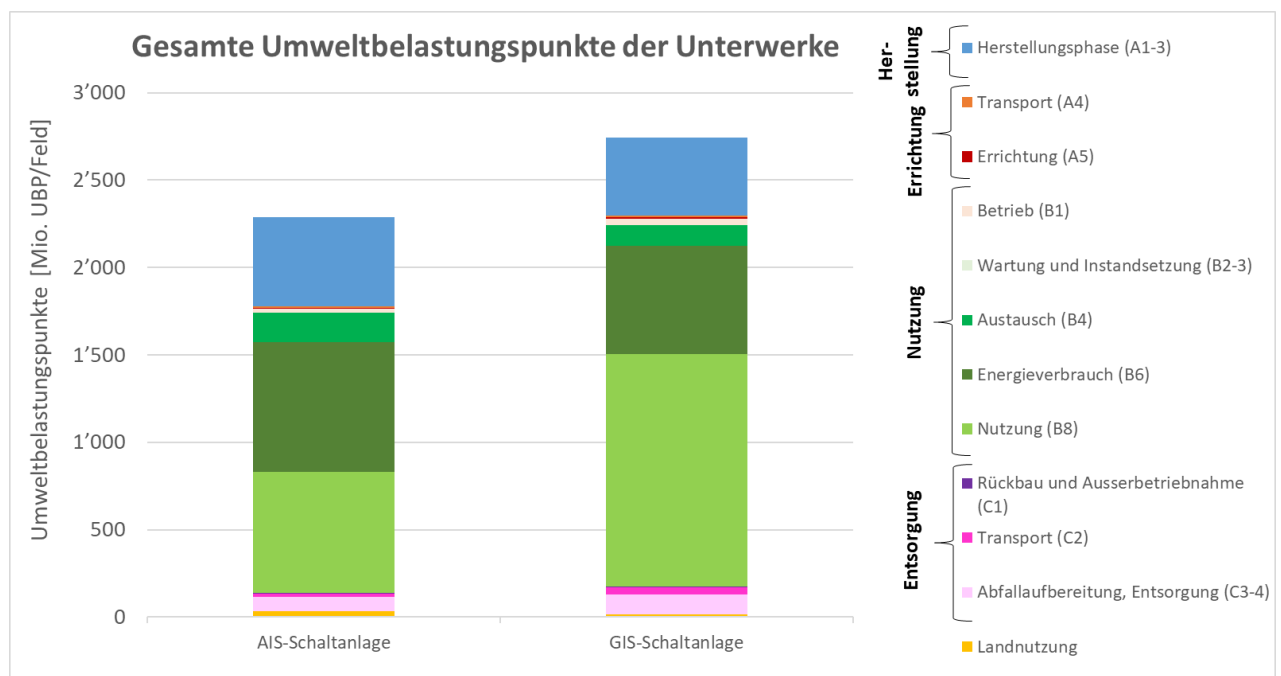


Abbildung 21: Gesamte Umweltbelastungspunkte der Unterwerke nach Lebenszyklusphasen

Die Lebenszyklusphasen Herstellungsphase (A1-3), Austausch (B4) sowie Energieverbrauch (B6) und Nutzung (B8) stellen entscheidende Faktoren in der Ökobilanz der Unterwerke dar. Die AIS-Schaltanlage weist höhere Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase (A1-3), im Austausch (B4) sowie im Energieverbrauch (B6) auf. Im Gegensatz dazu zeigt die GIS-Schaltanlage höhere Umweltauswirkungen in der Nutzung (B8). Die Lebenszyklusphasen Transport (A4), Errichtung (A5), Betrieb (B1), Wartung und Instandsetzung (B2–3), Rückbau und Ausserbetriebnahme (C1), Transport (C2), Abfallaufbereitung und Entsorgung (C3–4) sowie Landnutzung spielen in der Gesamtbetrachtung der Ökobilanz eine untergeordnete Rolle.

