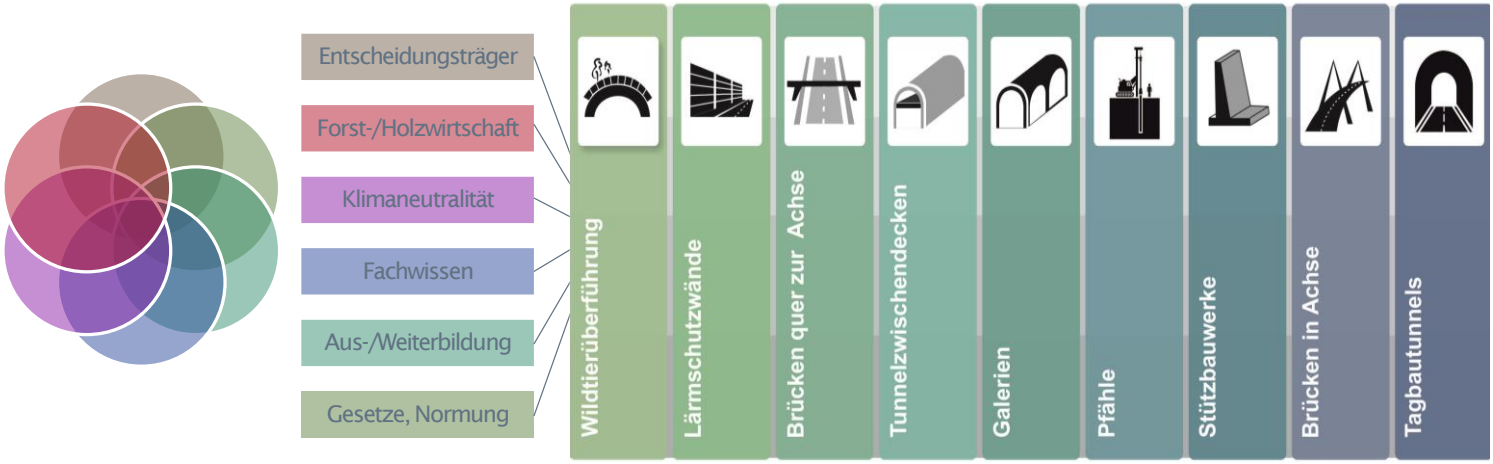


Dekarbonisierung Infrastrukturbauten

CO_2-Reduktionspotenzial und End-of-Life-Szenarien für den Holzbau

Technischer Bericht – Teilprojekt 3

Prof. Dr. Aude Chabrelie
Prof. Dr. Heiko Thömen

Biel/Bienne, 13. März 2024

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wald, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Berner Fachhochschule, Departement Architektur, Holz und Bau

Autor/Autorin: Prof. Dr. Aude Chabrelie, Prof. Dr. Heiko Thömen

Begleitung BAFU: Christian Aebischer, Alfred Kammerhofer

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Eine kritische Überprüfung wurde durch Dritte durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Impressum 2

Abbildungsverzeichnis 5

Tabellenverzeichnis 6

1 Zusammenfassung 7

2 Ausgangslage und Auftragsbeschrieb 9

3 Vereinfachte Ökobilanzen – Baumaterialien 11

3.1 Infrastrukturobjekte und Methodik 11
3.2 Ergebnisse – Treibhausgasemissionen und Primärenergie 17
3.3 Schlussfolgerung – Sensitivitätsanalysen, Vergleichsstudien, Interpretation 29

4 Speicherleistung Holz – Temporäre Speicherung biogenes CO_2 33

4.1 Einleitung 33
4.2 Grundsätzliche Anmerkungen zur Anrechenbarkeit temporärer Kohlenstoffspeicher 33
4.3 Abschätzung der CO_2-Speicherung im Holz für jedes Objekt 35

5 Speicherleistung Beton – Permanente Speicherung durch Karbonatisierung 37

5.1 Phänomen und Einflussfaktoren 37
5.2 Abschätzung der CO_2-Speicherung durch die Karbonatisierung für jedes Objekt 37

6 End-of-Life – Szenarien für die Holzbauweise 39

6.1 Einleitung 39
6.2 Voraussetzungen für spätere stoffliche Nutzung 39
6.3 Verwertungsoptionen 41
6.4 Fazit End-of-Life 42

7 Schlussfolgerungen 43

8 Grundlegende Massnahmen zur Umsetzungs- und Forschungsstrategie 44

8.1 Technische Massnahmen 44
8.2 Methodenentwicklung 44
8.3 Politische und normative Massnahmen 45

9 Literatur 46

ANHANG 47

I. Materiallisten und Lebensdauer 48
II. Umweltauswirkungsdaten von den Hauptbaumaterialien 55
III. Umweltbelastungspunkte 57
IV. Teilnehmende am Expert:innenworkshop zum Teilprojekt 3 am 30. Juni 2023 58
V. Reviewbericht vom Verifizierer 59

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. Übersicht der Treibhausgasemissionen (THGE) aller Objekte	7
Abb. 2: Phasen der Vergabe und Projektierung zur Ableitung der Teilprojekte	9
Abb. 3: Überblick zu den Themenfeldern mit den wesentlichen Inhalten	10
Abb. 4: Darstellung der sechs betrachteten Objekte	11
Abb. 5. Betrachtete Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4	13
Abb. 6. Zeichnungen der Wildtierüberführungen aus Beton und Holz.	17
Abb. 7. Treibhausgasemissionen für eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung	18
Abb. 8. Primärenergie für eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung	18
Abb. 9. Zeichnungen der Lärmschutzwände aus Beton und Holz	19
Abb. 10. Treibhausgasemissionen für eine 4 m lange und 3 m h*ohe* Lärmschutzwand	20
Abb. 11. Primärenergie für eine 4 m lange und 3 m hohe Lärmschutzwand	20
Abb. 12. Zeichnungen der Brücken quer zur Achse aus Beton und Holz	21
Abb. 13. Treibhausgasemissionen für eine 60 m lange Brücke quer zur Achse	22
Abb. 14. Primärenergie für eine 60 m lange Brücke quer zur Achse	22
Abb. 15. Zeichnungen der Tunnelzwischendecke aus Beton und Holz	23
Abb. 16. Treibhausgasemissionen für 1 lfm einer Tunnelzwischendecke	24
Abb. 17. Primärenergie für 1 lfm einer Tunnelzwischendecke	24
Abb. 18. Zeichnungen der Lärmschutzgalerie aus Beton und Holz	25
Abb. 19. Treibhausgasemissionen für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie	26
Abb. 20. Primärenergie für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie	26
Abb. 21. Zeichnungen des Tagbautunnels aus Beton und Holz	27
Abb. 22. Treibhausgasemissionen für 1 lfm eines Tagbautunnels	28
Abb. 23. Primärenergie für 1 lfm eines Tagbautunnels	28
Abb. 24. Übersicht der Treibhausgasemissionen (THGE) aller Objekte	29
Abb. 25. Übersicht der Primärenergie aller Objekte	30
Abb. 26. Modellierter globaler Temperaturanstieg (Matthews et al., 2022)	34
Abb. 27. Übersicht der Umweltbelastungspunkte UBP'21 aller Objekte	57

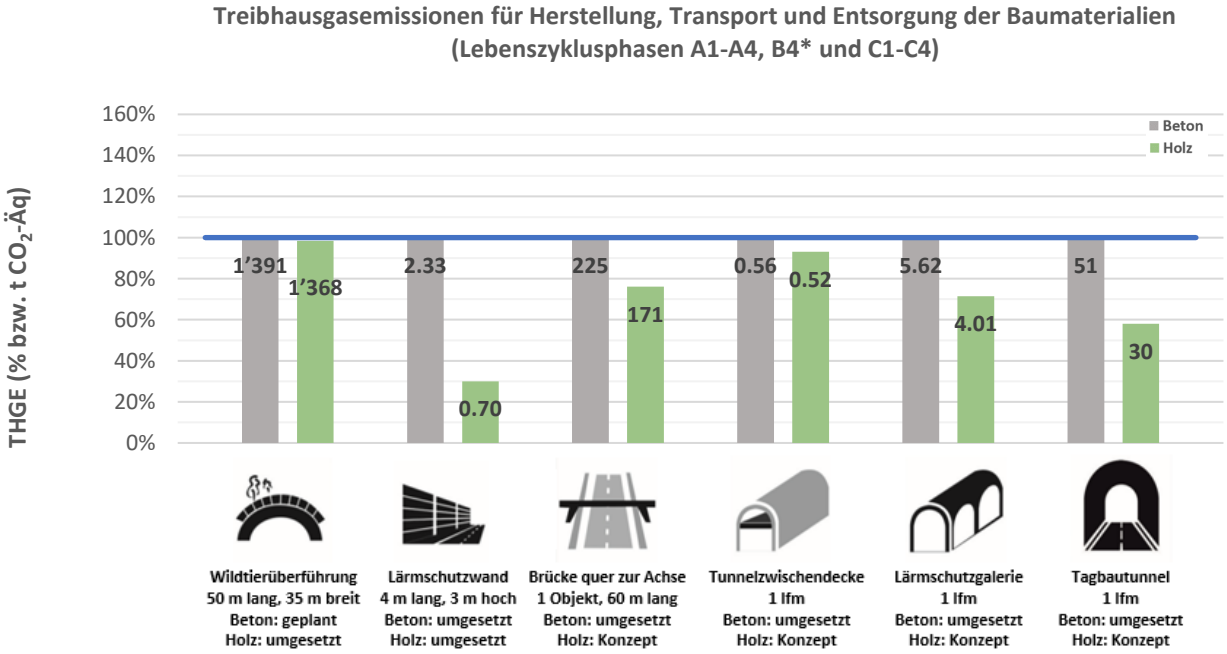
Tabellenverzeichnis

Tab. 1. Funktionelle Einheiten der einzelnen Objekte	12
Tab. 2. Lebensdauer von jedem Objekt und deren Baugruppen	14
Tab. 3. Annahmen für den Transport (Modul A4) innerhalb der Schweiz	16
Tab. 4. Minimal erforderliche Lebensdauer der Holzvarianten (gem. THGE und PENRE)	31
Tab. 5. Temporäre CO_2-Speicherung durch die Bindung von biogenem CO_2	36
Tab. 6. Permanente CO_2-Speicherung in den Betonbauten durch die Zement-Karbonatisierung	38
Tab. 7. Materialliste und Lebensdauer für eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung	48
Tab. 8. Materialliste und Lebensdauer für eine 4 m lange und 3 m hohe Lärmschutzwand	49
Tab. 9. Materialliste und Lebensdauer für eine 60 m lange Brücke quer zur Achse	50
Tab. 10. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm einer Tunnelzwischendecke	51
Tab. 11. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie	52
Tab. 12. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm eines Tagbautunnels	54
Tab. 13. Umweltauswirkungsdaten (Treibhausgasemissionen, Primärenergie und UBP)	55
Tab. 14. Quellen der Umweltauswirkungsdaten jedes Baumaterials	56
Tab. 15. Minimal erforderliche Lebensdauer der Holzvarianten (gem. UBP)	57

1 Zusammenfassung

Zur Abschätzung des Dekarbonisierungspotentials, welches sich aus der Ausführung von Infrastrukturbauten in Holz- statt in Betonbauweise ergibt, wurden an sechs exemplarischen Objektpaaren jeweils vereinfachte Ökobilanzierungen durchgeführt. Die Objekte in Betonausführung wurden überwiegend vom ASTRA zur Verfügung gestellt. In vier Fällen wurden die Varianten in Holzbauweise durch ein Holzbauingenieurbüro auf Konzeptstufe geplant, während für die Wildtierüberführungen und die Lärmschutzwände auf bereits umgesetzte Objekte zurückgegriffen werden konnte.

