

Ökobilanzierung für die Wildtierüberführung A1 im Kanton Thurgau



Quelle Titelbild: Olaf Kühne, Thurgauer Zeitung 27.09.2022

Verfasser

Thomas Pohl
Sandra Haessig

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

Datum: 26. März 2024

Im Auftrag der Jagd- und Fischereiverwaltung des Kantons Thurgau,
Projektleitung: Michael Vogel

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	5
1.1 Ausgangslage und Problemanalyse	5
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Berater	6
1.4 Stand des Wissens	6
2 Methodik und Vorgehen	8
2.1 Methodische Grundlagen	8
2.2 Review	10
2.3 Anwendung der Methode	10
3 Ergebnisse	36
3.1 Ökobilanzergebnisse für das Referenzszenario: Stahlbeton versus Holz	36
3.2 Umweltwirkung in der Herstellungsphase	38
3.3 Umweltwirkung in der Entsorgungsphase	39
3.4 Szenarien - Sensitivitätsanalyse	40
4 Interpretation und Schlussfolgerung	47
Referenzen	49
Verzeichnisse	51
Begriffe und Abkürzungen	51
Abbildungen	52
Tabellen	53
Anhang: Verzeichnis des elektronischen Anhangs	54

Zusammenfassung

Im Kanton Thurgau soll eine Wildtierüberführung errichtet werden, um als Landschaftsverbindung, die durch die Autobahn A1 verinselte Ökozonen mit weiteren Wildtierzonen wieder zusammenzuführen. Nicht nur die Förderung der Biodiversität durch die Vernetzung der Ökozonen, sondern auch die Minimierung der Umweltwirkung des Bauwerks sind ein grosses Anliegen des geplanten Bauprojekts zur Landschaftsverbindung TG 12 im Kanton Thurgau.

In diesem Projekt wird im Auftrag der Jagd- und Fischereiverwaltung des Kantons Thurgau eine vergleichende Ökobilanz von vier Ausführungsvarianten zweier Tragwerke für die Wildtierüberführung TG 12 aus Holz und Stahlbeton erstellt. Dabei werden folgende vier Varianten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen mittels der Ökobilanz untersucht:

- Variante 1: Stahlbetonplatte mit Mittelstütze
- Variante 2: Stahlbetonplatte ohne Mittelstütze
- Variante 3: Holztragwerk mit Mittelstütze
- Variante 4: Holztragwerk ohne Mittelstütze

In allen Varianten werden das Fundament, die Hinterfüllung sowie Aufschüttung betrachtet. Zwischen Tragwerk und Überdeckung wird nur bei den beiden Holzvarianten eine mehrschichtige Abdichtung eingebaut. Dies ist bei der Betonvariante bautechnisch nicht notwendig.

Rahmenbedingungen und Systemgrenzen

Die funktionale Äquivalenz der vier Varianten ist die Überquerung einer richtungsgetretenen zweispurigen Kantonsstrasse für Wildtiere auf einer Länge von 50 m für einen Zeitraum von 100 Jahren.

Die Ökobilanz umfasst die Herstellungsphase der Baumaterialien, die Errichtung des Bauwerks, den Betrieb und Unterhalt (Instandhaltungs- und Instandsetzungsmassnahmen) sowie die Rückbau- und Entsorgungsprozesse einer Wildtierüberführung.

Methodik und Vorgehen

Die Umtec Technologie AG (UTech AG) erarbeitete die Ökobilanz gemäss den KBOB-Richtlinien v6.0 [1] und verwendet die Ökobilanzmethoden der ökologischen Knappheit (UBP), die Treibhausgasemissionen (GWP) und den kumulierten Energieaufwand (KEA).

Umweltbelastungspunkte (UBP 2021): Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Lärm.

Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100a): Dieses Wirkungsmodell beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase auf die Erwärmung des Klimas, bezogen auf die Leitsubstanz CO₂.

Kumulierter Energieaufwand (KEA): Dieses Wirkungsmodell quantifiziert den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger, Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern sowie auch den Energieaufwand erneuerbarer Energieträger. In der vorliegenden Studie wird nur

der nicht-erneuerbare Anteil des kumulierten Energieaufwand betrachtet. Dieser wird auch als «Graue Energie» bezeichnet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stahlbetonvariante mit Mittelstütze in Bezug auf ihre Treibhausgasemissionen, graue Energie und Gesamtumweltbelastung (UBP) besser oder gleich abschneidet wie die Holzvariante mit Mittelstütze. Die Varianten ohne Mittelstützen weisen generell die höchsten Umweltauswirkungen bei allen Wirkungsmethoden auf.

- Einfluss von Instandsetzungsmassnahmen: Die Notwendigkeit von Instandsetzungsmassnahmen bei den Holzvarianten beeinflusst die Gesamtbilanz negativ. Das 'Best Case' Szenario mit reduzierten Instandsetzungsmassnahmen zeigt bei der Holzvariante mit Mittelstütze günstigere Umweltauswirkungen, liegt aber innerhalb der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten im Vergleich zur Stahlbetonvariante.
- Herstellungsphase: Bei allen Varianten trägt die Herstellungsphase signifikant zu den gesamten Umweltauswirkungen bei, insbesondere die Herstellung von Beton und Stahl bei den Stahlbetonvarianten und die Herstellung von Brettschichtholz bei den Holzvarianten.
- Entsorgungsphase: Die Entsorgung von Beton und Stahl dominiert die Umweltwirkungen dieser Phase, wobei bei den Holzvarianten auch die Verbrennung von Holz und Abdichtungsmaterialien relevant ist.

Empfehlungen

Aus ökologischer Sicht wird die Stahlbetonvariante mit Mittelstütze empfohlen, da sie in den meisten Wirkungskategorien die günstigsten oder vergleichbaren Werte gegenüber der Holzvariante mit Mittelstütze aufweist.

Die Holzvariante mit Mittelstütze könnte unter bestimmten Bedingungen und je nach Gewichtung der Umweltindikatoren ebenfalls eine Alternative darstellen, insbesondere wenn die Instandsetzung minimiert werden kann. Dies ist zurückzuführen auf das 'Best Case' Szenario, in welchem reduzierte Massnahmen bilanziert werden. Im 'Best Case' Szenario und gemäss der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) und der Treibhausgasemissionen weist die Holzvariante mit Mittelstütze den geringsten Wert auf, die Unterschiede liegen jedoch innerhalb der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten (Streubereich der Fehlerindikatoren in den Abbildungen) im Vergleich zur Stahlbetonvariante mit Mittelstütze.

Übergeordneter Nutzen der Wildtierüberführung

Die Errichtung von Wildtierüberführungen ist ein bedeutender Schritt im Schutz der Biodiversität. Obwohl die Herstellung und der Bau dieser Überführungen einen ökologischen Fussabdruck hinterlassen, übersteigt der langfristige Nutzen für die Umwelt bei weitem die negativen Auswirkungen. Wildtierüberführungen tragen massgeblich zur Erhaltung empfindlicher Ökosysteme bei, indem sie Lebensräume verbinden und das Risiko von Unfällen mit Wildtieren reduzieren. Dieser Aspekt sollte in einer ganzheitlichen Betrachtung nicht vernachlässigt werden.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemanalyse

Im Kanton Thurgau soll eine Wildtierüberführung errichtet werden, um als Landschaftsverbindung, die durch die Autobahn A1 verinselte Ökozonen mit weiteren Wildtierzonen wieder zusammenzuführen bzw. zu vernetzen. Nicht nur die Förderung der Biodiversität durch die Vernetzung der Ökozonen, sondern auch die Minimierung der Umweltwirkung des Bauwerks sind ein grosses Anliegen des geplanten Bauprojekts zur Landschaftsverbindung TG 12 im Kanton Thurgau. Auch die Minimierung der Umweltwirkung der Errichtung sowie des Betriebs und des Unterhalts der geplanten Wildtierüberführung sind für den Kanton Thurgau von zentraler Bedeutung. Deshalb soll eine vergleichende Ökobilanz für vier Ausführungsvarianten der Wildtierüberführung erstellt werden. Dabei sollen die Umweltwirkungen des Baus (inkl. der Vorkette der Materialproduktion und -lieferung), des Betriebs und des Unterhalts inkl. Rückbaus und Entsorgung der Wildtierüberführung ermittelt werden.

Aktuell befindet sich das Projekt in der Projektphase des Vorprojekts. Dabei wurden vier Ausführungsvarianten erarbeitet: Eine Wildtierüberführung mit einer Stahlbetonplatte mit oder ohne Mittelstütze, sowie eine Wildtierüberführung mittels Holztragwerk mit oder ohne Mittelstütze. Bauherrin ist die Baudirektion des Kantons Thurgau, wobei das Tiefbauamt sowie die Jagd- und Fischereiverwaltung des Kantons Thurgau involviert sind. Bevor das Projekt nun in die Projektphase des Bauprojekts übergeht, soll der Ökobilanzvergleich der ausgearbeiteten Varianten erstellt werden. Dazu hat die Jagd- und Fischereiverwaltung des Kantons Thurgau die auf Tiefbau-Ökobilanzen spezialisierte Umweltberatungsfirma Umtec Technologie AG (nachfolgend kurz UTech genannt) beauftragt.

1.2 Zielsetzung

In diesem Projekt soll eine vergleichende Ökobilanz von je zwei Varianten eines Tragwerks für die Wildtierüberführung im Kanton Thurgau aus Holz bzw. Stahlbeton erstellt werden. Dabei werden folgende vier Ausführungsvarianten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen mittels der Ökobilanz untersucht:

- Variante 1: Stahlbetonplatte mit Mittelstütze
- Variante 2: Stahlbetonplatte ohne Mittelstütze
- Variante 3: Holztragwerk mit Mittelstütze
- Variante 4: Holztragwerk ohne Mittelstütze

Neben dem Variantenstudium wird eine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf höchster Transparenz und vollständiger Dokumentation aller relevanter Aspekte eines Ökobilanzvergleichs der Varianten der Wildtierüberführungen. Dies beinhaltet die gewählte Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2] und die dazugehörigen generischen Einheitsprozesse, die getroffenen Annahmen (z.B. Transportdistanzen), die verwendeten Baumaschinen und Baumaschinenstunden (z.B. Stunden des Hydraulikbaggers sowie Grösse und Leistungsbedarf des Hydraulikbaggers) sowie die Materialmengen (z.B. Tonnen Stahl, Beton, Holz) inkl. deren Herkunft (vor allem beim Baustoff Holz). Ebenfalls werden alle Rahmenbedingungen der Ökobilanz wie die funktionelle Einheit, die technischen, geografische, zeitliche

und inhaltliche Systemgrenze, das Ziel und der Untersuchungsrahmen transparent und klar dokumentiert.

Die Ökobilanz wird weitestgehend in Konformität mit der ISO 14'040 (Abweichung betrifft die Verwendung gesamttaggrierender Methoden wie die Methode der ökologischen Knappheit «UBP» welche eine Schweizer Methode) und den spezifischen methodischen Setzungen gemäss KBOB (Bilanzierungsregeln V6.0, Stand Juni 2023) erstellt. Die Auswertung erfolgt anhand der im Baubereich üblichen und von der KBOB-Ökobilanzplattform empfohlenen Verfahren zur Wirkungsbilanzierung: Treibhauspotenzial (CO₂-Äquivalente), Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte «UBP») und kumulierter Energieaufwand (KEA).

1.3 Berater

Die Inhaber und Mitarbeitenden der UTech AG unterhalten zum Tiefbauamt des Kantons Thurgau keine persönliche Beziehung, Verpflichtung oder finanzielle Abhängigkeit und sind der wissenschaftlichen Neutralität verpflichtet. Die UTech AG greift auf eine langjährige Erfahrung in der Erstellung von Umweltbilanzen und Ökoeffizienzanalysen SEBI im Bereich der Abfalltechnik und Recycling sowie in der Bauwirtschaft zurück. Die UTech AG verfügt über ausgewiesene Kompetenz in den Bereichen der Bauwirtschaft und Ökobilanzierung von Rohstoffkreisläufen. Dies bezieht sich nicht nur auf die wissenschaftlich/technischen Aspekte, sondern auch auf die Einbindung wirtschaftlicher Betrachtungen.

1.4 Stand des Wissens

In der Schweiz werden hauptsächlich Wildtierüberführungen mit Stahlbetontragwerken geplant, entwickelt und errichtet. Die Betreiber der Strassennetze haben umfangreiche Erfahrung in Betrieb, Wartung, Instandhaltung und Reparatur dieser Bauwerke. Die Lebensdauer dieser Strukturen lässt sich anhand früherer Projekte zuverlässig einschätzen. In Luzern wurde im Auftrag des ASTRA die erste Wildtierüberführung aus Holz auf der Nationalstrasse NO2 realisiert. Der Hauptträger besteht aus Brettschichtholz und das Sekundärtragwerk aus Brettsperrholz. Obwohl in anderen Ländern häufiger Wildtierüberführungen mit Holztragwerken gebaut werden, liegen derzeit keine Informationen über den Werterhalt dieser Brücken vor. Es gibt Unsicherheiten bezüglich der erwarteten Lebensdauer der Strukturen sowie der erforderlichen Massnahmen für Wartung, Instandhaltung und Reparatur.

Bislang gibt es keine etablierte Methode zum Vergleich der Umweltauswirkungen von Brücken mithilfe von Ökobilanzen. Zudem fehlen bisher Daten zur Ökobilanzierung von Brücken, insbesondere für die Instandhaltung und –setzung und Reparatur von grösseren Holzbrücken gemäss dem aktuellen Stand der Technik.

Bisherige Ökobilanzstudien zum Vergleich verschiedener Brückenbauarten konzentrieren sich hauptsächlich auf grosse Strassenbrücken mit Stahl- oder Stahlbetontragwerken [3]. Bei kleineren Brücken werden auch Holztragwerke [4] berücksichtigt, manchmal in Kombination mit Beton [5]. Die meisten dieser Studien untersuchen den gesamten Lebenszyklus der Brücke. Insbesondere wird die Phase der Nutzung durch den Strassenverkehr stark gewichtet, wenn diese berücksichtigt wird [3]. Allerdings beschränken sich die meisten Studien auf den Unterhalt, die Instandhaltung und –setzung und Reparatur der Brücke. Die Annahme einer Lebensdauer von 100 Jahren ist dabei üblich.

Wenn die Umweltauswirkungen des Strassenverkehrs während der Nutzung vernachlässigt werden, dominiert in den meisten Studien die Herstellungsphase des Tragwerks. Dabei schneiden Stahlbetontragwerke im Vergleich zu Stahltragwerken besser ab [6]. Ein direkter Vergleich zwischen Holztragwerken und Stahl- bzw. Stahlbetontragwerken ist eher ungewöhnlich. Eine norwegische Studie [4] führt jedoch einen solchen Vergleich für kleinere Brücken (bis zu 450 m² Brückenträgeroberfläche) durch. Hierbei erzielt die Holzbrücke das beste Ergebnis in Bezug auf das Treibhauspotenzial, während die Stahlbetonvariante in allen anderen Umweltmodellen die geringsten Auswirkungen aufweist.

Der Kanton Zürich veröffentlichte 2021 eine Ökobilanz, in welcher zwei Varianten eines Tragwerks für eine Wildtierbrücke aus Holz bzw. Stahlbeton verglichen wurden [7]. Die betrachteten Tragwerke bestehen grösstenteils aus Holz bzw. komplett aus Stahlbeton. Bei beiden Varianten wurde eine Abdichtung zwischen Tragwerk und Überdeckung eingebaut und entsprechende Instandsetzungsarbeiten bilanziert. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Holzvariante in Bezug auf das Treibhauspotenzial deutlich besser abschneidet als die Stahlbetonvariante. Bei den Wirkungsmodellen der Grauen Energie und der ökologischen Knappheit liegen die Unterschiede innerhalb der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten. Die Ergebnisse werden auf die unterschiedlichen Massen des Bauwerkes (Holzvariante 2'400 t und Stahlbetonvariante 6'500 t) und die grössere Menge an Stahl im Gegensatz zur Holzvariante zurückgeführt. In der Studie wird erwähnt, dass der Unterschied zwischen den beiden Varianten kleiner wird, wenn bei der Holzvariante eine grössere Instandsetzung während der Nutzungsdauer erforderlich wird.

2 Methodik und Vorgehen

2.1 Methodische Grundlagen

Die UTech erarbeitet eine vergleichende Ökobilanz gemäss ISO 14040:2006 [8] bzw. ISO 14044:2006 [9]. Nach dieser Norm umfasst eine Ökobilanz die nachfolgenden Schritte:

i. Ziel- und Rahmenbedingungen

In diesem Schritt werden die Ziele der Studie festgelegt und die folgenden, wesentlichen Annahmen für die Analyse definiert:

- Auswahl der betrachteten Phasen im Lebenszyklus einer Wildtierüberführung (Herstellung, Bau, Nutzung etc.),
- Auswahl der in diesen Phasen analysierten Prozesse (z.B. Entsorgung),
- Definition der Nutzungsdauer der Wildtierüberführung,
- Definition der funktionalen Anforderungen an die Wildtierüberführung, die von allen betrachteten Varianten erfüllt werden müssen,
- Auswahl der Wirkungsmodelle, die für die Bewertung der Varianten verwendet werden (z.B. Umweltbelastungspunkte).

Die vorliegende Studie orientiert sich an der EN 15643-5 [10] für die Systemdefinition und die Beschreibung der funktionalen Einheit und an den Datenqualitätsrichtlinie der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2].

ii. Sachbilanz

In diesem Schritt werden die Emissionen und der Ressourcenverbrauch bzw. –Inanspruchnahme für sämtliche Prozesse der untersuchten Systeme erfasst bzw. abgeschätzt. Grundlagen dafür sind:

- Materialbedarf, Abfallmengen, Maschinenstunden der Bauprozesse, im Bauprozess entstehende Emissionen (z.B. durch Luftemissionen der Baumaschinen) und geplante Transportleistungen in den betrachteten Varianten des Bauprojekts.
- Daten zu den Prozessen der Nutzung, Instandhaltung, Instandsetzung und des Rückbaus der betrachteten Varianten des Bauwerks.
- Daten zu den Prozessen der Rohstoff-/Energiegewinnung, der Herstellung, der Entsorgung oder des Transports, die von Dritten bereitgestellt werden.

In der Sachbilanz werden die Mengen der kumulierten Emissionen und Ressourceninanspruchnahmen über den ganzen Lebensweg des Produkt-/Prozesssystems hinweg berechnet. Dafür werden verschiedene Annahmen getroffen, z.B. bei der Allokation von Emissionen im Falle von Kuppelproduktion.

Die vorliegende Studie orientiert sich an der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2]. Davon abweichende Annahmen werden dokumentiert.

iii. Wirkungsbilanz

In der Wirkungsbilanz wird beschrieben, wie sehr die verschiedenen Varianten die Umwelt belasten. Nach ISO 14040/44 [8, 9] oder EN 15643-6 [10] geht man dabei von einer Reihe allgemein akzeptierter Umweltproblemen aus – wie beispielsweise dem Treibhauseffekt oder der Zerstörung der Ozonschicht – und zeigt mit Hilfe von Wirkungsmodellen, wie stark die untersuchten Prozesse zu diesen Umweltproblemen beitragen. Man erhält so eine mehrdimensionale Bewertung und letztlich muss der Auftraggebende entscheiden, welchem Umweltproblem er die grösste Bedeutung beimisst. Alternativ dazu wird in der Schweiz seit vielen Jahren ein alternativer Bewertungsansatz propagiert, der zu einem Gesamtindex für alle Umweltbelastungen führt: die «Methode der ökologischen Knappheit» mit der Masseinheit «Umweltbelastungspunkte» (siehe Abbildung 1) [11]. Bewertungsmaßstab ist hier der aktuelle Zielerreichungsgrad der nationalen Umweltpolitik. International bezeichnet man den Ansatz allgemein mit dem Begriff «distance to target»: ein Umweltproblem ist umso schlimmer, je weiter ein Land von der Erreichung seiner problembezogenen Umweltziele ist. Dieser Ansatz ist aber nicht konform zur ISO 14040/44, da für solche Vergleiche keine Gesamtindizes in Ökobilanzen verwendet werden dürfen. In der Schweiz ist die Methode der ökologischen Knappheit jedoch besonders bei Entscheidungsträgern sehr etabliert und akzeptiert [12], [13] und [14].