Die Resultate der Lebenszyklusanalyse werden ebenfalls durch die Auswertung der Ökobilanz nach Kategorien bestätigt. Die relevanten Kategorien sind «Ressourcen und Emissionen» sowie «Energie». Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Ökobilanz sind die SF₆-Gasverluste, der Energieverbrauch sowie die eingesetzten Materialien. In der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» sind die Materialaufwendungen in der Herstellungsphase (A1-3) und des Austausches (B4) enthalten sowie die SF₆-Verluste der Anlagenkomponenten in der Nutzung (B8). Die Analyse der Umweltauswirkungen in der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» zeigt, dass die Umweltauswirkungen des SF₆-Gasverlustes die Umweltauswirkungen der Materialaufwendungen deutlich übersteigen.

Die Analyse der Ressourcen zeigt, dass Anlagekomponenten, die sowohl eine hohe Materialmenge als auch mindestens ein Metall enthalten, für die höchsten Umweltauswirkungen bei den «Ressourcen und Emissionen» verantwortlich sind. Zu den Komponenten mit einer hohen Umweltauswirkung bei der AIS-Schaltanlage zählen das AIS-Gebäude, der Kabelrohrblock, die Leistungsschalter sowie die Stahlkonstruktion der Trennschalter-Erdschalter. Bei der GIS-Schaltanlage sind dies das GIS-Gebäude, die GIS-Schaltanlage sowie die Stahlkonstruktion der Trennschalter.

In der Kategorie «Energie» werden die Umweltauswirkungen des Energiebedarfs der Unterwerke ausgewertet. Die Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen» zeigen, dass die Umweltauswirkungen der Kategorie «Ressourcen und Emissionen» die der Kategorie «Energie» übersteigen. In Bezug auf den «kumulierten Energieaufwand» zeigt sich ein gegenläufiges Bild. Die Analyse des «kumulierten Energieaufwands» nach Kategorie verdeutlicht, dass zwei Drittel und mehr der Umweltauswirkungen auf die Kategorie «Energie» zurückzuführen sind.

Die Kategorien «Transport», «Baumaschinen» und «Landnutzung» weisen im Vergleich zu den übrigen Kategorien eine tiefe Umweltauswirkung auf und sind daher für die Gesamtbilanz der Ökobilanz von untergeordneter Bedeutung.

5.2 Sensitivitätsanalyse

Weiter enthält der Bericht eine Sensitivitätsanalyse für die Unterwerke. Dabei variiert die Sensitivitätsanalyse das Isoliergas (SF₆-Gas, 3M Novec 4710, CleanAir), den Strommix (Schweizer Verbraucherstrommix, nicht erneuerbarer Schweizer Strommix, erneuerbarer Schweizer Strommix), die Lebensdauer der Anlagenkomponenten (aktuelle, halbe, doppelte Lebensdauer) sowie die Verlustrate des SF₆-Gases (Verlustrate von 0,3 %, Verlustrate von 0,1 %).

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Wahl des Isoliergases sowie die Höhe der Verlustrate entscheidende Parameter für die Ökobilanz darstellen. Es lässt sich feststellen, dass bei Einsatz eines Alternativmediums gegenüber SF₆-Gas sowohl die Umweltauswirkungen in der Nutzung (B8) signifikant reduziert werden können als auch die GIS-Schaltanlage geringere Umweltauswirkungen aufweist als die AIS-Schaltanlage. Die dargelegten Beobachtungen lassen sich auf das Isoliergas «3M Novec 4710» sowie auf «CleanAir» übertragen. Der Einsatz des Isoliergases «CleanAir» führt zu den höchsten Einsparungen an Umweltauswirkungen, siehe Abbildung 17.

Die Reduzierung der Verlustrate von 0,3 % auf 0,1 % führt ebenfalls zu einer signifikanten Verringerung der Umweltauswirkungen des SF₆-Gasverlustes in der Nutzung (B8), siehe Abbildung 20.

Dies führt dazu, dass die GIS-Schaltanlage geringfügig niedrigere Umweltauswirkungen aufweist als die AIS-Schaltanlage.