Die vereinfachten Ökobilanzierungen ergaben, dass sich die Treibhausgasemissionen für Herstellung, Transport und Entsorgung der Baumaterialien (Module A1 bis A4 und C1 bis C4, mit Einbezug der Ersatzmaterialien für Sanierungen in diese Module) bei Ausführung in Holz- statt in Betonbauweise um 2 bis 70 % reduzieren lassen (Abb. 1), mit erheblichen Unterschieden zwischen den betrachteten Objekten. Werden die graue Energie und die Umweltbelastungen betrachtet, reduziert sich der Unterschied zwischen einer Holz- und einer Betonausführung deutlich. Die Fundamente sind in die Betrachtungen eingeschlossen, wobei gleiche Fundamente für Holz- und Betonbauweise angenommen wurden. Verkehrliche Auswirkungen sind nicht Teil der vorliegenden Studie.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 1. Übersicht der Treibhausgasemissionen (THGE) aller Objekte. Darstellung der Emissionen in Prozent des jeweiligen Wertes für die Betonvariante, mit absoluten Zahlenwerten auf den Balken in t CO_2-Äq

Unter der Annahme, dass zu 100 % Schweizer Holz verwendet wird, verbessern sich die Reduktionswerte für die Holzvarianten nochmals um 1 bis 19 Prozentpunkte. Wird dagegen mit einer 100-prozentigen Einfuhr des Holzes gerechnet, so können sich die Treibhausgasemissionen der Holzvarianten erkennbar erhöhen. In den meisten Fällen liegt die Primärenergie nicht-erneuerbar (PENRE) für die Holzvariante niedriger als für die Betonvariante; einzig für die Tunnelzwischendecken liegt dieser Wert über dem Referenzwert.

Den hier präsentierten Emissionswerten liegt die Annahme zugrunde, dass die Holz- und Betonvarianten jeweils die gleiche Lebensdauer erreichen, bei materialspezifischen Ersatzintervallen einzelner Baugruppen oder -elemente. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass sich die Lebensdauern der Holzvarianten zum Teil deutlich reduzieren dürften, um auf gleiche Treibhausgasemissionen zu kommen. Die deutlichste Abnahme der Lebensdauer von 100 auf 30 Jahre ergibt sich dabei für Lärmschutzwände.

Ergänzend zur Berechnung der Treibhausgasemissionen für Herstellung, Transport und Entsorgung der Baumaterialien wurde eine Bestimmung der Kohlenstoffspeicherung in den Holzelementen von Infrastrukturbauten wie auch eine Abschätzung des Karbonatisierungseffekts an den Oberflächen von Betonbauteilen vorgenommen. Die in Infrastrukturbauten aus Holz temporär gespeicherten Mengen an biogenem CO_2 sind erheblich und können ein Vielfaches der CO_2-Emissionen erreichen, welche bei Herstellung, Transport und Entsorgung der Baumaterialien emittiert werden. Die direkte Gegenrechnung von Emissionen aus der Herstellung einerseits und Mengen an gespeichertem CO_2 andererseits ist nicht zulässig. Zielführend erscheinen aber Überlegungen, wonach die temporäre Speicherung von Kohlenstoff in Bauprodukten als Negativemission angerechnet werden kann, wenn für sie eine rechtsverbindliche Verpflichtung zur permanenten Speicherung besteht.

Die durch die Zement-Karbonatisierung über die Lebensdauer der Infrastrukturbauten gespeicherten Mengen an CO_2, bezogen auf die Treibhausgasemissionen aus Herstellung, Transport und Entsorgung der insgesamt verbauten Materialien, fallen aufgrund der grossen Bauteildicken der betrachteten Objekte relativ gering aus. Die Werte liegen für die betrachteten Infrastrukturobjekte zwischen 0.4 und 2.5 %. Lediglich für die Lärmschutzwände liegt der Wert aufgrund des häufigen Austausches der relativ dünnen Schallschutzelemente bei knapp 13 %.

Die Verwertung von Holz aus Infrastrukturbauten an deren Lebenszyklusende ist dadurch gekennzeichnet, dass grosse, kompakt verbaute Holzmengen vorliegen. Holzbasierte Infrastrukturbauten können damit am Lebenszyklusende eine ergiebige Rohstoffquelle für den Holzbau und andere Anwendungen darstellen. Voraussetzungen für die Nutzbarkeit des Holzes sind aber, dass auf einen chemischen Holzschutz verzichtet wird, und dass die zu verwertenden Bauteile möglichst metall- und fremdstofffrei ausgeführt sind.

Der vorliegende Bericht wurde in Anlehnung an den Review-Prozess nach dem ISO 14044:2006 Standard durch Dritte verifiziert. Der Reviewbericht steht im ANHANG.

2 Ausgangslage und Auftragsbeschrieb

Das BAFU hat die BFH beauftragt, eine Forschungs- und Umsetzungsstrategie zur Dekarbonisierung von Infrastrukturbauten auszuarbeiten. Dem Auftrag durch das BAFU liegt die Motion 21.3293, SR Jakob Stark, *Erforschung und Innovation des Werkstoffs Holz für den Einsatz im Infrastrukturbau als Dekarbonisierungs-Beitrag* zugrunde. Ziel der Motion ist die Beauftragung des Bundesrats, «in Zusammenarbeit mit den Hochschulen und den einschlägigen Normenkommissionen die Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des Infrastrukturbaus zu erforschen. Insbesondere [sei] zu prüfen bzw. anzustreben, Stahlbeton durch CO_2-speichernde Materialien zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Dabei soll die Erforschung und Innovation des Werkstoffs Holz für den breiten Einsatz im Infrastrukturbau im Vordergrund stehen. Es ist eine entsprechende Forschungs- und Umsetzungs-Strategie auszuarbeiten.»

Der Auftrag an die BFH umfasst drei Teilprojekte, die in Anlehnung an den Gesamtprozess von der Vergabe bis zum Rückbau von Infrastrukturbauten gegliedert sind (vgl. Abb. 2). Das Teilprojekt 1 umfasst im Wesentlichen die Prozesse der Vergabe, der Initiierung eines Projekts unter Berücksichtigung der Entscheidungsträger, und der Beschaffung. Im Teilprojekt 2 wird das technische Fachwissen mit der Aus- und Weiterbildung, der Gesetzgebung und der Normung für die Phasen der Projektierung, der Ausführung, der Nutzung und der Erhaltung für jedes Themenfeld bearbeitet. Im Teilprojekt 3 werden schliesslich eine Abschätzung des Dekarbonisierungspotentials ausgewählter Infrastrukturbauten vorgenommen sowie Massnahmen zur Sicherstellung der stofflichen Verwertung am Lebenszyklusende ausgearbeitet. Jedes Teilprojekt mündet in einen technischen Bericht.

Die Auswahl der Typen von Infrastrukturbauten – im Folgenden als Themenfelder bezeichnet – wurde in Anlehnung an die Definition von Infrastrukturbauten gemäss SIA 112/2 vorgenommen. Eine Übersicht über die Themenfelder findet sich in Abb. 3.

Dem Motionstext und dem daraus resultierenden Auftrag durch das BAFU entsprechend wird in den drei Teilprojekten auf den Werkstoff Holz fokussiert, wobei für Baugruppen bzw. -teile einiger betrachteter Objekte auch eine Kombination bzw. ein Verbund aus Holz und Beton berücksichtigt wird.

Grundsätzlich gilt heute für Infrastrukturbauten eine Präferenz für den Werkstoff Beton, während die Holzbauweise in den vergangenen hundert Jahren vergleichsweise wenig bis gar nicht zum Einsatz kam. Entsprechend niedrig fällt daher auch der wissenschaftlich-technische Kenntnisstand für einige Themenfelder aus. Die in der Motion 21.3293 geforderte Ausarbeitung einer Forschungs- und Umsetzungsstrategie erfordert gerade deshalb, diese bisher nicht in Holz ausgeführten Infrastrukturbauten in die Betrachtung einzubeziehen. Dieses gilt auch, wenn entsprechende Bauten nach heutigem Stand der Normung und reglementarischen Vorgaben nicht realisiert werden können. Es werden in den vorliegenden Berichten also bewusst auch Konzepte skizziert, für die der Nachweis der Umsetzbarkeit noch nicht erbracht ist, um so die Wissenslücken und den Forschungsbedarf, ggf. aber auch das Potential, aufzeigen zu können.

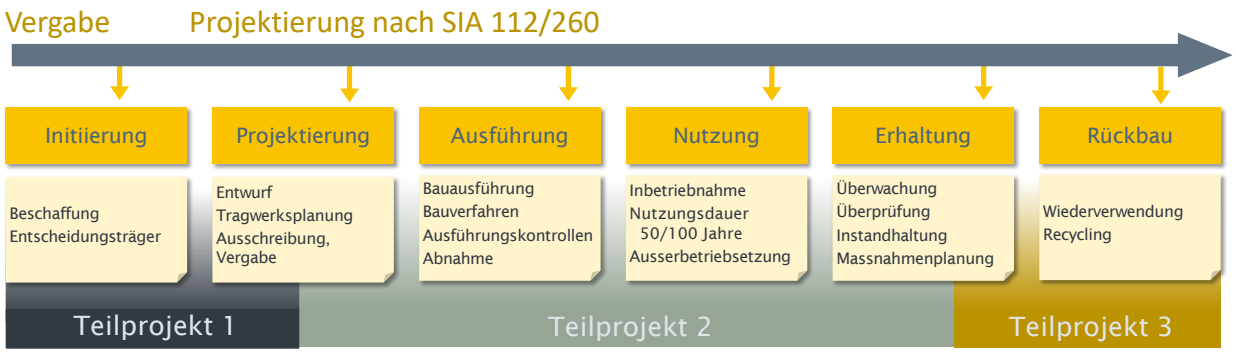


Abb. 2: Phasen der Vergabe und Projektierung zur Ableitung der Teilprojekte. Teilprojekt 3 schliesst ausserdem eine vereinfachte Ökobilanzierung ein

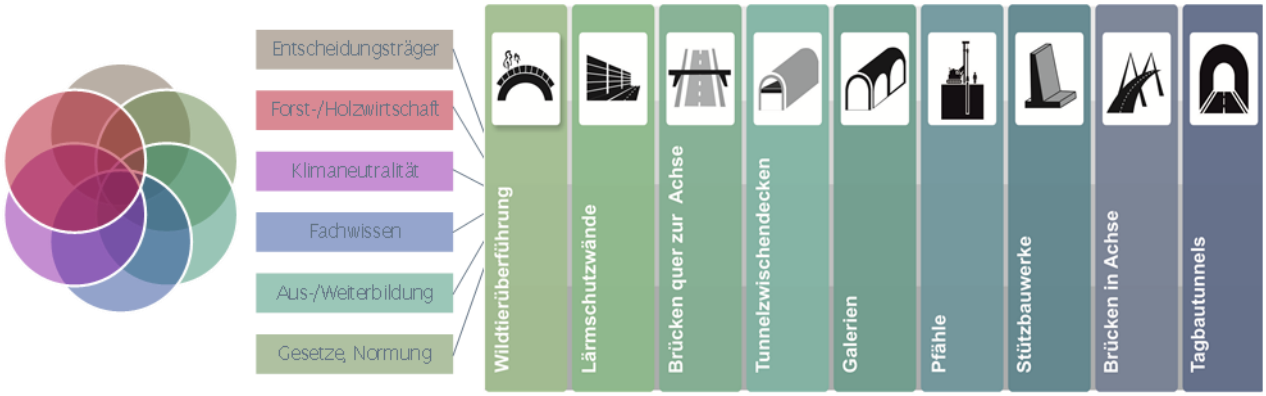


Abb. 3: Überblick zu den Themenfeldern mit den wesentlichen Inhalten

Das Vorgehen und die Ergebnisse für das Teilprojekt 3 werden im vorliegenden Bericht dargestellt. Dazu wird in Kapitel 3 eine vereinfachte Ökobilanzierung für Infrastrukturbauten in zwei unterschiedlichen Bauweisen vorgestellt. In den Kapiteln 4 und 5 wird dann auf die Speicherung von CO_2 in den verschiedenen Baumaterialien näher eingegangen, bevor das Lebenszyklusende in Kapitel 6 diskutiert wird.