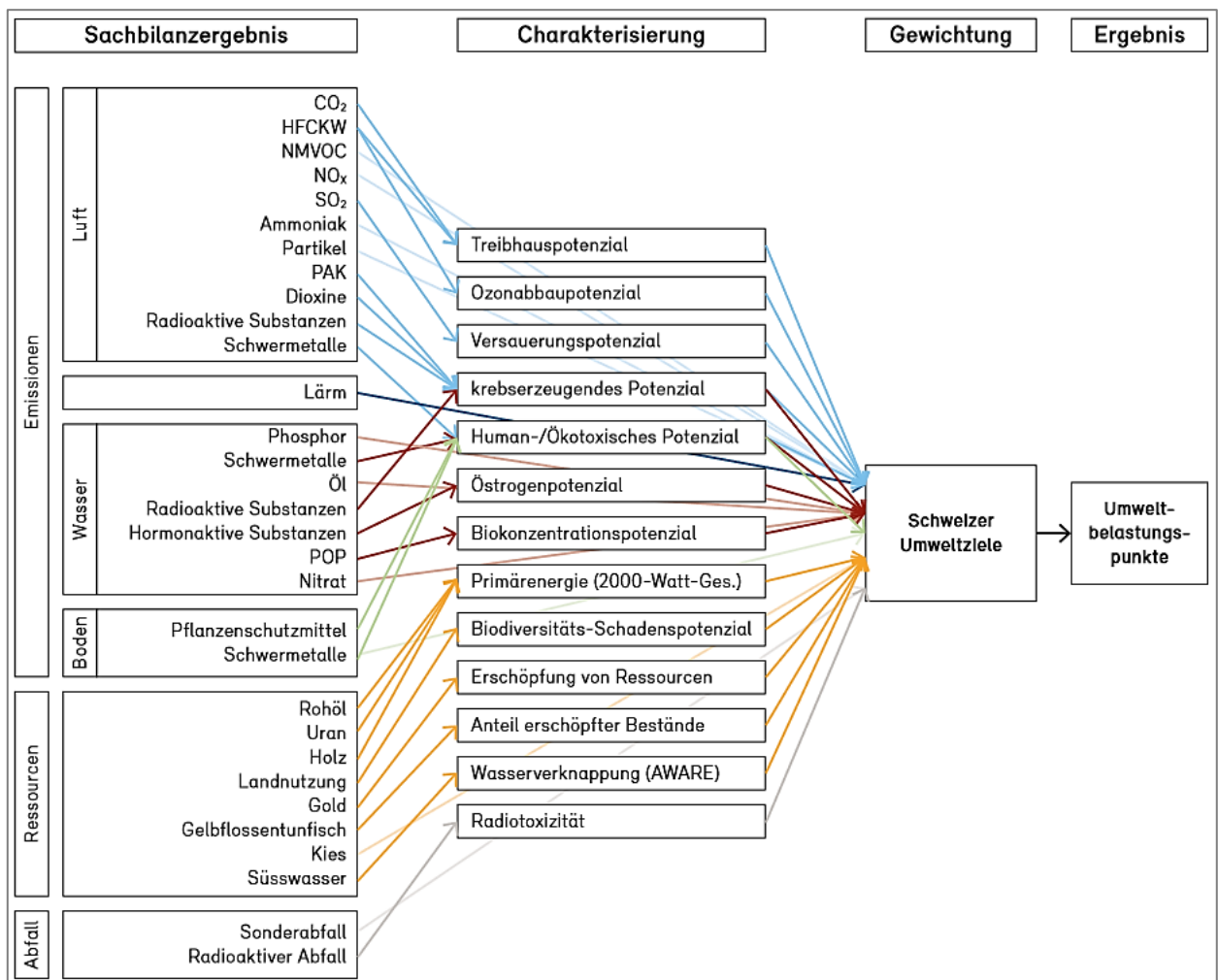


Abbildung 1: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels der UBP-Methode. Grundschematische Verknüpfung der Sachbilanz mit den Wirkungsmodellen (Charakterisierung) und dem Gesamtindex der ökologischen Knappheit (Gewichtung und Ergebnis), Quelle: [11]

iv. Auswertung und Interpretation

Im letzten Schritt der Anwendung der Methode werden die Ergebnisse der Wirkungsbilanz der betrachteten Varianten aufgrund der Zielsetzungen der Studie ausgewertet und interpretiert. Dies kann im Verlauf der Untersuchung dazu führen, dass die im ersten Schritt festgelegten Annahmen der Analyse angepasst werden (z.B. die Systemgrenzen oder die Auswahl der Wirkungsmodelle). Dadurch wird die Aussagekraft der Untersuchung in einem iterativen Prozess schrittweise verbessert.

Ein wichtiger Teil von Auswertung und Interpretation ist die Unsicherheitsanalyse. Dabei unterscheidet man zwischen Datenunsicherheiten, die mit Hilfe statistischer Methoden analysiert werden, und Modellunsicherheiten, die man durch Szenarioanalysen abschätzen kann. In der vorliegenden Studie werden beide Methoden angewandt.

2.2 Review

Zur Absicherung der Qualität wird ein projektbegleitendes Review durch Prof. Dr. Susanne Kytzia durchgeführt. Susanne Kytzia leitete das Projekt der ökologischen Begleitung der Wildtierüberführung im Kanton Zürich. Der Reviewerin wurde periodisch Einblick in die Daten und das Ökobilanzmodell gewährt. Ebenso wurde der Bericht von ihr korreferiert.

2.3 Anwendung der Methode

2.3.1 Ziele und Rahmenbedingungen

2.3.1.1 Ziel der Studie

Das Ziel der Studie ist der Vergleich der Umweltwirkungen von vier Varianten einer Wildtierüberführung:

- Varianten

- 1: Stahlbetonplatte mit Mittelstütze (Abbildung 2)

Das Tragwerk aus Stahlbeton ist auf die Stützen und Foundation abgestützt. Das Fundament der Brücke besteht aus einem Streifenfundament. Zwischen dem Tragwerk und der Überdeckung ist keine Abdichtung vorgesehen.

- 2: Stahlbetonplatte ohne Mittelstütze (Abbildung 3)

Das Tragwerk aus Stahlbeton ist auf die Stützen und Foundation abgestützt. Das Fundament der Brücke besteht aus einer Pfahlfundation und Bohrpfählen. Wegen der fehlenden Mittelstütze werden Bohrpfähle benötigt. Die Stahlbetonplatte wird zusätzlich mit Vorspannstahl verstärkt. Zwischen dem Tragwerk und der Überdeckung ist keine Abdichtung vorgesehen.

- 3: Holztragwerk mit Mittelstütze (Abbildung 4)

Das Tragwerk aus Brettschichtholzträgern ist auf die Stützen und Foundation aus Stahlbeton abgestützt. Das Fundament der Brücke besteht aus einem Streifenfundament. Zwischen dem Tragwerk und der Überdeckung wird eine mehrschichtige Abdichtung eingebaut. Diese besteht aus einer Brettsperrholzplatte, Epoxidharzversiegelung, Polymerbitumendichtungsbahnen und einem Gussasphalt.

- 4: Holztragwerk ohne Mittelstütze (Abbildung 5)

Das Tragwerk aus Brettschichtholzträgern ist auf Stützen und Foundation aus Stahlbeton abgestützt. Das Fundament der Brücke besteht aus einer Pfahlfundation und Bohrpfähle. Wegen der fehlenden Mittelstütze werden Bohrpfähle benötigt. Zwischen dem Tragwerk und der Überdeckung wird eine mehrschichtige Abdichtung eingebaut. Diese besteht aus einer Brettsperrholzplatte, Epoxidharzversiegelung, Polymerbitumendichtungsbahnen und einem Gussasphalt.

Zum Angleich des Bauwerks an das umliegende Terrain wird es hinterfüllt und künstlich aufgeschüttet mit Kies, Naturboden und Humus. Zwischen Tragwerk und Überdeckung wird nur bei den beiden Holzvarianten eine mehrschichtige Abdichtung eingebaut. Dies ist bei der Betonvariante gemäss Auftragsgeber bautechnisch nicht notwendig.

Die Bepflanzung des künstlich aufgeschütteten Terrains wird vernachlässigt. Weiter werden Kleinteile wie kleinere Metallteile zur Befestigung, Schrauben oder Schutzbehandlungen des Holzes u.ä. vernachlässigt.

Längsschnitt B-B 1:200

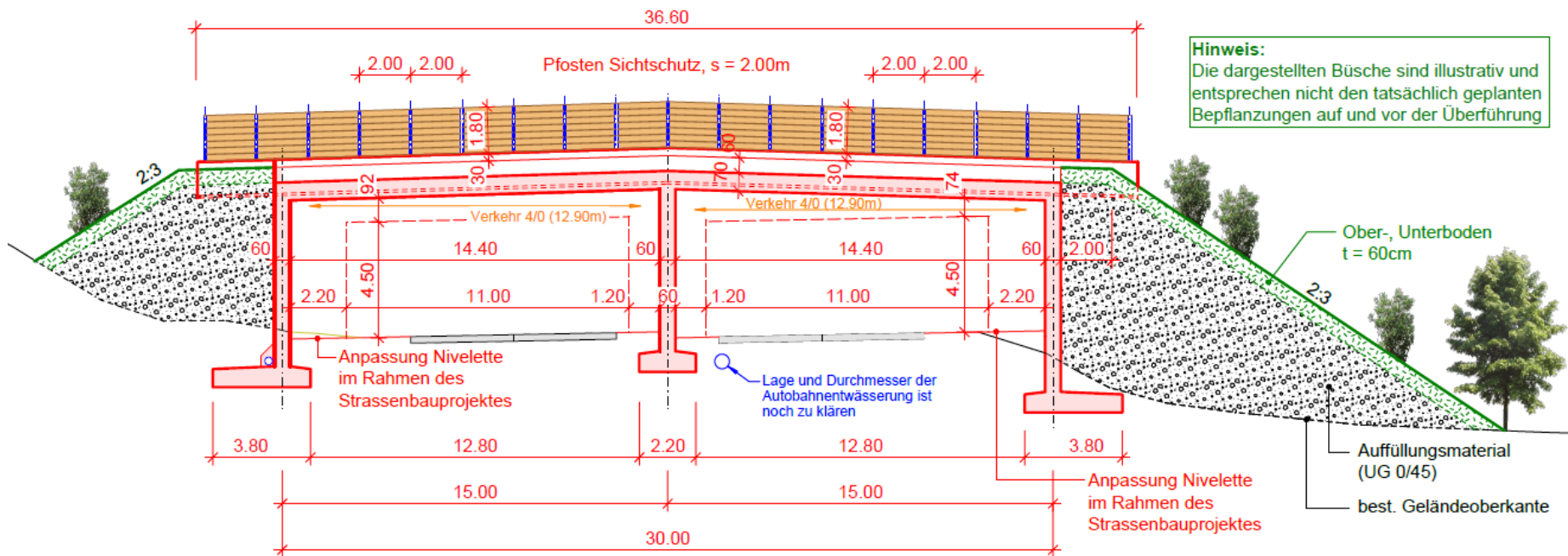


Abbildung 2: Variante 1 - Stahlbetonplatte mit Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023)

Längsschnitt B-B 1:200

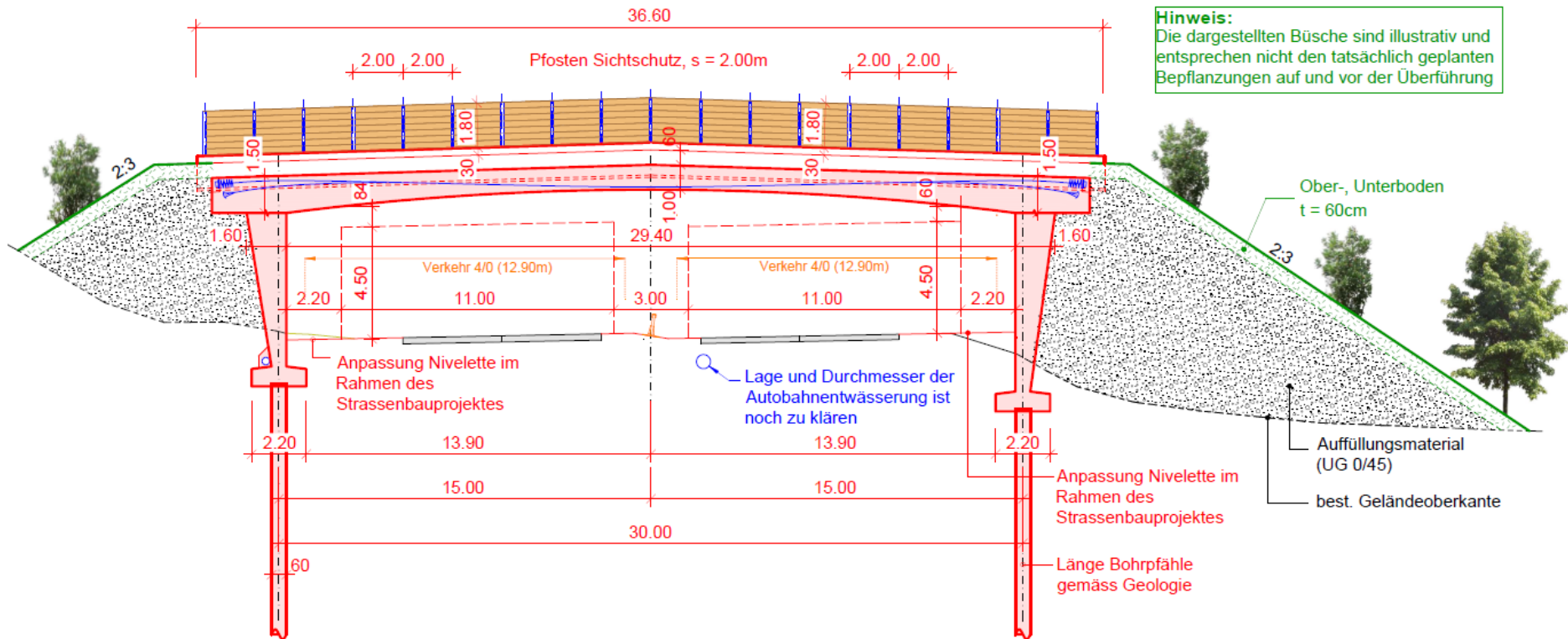


Abbildung 3: Variante 2 - Stahlbetonplatte ohne Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023)

Längsschnitt B-B 1:200

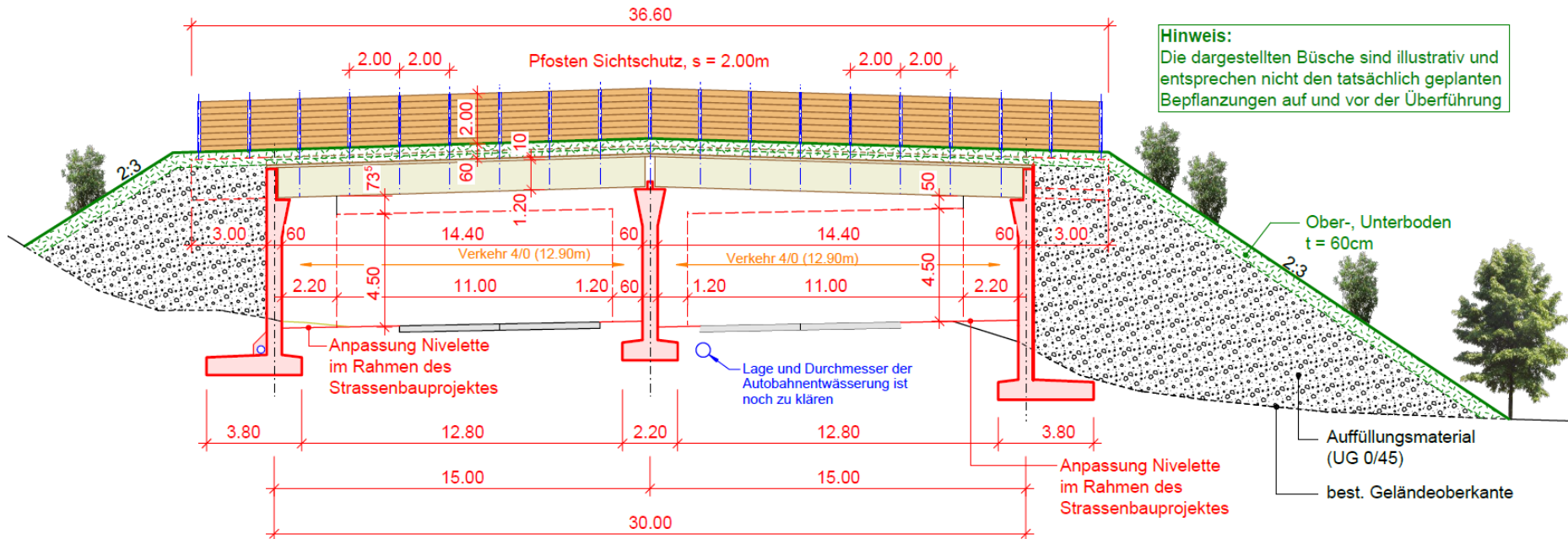


Abbildung 4: Variante 3 - Holztragwerk mit Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023)

Längsschnitt B-B 1:200

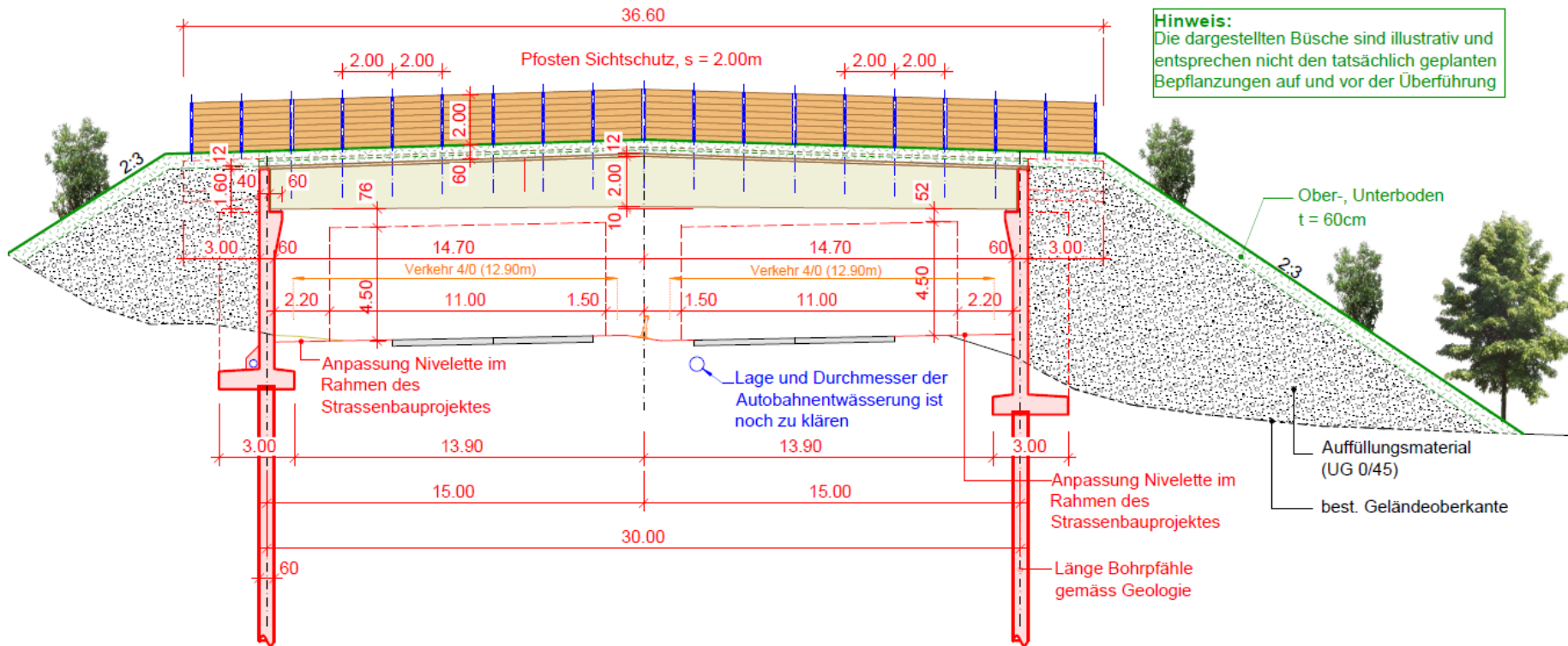


Abbildung 5: Variante 4 - Holztragwerk ohne Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023)

2.3.1.2 Szenarien

Die vier Varianten der Wildtierüberführung werden jeweils in vier Szenarien modelliert und verglichen. Die Szenarien unterscheiden sich zum Referenzszenario entweder in der Herstellung und der Transportdistanzen des Holzes (Holz-Herstellungsszenario) oder den Instandsetzungsmassnahmen ('Best Case' und 'Worst Case' Szenario). Eine Übersicht über die Instandsetzungsmassnahmen kann der Tabelle 1 entnommen werden.

- Referenzszenario
 - Herkunft Holzmaterial aus Deutschland, Verarbeitung in der Schweiz
 - Stahlbetonvarianten: Massnahmen während Nutzungsdauer von 100 Jahren
 - Einmalige Reprofilierungsarbeiten an Betonstützen
 - Holzvarianten: Massnahmen während Nutzungsdauer von 100 Jahren
 - Austausch $\frac{1}{2}$ der Brettsperrholzplatte und der Abdichtung nach 25 Jahren
 - Austausch gesamte Brettsperrholzplatte und gesamte Abdichtung nach 50 Jahren
 - Einmalige Reprofilierungsarbeiten an Betonstützen
 - Austausch $\frac{1}{2}$ der Brettsperrholzplatte und der Abdichtung nach 75 Jahren
 - Rückbau und Entsorgung aller Materialien nach 100 Jahren
- Holz-Herstellungsszenario
 - Unterscheidet sich lediglich in der Herstellung und dem Transport des Holzmaterials aus Schweden (stellvertretend für Holzherkunft Skandinavien) zum Referenzszenario. Verarbeitet wird das Holz in der Schweiz.
- 'Best Case' Szenario
 - Herkunft Holzmaterial wie im Referenzszenario
 - Unterscheidet sich in einem verringerten Ausmass der Instandsetzungsmassnahmen der Holzbrücken zum Referenzszenario (siehe Tabelle 1). Keine Anpassungen der Instandsetzungsmassnahmen der Varianten mit Stahlbetonplatte gegenüber dem Referenzszenario.
- 'Worst Case' Szenario
 - Herkunft Holzmaterial wie im Referenzszenario
 - Unterscheidet sich in einem erhöhten Ausmass der Instandsetzungsmassnahmen der Holzbrücken zum Referenzszenario (siehe Tabelle 1). Keine Anpassungen der Instandsetzungsmassnahmen der Varianten mit Stahlbetonplatte gegenüber dem Referenzszenario.