Die Kernaussagen der Ökobilanz bleiben bei einer Variation des Strommixes bestehen. Der Grund dafür ist, dass die Menge des Energieverbrauchs bei beiden Unterwerken konstant bleibt und lediglich die Umweltauswirkung der einzelnen Strommixe variiert. Es lässt sich beobachten, dass eine drastische Reduzierung der Umweltauswirkungen möglich ist, wenn der Anteil erneuerbarer Energien im Strommix zunimmt, siehe Abbildung 18. Die gegenläufige Tendenz lässt sich bei zunehmendem Anteil nicht erneuerbarer Energien im Strommix beobachten.

Die Variation der Lebensdauer von Anlagenkomponenten hat keinen Einfluss auf die Kernaussagen der Ökobilanz. Eine Variation der Lebensdauer führt zu einer Veränderung der Umweltauswirkungen, die jedoch als zu geringfügig erachtet wird, um eine Revision der Aussagen der Ökobilanz zu rechtfertigen. Die Variation der Lebensdauer von Anlagenkomponenten wirkt sich insbesondere auf die Umweltauswirkungen der Lebenszyklusphase Austausch (B4) aus. Die Konsequenzen der Transporte (C2) sowie der Abfallaufbereitung (C3-C4) bleiben bestehen. Es lässt sich feststellen, dass die Verkürzung der Lebensdauer der Anlagenkomponenten einen signifikant höheren Einfluss auf die Ökobilanz ausübt als die Verlängerung der Lebensdauern.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

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

Die Resultate des Variantenstudiums lassen keine eindeutigen Schlüsse zu. In Abhängigkeit von der angewandten Methode zur Wirkungsabschätzung variieren die Aussagen der Ökobilanz. Die AIS-Schaltanlage weist im Variantenstudium bei den Wirkungsabschätzungsmethoden «Methode der ökologischen Knappheit» und «Treibhausgasemissionen» geringere Umweltauswirkungen auf, während die GIS-Schaltanlage bei der Wirkungsabschätzungsmethode «Kumulierter Energieaufwand» geringere Umweltauswirkungen aufweist. Der Konflikt resultiert aus den signifikanten Mengen an SF₆-Gas, die bei der GIS-Schaltanlage festgestellt wurden und bei den «Treibhausgasemissionen» eine höhere Gewichtung erfahren, sowie dem hohen Energieverbrauch, der bei der AIS-Schaltanlage festgestellt wurde und beim «Kumulierter Energieaufwand» eine höhere Gewichtung erfährt. Um ein ganzheitliches Bild der Umweltauswirkungen zu erhalten, erweist sich die Anwendung der «Methode der ökologischen Knappheit» (Umweltbelastungspunkte) als zielführend. Sie ist nicht auf einen einzelnen Umweltindikator ausgerichtet, sondern bezieht eine Vielzahl von Umweltaspekten ein und liefert somit eine ausgewogene Bewertung der Umweltauswirkungen.

Für alle drei Wirkungsabschätzungsmethoden sind die Lebenszyklusphasen Herstellungsphase (A1-3), der Austausch (B4), der Energieverbrauch (B6) und die Nutzung (B8) von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis der Ökobilanz. Die Lebenszyklusphasen Transport (A4), Errichtung (A5), Betrieb (B1), Wartung und Instandsetzung (B2-3), Rückbau und Ausserbetriebnahme (C1), Transport (C2), Abfallaufbereitung und Entsorgung (C3-4) sowie Landnutzung spielen in der Gesamtbeurteilung der Ökobilanz eine untergeordnete Rolle. Die durchgeführte Analyse hat ergeben, dass die Kategorien «Ressourcen und Emissionen» sowie «Energie» für die Ökobilanz von entscheidender Bedeutung sind. Demgegenüber sind die Kategorien «Transport», «Baumaschinen» und «Landnutzung» von untergeordneter Relevanz. Die Transportstrecken sind kurz und erfolgen von den Zwischenlagern an die Baustelle sowie von der Baustelle zur Endentsorgungsstelle. Aufgrund der kurzen Transportstrecken sind nur geringe Umweltauswirkungen zu verzeichnen. Die versiegelte Fläche der Unterwerke ist gering und die Landnutzungsart führt ebenso zu keinen erheblichen Umweltauswirkungen.