3 Vereinfachte Ökobilanzen – Baumaterialien

3.1 Infrastrukturobjekte und Methodik

3.1.1 Ziel

Das Ziel der vereinfachten Ökobilanzierung ist es, das Dekarbonisierungspotential von Infrastrukturbauten zu bestimmen unter der Annahme, dass die Bauten in Holz statt in Beton ausgeführt sind. Dafür hat die BFH das ASTRA für repräsentative Objekte im Infrastrukturbau angefragt. Die vom ASTRA bereitgestellten Objekte sind exemplarisch ausgewählt; eine Bevorzugung der Holz- oder Betonausführung durch diese Auswahl ist nicht beabsichtigt.

Für jedes Objekt wurde eine vereinfachte Ökobilanzierung durchgeführt. Der Fokus lag dabei dem Auftrag durch das BAFU entsprechend auf der Bestimmung und dem Vergleich von Treibhausgasemissionen und Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar). Zudem stehen im ANHANG die Umweltbelastungspunkte UBP'21 der betrachteten Objekte zur Verfügung. Die Einbeziehung weiterer Indikatoren und die detaillierte Analyse der Ergebnisse zu den Umweltbelastungspunkten waren im Rahmen der vorliegenden Studie nicht vorgesehen.

Es werden im vorliegenden Bericht die sechs in Abb. 4 dargestellten Objekte betrachtet: Wildtierüberführungen, Lärmschutzwände, Brücken quer zur Achse, Tunnelzwischendecken, Lärmschutzgalerien und Tagbautunnels. Die zwei ersten genannten Objekte (Wildtierüberführungen und Lärmschutzwände) sind bereits in Holzausführung realisiert worden, während die vier weiteren Objekte (Brücken quer zur Achse, Tunnelzwischendecken, Lärmschutzgalerien und Tagbautunnels) lediglich Konzepte darstellen, die mit den Belastungen aus den Nutzungsvereinbarungen bemessen wurden und daher umsetzbar wären. Die Galerie, welche in dieser Studie betrachtet wird, stellt eine Lärmschutzgalerie ohne stützende Funktion dar. Die Pfähle, Stützbauwerke und Brücken in Achse, welche in den Teilprojekten 1 und 2 ebenfalls betrachtet wurden, werden im Teilprojekt 3 im Sinne einer Konzentration der Ressourcen auf lediglich 6 Objekte nicht berücksichtigt. Die Quellen der Zeichnungen und der Materialdaten sind in Abb. 4 erwähnt sowie im ANHANG detailliert aufgeführt. Als weitere Grundlage für die Erstellung der Materiallisten, die im ANHANG stehen, wurde das Fachhandbuch Trasse – Umwelt (2023) des Bundesamts für Strassen ASTRA verwendet.

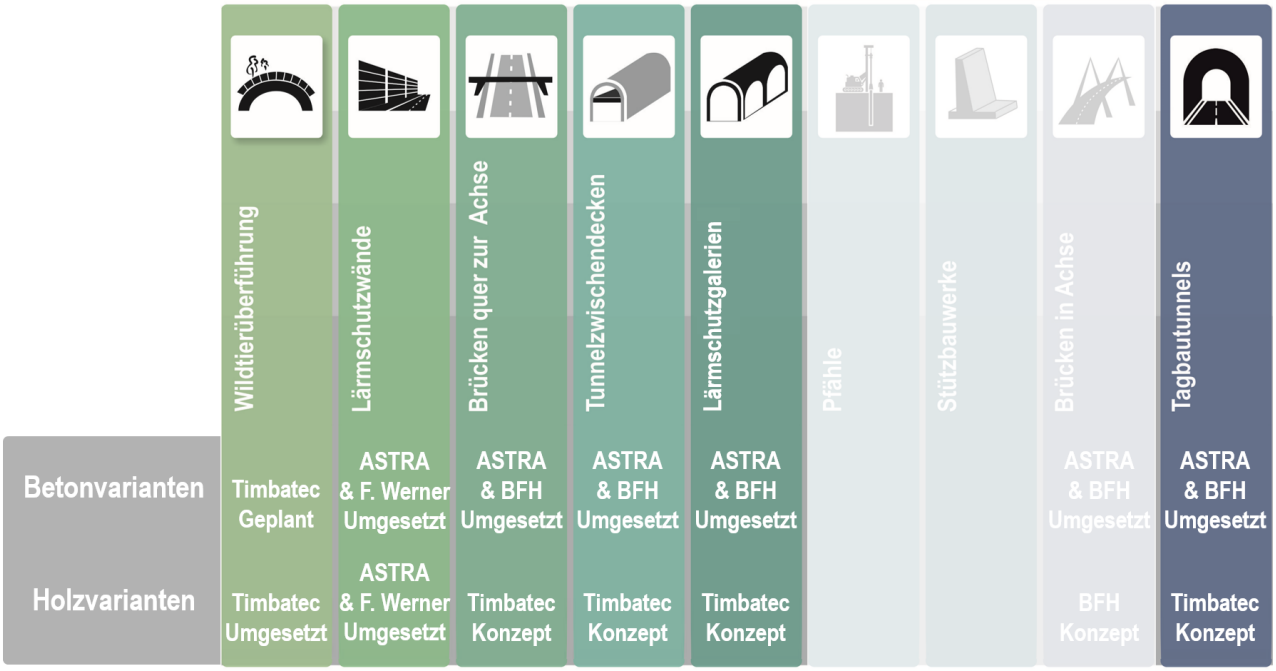


Abb. 4: Darstellung der sechs betrachteten Objekte einschliesslich der Quellen für Materialdaten und Zeichnungen (siehe entsprechende Daten in den Materiallisten im ANHANG). Hinweis: Im Teilprojekt 3 werden Lärmschutzgalerien als besondere Form von Galerien betrachtet

3.1.2 Rahmen

Für jedes Objekt wurde eine funktionelle Einheit für die Berechnung der Treibhausgasemissionen und der Primärenergie definiert (Tab. 1). Die entsprechenden Zeichnungen von jedem Objekt mit der Angabe der betrachteten Baugruppen finden sich im Abschnitt 3.2 jeweils vor den Ergebnissen der Treibhausgasemissionen.

Tab. 1. Funktionelle Einheiten der einzelnen Objekte

	Funktionelle Einheit für die einzelnen Ökobilanzierungen (Ergebnisse pro Objekt unter 3.2 und Materiallisten im ANHANG)
Wildtierüberführungen	1 Objekt, 50 m lang, 35 m breit
Lärmschutzwände	4m lang, 3 m hoch
Brücken quer zur Achse	1 Objekt, 60 m lang
Tunnelzwischendecken	1 lfm
Lärmschutzgalerien	1 lfm
Tagbautunnels	1 lfm

lfm: Laufmeter

Die Fundamente wurden für die Berechnung von Treibhausgasemissionen und Primärenergie jeweils mitbetrachtet. Dabei wurde die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Holzvarianten das gleiche Fundament haben wie die Betonvarianten, mit gleichen Dimensionen und Zusammensetzungen. Dieser Ansatz ist konservativ, da die Holzvarianten leichter als die Betonvarianten sind und dadurch voraussichtlich ein kleineres Fundament benötigen. Neben dem Gewicht des Bauwerks definieren aber auch die Konstruktion (z.B. Stützenabstände) und der Untergrund die jeweiligen Fundamentgrössen. In einer umfassenderen Analyse wäre mit für die Holzvariante angepassten Fundamenten zu rechnen.

Verkehrliche Auswirkungen wie z.B. Massnahmen zur Umleitung und Aufrechterhaltung des Verkehrs während der Bau- oder Wartungsarbeiten sind nicht Teil der vorliegenden Studie. In einer vertieften Betrachtung wäre das für Beton- und Holzbauweisen teilweise unterschiedliche Ausmass von Verkehrsunterbrechungen durch Erneuerungsarbeiten, die unterschiedliche Häufigkeit dieser Unterbrechungen, sowie Unterschiede in der Planbarkeit von Ausbesserungsarbeiten zu berücksichtigen.

3.1.3 Methodik

Die vereinfachten Ökobilanzierungen wurden in der vorliegenden Studie für die Lebenszyklusphasen A1 bis A4 und C1 bis C4 durchgeführt (Abschnitt 3.2), mit separater Berechnung der CO_2-Emissionsrückgewinnung (Kapitel 4 und 5), was einer sogenannten Analyse «Cradle-to-Gate mit Optionen» gemäss EN 15804+A2 entspricht (Abb. 5). Der Austausch von Baugruppen oder -teilen, welche eine geringere Lebensdauer als das Gesamtobjekt aufweisen, geht in die Berechnungen ein, indem die Emissionen und Primärenergiewerte der ersetzten Elemente entsprechend der jeweiligen Austauschhäufigkeit den Modulen A1 bis A4 und C1 bis C4 zugeschlagen sind. Dieses Vorgehen zur Behandlung der Austauschteile wurde gewählt, da die gesonderte Ausweisung des Moduls B4 auch Werte für die Austauscharbeiten erfordert hätte (analog zum Modul A5), nicht aber nur Werte zum eingesetzten Material.

Gemäss Angaben der kürzlich erschienen Studie Goertz und Pham (2023, S. 25 und 31) zur CO_2-Bilanzierung von 34 realen Brückenbauwerken unterschiedlicher Bauart entfallen 73 % der CO_2-Emissionen aller betrachteten Brücken auf die Herstellung der Baustoffe (Module A1 bis A3) und 8 % auf den Rückbau (Module C1 bis C4), ohne Einbeziehung des Recyclingpotentials (Modul D) in die Berechnung dieser Werte. Die 12 %, die sich aus der Nutzung des Bauwerks ergeben, beinhalten wiederum 10 Prozentpunkte aus der Herstellung der Baustoffe und 1 Prozentpunkt aus dem Rückbau. Gemäss dieser Angaben sind also 94 % der CO_2-Emissionen der betrachteten Brückenbauwerke auf die Lebenszyklusphasen A1 bis A3 und C1 bis C4 einschliesslich der Austauschmaterialien zurückzuführen. Die Erstellung des Bauwerks (A5, hier einschliesslich A4) sowie die Austauscharbeiten machen demnach lediglich 6 % der CO_2-Emissionen aus.