Tabelle 1: Instandsetzungsmassnahmen für alle Varianten und Szenarien

Instandsetzungsmassnahmen	Referenz- und Transportszenario		'Best Case' Szenario		'Worst Case' Szenario	
	Beton	Holz	Beton	Holz	Beton	Holz
25 Jahre						
Ersatz ½ Brettsperrholzplatte		X				x
Ersatz ½ Abdichtungen und Versiegelung		X				x
50 Jahre						
Einmalige Reprofilierungsarbeiten Punktuelle Verbesserungen im Spritzbereich der Autos.	x	X	x	x	x	x
Ersatz gesamte Brettsperrholzplatte		X		x		x
Ersatz gesamte Abdichtungen und Versiegelung		X		x		x
¼ Ersatz Brettschichtholzträger						x
75 Jahre						
Ersatz ½ Brettsperrholzplatte		X				x
Ersatz ½ Abdichtungen und Versiegelung		X				x

2.3.1.3 Funktionale Äquivalenz

Die funktionale Äquivalenz der vier Varianten ergibt sich gemäss EN 15643-5 aus den funktionalen und/oder technischen Anforderung des Bauwerks. Sie sind wie folgt definiert:

Überquerung der A1 von Wildtieren auf einer Länge von 50 m für einen Zeitraum von 100 Jahren mit folgenden technischen Eigenschaften:

- Lichtraumprofil von ca. 28 m und einer Höhe von 4.50 m bei den Varianten ohne Mittelstütze sowie zwei Lichtraumprofile von je ca. 12 m und einer Höhe von 4.50 m bei den Varianten mit Mittelstütze.
- Die Überdeckung überspannt die richtungsgetrennte vierspurige Strasse.
- Die Überdeckung wird mit einer ca. 60 cm starken Auffüllung überschüttet.

Die vorliegende Studie betrachtet die Nutzung während des gesamten Zeitraums sowie die Bauzeit für Errichtung und Rückbau.

2.3.1.4 Übergeordneter Nutzen einer Wildtierüberführung

An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass in der vorliegenden Ökobilanz-Studie ein Variantenvergleich auf Basis unterschiedlich materialisierter Varianten der Wildtierüberführung A1 TG im Vordergrund steht. Der übergeordnete Nutzen, der eine Wildtierüberführung liefert, ist schwierig bis gar nicht abbildbar mittels Methoden der Ökobilanz. Erste Berechnungen in diese Richtung wurde von der UTech für das Tiefbauamt des Kantons Zürich vorgenommen [7]. Diese Berechnungen haben gezeigt, dass der Umweltnutzen für die Steigerung der Biodiversität die Umweltbelastung der Brücke (Herstellung der Materialien, Errichtung, Unterhalt etc.) um ein x-

faches übersteigt [15]. Gerade mit Blick auf die periodisch vom BAFU veröffentlichten Umweltberichte der Schweiz, die den Zustand der Umwelt analysieren und einordnen, gilt es dem Aspekt der Förderung der Biodiversität hohe Wichtigkeit zu zuordnen. Stimmt die Standortwahl und passt die Ausgestaltung der Wildtierüberführung, so liefert diese einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Biodiversität.

2.3.1.5 Systemgrenzen

Von der Rohstoffgewinnung, Herstellung der Baumaterialien, Transport der Baumaterialien zur Baustelle, dem Bau, der Nutzung und dem Unterhalt über Rückbau, Abtransport der Rückbaustoffe zur Entsorgung / Verwertung bis zur Entsorgung / Verwertung (Recycling, Verbrennung, Deponierung)

Gemäss EN 15643-5 [10] (siehe dazu Abbildung 6) 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 B5) sowie die Entsorgungsphase (Module C1 bis C4). Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D aus Abbildung 6) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt.

In der Herstellungsphase werden die Rohstoffgewinnung, der Transport und die Herstellung der mengenmässig wichtigsten verwendeten Baumaterialien bzw. Bauelemente betrachtet (ca. 98% der Masse aller eingesetzten Materialien). Der Schwerpunkt liegt auf den verwendeten Baumaterialien Holz und Stahlbeton. Für diese beiden Materialien wurden die Prozessketten der Herstellung möglichst realistisch beschrieben.

In der Errichtungsphase werden der Transport der Baumaterialien bis zur Baustelle und die Bauprozesse betrachtet. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Wildtierüberführung selbst (inkl. Hinterfüllung und Überdeckung). Alle Prozesse und Materialien dieses Projektes, die mit dem Strassen- bzw. Leitungsbau verbunden sind, werden vernachlässigt.

In der Nutzungsphase werden nur diejenigen Auswirkungen betrachtet, die sich aus dem Betrieb, dem Unterhalt und der Werterhaltung des Bauwerks ergeben. Die Nutzung des Bauwerks hingegen durch die Verkehrsteilnehmer wird vernachlässigt (z.B. der Energieverbrauch der Fahrzeuge auf der Strasse, die durch die Wildtierüberführung überdeckt wird). Während der Nutzungsdauer von 100 Jahren werden drei Szenarien (Reprofilierung von Betonstützen bei allen Varianten, unterschiedlicher Ersatz von Brettschichtholzträger und/oder Brettsperrholzplatte) zur Instandsetzung angenommen.

In der Entsorgungsphase wird das Bauwerk rückgebaut und die dabei entstehenden Materialien werden wiederverwendet, rezykliert oder als Abfälle entsorgt. Es werden alle damit verbundenen Prozesse (inkl. Transporte) betrachtet unter Annahme des aktuellen Stands der Technik. Gemäss EN 15643-5 werden die Prozessketten der Entsorgungsphase soweit betrachtet bis das rückgebaute Material den Status «Ende der Abfalleigenschaft» erreicht.

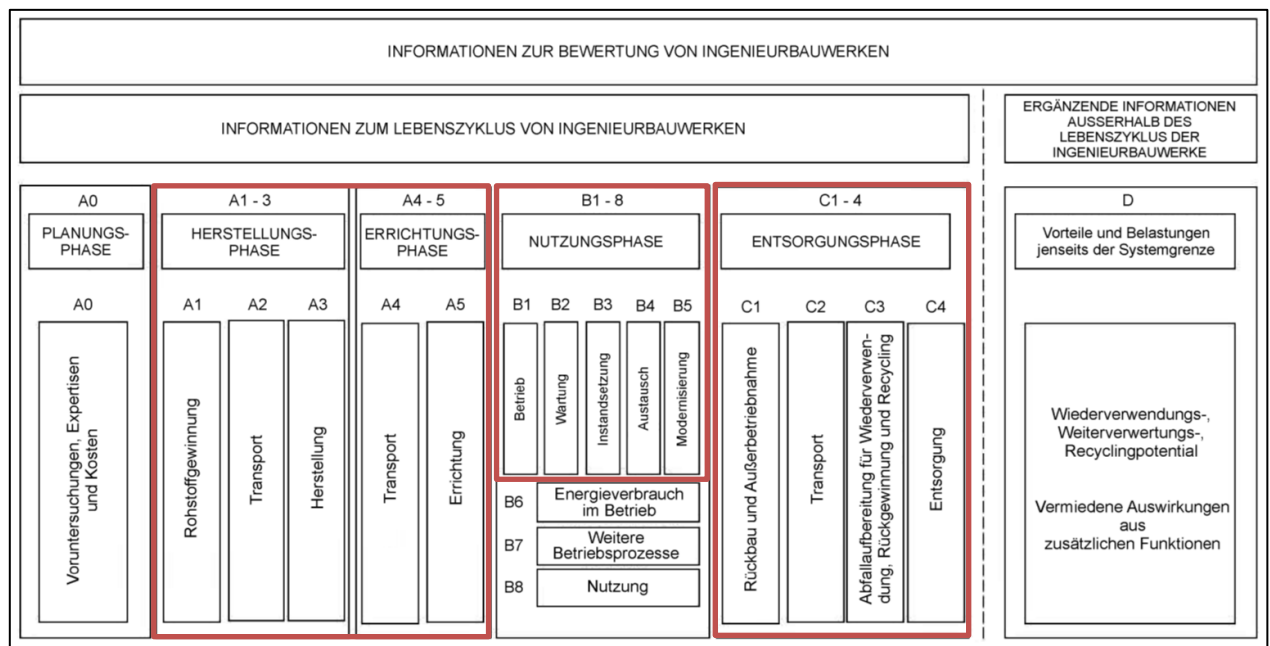


Abbildung 6: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5 [10].

2.3.2 Sachbilanz

Die Ökobilanzen der vier Varianten wurden auf der Grundlage der bestehenden Dokumentation der Varianten des Projektes auf der Stufe des Vorprojekts erstellt. Datenlücken zu den technischen Vordergrunddaten (Materialmengen) wurden gezielt mit dem involvierten Ingenieurbüro (Bänziger Partner) ergänzt.

Die wichtigste Datengrundlage für die Sachbilanzierung ist die Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2]. Für die Modellierung einzelner Prozesse und die Analyse der Szenarien wurden ausserdem ergänzend dazu verschiedene Datenquellen genutzt, welche auch wiederum auf der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2], basieren.

Im elektronischen Anhang werden sämtliche Datenquellen dokumentiert.

2.3.2.1 Quellen und Hintergrunddaten

Neben der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2] haben wir auch Daten der KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [16] und den Betonsortenrechner [17] und Holzrechner [18] von Treeze (Rolf Frischknecht) verwendet. Zusätzlich wurde das auf Tiefbauökobilanzen spezialisierte Online-Tool «ECO₂nstruct» des Schweizerischen Infrastrukturbau-Branchenverbandes Infra Suisse verwendet [19]. Diese Tools basieren auf den Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2016). Die KBOB-Liste Ökobilanzen im Baubereich basieren auf den Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) und gewährleisten damit eine in sich kohärente Datengrundlage und Übereinstimmung der methodischen Setzungen der vorliegenden Ökobilanz.

Zur Berechnung der Anzahl Maschinenstunden, die für die Erstellung und den Rückbau notwendig sind, wurde auf den Technik- und Betriebswirtschaftsvierer (nachfolgend kurz TB-Viewer genannt) des Schweizerischen Baumeisterverband (SBV) zurückgegriffen [20]. Der TB-Viewer ent-

hält Standard-Analysen mit Positionen zu benötigten Baumaschinen für diverse Bauprozesse. Anhand der ausgewählten Bauprozesse wurde dann über die im TB-Viewer vorhandenen Leistungskennwerte der Baumaschinen, die notwendige Anzahl an Baumaschinenstunden ermittelt.

2.3.2.2 Herstellungsphase

In den folgenden Tabellen wird beschrieben, welche Materialien in welchen Mengen in welchen Teilen des Bauwerks eingesetzt werden. Diesen Materialmengen wird ein Datensatz aus der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2], aus der KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [16] oder aus einem der genannten Online Ökobilanztools [17], [18], [19] zugeordnet.

Stahlbetonvariante mit Mittelstütze

Tabelle 2: Materialzusammensetzung der Stahlbetonvariante mit Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.

Teil des Bauwerks	Material	Menge	Datensatz	Quelle
Betonbauteile	Wände / Platten: Sorte G, C30/37, XC4 / XD3 / XF4 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	1900 m ³	Kranbeton, NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Fundamente: Sorte D, C25/30, XC4 / XD1 / XF2 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	400 m ³	Fundamente: Kranbeton, NPK D, C25/30, 0/32 mm, XF2, XC4, XD1, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
Bewehrungsstahl	Bewehrungsstahl: B500B Bewehrungsüberdeckung: allgemein 40mm, Leitmauer 60mm	347.2 t	Bewehrungsstahl B500B	ECO2nstruct Daten basierend auf Wert aus Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022 für 3 Rippenreihen angepasst auf 4 Rippenreihen
Auffüllungsmaterial	Sand / Kies Mischung (UG 0/45)	9425 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
Abdichtung	UG 0/45 Schicht	375 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
Sichtschutz	Holzbohlen Vollholz, Nadelholz C24, Material: Lärche, mit angeschrägten Kanten Brettdicke: t = 40mm, splintfrei	7.7 m ³	Schnittholz, Bretter, Nadelholz, gehobelt, kammergetrocknet (u=10%)	KBOB-Holzrechner Link
	H-Stahlprofile	2584 kg	Stahlprofil, blank	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 06.012

Stahlbetonvariante ohne Mittelstütze

Tabelle 3: Materialzusammensetzung der Stahlbetonvariante ohne Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.

Teil des Bauwerks	Material	Menge	Datensatz	Quelle
Betonbauteile	Wände / Platten: Sorte G, C30/37, XC4 / XD3 / XF4 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	3220 m ³	Kranbeton, NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Fundamente: Sorte D, C25/30, XC4 / XD1 / XF2 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	180 m ³	Kranbeton, NPK D, C25/30, 0/32 mm, XF2, XC4, XD1, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Bohrpfahl: Sorte H, C30/37, CEM II/A	138 m ³	NPK H, C30/37, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
Bewehrungsstahl	Bewehrungsstahl: B500B Bewehrungsüberdeckung: allgemein 40mm, Leitmauer 60mm	580 t	Bewehrungsstahl B500B	ECO2nstruct Daten basierend auf Wert aus Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022 für

				3 Rippenreihen angepasst auf 4 Rippenreihen
	Vorspannstahl: YI670	66 t	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022)
Auffüllungsmaterial	Sand / Kies Mischung (UG 0/45)	8825 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
Abdichtung	UG 0/45 Schicht	375 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
Sichtschutz	Holzbohlen Vollholz, Nadelholz C24, Material: Lärche, mit angeschrägten Kanten Brettdicke: t = 40mm, splintfrei,	7.7 m ³	Schnittholz, Bretter, Nadelholz, gehobelt, kammergetrocknet (u=10%)	KBOB-Holzrechner Link
	H-Stahlprofile	2584 kg	Stahlprofil, blank	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 06.012

Holzvariante mit Mittelstütze

Tabelle 4: Materialzusammensetzung der Holzvariante mit Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.

Teil des Bauwerks	Material	Menge	Datensatz	Quelle
Betonbauteile	Wände / Platten: Sorte G, C30/37, XC4 / XD3 / XF4 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	900 m ³	Kranbeton, NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Fundamente: Sorte D, C25/30, XC4 / XD1 / XF2 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	400 m ³	Fundamente: Kranbeton, NPK D, C25/30, 0/32 mm, XF2, XC4, XD1, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
Bewehrungsstahl	Bewehrungsstahl: B500B Bewehrungsüberdeckung: allgemein 40mm, Leitmauer 60mm	198.8 t	Bewehrungsstahl B500B	ECO2nstruct Daten basierend auf Wert aus Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022 für 3 Rippenreihen angepasst auf 4 Rippenreihen
Auffüllmaterial	Sand / Kies Mischung (UG 0/45)	9425 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
Abdichtung	UG 0/45 Schicht	375 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
	PBD-Bahn: Vollflächig aufgefälmte Polymerbitumendichtungsbahnen (PBD EP5) Anforderung: PBD gemäss SIA 281 Gruppe C (MA-beständig)	7.5 m ³	Bitumenemulsion, 1 Anstrich	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 14.003
	Gussasphalt	145 t	Gussasphalt MA 11	ECO2nstruct Daten basierend auf eigenen Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022)
	Brettsperrholzplatte Festigkeitsklasse: GL24h, quer verleimt t = 100mm	1500 m ²	Brettsperrholz	KBOB-Holzrechner Link
Versiegelung	Epoxidharzversiegelung 2-schichtig aufgetragen, mind. 1'200 g/m ² , 2-3mm	4.5 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 11.001

	2. Schicht mit Quarzsandeinstreuung, 0.3-0.5mm, 1.5 bis 2.0 kg/m ²	0.75 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 11.001
Holzträger	Brettschichtholzträger Festigkeitsklasse: GL24h, QS 240x1200mm	442.3 m ³	Brettschichtholz	KBOB-Holzrechner Link
Sichtschutz	Holzbohlen Vollholz, Nadelholz C24, Material: Lärche, mit angeschrägten Kanten Brettdicke: t = 40mm, splintfrei	7.7 m ³	Schnittholz, Bretter, Nadelholz, gehobelt, kammergetrocknet (u=10%)	KBOB-Holzrechner Link
	H-Stahlprofile	2584 kg	Stahlprofil, blank	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 06.012

Holzvariante ohne Mittelstütze

Tabelle 5: Materialzusammensetzung der Holzvariante ohne Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.

Teil des Bauwerks	Material	Menge	Datensatz	Quelle
Betonbauteile	Wände / Platten: Sorte G, C30/37, XC4 / XD3 / XF4 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	700 m ³	Kranbeton, NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Fundamente: Sorte D, C25/30, XC4 / XD1 / XF2 (CH), GK<32mm, CI 0.1, C3	400 m ³	Kranbeton, NPK D, C25/30, 0/32 mm, XF2, XC4, XD1, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Bohrpfahl: Sorte H, C30/37, CEM II/A	138 m ³	NPK H, C30/37, CEM II/A	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
Bewehrungsstahl	Bewehrungsstahl: B500B Bewehrungsüberdeckung: allgemein 40mm, Leitmauer 60mm	168.8 t	Bewehrungsstahl B500B	ECO2nstruct Daten basierend auf Wert aus Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022 für 3 Rippenreihen angepasst auf 4 Rippenreihen
Auffüllmaterial	Sand / Kies Mischung (UG 0/45)	9025 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
Abdichtung	UG 0/45 Schicht	375 m ³	Betonkies, 0/45 mm	ECO2nstruct Daten basierend auf Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2022
	PBD-Bahn: Vollflächig aufgefällmte Polymerbitumendichtungsbahnen (PBD EP5) Anforderung: PBD gemäss SIA 281 Gruppe C (MA-beständig)	7.5 m ³	Bitumenemulsion, 1 Anstrich	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 14.003
	Gussasphalt	145 t	Gussasphalt MA 11	ECO2nstruct Daten basierend auf Treeze Betonrechner
	Brettsperrholzplatte Festigkeitsklasse: GL24h, quer verleimt t = 100mm	1500 m ²	Brettsperrholz	KBOB-Holzrechner Link
Versiegelung	Epoxidharzversiegelung 2-schichtig aufgetragen, mind. 1'200 g/m ² , 2-3mm	4.5 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 11.001
	2. Schicht mit Quarzsandeinstreuung, 0.3-0.5mm, 1.5 bis 2.0 kg/m ²	0.75 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 11.001
Holzträger	Brettschichtholzträger Festigkeitsklasse: GL24h, QS 240x1200mm	1672.3 m ³	Brettschichtholz	KBOB-Holzrechner Link

Sichtschutz	Holzbohlen Vollholz, Nadelholz C24, Material: Lärche, mit angeschrägten Kanten Brettdicke: t = 40mm, splintfrei	7.7 m ³	Schnittholz, Bretter, Nadelholz, gehobelt, kammergetrocknet (u=10%)	KBOB-Holzrechner Link
	H-Stahlprofile	2584 kg	Stahlprofil, blank	KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022, Version 4, 06.012

2.3.2.3 Errichtungsphase

In den folgenden Tabellen wird beschrieben, welche Baumaschinen wie viele Stunden für den Bau der verschiedenen Teile des Bauwerks eingesetzt werden. Diesen Baumaschinen wird ein Datensatz aus der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2]. Die Prozesse hierfür stammen aus dem TB-Viewer, Standard-Analysen des Schweizerischen Baumeisterverband (Stand 2024).

In dieser Phase wird ausserdem der Transport der Materialien vom Hersteller bis zu Baustelle betrachtet. Die folgende Tabelle zeigt welche Materialien über welche Distanzen transportiert werden. Diese Daten basieren auf Expertengesprächen. Aus diesen Gesprächen ergeben sich auch die Annahmen zur Streuung dieser Parameter (siehe dazu Tabelle 6).

Transportdistanzen für alle Varianten

Tabelle 6: Transportdistanzen Hersteller – Baustelle für alle vier Varianten und Datensätze des Ökoinventars

Material	Transportdistanz	Streuung	Datensatz
Beton	30 km	+/- 10 km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
Stahl	100 km	+/- 20 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Vorspannstahl	300 km	+/- 100 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Abdichtung	300 km	+/- 100 km	Freight lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6
Referenzszenario: Brettschichtholzträger (DE)	900 km	+/- 50 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Transport Szenario: Brettschichtholzträger (SE)	2550 km	+/- 50 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Referenzszenario: Brettsperrholzplatte (DE)	900 km	+/- 50 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Transport Szenario: Brettsperrholzplatte (SE)	2550 km	+/- 50 km	Freight lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6
Referenzszenario: Holzbohlen (DE)	750 km	+/- 50 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Transport Szenario: Holzbohlen (SE)	2400 km	+/- 50 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Stahlpfosten Sichtschutz	200 km	+/- 20 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6
Oberboden	50 km	+/- 10 km	Freight lorry >32 metric ton, EURO6

In den Distanzen für das Holz ist der Transport vom Wald (DE oder SE) zum Sägewerk (CH), vom Sägewerk zur Verarbeitung (CH) sowie der Transport zur Baustelle enthalten.