Die Ergebnisse des Variantenstudiums mit der «Methode der ökologischen Knappheit» legen nahe, dass die GIS-Schaltanlage im Vergleich zur AIS-Schaltanlage eine höhere Umweltauswirkung aufweist. Die Erkenntnis lässt sich auf den höheren SF₆-Gasverlust der GIS-Schaltanlage in der Lebenszyklusphase Nutzung (B8) zurückführen, welcher den wesentlichen Treiber für die Ökobilanz darstellt. Die Materialien aus der Herstellungsphase (A1-3) und dem Austausch (B4) sowie der betriebliche Energieverbrauch der Unterwerke (B6) stellen ebenfalls entscheidende Faktoren für die Ökobilanz dar. Die AIS-Schaltanlage weist in allen genannten Lebenszyklusphasen ausser der Nutzung (B8) höhere Umweltauswirkungen auf als die GIS-Schaltanlage. Diese Erkenntnis ist von grosser Bedeutung, da die Ergebnisse der Variantenuntersuchung in Abhängigkeit von der Wahl und der Menge des alternativen Mediums im Vergleich zum SF₆-Gas relativiert werden können.

Gegenwärtig werden alternative Medien zu SF₆-Gas erforscht, deren Markteinführung jedoch noch aussteht. Der Einsatz alternativer Medien mit deutlich geringerem Treibhauseffekt in zukünftigen Anlagen führt zu einer klaren Vorteilssituation der GIS-Schaltanlage gegenüber der AIS-Schaltanlage. Die Umweltauswirkungen in der Nutzung (B8) können durch den Einsatz alternativer Medien

deutlich reduziert werden. Dies führt dazu, dass die Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-3), Austausch (B4) und der Energieverbrauch (B6) an Bedeutung gewinnen. Bei der AIS-Schaltanlage weisen diese Lebenszyklusphasen höhere Umweltauswirkungen auf. Dies begründet den Vorteil der GIS-Schaltanlage gegenüber der AIS-Schaltanlage.

Die Wahl des Isoliergases ist dabei lediglich ein Aspekt, der zu berücksichtigen ist. Ebenso von Bedeutung ist die Höhe der SF₆-Gasverluste. Eine Reduzierung der Verlustrate von 0,3 % auf 0,1 % führt zu signifikanten Verschiebungen in den Ergebnissen. Bei einer Reduzierung der SF₆-Verluste von 0,3 % auf 0,1 % zeigt sich, dass die AIS-Schaltanlage und die GIS-Schaltanlage vergleichbar hohe Umweltauswirkungen aufweisen. Dabei sind die Umweltauswirkungen der GIS-Schaltanlage etwas geringer als die der AIS-Schaltanlage. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass das eingesetzte Isoliergas sowie dessen Menge in den Unterwerken massgeblich das Ergebnis beeinflussen.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der Energiebedarf der Unterwerke einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz ausübt. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse hat ergeben, dass die Umweltauswirkungen der Unterwerke durch die Wahl eines erneuerbaren Strommixes deutlich reduziert bzw. durch die Wahl eines nicht erneuerbaren Strommixes erhöht werden können. Die Kernaussagen der Ökobilanz bleiben auch nach der Berücksichtigung des genannten Einflussfaktors bestehen. Dennoch ist eine Reduktion der Umweltauswirkungen durch einen Strommix mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien erstrebenswert.