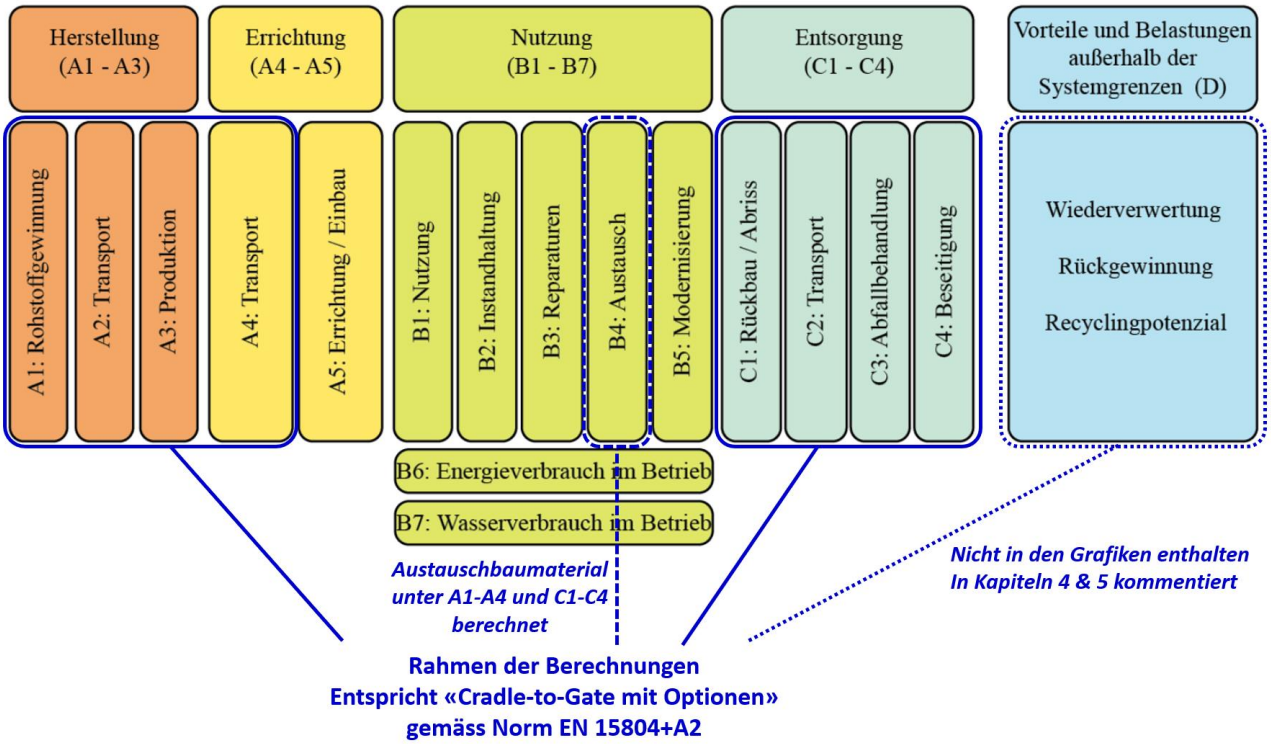


Abb. 5. Betrachtete Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4 mit separater Berücksichtigung von D (Bild in Anlehnung an www.nbau.org). Für das Modul B4 sind die Emissionen und Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gemäss Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt bereits Lünser (1999, S. 99-101) in seinem Buch *Ökobilanzen im Brückenbau: eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung*, in welchem er Ökobilanzen für alle Lebenszyklusphasen von Brückenbauten, d.h. von der Baustoffgewinnung bis zum Abbruch und zur Entsorgung, zusammengestellt und bewertet hat. Er zeigt, dass zwischen 80 % und 90 % der Treibhausgasemissionen (und der Primärenergie) von Brückenbauten durch die Baustoffherstellung verursacht werden.

Unter Berücksichtigung der beiden hier aufgeführten Studien erscheint es für eine Abschätzung des Dekarbonisierungspotentials im Infrastrukturbau gerechtfertigt, auf die Einbeziehung der Bauarbeiten zur Erstellung des Bauwerks wie auch beim Austausch von Bauelementen zu verzichten. Zumindest für Brücken kann davon ausgegangen werden, dass unter den beschriebenen Annahmen über 80 % bis zu 95 % der Emissionen abgedeckt sind.

Bei der Betrachtung der Primärenergie wird die energetisch genutzte Primärenergie für Herstellung und Entsorgung (PERE und PENRE) ausgewiesen; die stofflich genutzte Primärenergie (PERM und PENRM) wird in diesem Fall nicht berücksichtigt.

Die Annahmen zur Lebensdauer der betrachteten Objekte basieren auf dem Fachhandbuch Kunstbauten (2023) des Bundesamtes für Strassen ASTRA und sind in Tab. 2 aufgeführt. Dabei wurde die Lebensdauer von jedem Objekt und von deren Baugruppen gemäss der ASTRA-Anforderungen definiert. Diese Anforderungen gelten gleichermassen für die Beton- wie auch die Holzvariante, werden also in der vorliegenden Studie ungeachtet des heutigen Stands der Technik auch für die Holzvariante als Vorgabe angesetzt. Die spezifischen Bedingungen für den Einsatz von Holz im Infrastrukturbau fliessen aber in die Annahmen zum Austausch von Baugruppen oder von Elementen innerhalb von Baugruppen ein.[1]

[1] Hinweis: Die angenommene Lebensdauer für Brücken quer zur Achse beträgt 100 Jahre. Auch Görtz und Pham gehen in ihrer Studie *CO_2-Bilanzierung und Optimierung von Brückenbauwerken* (2023) auf Basis verschiedener Quellen davon aus, dass die Spannbreite der Lebensdauer von Holzbrücken von 60 bis über 100 Jahren reicht.

Tab. 2. Lebensdauer von jedem Objekt und deren Baugruppen (detailliertere Angaben in den Materiallisten im ANHANG)

Objekt	Lebensdauer des Objekts	Ausführung	Baugruppen	Lebensdauer der Baugruppen
Wildtierüber-führungen	100 Jahre	Beton	Decke aus Beton	100 Jahre
			Oberflächenschutz	15 Jahre
			Wände aus Beton	100 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
		Holz	Decke aus Holz	100 Jahre [1)]
			Oberflächenschutz	15 Jahre
			Wände aus Beton	100 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
Lärmschutz-wände	100 Jahre	Beton	Schallschutzelement aus Beton	30 Jahre
			Wände aus Holz	50 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
		Holz	Schallschutzelement aus Holz	30 Jahre
			Wand Konstruktion	50 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
Brücken quer zur Achse	100 Jahre	Beton	Belag	50 Jahre
			Fahrbahn aus Beton	100 Jahre
			Träger aus Beton	100 Jahre
			Übergang Damm-Brücke aus Beton	100 Jahre
			Aufschüttung	100 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
		Holz	Belag	50 Jahre [1)]
			Fahrbahn aus Holz	100 Jahre [1)]
			Träger aus Holz	100 Jahre [1)]
			Übergang Damm-Brücke aus Beton	100 Jahre
			Aufschüttung	100 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
Tunnelzwi-schendecken	60 Jahre	Beton	Zwischendecke aus Beton	60 Jahre
		Holz	Zwischendecke aus Holz	60 Jahre [1)]
Lärmschutzga-lerien	100 Jahre	Beton	Decke aus Beton	100 Jahre
			Seitenwand aus Beton	100 Jahre
			Oberflächenschutz für Betonwand	15 Jahre
			Rückwand aus Beton	100 Jahre
			Stützwand aus Beton	100 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
		Holz	Decke aus Holz	100 Jahre [1)]
			Seitenwand aus Holz	100 Jahre [1)]
			Oberflächenschutz für Betonwand	15 Jahre
			Rückwand aus Beton	100 Jahre
			Stützwand aus Beton	100 Jahre
			Fundament aus Beton	100 Jahre
Tagbautunnels	100 Jahre	Beton	Decke aus Beton	100 Jahre
			Oberflächenschutz für Betonwand	15 Jahre
			Wände aus Beton	100 Jahre
			Fundament aus Beton (Bodenplatte)	100 Jahre
		Holz	Decke aus Holz	100 Jahre [1)]
			Oberflächenschutz für Betonwand	15 Jahre
			Wände aus Beton	100 Jahre
			Fundament aus Beton (Bodenplatte)	100 Jahre

[1)] Details zu den Ersatzintervallen von Elementen siehe Materiallisten im ANHANG

Für einzelne Baugruppen, für welche eine reduzierte Lebensdauer anzunehmen ist, sind die entsprechenden Werte ebenfalls in Tab. 2 angegeben. Der sogenannte Lebensdauerfaktor berechnet sich als Quotient aus Lebensdauer des Bauwerks und Lebensdauer einer Baugruppe; diese Faktoren sind auch in den Materiallisten im ANHANG aufgeführt. Die Emissionswerte und die Primärenergie werden für die Gesamtbetrachtung mit den Lebensdauerfaktoren multipliziert. Auch in Fällen, in welchen nicht eine vollständige Baugruppe mit reduzierter Lebensdauer angenommen wird, sondern Elemente einer Baugruppe aufgrund von Bauschäden oder unplanmässigen Ereignissen auszutauschen sind, erhöht sich der Lebensdauerfaktor dementsprechend. Die Annahmen zu den Ersatzintervallen von Elementen innerhalb von Baugruppen finden sich ebenfalls in den Materiallisten im ANHANG.

Ergänzend wurde in einer Berechnungsvariante untersucht, welche minimale Lebensdauer für die Holzvariante anzunehmen ist, um zwischen Beton- und Holzvariante zu gleichen Treibhausgasemissionen oder Primärenergiewerten zu kommen (Abschnitt 3.3.1). Die sich hieraus ergebenden Werte für die Lebensdauer liegen möglicherweise unter den ASTRA-Anforderungen, sie dienen aber als Zusatzinformation zur Diskussion um das Dekarbonisierungspotential von Infrastrukturbauten.

Die Umweltauswirkungsdaten wurden der KBOB-Datenbank 2009/1:2022 Version 3 entnommen. Zusätzlich wurde die Datenbank Ecoinvent 3.7.1 für Daten verwendet, die nicht in der KBOB-Datenbank enthalten sind: Holzimprägnierung (Datensatz des «wood preservation, oscillating pressure method, organic salt, Cr-free, outdoor use, ground» von F. Werner (Version 6.3.0.0), sowie das Brandschutzband. Die Benutzung von Daten aus zwei Datenquellen stört die Konsistenz der Daten nicht, da sich einerseits die KBOB-Datenbank auf die Ecoinvent Datenbank stürzt, und da andererseits der Einfluss der Daten aus der Datenbank Ecoinvent 3.7.1. auf die Ökobilanzen der betroffenen Objekte relativ gering ist (Holzimprägnierung: 1 % für Wildtierüberführungen, 5 % für Lärmschutzwände, 10 % für Tunnelzwischendecken und 0.06 % für Tagbautunnels; Brandschutzband: 1.2 % für Tunnelzwischendecken). Details zu den verwendeten Datenquellen und Datensätzen finden sich in Tab. 14 im ANHANG.

Für die Holzmaterialien werden im vorliegenden Bericht, wenn nicht anders angegeben, die Standardwerte der KBOB-Datenbank verwendet. Diese stellen eine Kombination von Datensätzen für Schweizer Holz einerseits und eingeführtes Holz andererseits dar. Die Hintergrundberichte für Holzprodukte von F. Werner (2017 und 2020) wurden für die Bestimmung der repräsentativen Herkunftsverteilung der verschiedenen Holzmaterialien zwischen Schweiz und Einfuhr genutzt. Zusätzlich wurden die beiden Szenarien «100 % Einfuhr» und «100 % Schweizer Holz» betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 3.3 und im ANHANG dargestellt.

Die Emissionen aus dem Transport A2 (zwischen der Rohstoffgewinnung und der Baumaterialherstellung, innerhalb der Produktionsphase) sind bereits in den KBOB-Daten inbegriffen. Für Baumaterialien aus dem Ausland sind zusätzlich die Emissionen aus dem Transport A4 in den KBOB-Daten inbegriffen, und zwar von der Baumaterialherstellung im Ausland bis nach Bern. Da die Emissionen aus dem Transport eine wesentliche Rolle in der Ökobilanzierung und insbesondere für die Treibhausgasemissionen spielen können, wurde entschieden, die Distanzen für den Transport A4 innerhalb der Schweiz ebenfalls in die Betrachtung mit einzubeziehen. Die dabei gemachten Annahmen ergeben sich aus Tab. 3. Die entsprechenden Emissionen wurden anhand der KBOB-Daten zu den Transportemissionen berechnet.