Stahlbetonvariante mit und ohne Mittelstütze (MS)

Tabelle 7: Maschinenstunden der Stahlbetonvarianten in der Errichtung und Datensätze des Ökoinventars

Teil des Bauwerks	Maschine	Stunden		Datensatz
		mit MS	Ohne MS	
Turmkrane einrichten und entfernen	Pneukrane, -60 t	18.5 h	18.5 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024
	Lastwagen Kippbrücke mit Allrad, -26.0 t	40.5 h	40.5 h	
	Tiefganganhänger, - 24 t	40.5 h	40.5 h	

Stahl liefern und verlegen	Turmkrän Laufkatze, -200 mt/70m, stationär	347 h	580 h	Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventar Datenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieserverbrauch)
Bohren	Drehbohrgeräte, -28 mt	-	18.5 h	
Beton für Stützen liefern, einbauen	Vibriernadel, -70 mm, Hochfrequenz Elektromotor	536 h	908 h	
	Umformer, EM, - 5.5 kVA	536 h	908 h	
	Turmkrän Laufkatze, -200 mt/70m, stationär	348 h	589 h	
Aushub	Hydr-Bagger Raupen, -22.0 t, VM, 120 kW	735 h	688 h	
Hinterfüllen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	88 h	88 h	
	Grabenwalze, -2.0 t, mit Fernsteuerung	88 h	88 h	
Schutzeinrichtungen	Lastwagen Kippbrücke mit Allrad, - 26.0 t	1 h	1 h	
Oberboden abtragen und anlegen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	22 h	22 h	
	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	13.5 h	13.5 h	

Holzvariante mit und ohne Mittelstütze (MS)

Tabelle 8: Maschinenstunden der Holzvarianten in der Errichtung und Datensätze des Ökoinventars

Teil des Bauwerks	Maschine	Stunden		Datensatz
		mit MS	Ohne MS	
Turmkrän einrichten und entfernen	Pneukrane, -60 t	18.5 h	18.5 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventar Datenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieserverbrauch)
	Lastwagen Kippbrücke mit Allrad, -26.0 t	40.5 h	40.5 h	
	Tiefganganhänger, - 24 t	40.5 h	40.5 h	
Stahl liefern und verlegen	Turmkrän Laufkatze, -200 mt/70m, stationär	199 h	169 h	
Bohren	Drehbohrgeräte, -28 mt	-	18.5 h	
Beton für Stützen liefern, einbauen	Vibriernadel, -70 mm, Hochfrequenz Elektromotor	254 h	198 h	
	Umformer, EM, - 5.5 kVA	254 h	198 h	
	Turmkrän Laufkatze, -200 mt/70m, stationär	165 h	128 h	
Abdichtung	Bitumenkocher, -50 l, stationär	2.5 h	2.5 h	
Aushub	Hydr-Bagger Raupen, -22.0 t, VM, 120 kW	735 h	704 h	
Hinterfüllen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	88 h	88 h	
	Grabenwalze, -2.0 t, mit Fernsteuerung	88 h	88 h	
Schutzeinrichtungen	Lastwagen Kippbrücke mit Allrad, - 26.0 t	1 h	1 h	
Oberboden abtragen und anlegen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	22 h	22 h	
	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	13.5 h	13.5 h	

2.3.2.4 Nutzungsphase

In der Analyse wird davon ausgegangen, dass alle Varianten während einer Nutzungsdauer von 100 Jahren gebrauchstauglich bleiben, wenn die folgenden, für die Varianten unterschiedlichen, Massnahmen durchgeführt werden:

Tabelle 9: Instandhaltungs-/setzungsmassnahmen für alle Varianten und Szenarien

Instandhaltungs- und Instandsetzungsmassnahmen	Referenz- und Transportszenario		'Best Case' Szenario		'Worst Case' Szenario	
	Beton	Holz	Beton	Holz	Beton	Holz
25 Jahre						
Ersatz ½ Brettsperrholzplatte		x				x
Ersatz ½ Abdichtungen und Versieglung		x				x
50 Jahre						
Einmalige Reprofilierungsarbeiten Punktuelle Verbesserungen im Spritzbereich der Autos.	x	x	x	x	x	x
Ersatz gesamte Brettsperrholzplatte		x		x		x
Ersatz gesamte Abdichtungen und Versieglung		x		x		x
¼ Ersatz Brettschichtholzträger						x
75 Jahre						
Ersatz ½ Brettsperrholzplatte		x				x
Ersatz ½ Abdichtungen und Versieglung		x				x

Referenzszenario und Transportszenario:

Stahlbetonvariante mit und ohne Mittelstütze

Tabelle 10: Referenz und Transport Szenario: Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Stahlbetonvariante mit und ohne MS und Datensätze des Ökoinventars.

Prozess	Material / Prozess	Menge / Stunden		Datensatz
		mit MS	Ohne MS	
Einmalige Reprofilierungsarbeiten	Cement mortar, at plant/CH U (Reprofilierungsmörtel)	458 m ²	229 m ²	Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieserverbrauch)
	Hochdruckreiniger, -5.0 kW, Kaltwasser	22 h	11 h	

Holzvariante mit und ohne Mittelstütze

Tabelle 11: Referenz und Transport Szenario: Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Holzvariante mit und ohne MS und Datensätze des Ökoinventars.

Prozess	Material / Prozess / Baumaschine	Menge / Stunden		Datensatz
		mit MS	Ohne MS	
Einmalige Reprofilierungsarbeiten	Reprofilierungsmörtel Cement mortar, at plant/CH U	458 m ²	229 m ²	Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022)
	Hochdruckreiniger, -5.0 kW, Kaltwasser	22 h	11 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
Ersatz nach 25a	½ der Brettsperrholzplatte	75 m ³	75 m ³	Brettsperrholz
	½ der PBD-Bahn	3.75 m ³	3.75 m ³	Dichtungsbahn bituminös
	Bitumenkocher, -50 l, stationär	1.3 h	1.3 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
	½ des Gussasphalt	72.5 t	72.5 t	Gussasphalt MA 11
Hinterfüllen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	1.7 h	1.7 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024
Hinterfüllen	Grabenwalze, -2.0 t, mit Fernsteuerung	1.7 h	1.7 h	
Oberboden abtragen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	11 h	11 h	Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
Boden anlegen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	6.75 h	6.75 h	
	½ der Epoxidharzversiegelung	2.25 m ³	2.25 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz)
	½ der 2. Schicht Epoxidharzversiegelung	0.4 m ³	0.4 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz)
Ersatz nach 50a	gesamte Brettsperrholzplatte	150 m ³	150 m ³	Brettsperrholz
	gesamte PBD-Bahn	7.5 m ³	7.5 m ³	Dichtungsbahn bituminös

	Bitumenkocher, -50 l, stationär	2.5 h	2.5 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterver- band, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Bauma- schinen: Eigene Datensätze basie- rend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bun- desverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Die- sel) und der technischen Vorder- grunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
	Gasamter Gussasphalt	145 t	145 t	Gussasphalt MA 11
Hinterfüllen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	3.4 h	3.4 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterver- band, Stand: 2024
Hinterfüllen	Grabenwalze, -2.0 t, mit Fernsteue- rung	3.4 h	3.4 h	
Oberboden abtragen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	22 h	22 h	Ökobilanzkennwerte für Bauma- schinen: Eigene Datensätze basie- rend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bun- desverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Die- sel) und der technischen Vorder- grunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
Boden anlegen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	13.5 h	13.5 h	
	Gesamte Epoxidharzversiegelung	4.5 m ³	4.5 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxid- harz)
	Gesamte 2. Schicht Epoxidharzversie- gelung	0.75 m ³	0.75 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxid- harz)
Ersatz nach 75a	½ der Brettspertholzplatte	75 m ³	75 m ³	Brettspertholz
	½ der PBD-Bahn	3.75 m ³	3.75 m ³	Dichtungsbahn bituminös
	Bitumenkocher, -50 l, stationär	1.5 h	1.5 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterver- band, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Bauma- schinen: Eigene Datensätze basie- rend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bun- desverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Die- sel) und der technischen Vorder- grunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
	½ des Gussasphalts	72.5 t	72.5 t	Gussasphalt MA 11
Hinterfüllen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	1.7 h	1.7 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterver- band, Stand: 2024
Hinterfüllen	Grabenwalze, -2.0 t, mit Fernsteue- rung	1.7 h	1.7 h	
Oberboden abtragen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	11 h	11 h	Ökobilanzkennwerte für Bauma- schinen: Eigene Datensätze basie- rend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bun- desverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Die- sel)
Boden anlegen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	6.75 h	6.75 h	

				sel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
	½ der Epoxidharzversiegelung	2.25 m ³	2.25 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz)
	½ der 2. Schicht Epoxidharzversiegelung	0.4 m ³	0.4 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz)

'Best Case' Szenario

Stahlbetonvariante mit und ohne Mittelstütze

Die Aufwände für die Instandhaltung/-setzung der Stahlbetonvarianten mit und ohne Mittelstütze sind dieselben wie im Referenzszenario.

Holzvariante mit und ohne Mittelstütze

Tabelle 12: 'Best Case' Szenario: Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Holzvariante mit und ohne MS und Datensätze des Ökoinventars.

Prozess	Material / Prozess / Baumaschine	Menge / Stunden		Datensatz
		mit MS	Ohne MS	
Einmalige Reprofilierungsarbeiten	Reprofilierungsmörtel Cement mortar, at plant/CH U	458 m ²	229 m ²	Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022)
	Hochdruckreiniger, -5.0 kW, Kaltwasser	22 h	11 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
Ersatz nach 50a	gesamte Brettsperrholzplatte	150 m ³	150 m ³	Brettsperrholz
	gesamte PBD-Bahn	7.5 m ³	7.5 m ³	Dichtungsbahn bituminös
	Bitumenkocher, -50 l, stationär	2.5 h	2.5 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieselverbrauch)
	Gasamter Gussasphalt	145 t	145 t	Gussasphalt MA 11
Hinterfüllen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	3.4 h	3.4 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024
Hinterfüllen	Grabenwalze, -2.0 t, mit Fernsteuerung	3.4 h	3.4 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024

Oberboden abtragen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	22 h	22 h	Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventar Datenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieserverbrauch)
Boden anlegen	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	13.5 h	13.5 h	
	Gesamte Epoxidharzversiegelung	4.5 m ³	4.5 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz)
	Gesamte 2. Schicht Epoxidharzversiegelung	0.75 m ³	0.75 m ³	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz)

‘Worst Case’ Szenario

Stahlbetonvariante mit und ohne Mittelstütze

Die Aufwände für die Instandhaltung/-setzung der Stahlbetonvarianten mit und ohne Mittelstütze sind dieselben wie im Referenzszenario.

Holzvariante mit und ohne Mittelstütze

Die Holzvarianten mit und ohne Mittelstütze unterscheiden sich nur in einem zusätzlichen Ersatz von ¼ des Brettschichtholzträgers vom Referenzszenario.

Tabelle 13: ‘Worst Case’ Szenario: Zusätzlicher Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Holzvariante mit und ohne MS im Vergleich zum Referenzszenario.

Prozess	Material / Prozess / Baumaschine	Menge / Stunden		Datensatz
		mit MS	Ohne MS	
Ersatz nach 50a	¼ des Brettschichtholzträgers	110.6 m ³	418 m ³	Brettschichtholz

2.3.2.5 Entsorgungsphase

In den folgenden Tabellen wird beschrieben,

- welche Baumaschinen wie viele Stunden für den Rückbau der Wildtierüberführung der betrachteten Varianten eingesetzt werden.
- in welchen Prozessen die rückgebauten Materialien entsorgt werden.
- wie gross die Transportdistanzen zwischen der Baustelle und Entsorgungsprozessen sind, bzw. welche Transportprozesse eingesetzt werden.

Es wird angenommen, dass beim Rückbau sämtliche Materialien, die in Tabelle 2 bis Tabelle 5 aufgelistet werden, rückgebaut und entsorgt werden. Dabei wird angenommen, dass sämtliche Betonbauteile (Fundament und Tragwerk) in Betonabbruch und Eisenschrott (Bewehrung und Vorspannungsstahl) getrennt, aufbereitet und wiederverwendet werden. Holz und sämtliche Materialien der Abdichtung werden in einer Kehrrichtverbrennungsanlage verbrannt. Die Betonpfähle verbleiben im Boden und werden nicht im Entsorgungsprozess modelliert.

Diesen Rückbau-, Entsorgungs- und Transportprozessen wird ein Datensatz aus dem Ökoinventar Datenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) [2] oder aus der KBOB-Liste Ökobilanzdaten

im Baubereich zugeordnet. In den folgenden Tabellen wird der Name des Datensatzes genannt. Im Anhang dieses Berichts befinden sich die genauen Quellenangaben jedes dieser Datensätze.

Stahlbetonvariante mit und ohne Mittelstütze

Tabelle 14: Entsorgungsprozesse der Stahlbetonvarianten und Datensätze des Ökoinventars.

Material	Entsorgungsprozess	Datensatz
Beton	90 % Recycling 10% Deponie	disposal, building, reinforced concrete, at sorting plant, to recycling/kg/CH U disposal, inert waste, 5% water, to construction waste landfill/kg/CH
Stahl	100 % Recycling	Entsorgung, Armierungsstahl
Auffüllungsmaterial und UG 0/45 Schicht	100 % Recycling	disposal, building, concrete gravel, at sorting plant, to recycling/kg/CH U
Holzbohlen Sichtschutz	100 % KVA	Entsorgung, Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
Stahlpfosten Sichtschutz	100 % Recycling	Entsorgung, Armierungsstahl

Tabelle 15: Maschinenstunden des Rückbaus der Stahlbetonvarianten und Datensätze des Ökoinventars

Prozess	Maschine	Stunden		Datensatz
		Mit MS	Ohne MS	
Beton bewehrt mit Zangen maschinell entfernen	Abbruch-Roboter, VM, -7.0 t, 70 kW	1534 h	2268 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieserverbrauch)
	Abbruchzange für Bagger, -8 t, -500 kg	1534 h	2268 h	
	Schweiss/Schneidgerät, autogen	154 h	228 h	
Lockergestein maschinell ausheben	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	51 h	48 h	
Zäune abbrechen	Handkreissäge, Holz	1.5 h	1.5 h	
	Säbelsäge, 3 kg, Akku	1.5 h	1.5 h	

Holzvariante mit und ohne Mittelstütze

Tabelle 16: Entsorgungsprozesse der Holzvarianten und Datensätze des Ökoinventars.

Material	Entsorgungsprozess	Datensatz
Beton	90 % Recycling 10% Deponie	disposal, building, reinforced concrete, at sorting plant, to recycling/kg/CH U disposal, inert waste, 5% water, to construction waste landfill/kg/CH
Stahl	100 % Recycling	Entsorgung, Armierungsstahl
Belag Gussasphalt	100 % Deponie	Entsorgung, Asphalt, 0.1% Wasser, in Reaktordeponie
Abdichtung: PBD-Bahn	100 % KVA	Entsorgung, Dichtungsbahnen und Schutzfolien, Dampfbremse Bitumen
Versiegelung Harz	100 % KVA	Entsorgung, 2K-Fliessbelag Industrie
Auffüllungsmaterial und UG 0/45 Schicht	100 % Recycling	disposal, building, concrete gravel, at sorting plant, to recycling/kg/CH U
Brettschichtholzträger	100 % KVA	Entsorgung, Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
Brettsperrholzplatte	100 % KVA	Entsorgung, Brettschichtholz verleimt
Holzbohlen Sichtschutz	100 % KVA	Entsorgung, Holz und Holzwerkstoffe, Massivholz
Stahlpfosten Sichtschutz	100 % Recycling	Entsorgung, Armierungsstahl

Tabelle 17: Maschinenstunden des Rückbaus der Holzvarianten und Datensätze des Ökoinventars

Prozess	Maschine	Stunden		Datensatz
		Mit MS	Ohne MS	
Beton bewehrt mit Zangen maschinell entfernen	Abbruch-Roboter, VM, -7.0 t, 70 kW	867 h	734 h	Maschinenstunden: TB-Viewer, Standard-Analysen, Schweizerischer Baumeisterverband, Stand: 2024 Ökobilanzkennwerte für Baumaschinen: Eigene Datensätze basierend auf Einheitsprozessen der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) (bspw. Bereitstellung 1 Liter Diesel) und der technischen Vordergrunddaten des TB-Viewer (bspw. Dieserverbrauch)
	Abbruchzange für Bagger, -8 t, -500 kg	867 h	734 h	
	Schweiss/Schneidgerät, autogen	87 h	74 h	
Holzbalkendecken abbrechen	Hydr-Bagger Raupen, -9.0 t, VM, 50 kW	207 h	207 h	
	Kettensäge, VM, -5.5 kW, Schwert 60 cm	154.5 h	154.5 h	
Bitumenhaltige Betondecken abbrechen	Hydr-Bagger Raupen, -26.0 t, VM, 135 kW	18 h	18 h	
	Schraubenkompressor, -4.5 m3, VM, fahrbar	18 h	18 h	
	Abbauhammer Druckluft, -25 kg	18 h	18 h	
Lockergestein maschinell ausheben	Hydr-Bagger Raupen, -33.0 t, VM, 210 kW	51 h	49 h	
Zäune abbrechen	Handkreissäge, Holz	1.5 h	1.5 h	
	Säbelsäge, 3 kg, Akku	1.5 h	1.5 h	

Transporte für alle Varianten

Tabelle 18: Transportdistanzen Baustelle - Entsorger aller Varianten und Datensätze des Ökoinventars.

Entsorgungsprozess	Transportdistanz	Streuung	Datensatz Herstellung	
Beton	Recycling	30 km	+/- 10km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
	Deponie	50 km	+/- 10km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
Stahl	Recycling	200 km	+/- 20km	Freight lorry 32-40 metric ton, EURO6
Vorspannstahl	Recycling	200 km	+/- 20km	Freight lorry 32-40 metric ton, EURO6
Abdichtung: PBD-Bahn	KVA	30 km	+/- 5km	Freight lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6
Belag Gussasphalt	Deponie	50 km	+/- 10km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
Auffüllungsmaterial (UG 0/45)	Recycling	30 km	+/- 10km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
UG 0/45 Sicht	Recycling	30 km	+/- 10km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
Versiegelung	KVA	30 km	+/- 5km	Freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
Brettschichtholzträger	KVA	30 km	+/- 5km	Freight lorry 32-40 metric ton, EURO6
Brettsperrholzplatte	KVA	30 km	+/- 5km	Freight lorry 32-40 metric ton, EURO6
Holzbohlen Sichtschutz	KVA	30 km	+/- 5km	Freight lorry 32-40 metric ton, EURO6
Stahlpfosten Sichtschutz	Recycling	200 km	+/- 20km	Freight lorry 32-40 metric ton, EURO6

2.3.3 Wirkungsabschätzung

Es gibt verschiedene Wirkungsabschätzungsmethoden die, je nach Aufgabenstellung, mehr oder weniger geeignet sind, um den Einfluss einer umweltrelevanten Tätigkeit abzubilden.

Indikatoren der Wirkungsbilanz wie z.B. das Treibhauspotential oder der Gesamtenergieaufwand (kumulierte Energieaufwand KEA), decken jeweils nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt jedoch ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Die Berechnung dieser Indikatoren basiert auf wissenschaftlichen Modellen, daher haben diese Indikatoren, auch wenn sie nur einen Teil der Wirkungen abbilden, eine hohe Akzeptanz.

Ein Interpretationsproblem besteht, wenn die verschiedenen Auswirkungen unterschiedliche Schlüsse zulassen. So kann zum Beispiel ein untersuchtes Produkt wesentlich geringere Auswirkungen auf das Klima haben als ein anderes, jedoch viel grössere Auswirkungen auf die Gewässer und es stellt sich die Frage, was bei den untersuchten Produkten oder Systemen entscheidend ist. Problematisch dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Wirkkategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Einerseits sind die Einheiten und damit die Dimensionen unterschiedlich und andererseits wird keine Aussage gemacht, wie problematisch die betreffende Wirkung relativ zur anderen ist.

Um schlussendlich einen eindimensionalen und aussagekräftigen Wert der Umweltwirkung zu erhalten, muss die Wirkungsbilanz mit einer vollaggregierten Methode durchgeführt werden (siehe dazu Abbildung 7). Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamttaggregierenden Methoden teilweise abgelehnt, z.B. auch von der ISO Norm 14'040 [8] für Vergleiche, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Dabei ist zu beachten, dass auch die Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z.B. kumulierter Energieaufwand (KEA) und Treibhauspotential betrachtet werden, kommt dies einer Gewichtung der anderen Auswirkungen mit Null gleich. Die Betrachtung der einzelnen Wirkkategorien kann durchaus hilfreich sein, z.B. zur Ermittlung der Ursachen von spezifischen Auswirkungen und Erarbeitung von möglichen Optimierungspotentialen. Als Entscheidungsgrundlage oder für die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen dürfen jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamttaggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich, sondern notwendig [16]. Betreffend der Verwendung der gesamttaggregierenden Methoden richtet sich die vorliegende Studie durch die Verwendung der Methode der ökologischen Knappheit «Umweltbelastungspunkte» nicht nach der ISO Norm 14'040 [8], sondern geht über diese hinaus. Die Verwendung verschiedener Bewertungsmethoden erlaubt es, die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

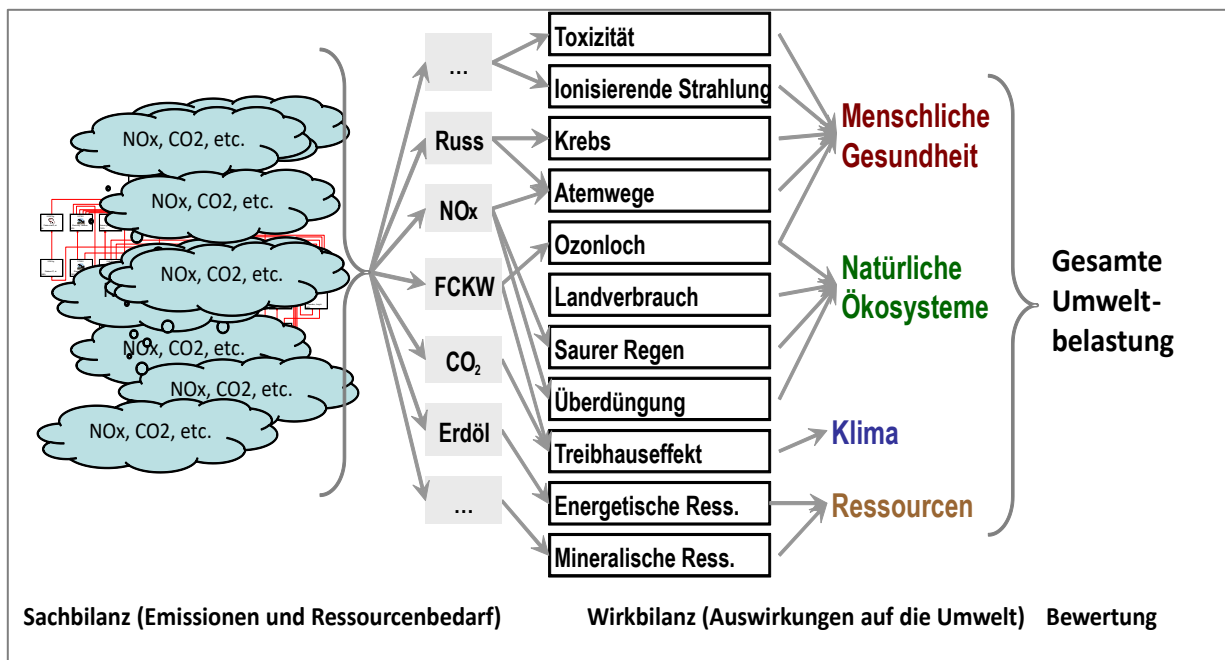


Abbildung 7: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels gesamttaggregierender Methoden [14].