Des Weiteren hat die Verdoppelung oder Halbierung der Lebensdauer der Anlagenkomponenten keinen Einfluss auf die Hauptaussagen der Variantenuntersuchung hinsichtlich der Umweltauswirkungen. Beim Einsatz alternativer Medien zum SF₆-Gas oder bei einer Reduktion von SF₆-Gas in den Unterwerken hingegen rückt die Materialisierung in den Vordergrund der Ökobilanz, wobei auch der Einfluss der Lebensdauer der Komponenten zunimmt. Eine genaue Untersuchung des Einflusses wurde in der vorliegenden Ökobilanz nicht durchgeführt. Dennoch ist eine Reduktion der Umweltauswirkungen durch eine Verlängerung der Lebensdauer von Anlagenkomponenten stets erstrebenswert. Denn mit jeder Verlängerung der Lebensdauer können Umweltlasten eingespart werden.

Die Materialien sind für einen erheblichen Teil der Umweltauswirkungen verantwortlich. Zusätzlich zu den in der Herstellungsphase (A1-3) verbauten Materialien werden während des gesamten Lebenszyklus immer wieder Materialien für den Austausch (B4) aufgewendet. Die durchgeführte Variantenuntersuchung hat ergeben, dass alle Anlagenteile, die einen hohen Materialanteil aufweisen oder aus einem oder mehreren Metallen bestehen, hohe Umweltauswirkungen haben. Bei der AIS-Schaltanlage sind dies das AIS-Gebäude, der Kabelrohrblock, die Leistungsschalter und die Stahlkonstruktion der Trennschalter-Erdschalter, während bei der GIS-Schaltanlage das GIS-Gebäude, die GIS-Schaltanlage und die Stahlkonstruktion der Trennschalter zu den Komponenten mit hohen Umweltauswirkungen zählen.

Die Erkenntnisse aus der Ökobilanz bieten Swissgrid eine Möglichkeit, nachhaltige Bauentscheidungen zu treffen und das ökologisch vorteilhafteste Unterwerk zu wählen. Zusätzlich schaffen die Ergebnisse Transparenz für mögliche Handlungsfelder in der Vorplanung wie auch im Bau der Unterwerke, um künftige Optimierungsmaßnahmen zur Minimierung von Umweltauswirkungen von Beginn an festzulegen. Die Ökobilanz verdeutlicht die Relevanz von Innovationen im Bereich der Technik sowie von Alternativen, die im Sinne der Nachhaltigkeitsziele von Swissgrid erstrebenswert sind.

In einem nächsten Schritt kann die Sachbilanz des vorliegenden Berichts mit einem von Swissgrid dokumentierten Baustandard für die Unterwerke ergänzt werden. Dies erlaubt eine noch präzisere Aussage bezüglich Variantenstudien und Sensitivitäten. Dazu wäre eine Überprüfung des Energieverbrauchs einer 5-Feld-Schaltanlage sowie der HLK-Anlagen der einzelnen Gebäude erforderlich. Eine detailliertere Materialisierung würde es ermöglichen, den Einfluss des SF₆-Gases genauer zu untersuchen. Der vorliegende Bericht stellt die Grundlage für die Entwicklung eines Baustandards dar.

7 Empfehlung

Die Resultate der Variantenuntersuchung sowie der Sensitivitätsanalyse lassen keine eindeutigen Schlüsse zu. Aufgrund der Unmöglichkeit, im Rahmen der Ökobilanz genaue Aussagen zu den Ergebnissen zu treffen, muss auch die Empfehlung relativiert werden.

Die Empfehlung für die reine Variantenuntersuchung wäre, die AIS-Schaltanlage der GIS-Schaltanlage vorzuziehen, sofern die Ergebnisse unter Berücksichtigung einer SF₆-Verlustrate von 0,3 % berechnet werden. Die AIS-Schaltanlage weist bei der Hauptwirkungsabschätzungsmethode «Methode der ökologischen Knappheit» sowie bei den «Treibhausgasemissionen» geringere Umweltauswirkungen auf.