Für die vereinfachte Ökobilanzierung wurde die Methodik 0/0, keine Betrachtung des biogenen CO_2, in Anlehnung an die *Regeln der KBOB, Ecobau und IPB für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz*, von R. Frischknecht (2022) angewendet. Gemäss der Methodik 0/0 wird die Absorption von biogenem CO_2 aus der Atmosphäre während des Baumwachstums (Modul A1) einerseits, und die Freisetzung des biogenen CO_2 durch Verbrennung oder Zersetzung nach dem Lebensende (Modul D) nicht betrachtete. Diese beiden Grössen entsprechen sich in ihren Absolutwerten und heben sich nach Abschluss der Verbrennung oder des Zersetzungsprozesses auf. Ergänzend wird im Kapitel 4 auf die temporäre Speicherung des biogenen CO_2 eingegangen. Auch die CO_2-Speicherung durch Karbonatisierung im Beton ist in der vereinfachten Ökobilanzierung nicht enthalten, wird aber ebenfalls gesondert dargestellt (siehe Kapitel 5).

Wegen des engen Zeithorizonts für die Reduktion der CO_2-Emissionen (bis 2040 bzw. 2050) basiert die vorliegende Studie auf dem aktuellen Stand der Technik. Zu erwartende Effizienzsteigerungen und Materialentwicklungen wie auch Negativemissionstechnologien wie zum Beispiel Carbon Capture wurden nicht betrachtet.

Tab. 3. Annahmen für den Transport (Modul A4) innerhalb der Schweiz: Vom Herstellungswerk bis zur Baustelle für Baumaterialien aus der Schweiz, und von Bern zur Baustelle für Baumaterialien aus der Einfuhr. Hinweis: Für eingeführte Baumaterialien ist der Teil des Transports A4 vom Herstellungswerk bis nach Bern bereits in den KBOB-Daten inbegriffen

Baumaterial	**Herkunft**	**Transport A4 bereits in KBOB-Daten inbegriffen**	**Annahmen für Transport A4 innerhalb der Schweiz**		
			LKW-Klasse	**Grundlagen Distanz**	**Distanz**
Beton	Schweiz	Keiner	32 t	40 CH-Produzenten + Angaben Betonsuisse	20 km
Stahl	Schweiz & Einfuhr[1)]	Keiner für Schweiz Bis nach Bern für Einfuhr	40 t	4 CH-Produzenten Von Bern aus	100 km
Brettschichtholz (BSH)	Schweiz	Keiner	32 t	15 relevante CH-Produzenten	30 km
	Einfuhr[1)]	Bis nach Bern	32 t	Von Bern aus	150 km
Brettsperrholz (CLT)	Schweiz	Keiner	32 t	2 relevante CH-Produzenten	150 km
	Einfuhr[1)]	Bis nach Bern	32 t	Von Bern aus	150 km
Nadelschnittholz	Schweiz	Keiner	32 t	50 relevante CH-Sägewerke	20 km
	Einfuhr[1)]	Bis nach Bern	32 t	Von Bern aus	150 km
OSB	Einfuhr[1)]	Bis nach Bern	32 t	Von Bern aus	150 km

[1)] Die Herkunftsländer der eingeführten Baumaterialien entsprechen den Annahmen aus den Hintergrundberichten der KBOB-Datenbank, die repräsentativ für die aktuelle Situation für die Schweiz sind

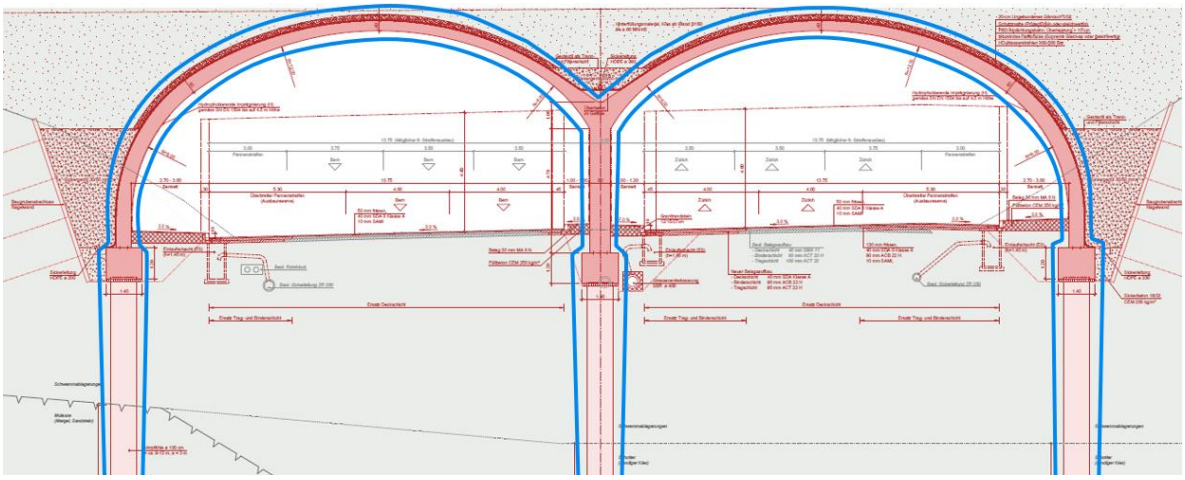
In Anlehnung an den Review-Prozess nach dem ISO 14044:2006 Standard, hat eine unabhängige kritische Überprüfung durch unabhängige Dritte stattgefunden, mit dem Ziel, die folgenden Aspekte zu begutachten: Methodik, Daten, Bericht, Resultate. Dieses Review wurde von R. Hischier aus der EMPA durchgeführt und ist im ANHANG zu finden.

3.2 Ergebnisse – Treibhausgasemissionen und Primärenergie

3.2.1 Wildtierüberführungen

Eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung wurde betrachtet. Als Breite wird dabei die Dimension in Richtung des Strassenverlaufs definiert. Die Betonvariante wurde bis Vorprojekt geplant und ist daher nicht optimiert worden, während die Holzvariante optimiert und realisiert wurde. Die betrachteten Baugruppen sind Decken, Wände und Fundamente (Abb. 6). In der Holzvariante sind die Decken aus druckimprägnierten BSH-Trägern mit einem Achsabstand von 800 mm ausgeführt, während die Decken der Betonvariante eine schalenförmige Geometrie aufweisen, was den Massenunterschied zwischen der Holzvariante und der Betonvariante erklärt. Die detaillierten Materiallisten beider Varianten finden sich im ANHANG (Tab. 7).

Betonvariante (geplant bis Vorprojekt)



Holzvariante (umgesetzt)

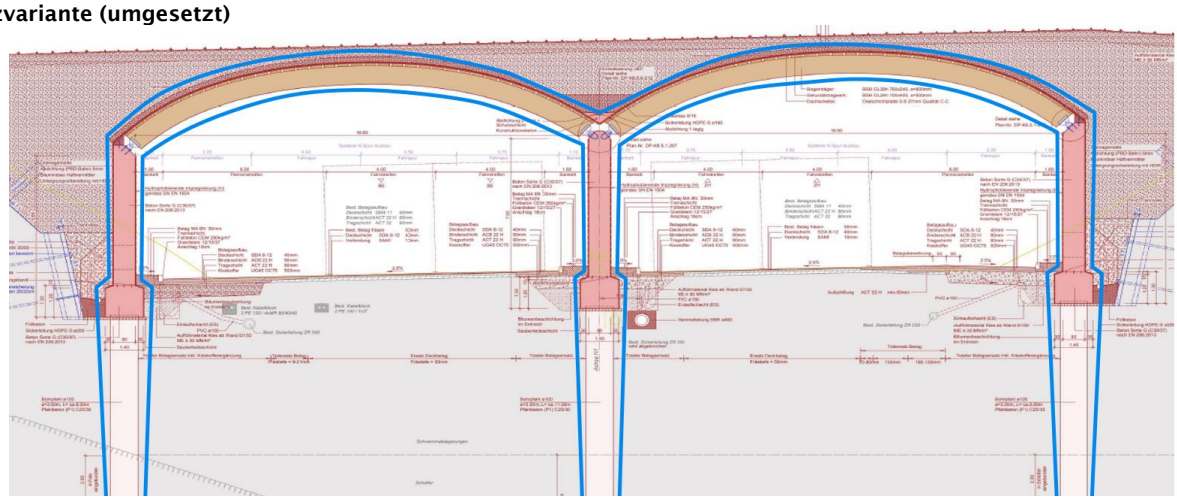


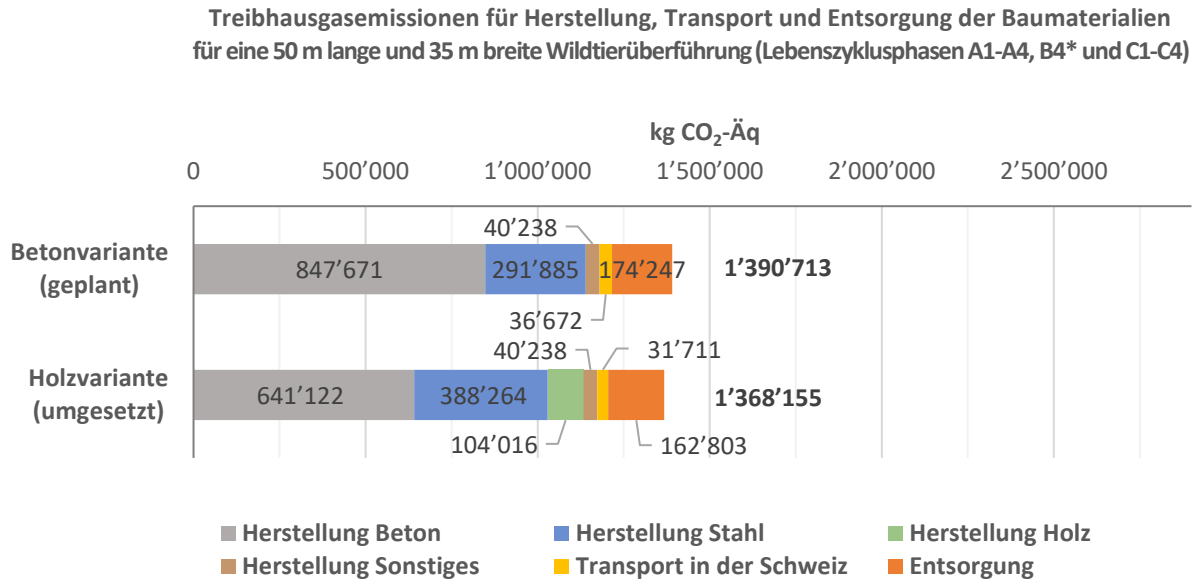
Abb. 6. Zeichnungen der Wildtierüberführungen aus Beton und Holz. Die betrachteten Baugruppen sind blau umrandet

Die berechneten Treibhausgasemissionen (Abb. 7) und die Primärenergie (Abb. 8) für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung (Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4) weisen folgende Differenzen auf: Die Emissionen der Holzvariante liegen um 2 % niedriger als die der Betonvariante, während deren Energieverbrauch um 35 % höher ausfällt (nicht erneuerbare Energie plus 10 %; erneuerbare Energie vier mal höher).