2.3.4 Wirkungsbilanz

In dieser Studie werden die folgenden drei Wirkungsmodelle verwendet:

Umweltbelastungspunkte (UBP): Mit der Methode der ökologischen Knappheit wird ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen aufgezeigt [11]. Sie basiert auf der Schweizerischen Umweltpolitik. Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süßwasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. In der Schweiz gilt die UBPMethode als Standard bei Ökobilanzen [12], [21], [22]. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt als besonders hilfreich für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen, da die Methode die Umweltpolitik der Schweiz widerspiegelt und umfassend ist.

Treibhausgaspotenzial (GWP): Dieses Wirkungsmodell beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO₂. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 6. Sachstandberichts des IPCC (2021) quantifiziert [23], [24].

Gesamtenergieaufwand (Kumulierter Energieaufwand, KEA): Dieses Wirkungsmodell quantifiziert den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger, Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern sowie auch den Energieaufwand erneuerbarer Energieträger. In der vorliegenden Studie wurde nur der nicht-erneuerbare Anteil des kumulierten Energieaufwandes betrachtet, welcher auch als «Graue Energie» bezeichnet. Dieses Wirkungsmodell ist ein im Baubereich etablierter Kennwert, der auch in der KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» [16] verwendet wird. Das Ergebnis der Ökobilanz wird bei der Methode des kumulierten Energieaufwands als MJ-Oil-eq oder kWh Oil-eq («equivalents» = MJ / kWh Öl-Äquivalente) ausgegeben. Eine MJ Oil-eq bildet, analog zur Methode der Treibhausgase (kg CO₂-eq), die Basislinie zur Umrechnung der verschiedenen Energiequellen auf einen gemeinsamen Nenner [25].

2.3.5 Auswertung und Interpretation

2.3.5.1 Analyse der Datenunsicherheit

Die Bedeutung von Datenunsicherheiten wurde durch eine Monte-Carlo-Simulation abgeschätzt. Die Monte-Carlo-Simulation variiert die Eingabeparameter einer Ökobilanz gemäss statistischer Verteilung und berechnet die Ökobilanz erneut. Dies geschieht iterativ, wobei die Resultate jeder Iteration zwischengespeichert werden. Auf diese Weise werden Verteilungen möglicher Ergebniswerte generiert.

Für die Transportdistanzen wurden Bandbreiten für die Streuung der Parameterwerte in Expertengesprächen abgeschätzt (siehe Tabelle 6 und Tabelle 18). Als statistische Verteilung wurde für alle Parameter, ausser für die Transportdistanzen, eine Lognormalverteilung angenommen. Bei den Transportdistanzen wurde eine Dreiecksverteilung angenommen. Sie hat die höchste Wahrscheinlichkeit beim Mittelwert und fällt linear zum Minimal- und Maximalwert ab. Für die Monte Carlo-Simulationen wurden 10'000 Iterationen durchgeführt und ein Konfidenzintervall von 95% angenommen.

2.3.5.2 Analyse der Modellunsicherheiten

Zum besseren Verständnis der Modellunsicherheiten werden die folgenden drei Szenarien als Ergänzung zum Referenzszenario definiert:

Szenario 1: Transport - Holz aus Schweden

Nur 37% des Holzes, das für Bau und andere stoffliche Nutzung verarbeitet wird, stammt aus der Schweiz [3]. Es ist daher wahrscheinlich, dass bei vergleichbaren Holztragwerken auf ausländische Lieferanten zurückgegriffen wird. Im Referenzszenario wird deshalb davon ausgegangen, dass das Holz aus Deutschland stammt und in der Schweiz verarbeitet wird. In diesem Transport-szenario wird aus Unsicherheiten angenommen, dass das Holz aus Schweden stammt und auch in der Schweiz verarbeitet wird. Dieses Szenario unterscheidet sich bei keinen weiteren Aspekten vom Referenzszenario.

Szenario 2: 'Best Case' Instandhaltungs- und Instandsetzungsmassnahmen

Bis zum Abschluss dieser Studie bestehen noch keine Erfahrungen mit der Werterhaltung von vergleichbaren Tragwerken aus Brettschichtholzträgern für eine solche Nutzung unter ähnlichen klimatischen Bedingungen. Es besteht deshalb eine erhebliche Unsicherheit bei den Annahmen zur Nutzung des Bauwerks (siehe Kapitel 2.3.2.4).

Für die Instandsetzungsmassnahmen werden deshalb, neben dem Referenzszenario, zwei weitere Instandsetzungsszenarien für die Holzbrücken definiert. Diese unterscheiden sich im Ausmass der benötigten Massnahmen. Die Herkunft des Holzes wird gemäss dem Referenzszenario aus Deutschland angenommen. Folgend wird das 'Best Case' Szenario beschrieben, welche weniger Instandsetzungsmassnahmen benötigt als das Referenzszenario.

Es wird während der Nutzungsdauer von 100 Jahren nur eine einmalige Instandsetzung nach 50 Jahren durchgeführt. Dabei wird die gesamte Brettsperrholzplatte und die darüberliegende Abdichtung ersetzt. Tabelle 12 zeigt die dafür eingesetzten Materialien und Baumaschinen.

Für die Stahlbetonvariante ist diese Modellunsicherheit deutlich geringer, da man bereits vergleichbare Bauwerke in der Schweiz seit vielen Jahren nutzt. Es wird daher davon ausgegangen,

dass die einmaligen Reprofilierungsarbeiten am Beton (Tabelle 10) im Spritzbereich der vorbeifahrenden Fahrzeuge die Werterhaltung hinreichend widerspiegeln.

Szenario 3: 'Worst Case' Instandhaltungs- und Instandsetzungsmassnahmen

Da die Unsicherheit bei den Annahmen zur Nutzung des Bauwerks erheblich sind, wird als Ergänzung zum 'Best Case' und Referenzszenario ein 'Worst-Case' für die Instandsetzungsmassnahmen definiert. Dieses unterscheidet sich mit einer Ergänzung zum Referenzszenario.

Während der Nutzungsdauer von 100 Jahren wird dreimal eine Instandsetzung durchgeführt sowie ein einmaliger Ersatz von $\frac{1}{4}$ der Brettschichtholzträger. Dabei werden jeweils Teile der Abdichtung sowie einmalig (nach 50 Jahren) die gesamte Brettsperrholzplatte und die darüberliegende Abdichtung ersetzt. Da man trotzdem ein Eindringen von Feuchtigkeit nicht ganz verhindern kann, müssen auch Teile des Holztragwerks ersetzt werden, weshalb ein einmaliger Ersatz von $\frac{1}{4}$ der Brettschichtholzträger angenommen wird. Tabelle 13 zeigt diese, im Vergleich zum Referenzszenario, zusätzlich dafür eingesetzten Materialien.

Für die Stahlbetonvariante ist diese Modellunsicherheit deutlich geringer, da man in der Schweiz bereits seit vielen Jahren vergleichbare Bauwerke nutzt. Es wird daher davon ausgegangen, dass die einmaligen Reprofilierungsarbeiten am Beton (Tabelle 10) im Spritzbereich der vorbeifahrenden Fahrzeuge die Werterhaltung hinreichend widerspiegeln.

Gemäss dem Bericht einer vergleichende Ökobilanz für zwei Varianten der Wildtierbrücke zur Wiederherstellung der Landschaftsverbinding Nr. 49 im Kanton Zürich [7] ergeben sich, gemäss einem Expertengutachten, in diesem Szenario ausserdem markante negative Auswirkungen auf die Funktionalität des Bauwerks. Je nach Umfang der Eingriffe würde dieses über mehrere Monate unter Umständen bis ein, zwei Jahre seine Vernetzungsfunktion weitgehend einbüssen. Diese Einschränkung wird in der Szenarioanalyse nicht berücksichtigt aber bei der Interpretation der Ergebnisse wird dieser Aspekt wieder aufgegriffen.

3 Ergebnisse

3.1 Ökobilanzergebnisse für das Referenzszenario: Stahlbeton versus Holz

Die nachfolgenden drei Abbildungen 8 bis 10 zeigen das Ergebnis der vergleichenden Ökobilanz für die Wildtierüberführung mit den beiden Varianten Stahlbeton und Holz. In allen Wirkungsmodellen schneidet die Stahlbetonvariante mit Mittelstütze besser ab als die Stahlbetonvariante ohne Mittelstütze. Die beiden Holzvarianten liegen bei den Umweltbelastungspunkten und den Treibhausgasemissionen zwischen den Stahlbetonvarianten. Die Holzvariante mit Mittelstütze schneidet jedoch bei allen drei Wirkungsmodellen besser ab als die Stahlbetonvariante ohne Mittelstütze.

Alle drei Wirkungsmodelle zeigen ein einheitliches Bild bezogen auf die relativen Beiträge der Lebenszyklusphasen. Die Herstellungsphase trägt am meisten zu den gesamten Umweltwirkungen bei, gefolgt von der Entsorgungsphase sowie der Nutzungsphase bei den Holzvarianten. Die erhöhten Instandsetzungsmassnahmen bei der Holzvariante vergrössern den Unterschied zwischen beiden Varianten in der Nutzungsphase.

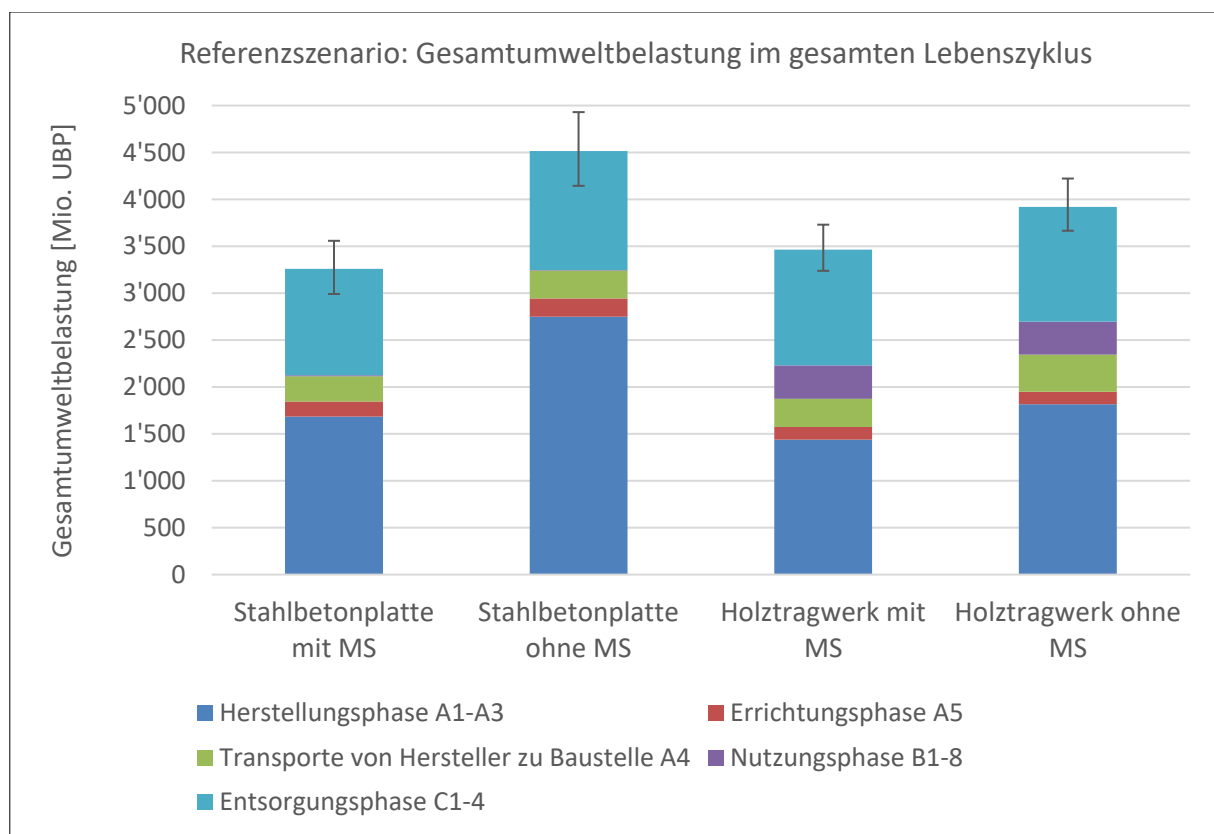


Abbildung 8: Umweltbelastung im gesamten Lebenszyklus für das Referenzszenario

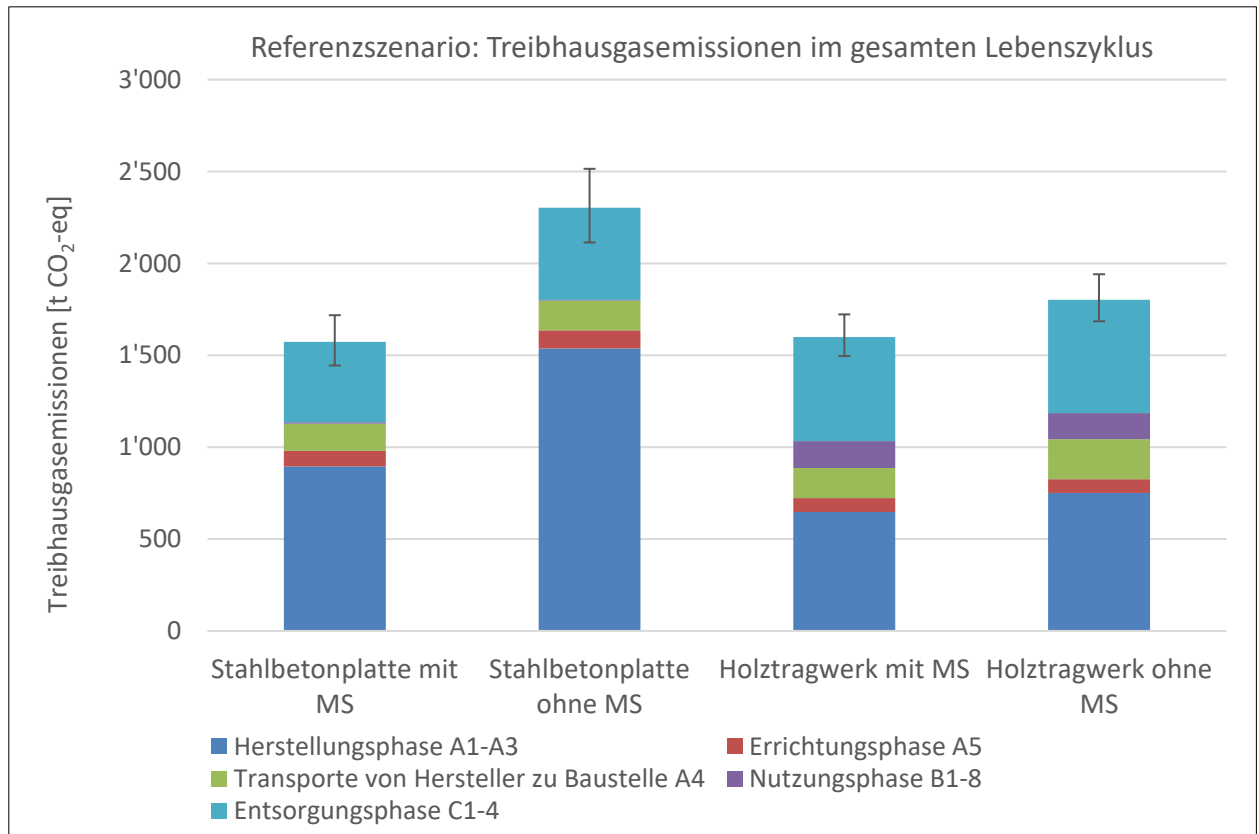


Abbildung 9: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus für das Referenzszenario

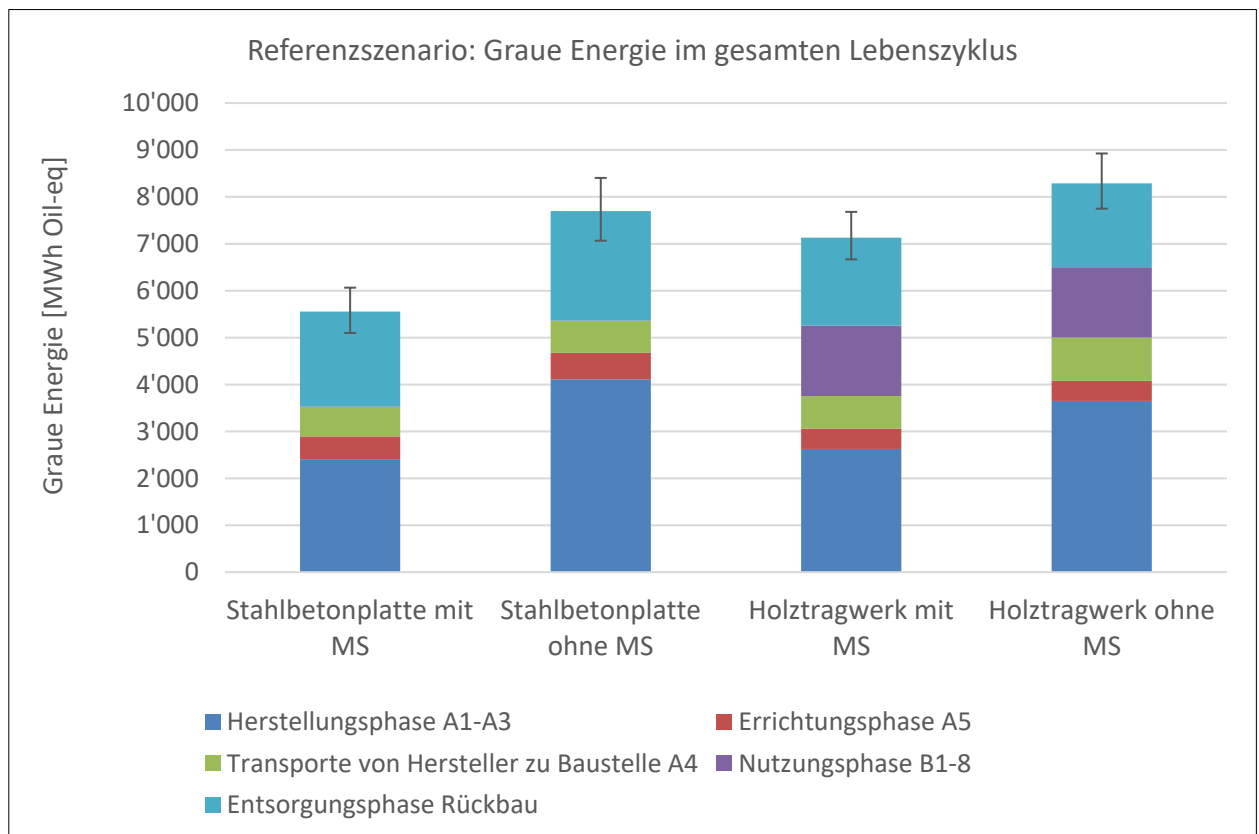


Abbildung 10: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus für das Referenzszenario

3.2 Umweltwirkung in der Herstellungsphase

Ein Vergleich der Ergebnisse für die Herstellungsphase in Abbildung 11 zeigt, dass die Herstellung des Stahls bei beiden Varianten einen grossen, wenn nicht den grössten Beitrag zur Grauen Energie und zur Summe der Umweltbelastungspunkte leistet. Es handelt sich dabei um die Armierung der Betonbauteile und um den Vorspannstahl im Stahlbetontragwerk ohne Mittelstütze.

Bei der Holzvariante ohne Mittelstütze leistet die Herstellung des Brettschichtholzes den grössten Beitrag zur Grauen Energie und zur Summe der Umweltbelastungspunkte, gefolgt von den Betonbestandteilen und deren Armierung. Der hohe Beitrag des Brettsperrholzes ist darauf zurückzuführen, da das Tragwerk ohne Mittelstütze einen dickeren Balken benötigt. Die Variante mit Mittelstütze hat einen erheblich minimierten Beitrag durch das Holz zu verzeichnen. Hier kommt das Holz erst an dritter Stelle nach den Betonbestandteilen und deren Armierung.