Gemäss Angaben von Swissgrid beträgt die tatsächliche Verlustrate des SF₆-Gases im Betrieb 0,1 %. Bei einer Verlustrate von 0,1 % für SF₆-Gase, wie von Swissgrid angegeben, ist der Einsatz einer GIS-Schaltanlage anstelle einer AIS-Schaltanlage sowohl für bestehende als auch für in Planung befindliche Unterwerke zu empfehlen. Die GIS-Schaltanlage weist mit einer Verlustrate von 0,1 % im Vergleich zur AIS-Schaltanlage eine geringere Umweltauswirkung auf. Des Weiteren kann mittels einer GIS-Schaltanlage wertvolle Fläche eingespart werden. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft Anlagenkomponenten mit alternativen Medien wie beispielsweise «3M Novec 4710» oder «CleanAir» in Unterwerken auf Höchstspannungsebene zum Einsatz kommen werden. In diesem Fall wäre die GIS-Schaltanlage gegenüber der AIS-Schaltanlage im Vorteil, da sie unabhängig von der Verlustrate eingesetzt werden sollte.

Die Reduktion der Umweltauswirkungen des Energieverbrauchs kann mittels eines Strommix mit einem möglichst hohen Anteil an erneuerbaren Energien erzielt werden. Die Implementierung dieser Massnahme führt zu einer effektiven Reduktion der Umweltauswirkungen bei der AIS- sowie bei der GIS-Schaltanlage. Die Implementierung dieser Massnahme ist auch bei bereits bestehenden Unterwerken möglich. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse belegt, dass durch diese Massnahme ein Grossteil der Emissionen, die aus der konventionellen Produktion elektrischer Energie resultieren, verhindert werden kann.

Die Bereitstellung der Materialien ist mit signifikanten Umweltauswirkungen verbunden. Um diesen Umstand zu kompensieren, können generelle Massnahmen ergriffen werden. Eine Massnahme wäre der Einsatz von rezyklierten Materialien. Die Wahl zertifizierter Materiallieferanten erlaubt schliesslich die Überwachung der Wertschöpfungskette sowie deren ökologische bzw. nachhaltige Gestaltung. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Beschaffungswege möglichst kurz sind. Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Hinblick auf die Umweltfreundlichkeit der Materialien ist deren Langlebigkeit. Es wird empfohlen, darauf zu achten, dass die Materialien eine hohe Qualität aufweisen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer zu gewährleisten. Im Folgenden werden Empfehlungen für die Verwendung spezifischer Materialien ausgesprochen:

- **Betone:** Durch den Einsatz von Ersatzmaterialien kann eine signifikante Reduktion der Umweltauswirkungen von Betonen erzielt werden. Als effektive Massnahme kann der Einsatz von rezykliertem Beton genannt werden. Die höchsten Umweltauswirkungen von Betonen sind auf die Zementherstellung bzw. den Zement selbst zurückzuführen. Eine weitere effektive Massnahme ist die Verwendung von Beton mit einem möglichst geringen Zementgehalt. Diesbezüglich sind Betone zu nennen, die mit Schlacke oder Flugasche angereichert wurden, sowie Betone mit einem innovativen Mischverhältnis. Des Weiteren kann auf eine umweltfreundliche Vorkette geachtet werden, indem

erneuerbare Energien in der Zementherstellung zum Einsatz kommen. Dies ist jedoch aufgrund der hohen benötigten Temperaturen des Ofens nur teilweise möglich. Der Stromverbrauch könnte jedoch mittels erneuerbarer Energien abgedeckt werden.