Der für beide Varianten ähnliche Wert der Treibhausgasemissionen lässt sich dadurch erklären, dass bei dem Bauwerk aus Holz nur rund 25 % des Betons (nur die Decke) durch Holz (hier konkret durch imprägniertes BSH) ersetzt wurde (siehe Materialliste im ANHANG, Tab. 7). Zwar sind, wie in den Umweltauswirkungsdaten für die Hauptmaterialien (siehe ANHANG, Tab. 13) ersichtlich, die Treihhausgasemissionen von imprägniertem BSH um 40 % niedriger als die von armiertem Beton. Gemäss

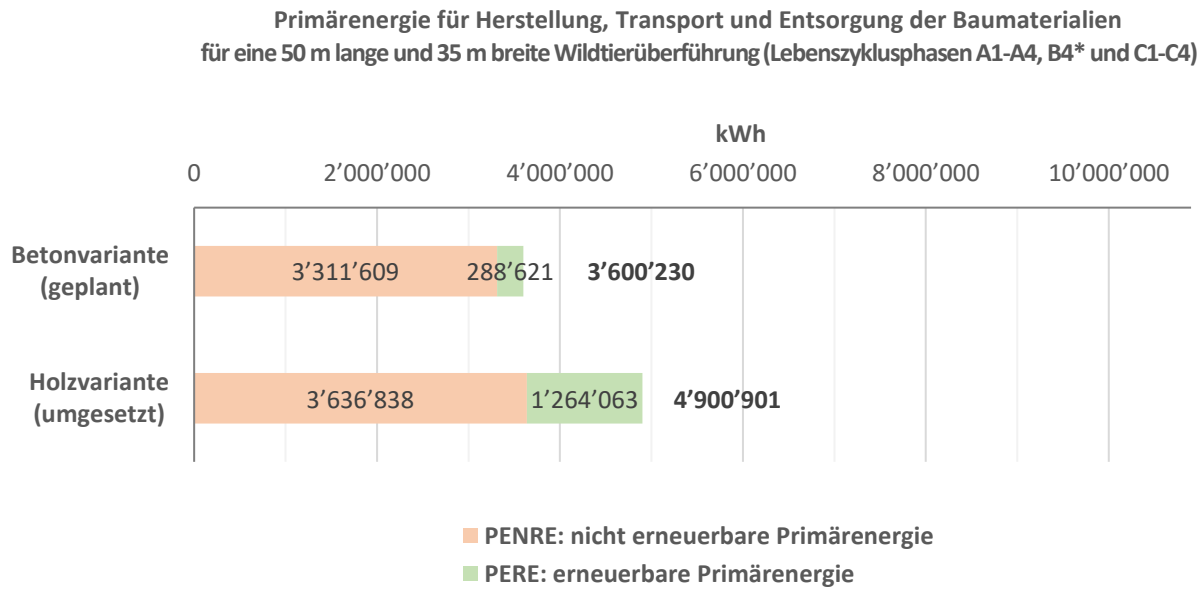
Daten vom ASTRA ist aber kein Ersatz von Beton für die Sanierung der Wildtierüberführung aus Beton betrachtet worden, sondern nur der Ersatz des Oberflächenschutzes alle 15 Jahre. Im Gegensatz dazu ist für die Holzvariante ein kompletter Ersatz mehrerer Holzelemente alle 25 oder 50 Jahre angenommen worden (siehe Materialliste in Tab. 7 im ANHANG). Menge und Typ des Oberflächenschutzes beinflusst die Endergebnisse der Treibhausgasemissionen der Betonvariante um nur 1 %.

Je nach Bauweisen kann der Unterschied in den Treibhausgasemissionen zwischen der Beton- und der Holzvariante deutlich anders ausfallen als in der vorliegenden Studie. So liegen die Treibhausgasemissionen der Holzvariante in einer in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Vergleichsstudie um 40 % unter denen der Betonvariante.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 7. Treibhausgasemissionen für eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung



*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 8. Primärenergie für eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung

3.2.2 Lärmschutzwände

Betrachtet wird eine 4 m lang und 3 m hoch Lärmschutzwand. Beide Varianten, Beton und Holz, wurden realisiert. Die betrachteten Baugruppen sind Abdeckungen, Wände und Fundamente (Abb. 9). Die detaillierten Materiallisten beider Varianten finden sich im ANHANG (Tab. 8).

Betonvariante (umgesetzt) **Holzvariante (umgesetzt)**

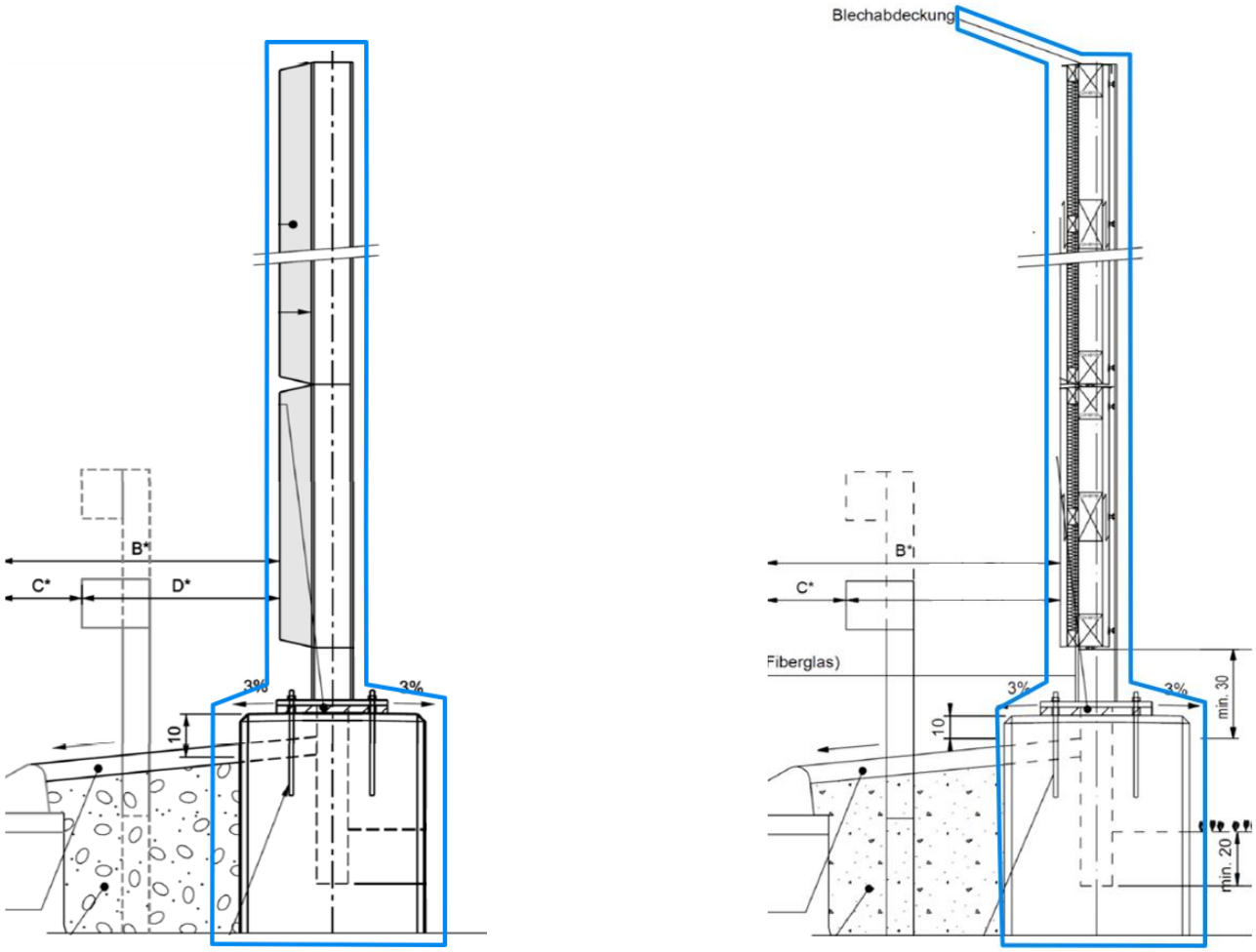
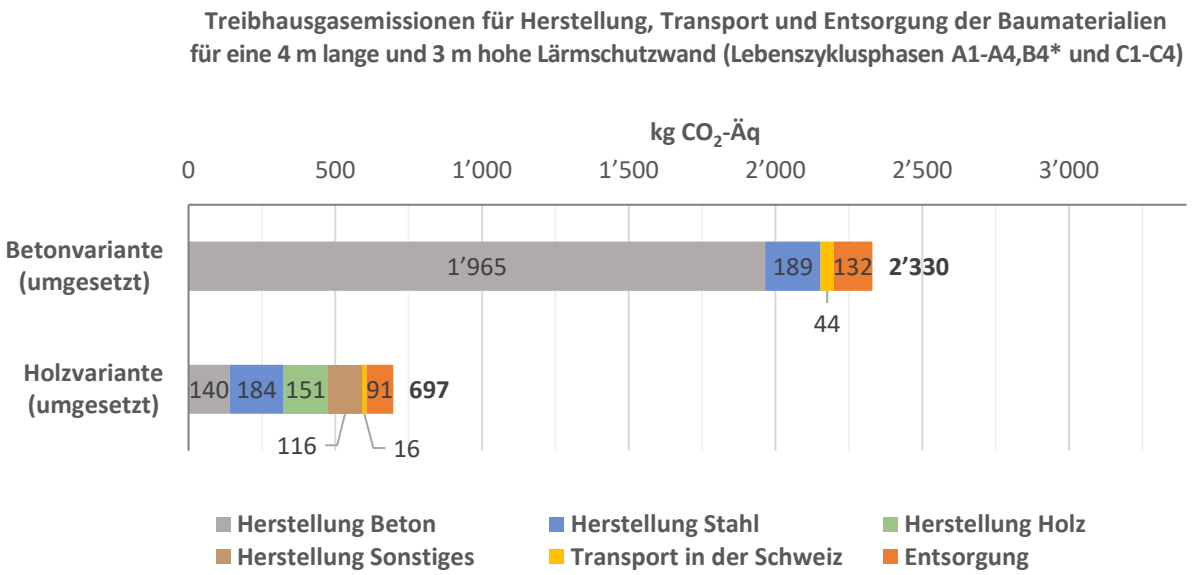


Abb. 9. Zeichnungen der Lärmschutzwände aus Beton und Holz. Die betrachteten Baugruppen sind blau umrandet: Sie bestehen aus einem Beton-Fundament, Stahlträgern und unterschiedlichen Ausfachungen (Holz oder Beton)

Die Treibhausgasemissionen für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung (Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4) liegen um 70 % niedriger als bei der Betonvariante und der Energieverbrauch ist im Vergleich zur Betonvariante um 55 % reduziert (die nicht erneuerbare Primärenergie liegt um 65% niedriger als bei der Betonvariante; Abb. 10 und Abb. 11).

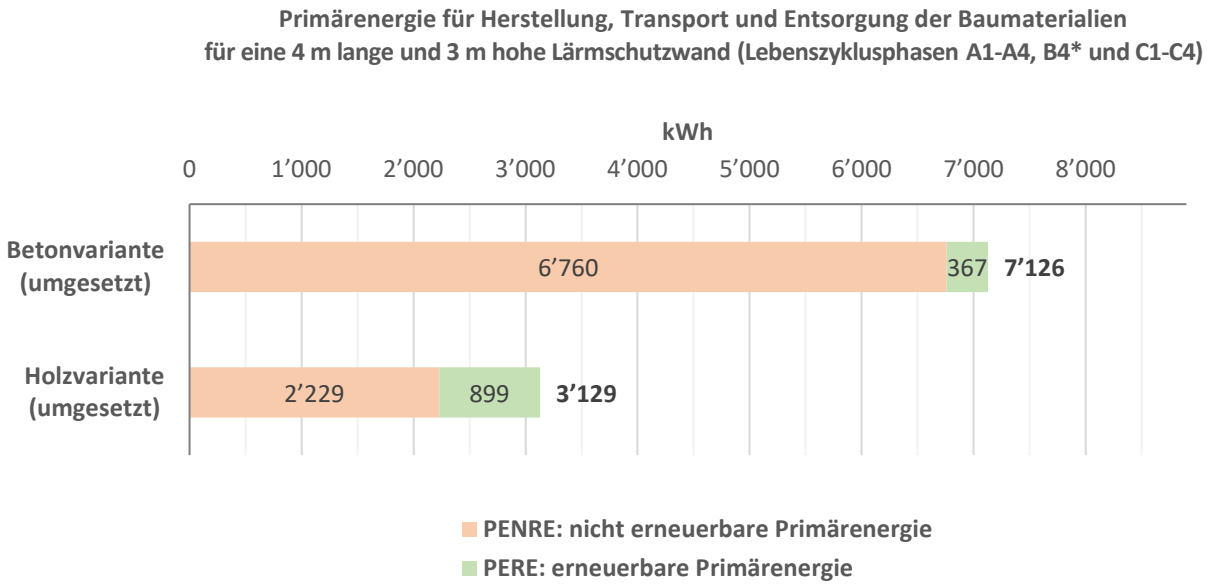
Dies lässt sich dadurch erklären, dass 80 % des Betonvolmens durch Holz (hauptsächlich imprägniertes Nadelschnittholz) ersetzt wird, welches volumenbezogen über dreimal tiefere Treibhausgasemissionen aufweist als Beton. Der Ersatz von Beton durch Holz führt beim Vergleich der beiden hier betrachteten Ausführungen zu einer Gewichtsreduktion von 65 %.