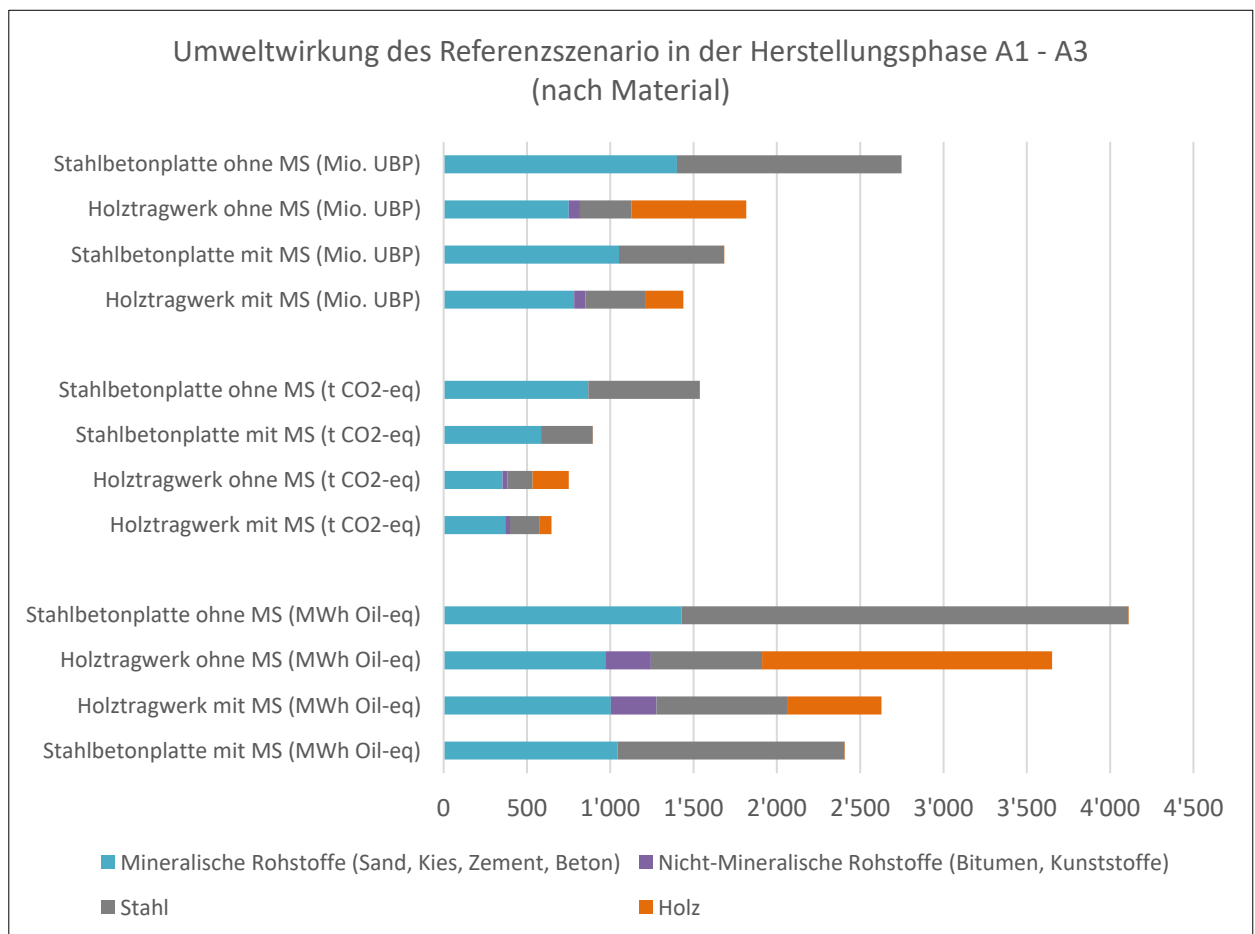


Abbildung 11: Umweltwirkung des Referenzszenario in der Herstellungsphase A1 - A3

3.3 Umweltwirkung in der Entsorgungsphase

Die Verwertung des Betonabbruchs führt zu den grössten Umweltwirkungen in allen drei Wirkungsmodellen (Abbildung 12). Das ist auf die grosse Menge des Betonabbruchs zurückzuführen. Die gleiche Überlegung trifft auch für die Verwertung des Stahls in der Stahlbetonvariante zu. Sowohl Betonabbruch wie auch Eisenschrott können nahezu vollständig stofflich wiederverwertet werden [16].

Bei den Holzvarianten spielt die Verbrennung der Abfälle in der Kehrichtverbrennung eine wichtige Rolle. Bei der Verbrennung der Abfälle in der Kehrichtverbrennung tragen vor allem die Materialien der Abdichtung und Beschichtung (Kunststoffe und Bitumen) gefolgt vom Holz zum Treibhauspotenzial und zur Summe der Umweltbelastungspunkten bei. Aufgrund der Verbrennungsrückstände trägt die Holzverbrennung jedoch nicht unwesentlich zur Summe der Umweltbelastungspunkte (wegen den Schwermetallen, vor allem Chrom und Zink) und den Treibhausgasemissionen bei. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die bei der Verbrennung des Holzes entstehenden biogenen CO₂-Emissionen (aus dem Holz stammender Kohlenstoff) gemäss den Bilanzierungsregeln der KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [1] mit 0 kg CO₂-eq gerechnet werden. Würden die biogenen CO₂-Emissionen aus der Holzverbrennung ebenfalls mitgerechnet werden, würde die Entsorgungsphase der beiden Holzvarianten deutlich schlechter abschneiden.

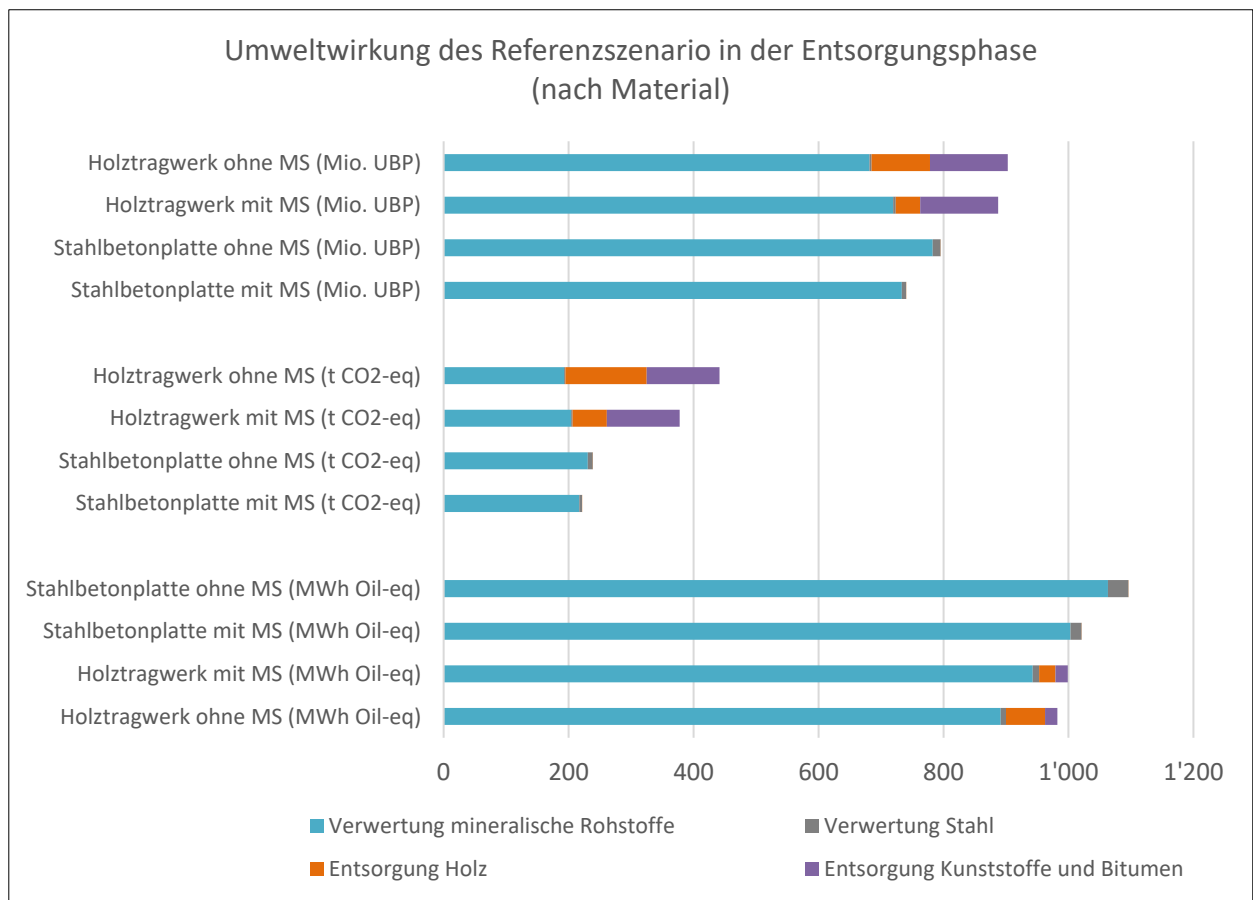


Abbildung 12: Umweltwirkung des Referenzszenario in der Entsorgungsphase

3.4 Szenarien - Sensitivitätsanalyse

3.4.1 Szenario 1: Holz aus Schweden

Die Holzvariante führt zu leicht höheren Umweltwirkungen, wenn man das Brettsperr- und Brettchichtholz aus dem nordeuropäischen Ausland (Skandinavien) importiert. Das ist vor allem auf die Herstellungsphase der Baumaterialien zurückzuführen. Die grössere Transportdistanz vom Hersteller bis zur Baustelle hingegen wirkt sich auf die Gesamtbilanz kaum aus. In diesem Szenario wird Schweden als Produktionsland und die Schweiz als Verarbeitungsort modelliert (Abbildung 13).

Die Stahlbetonvariante ohne Mittelstütze weist die geringsten Werte auf, weil in dieser Variante auch kein Träger aus Holz benötigt wird (nur das Holz für den Sichtschutz).

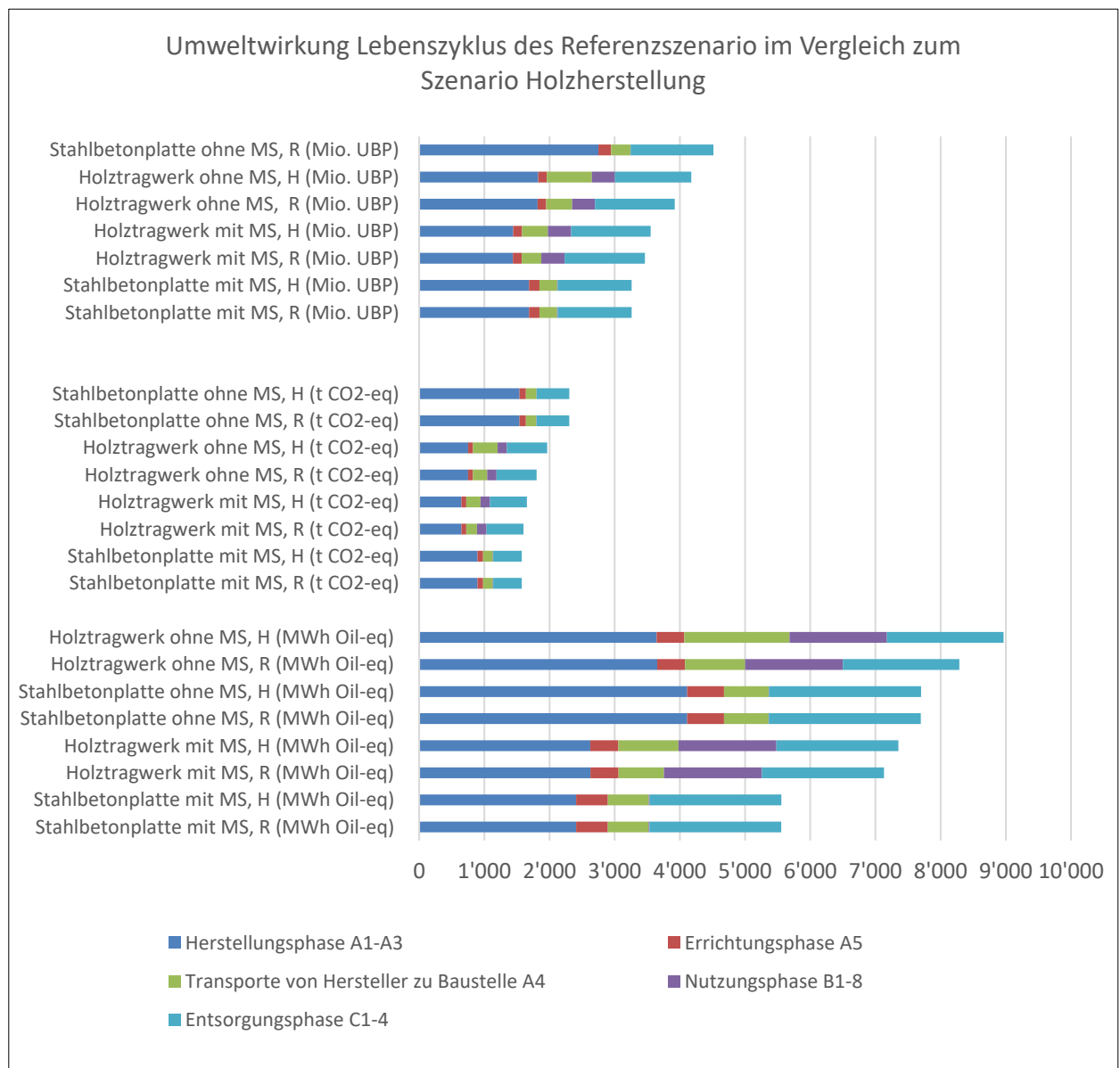


Abbildung 13: Umweltwirkung Lebenszyklus des Referenzszenario im Vergleich zum Szenario Holzherstellung, Legende: R = Referenzszenario, H = Herstellungsszenario

3.4.2 Szenario 2: 'Best Case' Instandsetzungsmassnahmen

Die nachfolgenden drei Abbildungen 14 bis 16 zeigen das Ergebnis der vergleichenden Ökobilanz für die Wildtierüberführung mit den beiden Varianten Stahlbeton und Holz für das 'Best Case' Szenario.

Die Variante Stahlbeton und Holzvariante mit Mittelstütze schneidet bei den Umweltbelastungspunkten und den Treibhausgasemissionen vergleichbar ab. Bei der grauen Energie weist die Variante Stahlbeton mit Mittelstütze den geringsten Wert auf. Die Holzvariante ohne Mittelstütze weist auch mit den stark reduzierten Instandsetzungsmassnahmen höhere Werte als die Stahlbetonvariante mit Mittelstütze auf.

Alle drei Wirkungsmodelle zeigen ein einheitliches Bild bezogen auf die relativen Beiträge der Lebenszyklusphasen. Die Herstellungsphase trägt am meisten zu den gesamten Umweltwirkungen bei, gefolgt von der Entsorgungsphase. Bei den Holzvarianten weisen im Vergleich zum Referenzszenario verminderte Werte in der Nutzungsphase aus.

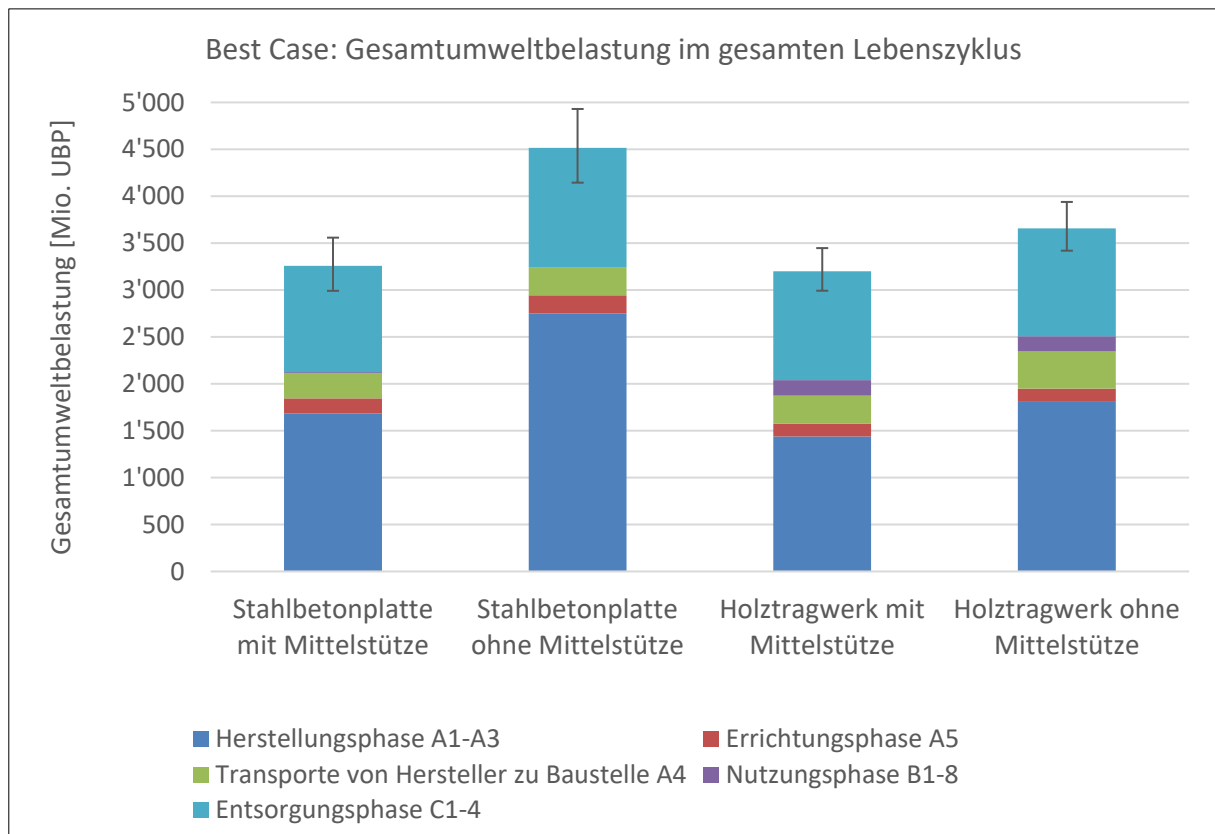


Abbildung 14: Gesamtumweltbelastung im gesamten Lebenszyklus für das 'Best Case' Szenario

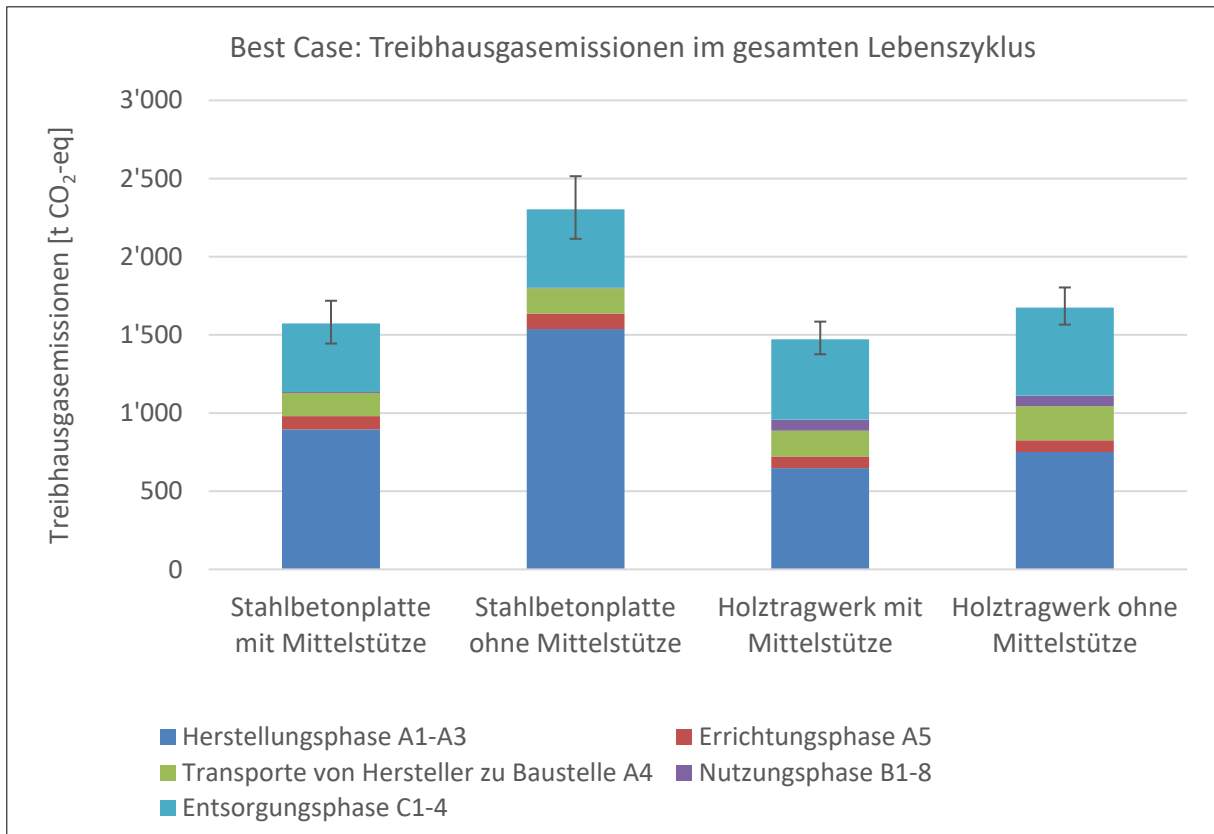


Abbildung 15: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus für das 'Best Case' Szenario