- **Gesteinskörnungen:** Eine Reduktion der Umweltauswirkungen der Gesteinskörnung kann durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen gewährleistet werden. Grundsätzlich ist der Einsatz von Sekundärmaterialien gegenüber Primärmaterialien zu bevorzugen. Eine weitere Massnahme kann in der lokalen Beschaffung bestehen. Es empfiehlt sich, darauf zu achten, dass die Gesteinskörnung möglichst in der Schweiz produziert werden kann. Dies erlaubt zum einen die Anwendung eines Abbaustandards mit strengeren Richtlinien als im Ausland und zum anderen eine Reduktion der Transportstrecken.
- **Stahlbetone:** Die vorliegenden Empfehlungen zu den Betonen und Gesteinskörnungen finden ebenfalls Anwendung auf die Stahlbetone. Eine weitere Massnahme, um die Umweltauswirkungen von Stahlbetonen zu reduzieren, ist der Einsatz von Sekundärstahl. Der Einsatz von hochfestem Stahl führt zudem zu einer optimierten Tragfähigkeit, so dass eine Reduktion der erforderlichen Bewehrungsmenge möglich ist.
- **Stahl und andere Metalle:** In Bezug auf die Reduktion der Umweltauswirkung erweist sich die sogenannte «goldene Regel» insbesondere für Stahl und andere Metalle als massgeblich. Diese besagt, dass anstelle von Primärmaterialien Sekundärmaterialien zum Einsatz kommen sollten. Der Grund hierfür liegt in der energieintensiven Gewinnung und Herstellung von Metallen. Der Einsatz von Sekundärmetallen ermöglicht zum einen die Einsparung der Gewinnung der Erze und zum anderen eine weniger energieintensive Aufbereitung im Vergleich zur Primärmetallaufbereitung. Eine weitere effektive Massnahme besteht in der Auswahl von Lieferanten, die einen möglichst nachhaltigen Produktions- bzw. Aufbereitungsprozess der Metalle gewährleisten.
- **Polymere:** Durch den Einsatz von biobasierten Polymeren, welche aus Cellulose oder Stärke gewonnen werden, sowie von rezyklierten Polymeren können die Umweltauswirkungen gesenkt werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, reine Polymere und keine Polymergemische zu verwenden. Letztere können nach ihrer Lebensdauer nicht rezykliert werden und müssen folglich in der Kehrichtverbrennungsanlage thermisch verwertet werden. Die Polymerherstellung ist mit einem hohen Chemikalienverbrauch verbunden. Daher ist es empfehlenswert, bei der Auswahl von Lieferanten neben der Qualität der Produkte auch den Einsatz von alternativen Herstellungsprozessen oder «grüner Chemie» zu berücksichtigen.

Die Effektivität der Beeinflussung der Nachhaltigkeit eines Bauprojekts ist in einer früheren Planungsphase am grössten. Daher ist es unerlässlich, bereits in der Phase der Vorplanung die Wahl der Materialien und Anlagenkomponenten zu berücksichtigen. In Konsequenz lassen sich drei Massnahmen ableiten, die eine effiziente und umweltfreundliche Gestaltung der Unterwerke ermöglichen:

1. Der Einsatz alternativer Medien zu SF₆-Gas,
2. die Wahl eines Strommix aus erneuerbaren Energien sowie
3. der Einsatz rezyklierter Baumaterialien

stellen Massnahmen dar, die eine effiziente und umweltfreundliche Gestaltung der Unterwerke ermöglichen.

Um ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte in Einklang zu bringen, ist es zweckmässig, für bereits in der Planungsphase beabsichtigte Netzerweiterungen einen Massnahmenplan zu erstellen und die Ökoeffizienz der Massnahmen mittels einer Ökoeffizienzanalyse zu beurteilen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass nicht nur die Umweltauswirkungen der geplanten Massnahmen berücksichtigt werden, sondern auch die ökonomischen Gesichtspunkte stets im Auge behalten werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)“, Okt. 2006.
- [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] Sustainability, PRé, „Herausgeber der Ökobilanzsoftware SimaPro“. PRé Sustainability, Amersfoort Netherlands, 2020.
- [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, United Kingdom and New York USA, 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 u. a., „Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, ecoinvent report No. 3“, Zürich, 2007.
- [15] Atheron, J., „Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles“, S. 59–60, 2007.
- [16] D. S. Glomb, M. Göppel, und P. Pilzecker, „‘Alternative Gase’ und Gasmischungen Teil 1“, Zugriffen: 18. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://dilo.eu/fileadmin/dilo_de/9._Unternehmen/13._Downloads/1._Login/2._PDFs/DILO-White-Paper_2020_D.pdf