Eine Vergleichsstudie für dieses Objekt ist im Abschnitt 3.3.2 beschrieben und bestätigt die hier dargestellten Ergebnisse.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 10. Treibhausgasemissionen für eine 4 m lange und 3 m hohe Lärmschutzwand



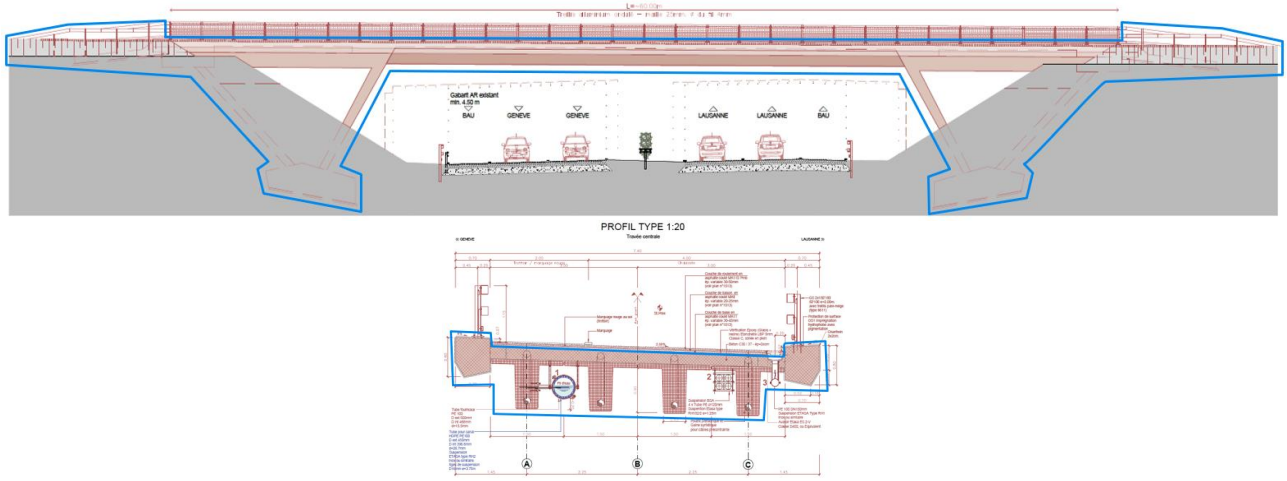
*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 11. Primärenergie für eine 4 m lange und 3 m hohe Lärmschutzwand

3.2.3 Brücken quer zur Achse

Die betrachtete Brücke quer zur Achse hat eine Länge von 60 m. Die Variante in Beton wurde realisiert, die in Holz liegt dagegen als Machbarkeitsstudie vor. Die betrachteten Baugruppen sind: Belag, Fahrbahn, Träger, Übergang Damm-Brücke, Aufschüttungen und Fundamente (Abb. 12). Die detaillierten Materiallisten beider Varianten finden sich im ANHANG (Tab. 9).

Betonvariante (umgesetzt)



Holzvariante (Konzept)

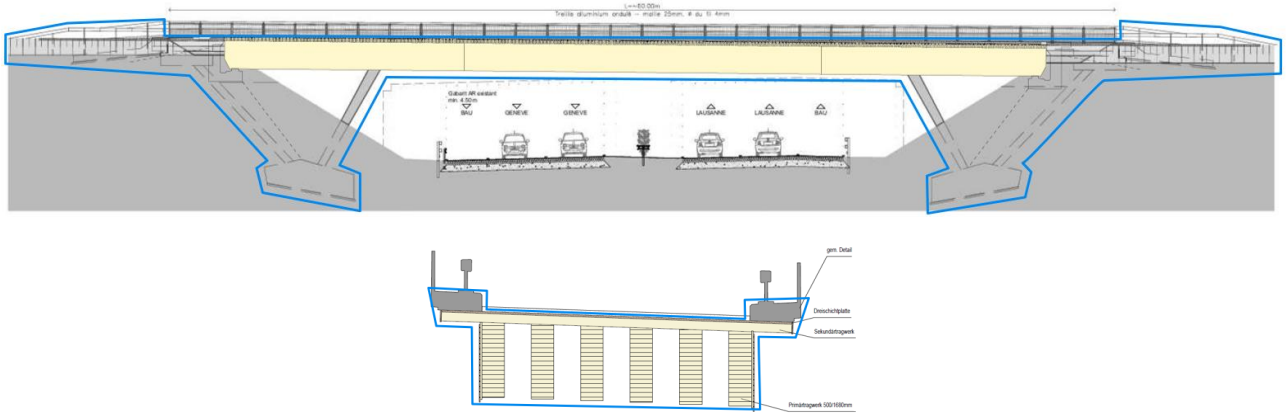
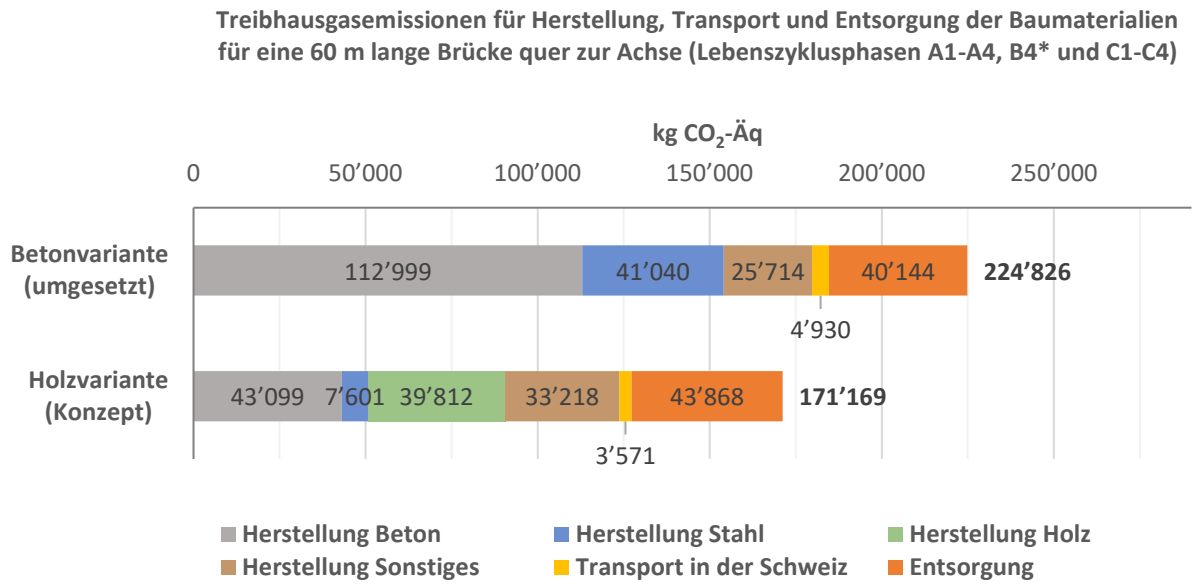


Abb. 12. Zeichnungen der Brücken quer zur Achse aus Beton und Holz. Die betrachteten Baugruppen sind blau umrandet

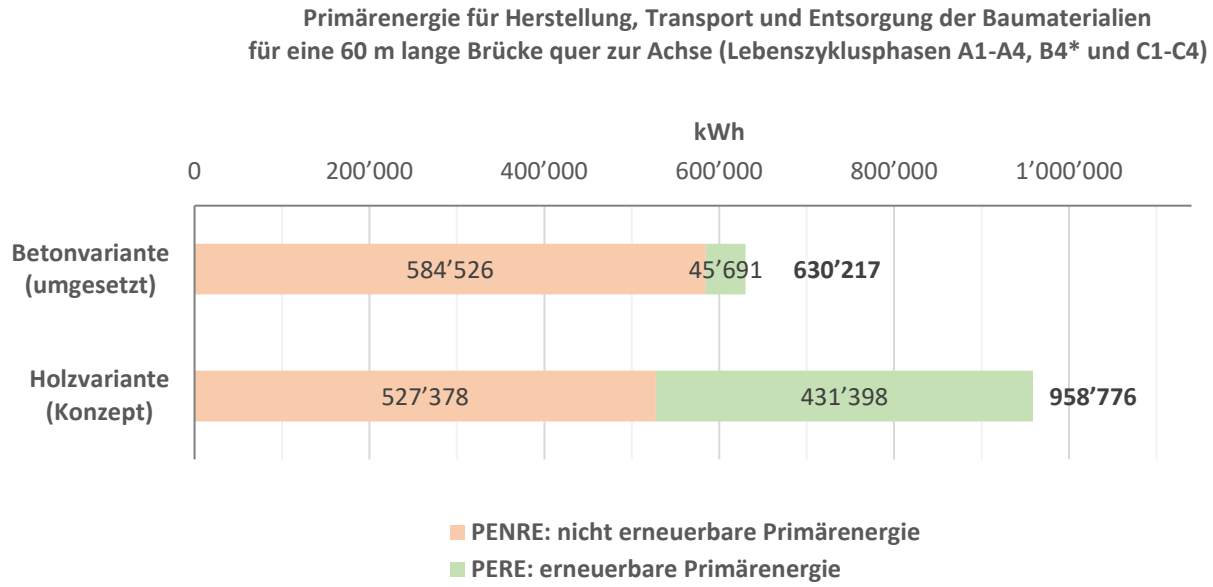
Die berechneten Treibhausgasemissionen für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung (Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4) der Holzvariante liegen 25 % niedriger als jene der Betonvariante (Abb. 13). Erwähnenswert ist, dass die Primärenergie (gesamt) der Holzvariante um 50 % höher liegt als jene der Betonvariante (Abb. 14). In der Primärenergie ist etwa 50 % erneuerbare Energie enthalten, die vor allem für die Trocknung des Holzes genutzt wird. Im Vergleich zu den anderen Holzprodukten weist BSH die höchsten Werte für Treibhausgasemissionen und Primärenergie aus (siehe Umweltauswirkungsdaten im ANHANG, Tab. 13). Auch daraus erklärt sich der relativ hohe Primärenergiebedarf für die Brücke quer zur Achse in Holzausführung. Die nicht-erneuerbare Primärenergie der Holzvariante liegt aber tiefer als jene der Betonvariante.

Eine Vergleichsstudie liegt für dieses Objekt im Abschnitt 3.3.2 vor.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 13. Treibhausgasemissionen für eine 60 m lange Brücke quer zur Achse



*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 14. Primärenergie für eine 60 m lange Brücke quer zur Achse

3.2.4 Tunnelzwischendecken

Die im Folgenden dargestellten Berechnungen beziehen sich auf einen Laufmeter einer Tunnelzwischendecke. Die Betonvariante wurde realisiert, während die Holzvariante ein Konzept ist. Das Objekt besteht aus nur einer Baugruppe (Abb. 15). Die detaillierten Materiallisten beider Varianten finden sich im ANHANG (Tab. 10).