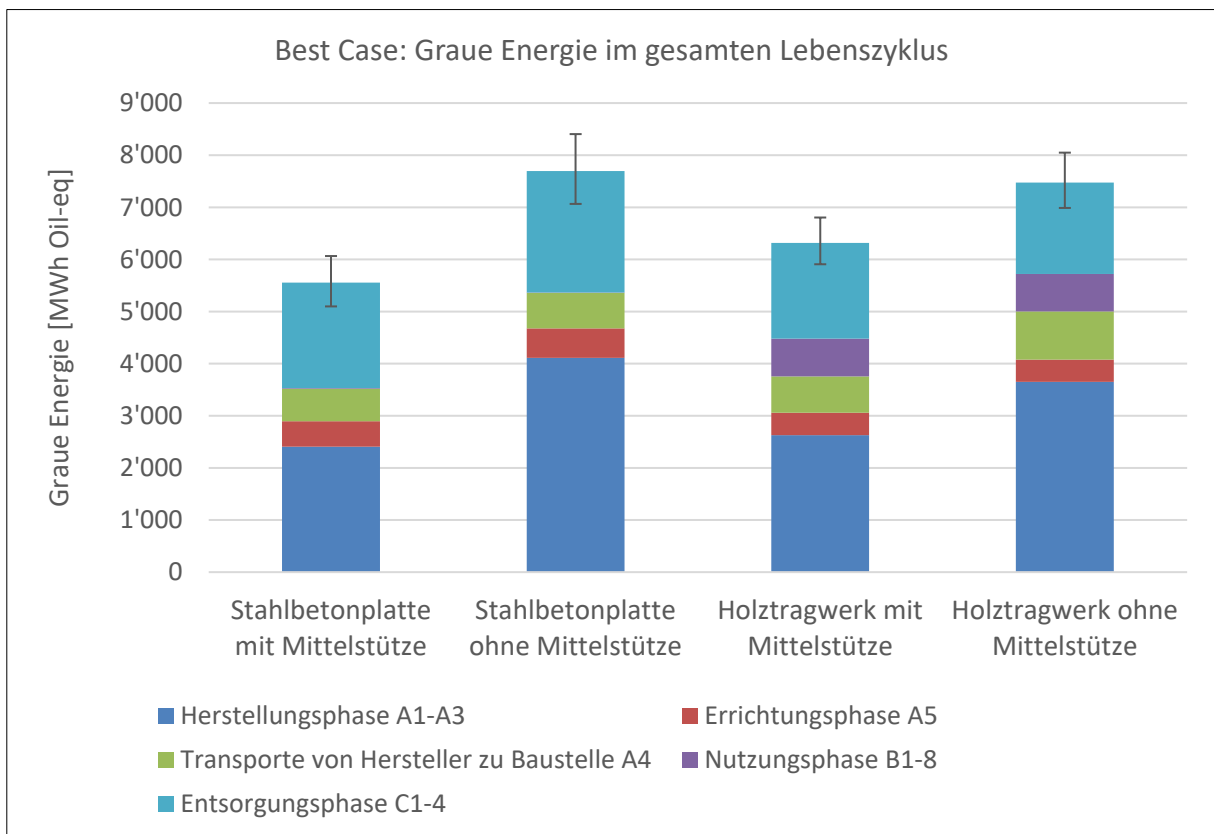


Abbildung 16: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus für das 'Best Case' Szenario

3.4.3 Szenario 3: 'Worst Case' Instandsetzungsmassnahmen

Die grösseren Instandsetzungsmassnahmen bei der Holzvariante infolge eines Schadensfalls vergrössern den Unterschied zwischen beiden Varianten (Abbildungen 17-19). Dieser Effekt ist am grössten bei der grauen Energie gefolgt von der Auswirkung auf die Umweltbelastungspunkte. Bei den Ergebnissen der Treibhausgasemissionen sind die Auswirkungen geringer.

Die Variante Stahlbeton mit Mittelstütze schneidet in allen Modellen leicht besser ab als die Holzvariante mit Mittelstütze. Die Holzvarianten weisen folglich trotz der zusätzlichen Instandsetzungsmassnahmen, dem Ersatz von $\frac{1}{4}$ des Trägers, einen höheren Wert auf als die Betonstahlvariante mit Mittelstütze.

Bei der grauen Energie weist die Holzvarianten ohne Mittelstütze die höchsten Werte auf. Bei den anderen zwei Wirkungsmodellen weist die Betonstahlvariante ohne Mittelstütze einen höheren Wert als die Holzvarianten auf.

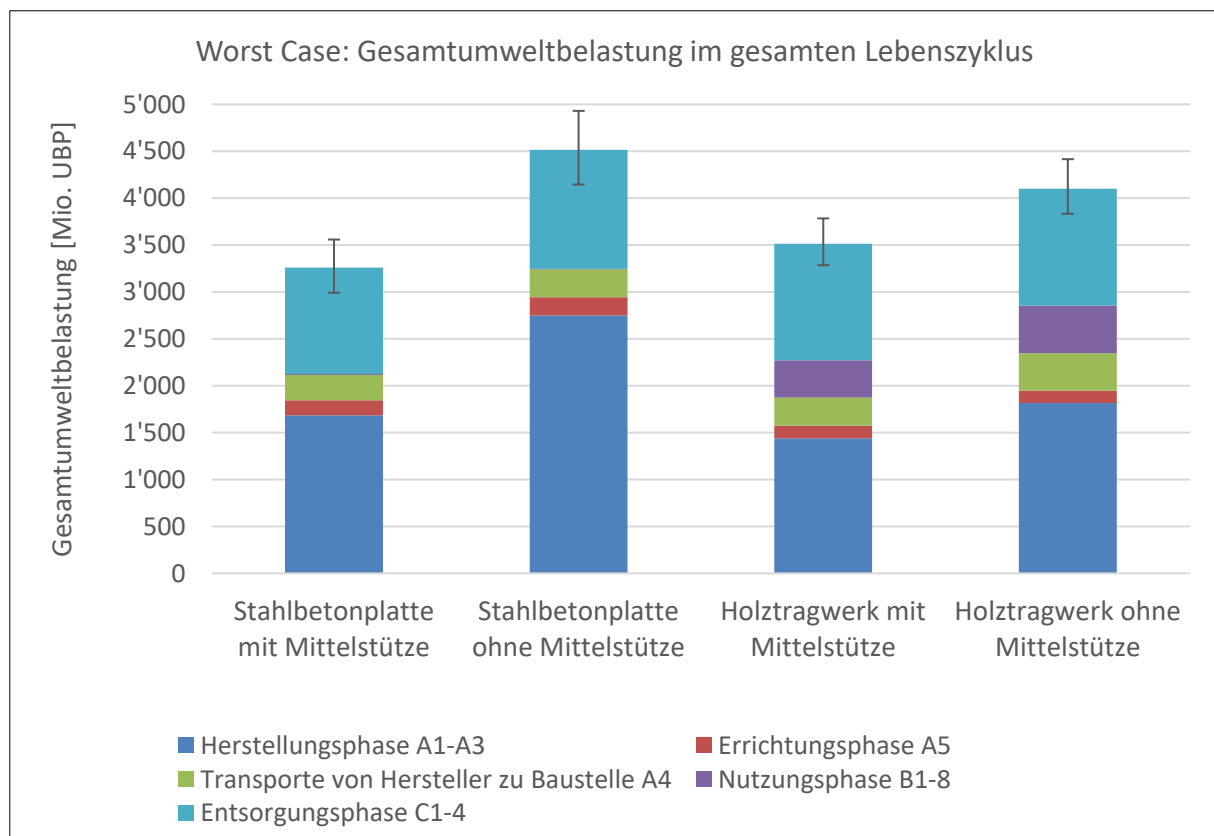


Abbildung 17: Gesamtumweltbelastung im gesamten Lebenszyklus für das 'Worst Case' Szenario

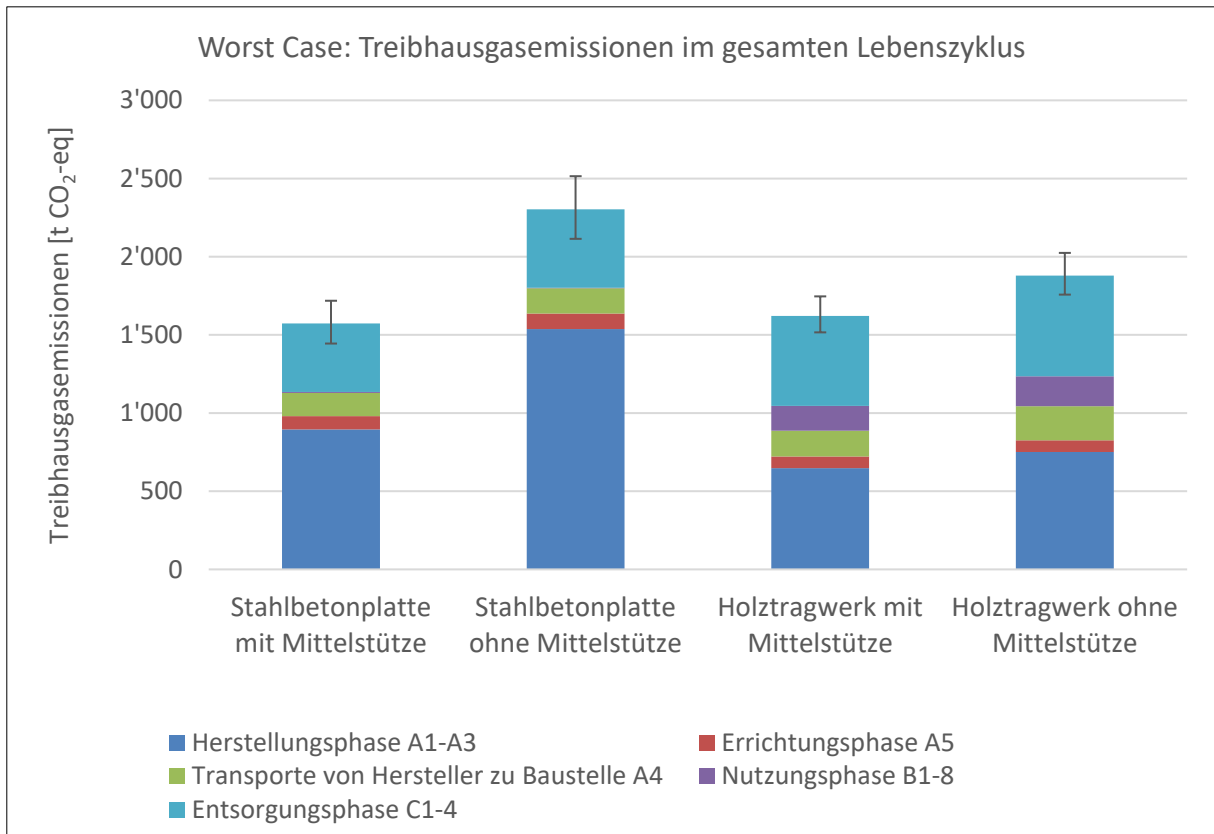


Abbildung 18: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus für das 'Worst Case' Szenario

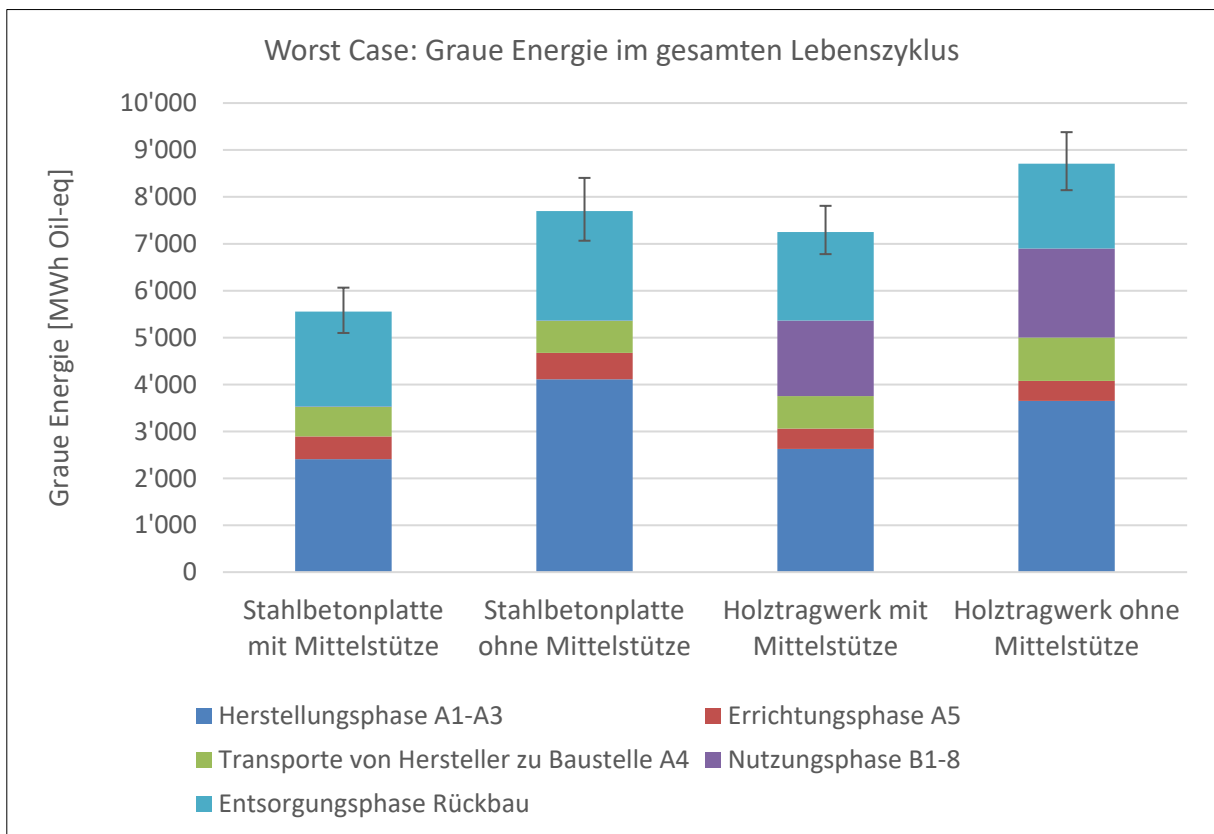


Abbildung 19: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus für das 'Worst Case' Szenario

3.4.4 Vergleich Referenzszenario zu 'Best Case' und 'Worst Case'

Die folgenden Abbildungen 20 bis 23 zeigen das Referenzszenario aller Varianten im Vergleich mit den Holzvarianten der Szenarien für Best und Worst Case auf.

Bei zwei von drei Wirkungsmodellen (Umweltbelastungspunkte und Treibhausgasemissionen) weist die Holzvariante mit Mittelstütze im 'Best Case' Szenario den geringsten Wert aus, gefolgt von der Stahlbetonvarianten mit Mittelstütze des Referenzszenarios.

Die Holzvariante mit Mittelstütze weist zwar bei der ökologischen Knappheit und den Treibhausgasemissionen im Referenz-, Best und Worst Case Szenario ähnliche Werte auf, diese liegen aber in der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten und deshalb statistisch vernachlässigbar.

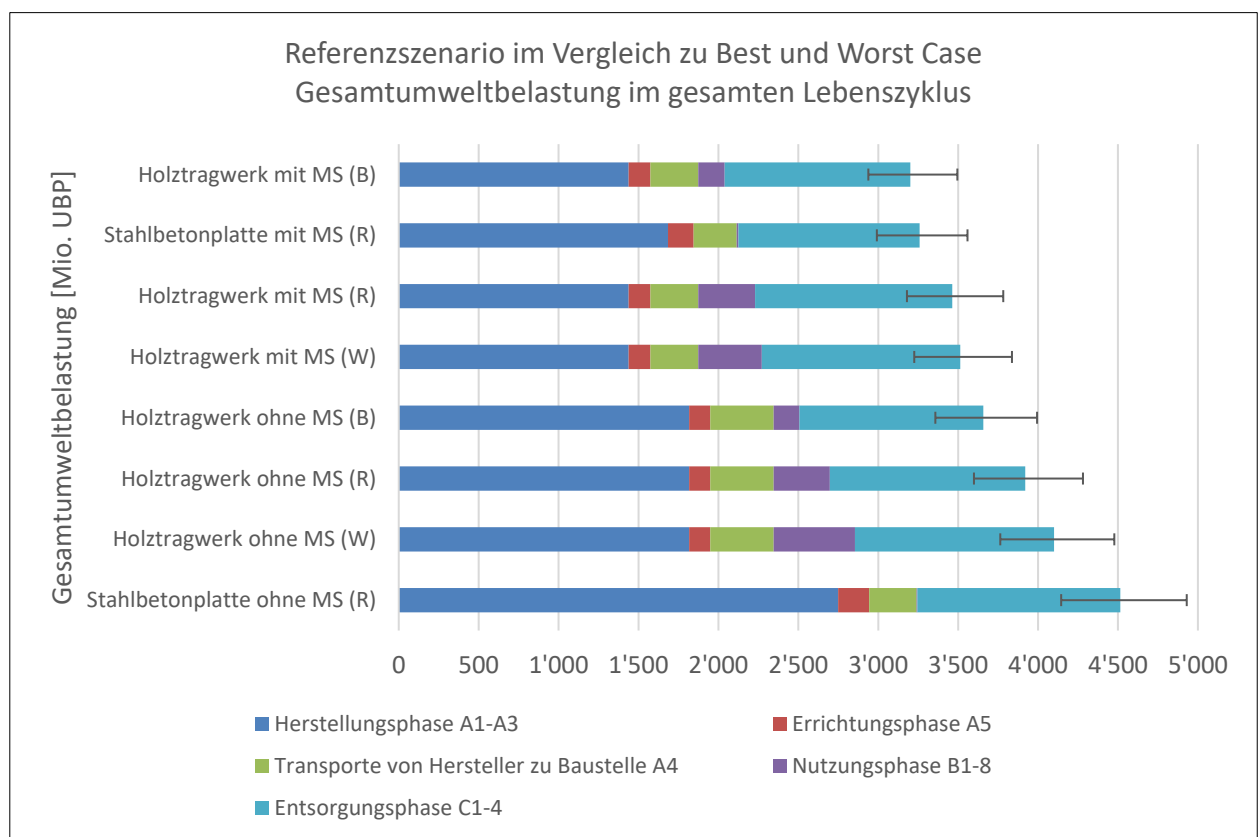


Abbildung 20: Gesamtumweltbelastung im gesamten Lebenszyklus, Referenzszenario im Vergleich zu Best und Worst Case, Legende: R = Referenzszenario, B = Best Case, W = Worst Case

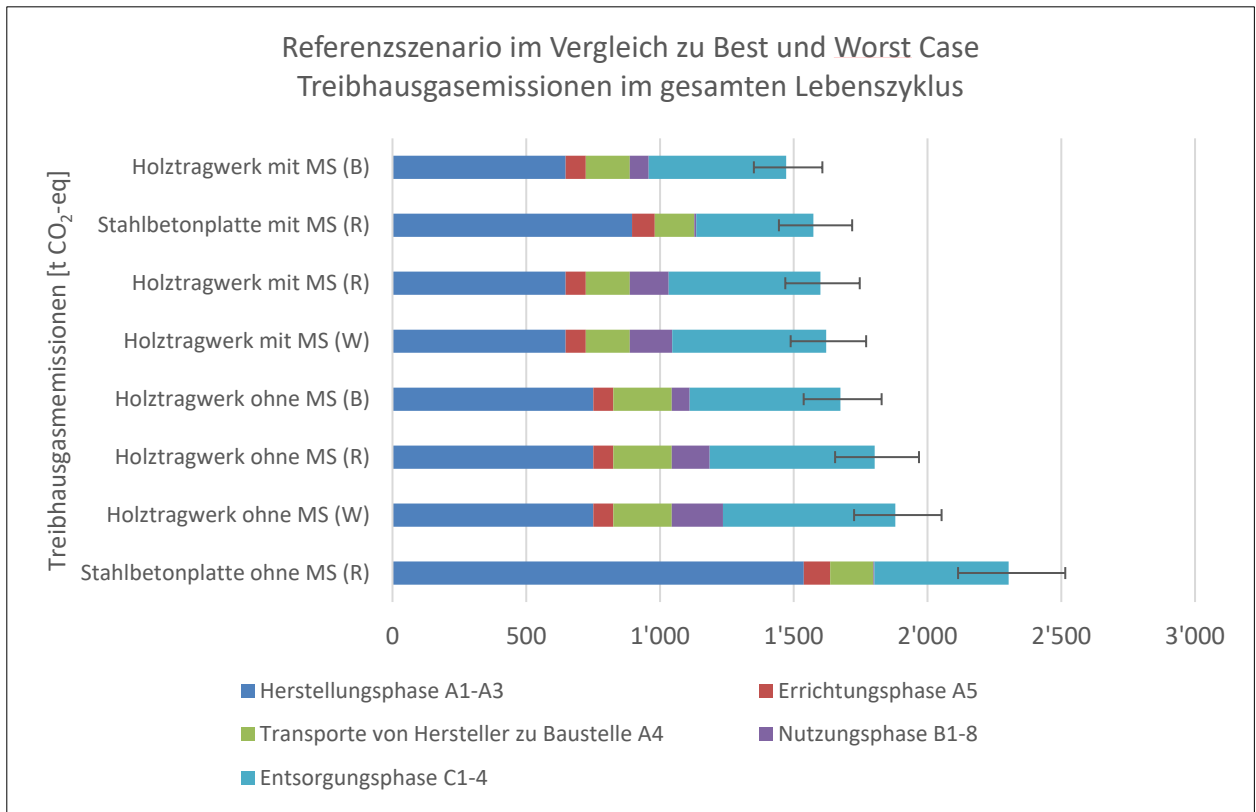


Abbildung 21: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus, Referenzszenario im Vergleich zu Best und Worst Case, Legende: R = Referenzszenario, B = Best Case, W = Worst Case

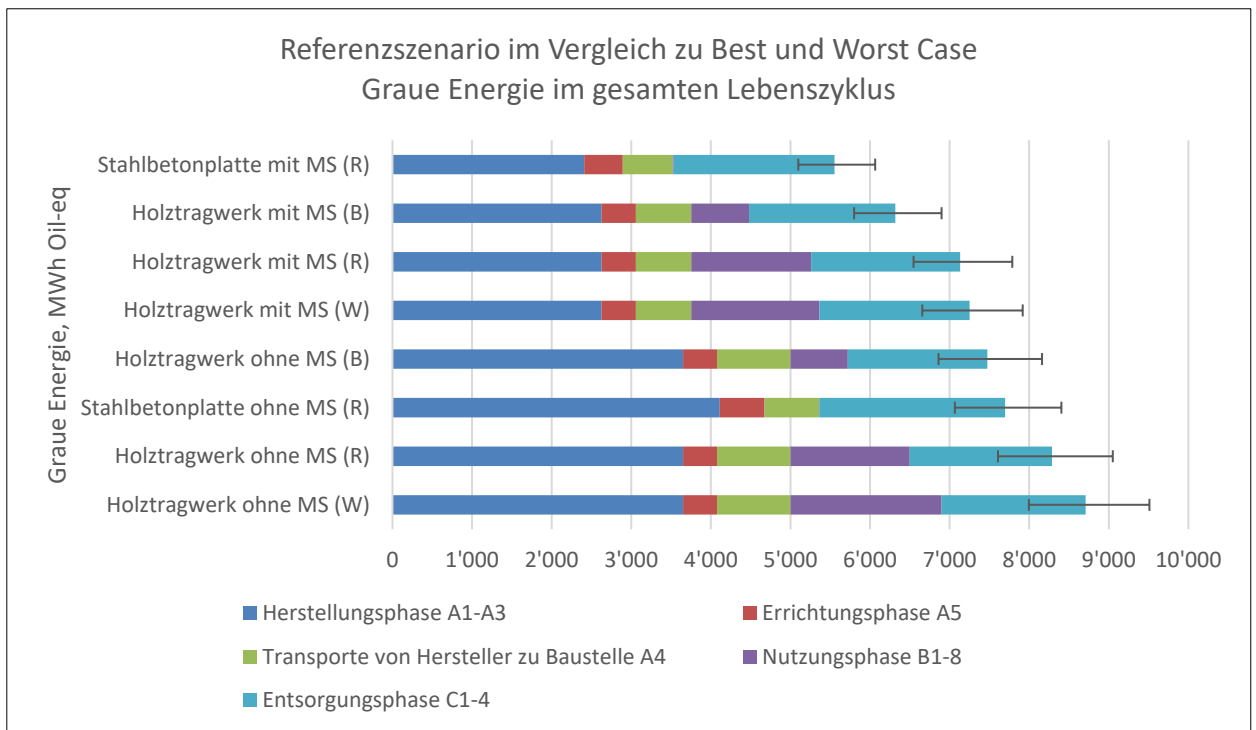


Abbildung 22: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus, Referenzszenario im Vergleich zu Best und Worst Case, Legende: R = Referenzszenario, B = Best Case, W = Worst Case

4 Interpretation und Schlussfolgerung

Am Beispiel des untersuchten Bauprojektes schneidet die Variante mit einem Stahlbetontragwerk mit Mittelstütze in Bezug auf ihre Treibhausgasemissionen, Graue Energie und Gesamtumweltbelastung (UBP) besser oder, je nach Szenario, gleich ab wie die Holzvariante mit Mittelstütze. Die Varianten ohne Mittelstützen weisen die höchsten Werte bei allen Wirkungsmethoden auf. Deshalb empfehlen wir, aus Sicht der Ökobilanz, die Stahlbetonvariante mit Mittelstütze umzusetzen.

Die Holzvariante mit Mittelstütze könnte unter bestimmten Bedingungen und je nach Gewichtung der Umweltindikatoren ebenfalls eine umsetzbare Alternative darstellen, insbesondere wenn die Instandsetzung minimiert werden kann. Dies ist zurückzuführen auf das 'Best Case' Szenario. Im 'Best Case' Szenario und gemäss der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) und der Treibhausgasemissionen weist die Holzvariante mit Mittelstütze den geringsten Wert auf, die Unterschiede liegen jedoch innerhalb der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten (Streubreich der Fehlerindikatoren in den Abbildungen) im Vergleich zur Stahlbetonvariante mit Mittelstütze.

Bei den Holzvarianten führt die Herstellung des Holzes in Deutschland gegenüber Schweden zu geringeren Werten bei allen drei Wirkungsmodellen.

Der Vorteil der Stahlbetonvariante mit Mittelstütze ist auf folgende Aspekte zurückzuführen:

- Instandsetzungsmassnahmen:

Die Instandsetzungsmassnahmen sind höher bei den Holzvarianten als bei den Stahlbetontragwerken, was zu höheren Aufwänden (Material, Maschinenstunden etc.) führt und sich auch bei der Entsorgung widerspiegelt. Die Holzvariante mit Mittelstütze weist zwar im 'Best Case' Szenario bei der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) und den Treibhausgasemissionen geringere Werte auf als die Stahlbetonvariante mit Mittelstütze auf, diese liegen aber in der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten und sind deshalb statistisch nicht signifikant.

- Material:

Die Varianten ohne Mittelstütze benötigen deutlich grössere Mengen an Material. Dies betrifft vor allem Beton, Stahl und Holz (Vorspannstahl beim der Betonstahlvariante und Bohrpfähle bei der Holz- und Betonstahlvariante). Bei den Holzvarianten kommt zusätzlich Material für den Ersatz der Abdichtungen dazu, was sich auch in einem erhöhten Aufwand bei der Entsorgung widerspiegelt.

Ein weiterer Aspekt, welcher bei den Holzvarianten beachtet werden muss, ist die Störung der Umgebung durch die die periodisch anfallenden Instandsetzungsarbeiten. Die Vernetzungsfunktion wird durch diese Eingriffe eingeschränkt, da die Wildtiere die Wildtierüberführung schätzungsweise für einige Zeit meiden werden. Laut Experten halten Veränderungen an der Umgebung die Tiere von der Nutzung ab. Die Störung der Umgebung kann reduziert werden, wenn keine oder nur eine einmalige Instandsetzung der Abdichtungen anfallen.

Die Errichtung von Wildtierüberführungen ist ein bedeutender Schritt im Schutz der Biodiversität. Obwohl die Herstellung und der Bau dieser Überführungen einen ökologischen Fussabdruck

hinterlassen, übersteigt der langfristige Nutzen für die Umwelt bei weitem die negativen Auswirkungen. Wildtierüberführungen tragen massgeblich zur Erhaltung empfindlicher Ökosysteme bei, indem sie Lebensräume verbinden und das Risiko von Unfällen mit Wildtieren reduzieren.

Unterschiede zur vergleichenden Ökobilanz für zwei Varianten einer Wildtierbrücke im Kanton Zürich

Der Kanton Zürich veröffentlichte 2021 eine Ökobilanz, in welcher zwei Varianten eines Tragwerks für eine Wildtierbrücke aus Holz bzw. Stahlbeton verglichen wurden [7]. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Holzvariante in Bezug auf das Treibhauspotenzial deutlich besser abschneidet als die Stahlbetonvariante. Bei den Wirkungsmodellen der Grauen Energie und der ökologischen Knappheit liegen die Unterschiede innerhalb der Bandbreite möglicher Datenunsicherheiten. In der Studie wird erwähnt, dass der Unterschied zwischen den beiden Varianten kleiner wird, wenn bei der Holzvariante ein höherer Instandsetzungsaufwand während der Nutzungsdauer erforderlich wird.

Im Vergleich zur den hier betrachteten Wildtierüberführungen wurde auch bei der Stahlbetonvariante eine Abdichtung zwischen Tragwerk und Überdeckung eingebaut und entsprechende Instandsetzungsarbeiten bilanziert. Zusätzlich sind die Tragwerke leicht anders konstruiert. Die im Kanton Zürich betrachteten Brücken bestehen grösstenteils aus Holz bzw. komplett aus Stahlbeton (Bogentragwerke). Das hier betrachtete Tragwerk aus Holz besteht teilweise auch aus Stahlbeton und benötigt deshalb auch mehr Material, was sich in einem höheren Gesamtgewicht der Holzvarianten zeigt. Die Holzvarianten weisen auch höhere Instandsetzungsmassnahmen auf als in der Ökobilanz des Kantons Zürich. Das hier abgebildete Ausmass an Instandsetzungsmassnahmen wird jedoch als realistisch betrachtet.

Speicherung von biogenem Kohlenstoff im Holz

Holz wird in der Ökobilanz als Teil eines CO₂-Kreislaufs betrachtet. Während des Wachstums eines Baums wird CO₂ aufgenommen und gespeichert. Dieses CO₂ wird bei der Verbrennung der Holzprodukte am Ende ihrer Lebensdauer jedoch wieder freigesetzt. In der Ökobilanz wird der Beitrag von Holz zum Treibhauseffekt daher als neutral betrachtet.

Aktuell wird die temporäre Speicherung von CO₂ im Holz von Bauwerken diskutiert. Berücksichtigt man diesen Effekt, dann vergrössert sich der Vorteil einer Holzvariante. Allerdings ist diese Abschätzung mit grossen Unsicherheiten verbunden und bietet lediglich einen temporären Benefit. Gemäss Experten [26] wird von einer Dauer von 3'000-8'000 Jahren ausgegangen, um diesen Vorteil dauerhaft geltend zu machen. Es wird deshalb als kritisch angesehen, diese bei einer Lebensdauer der Wildtierüberführungen von 100 Jahren zu berücksichtigen. Die temporäre Speicherung von biogenem Kohlenstoff in den Holzbestandteilen der Wildtierüberführung wird deshalb nicht bilanziert. Bestärkt wird dies durch die Bilanzierungsregeln der KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [1]. Die Regel verlangt, ungeachtet der Entsorgung, dass eine ausgeglichene biogene CO₂-Bilanz erstellt werden muss. Die Bilanzierungsregeln nennt drei spezifische Ausnahmen, bei welchen von der ausgeglichenen biogenen CO₂-Bilanz abgewichen werden darf. Diese treffen nicht auf die hier betrachtete Wildtierüberführungen zu.

Referenzen

- [1] KBOB, ecobau, IPB, „Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 6.0,“ Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich, Bern, 2022.
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Ökobilanzinventar der Bundesverwaltung (BAFU:2022), DQRv2:2022,“ Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 2023.
- [3] Y. Niu und G. Fink, „Life Cycle Assessment on modern timber bridges,“ *Wood Material Science & Engineerin*, Nr. 14:4, pp. 212-225, 2019.
- [4] J. Hammervold, M. Reenaas und H. Brattebø, „Environmental life-cycle assessment of bridges,“ *Journal of Bridge Engineering*, Bd. Volume 18, Nr. Issue 2, 2011.
- [5] L. Bouhaya, R. Le Roy und A. Feraille-Fresnet, „Simplified environmental study on innovative bridge structure,“ *Environmental Science and Technology*, p. 2066–2071, 2009.
- [6] A. Horvath und C. Hendrickson, „Steel versus Steel-Reinforced Concrete Bridges: Environmental Assessment,“ *Journal of Infrastructure Systems*, Bd. Issue 3, Nr. Volume 4, 1998.
- [7] S. Kytzia, T. Pohl und A. Bachmann, „Vergleichende Ökobilanz für zwei Varianten der Wildtierbrücke zur Wiederherstellung der Landschaftsverbindung Nr. 49,“ Baudirektion, Kanton Zürich, Zürich, 2021.
- [8] I. 14040, „Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines,“ ISO, Geneva, 2006.
- [9] I. 14044, „Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines,“ ISO, Geneva, 2006.
- [10] EN 15643-5:2017, „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, 2018-11-01.
- [11] R. Frischknecht und S. Büsser Knöpfel, „Ökofaktoren Schweiz 2013 gmäss der Methode der ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2013.
- [12] A. Gautschi, „Green Economy - The Method of Ecological Scarcity in Policy Making, in Economics and Environmental Monitoring Division,“ *Bundesamt für Umwelt (BAFU)*, 2013.
- [13] S. Hellweg, S. Rubli und R. Juraske, „Vorlesung: Grundzüge “Ökologische Systemanalyse”,“ ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2017.
- [14] F. Dinkel, „Skrip Ökobilanzen der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW,“ Fachhochschule Nordwestschweiz, Basel, 2013.
- [15] T. Pohl, „Reduktion der Umweltbelastung des Tiefbauamts des Kantons Zürich - Ökobilanz, Reduktionspotentiale und Ökoeffizienzanalyse (SEBI),“ Baudirektion des Kantons Zürich - Tiefbauamt Kt. ZH, Zürich, 2022.

- [16] KBOB, eco-bau und IPB, „KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2022: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022,“ Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2023.
- [17] Treeze, „Betonsortenrechner für Planende,“ 2023. [Online]. Available: https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/calculators/Betonsortenrechner_Planer_DE/Betonsortenrechner_Planer.htm.
- [18] Treeze, „Holzrechner,“ 2024. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi eprnMxeKEAxWi8bsIHQsBBqEQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Ftreeze.ch%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2Fcalculators%2F631-Holzrechner_v1.0.xlsx&usg=AOvVaw0nXdEll1d-_zoOkBgP_Mdh&opi=89978449.
- [19] Infra Suisse, „<https://infra-suisse.ch/nachhaltigkeit/eco2nstruct/>,“ 2024. [Online]. Available: <https://eco2nstruct.infra-suisse.ch/login>.
- [20] Schweizerischer Baumeisterverband SBV, „<https://shop.baumeister.swiss/pi/Technik-Betriebswirtschaft/Standard-Analysen/Standard-Analysen-SBV.html>,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.tb-viewer.ch/session/login>.
- [21] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren UBP'21,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2022.
- [22] T. Kägi, F. Dinkel, R. Frischknecht, S. Humbert, J. Lindberg, S. De Mester, T. Ponsioen, S. Sala und U. W. Schenker, „Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?" - SETAC Europe 25th Annual Meeting,“ *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 Mai 2015.
- [23] IPCC 2021, „Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group + to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom an New York USA, 2021.
- [24] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Climate Change 2007: Synthesis Report,“ Valencia, 2007.
- [25] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, R. Hischier, S. Hellweg, S. Humbert, M. Margni, T. Nemecek und M. Spielmann, „Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,ecoinvent report No. 3,“ ecoinvent, Zürich, 2007.
- [26] C. Brunner, „Climate effect of temporarily stored CO2 within building materials,“ in *80. Discussion forum on life cycle assesment*, Zürich, ETH Zentrum Campus, 2022.

Verzeichnisse

Begriffe und Abkürzungen

CO ₂ -eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente («equivalents»)
FU	Funktionelle Einheit der Ökobilanz, engl. «Functional unit»
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
KEA	Kumulierter Energieaufwand; Ökobilanzmethode zur Erfassung des Gesamtenergieaufwandbedarfs inkl. «Grauer Energie». KEA zeigt den direkten und auch den indirekten nicht-erneuerbaren Energieverbrauch, welche über Charakterisierungsfaktoren in MJ Öl-Equivalente umgerechnet werden. Diese Wirkungskategorie beinhaltet die energetischen Inputs für die Gewinnung, Herstellung und Entsorgung aller benötigten Materialien und Hilfsstoffe und bewertet dabei den Bedarf an nicht erneuerbaren primären Energieträgern wie Kohle, Öl oder Uran.
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse = Ökobilanz, die Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse oder life cycle assessment (LCA) genannt, ist ein Hilfsmittel zur Analyse der Umweltwirkung. Der Wortteil «Öko» steht dabei für die Umweltwirkung und der Wortteil «Bilanz» für die buchhalterische Erfassung sämtlicher Umweltwirkungen über den ganzen Lebenszyklus eines Produkts oder Prozesses in quantitativer/numerischer Form. Wichtig dabei ist, dass alle Emissionen und Ressourcenverbräuche während der Entstehung, über die eigentliche Lebenszeit bis zur Entsorgung oder Wiederverwertung in die Lebenszyklusanalyse einfließen – «von der Wiege bis zur Bahre».
MJ Oil-eq	Megajoule Öl Äquivalente (“equivalents”)
UBP	Umweltbelastungspunkte (Einheit der vollaggregierten Ökobilanz-Methode der ökologischen Knappheit, engl. Ecological Scarcity)

Abbildungen

Abbildung 1: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels der UBP-Methode. Grundschemata der Verknüpfung der Sachbilanz mit den Wirkungsmodellen (Charakterisierung) und dem Gesamtindex der ökologischen Knappheit (Gewichtung und Ergebnis)	9
Abbildung 2: Variante 1 - Stahlbetonplatte mit Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023)	12
Abbildung 3: Variante 2 - Stahlbetonplatte ohne Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023)	13
Abbildung 4: Variante 3 - Holztragwerk mit Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023).....	14
Abbildung 5: Variante 4 - Holztragwerk ohne Mittelstütze (Bänziger Partner AG, 2023).....	15
Abbildung 6: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5	19
Abbildung 7: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung mittels gesamtaggrierender Methoden.....	33
Abbildung 8: Umweltbelastung im gesamten Lebenszyklus für das Referenzszenario	36
Abbildung 9: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus für das Referenzszenario	37
Abbildung 10: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus für das Referenzszenario	37
Abbildung 11: Umweltwirkung des Referenzszenario in der Herstellungsphase A1 - A3	38
Abbildung 12: Umweltwirkung des Referenzszenario in der Entsorgungsphase.....	39
Abbildung 13: Umweltwirkung Lebenszyklus des Referenzszenario im Vergleich zum Szenario Holzherstellung, Legende: R = Referenzszenario, H = Herstellungsszenario.....	40
Abbildung 14: Gesamtumweltbelastung im gesamten Lebenszyklus für das 'Best Case' Szenario	41
Abbildung 15: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus für das 'Best Case' Szenario	42
Abbildung 16: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus für das 'Best Case' Szenario.....	42
Abbildung 17: Gesamtumweltbelastung im gesamten Lebenszyklus für das 'Worst Case' Szenario	43
Abbildung 18: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus für das 'Worst Case' Szenario	44
Abbildung 19: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus für das 'Worst Case' Szenario	44
Abbildung 20: Gesamtumweltbelastung im gesamten Lebenszyklus, Referenzszenario im Vergleich zu Best und Worst Case, Legende: R = Referenzszenario, B = Best Case, W = Worst Case.	45
Abbildung 21: Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus, Referenzszenario im Vergleich zu Best und Worst Case, Legende: R = Referenzszenario, B = Best Case, W = Worst Case.	46
Abbildung 22: Graue Energie im gesamten Lebenszyklus, Referenzszenario im Vergleich zu Best und Worst Case, Legende: R = Referenzszenario, B = Best Case, W = Worst Case.....	46

Tabellen

Tabelle 1: Instandsetzungsmassnahmen für alle Varianten und Szenarien	17
Tabelle 2: Materialzusammensetzung der Stahlbetonvariante mit Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.....	20
Tabelle 3: Materialzusammensetzung der Stahlbetonvariante ohne Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.	20
Tabelle 4: Materialzusammensetzung der Holzvariante mit Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.....	21
Tabelle 5: Materialzusammensetzung der Holzvariante ohne Mittelstütze und Datensätze des Ökoinventars.....	22
Tabelle 6: Transportdistanzen Hersteller – Baustelle für alle vier Varianten und Datensätze des Ökoinventars.....	23
Tabelle 7: Maschinenstunden der Stahlbetonvarianten in der Errichtung und Datensätze des Ökoinventars.....	23
Tabelle 8: Maschinenstunden der Holzvarianten in der Errichtung und Datensätze des Ökoinventars.....	24
Tabelle 9: Instandhaltungs-/setzungsmassnahmen für alle Varianten und Szenarien.....	25
Tabelle 10: Referenz und Transport Szenario: Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Stahlbetonvariante mit und ohne MS und Datensätze des Ökoinventars.	25
Tabelle 11: Referenz und Transport Szenario: Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Holzvariante mit und ohne MS und Datensätze des Ökoinventars.	26
Tabelle 12: ‘Best Case’ Szenario: Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Holzvariante mit und ohne MS und Datensätze des Ökoinventars.	28
Tabelle 13: ‘Worst Case’ Szenario: Zusätzlicher Aufwand der Instandhaltung/-setzung der Holzvariante mit und ohne MS im Vergleich zum Referenzszenario.	29
Tabelle 14: Entsorgungsprozesse der Stahlbetonvarianten und Datensätze des Ökoinventars.....	30
Tabelle 15: Maschinenstunden des Rückbaus der Stahlbetonvarianten und Datensätze des Ökoinventars.....	30
Tabelle 16: Entsorgungsprozesse der Holzvarianten und Datensätze des Ökoinventars.	30
Tabelle 17: Maschinenstunden des Rückbaus der Holzvarianten und Datensätze des Ökoinventars	31
Tabelle 18: Transportdistanzen Baustelle - Entsorger aller Varianten und Datensätze des Ökoinventars.....	31

Anhang: Verzeichnis des elektronischen Anhangs

Der Anhang wird in elektronischer Form dokumentiert. Er umfasst:

- Wirkungsbilanz für alle vier Szenarien