Betonvariante (umgesetzt) **Holzvariante (Konzept)**

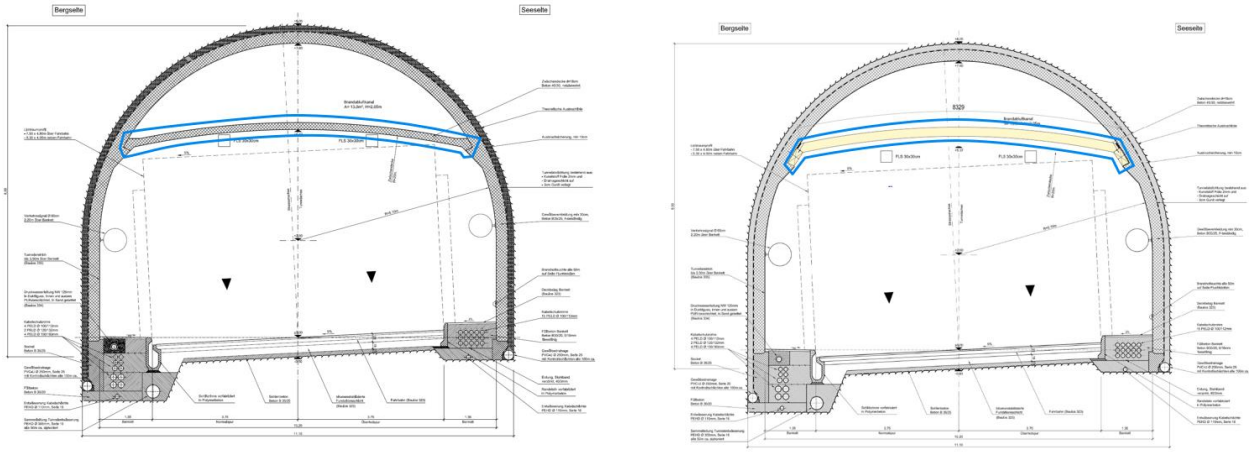
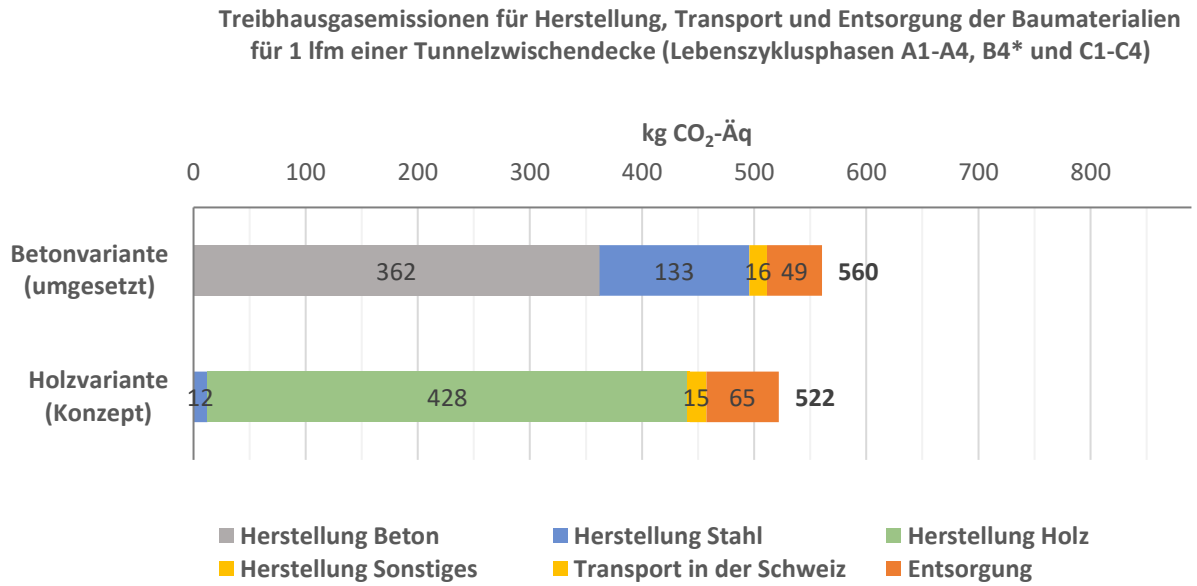


Abb. 15. Zeichnungen der Tunnelzwischendecke aus Beton und Holz. Die betrachteten Baugruppen sind blau umrandet

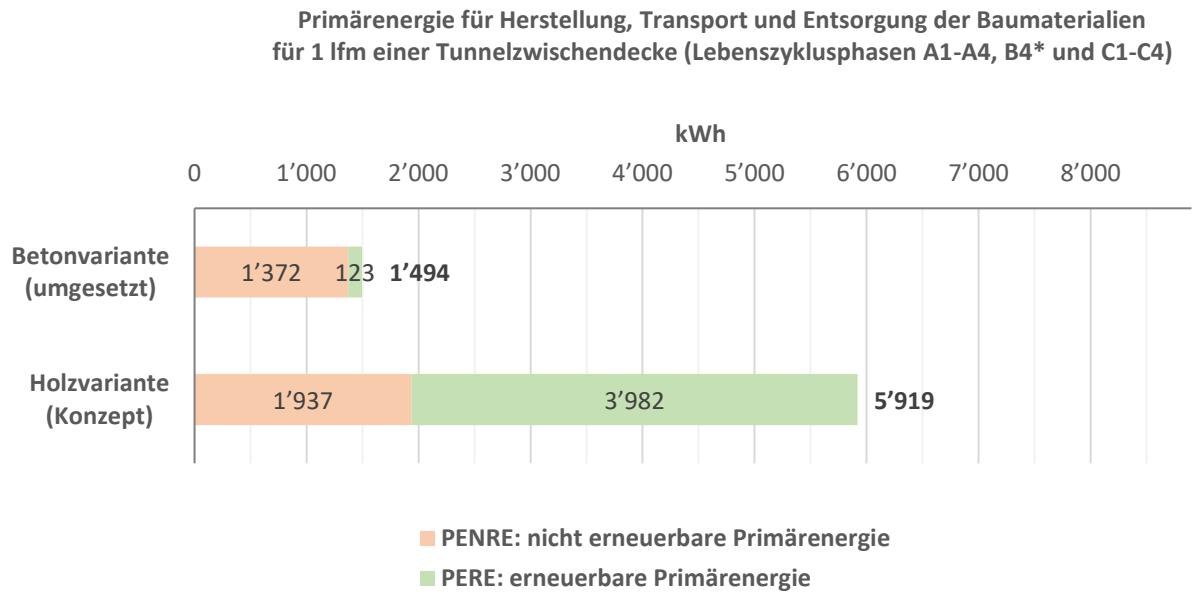
Die berechneten Treibhausgasemissionen für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung (Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4) der Holzvariante und der Betonvariante liegen nah beieinander (Abb. 16). Ohne die konservative Annahme, dass 30 % des Holzes einmal während der Lebensdauer von 60 Jahren komplett ausgetauscht wird, würden die Treibhausgasemissionen der Holzvariante 30% tiefer als jene der Betonvariante liegen.

Der anhand der Tunnelzwischendecke dargestellte Vergleich ermöglicht durch die relativ einfachen Geometrien und die direkte Substitution des Betons durch Holz einen interessanten Vergleich zwischen den beiden Materialvarianten. Ähnlich wie bei der Brücke quer zur Achse weist die Primärenergie der Holzvariante einen deutlich höheren Wert aus als die der Betonvariante: Die Holzvariante benötigt viermal mehr Primärenergie als die Betonvariante (Abb. 17). Dennoch liegen die Treibhausgasemissionen für die Holzvariante niedriger als jene für die Betonvariante (siehe oben). Dieses liegt daran, dass in der Holzvariante nahezu 70 % erneuerbare Energie enthalten ist, die insbesondere für die Trocknung des Holzes eingesetzt wird. Diese erneuerbare Energie trägt nicht zu den Treibhausgasemissionen bei. Aber selbst die nicht-erneuerbare Energie (PENRE in Abb. 17) liegt für die Holzvariante höher als für die Betonvariante. Dass die Treibhausgasemissionen der Holzvariante dennoch leicht unterhalb der Emissionen der Betonvariante liegen ist darin begründet, dass nicht nur die (nicht-erneuerbare) Primärenergie sondern auch die CO_2-Freisetzung durch die chemische Reaktion bei der Zementherstellung zu den Treibhausgasemissionen beiträgt.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 16. Treibhausgasemissionen für 1 lfm einer Tunnelzwischendecke



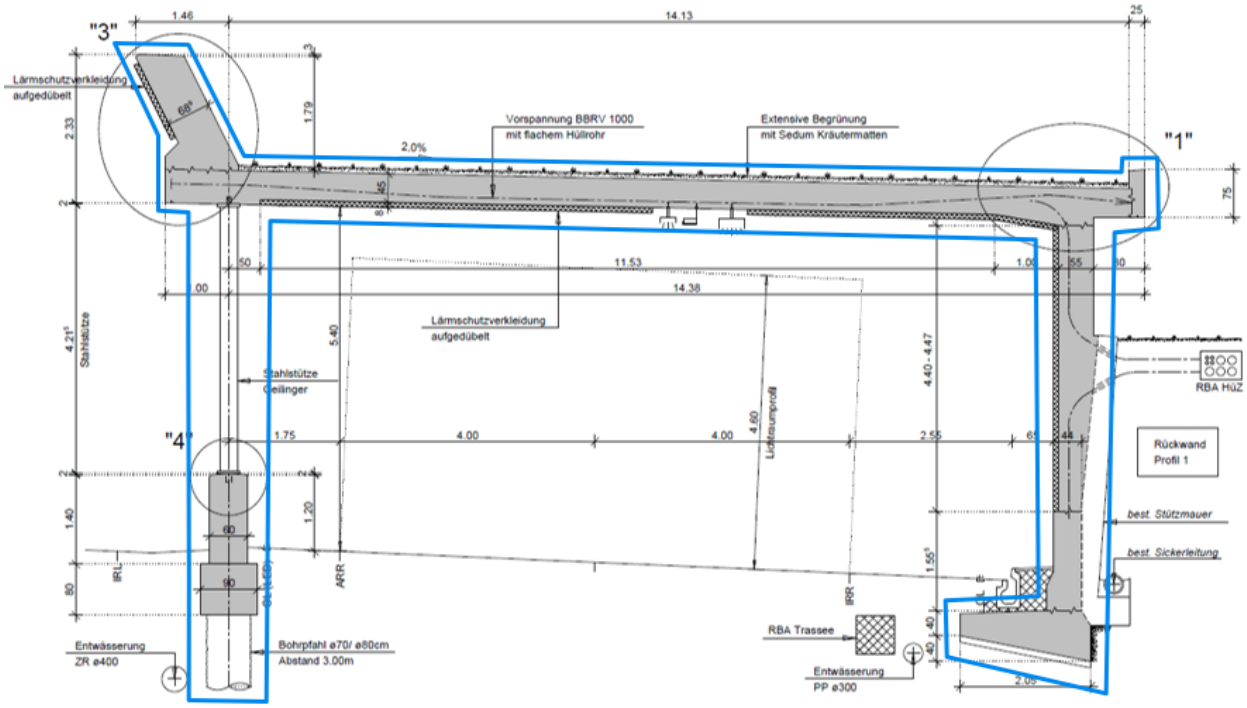
*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 17. Primärenergie für 1 lfm einer Tunnelzwischendecke

3.2.5 Lärmschutzgalerien

Bei der hier dargestellten Lärmschutzgalerie beziehen sich die Berechnungen auf einen Laufmeter. Die Betonvariante wurde realisiert, während die Holzvariante ein Konzept darstellt. Die betrachteten Baugruppen sind: Decke, Wände, Fundament (Abb. 18). Die detaillierten Materiallisten beider Varianten finden sich im ANHANG (Tab. 11).

Betonvariante (umgesetzt)



Holzvariante (Konzept)

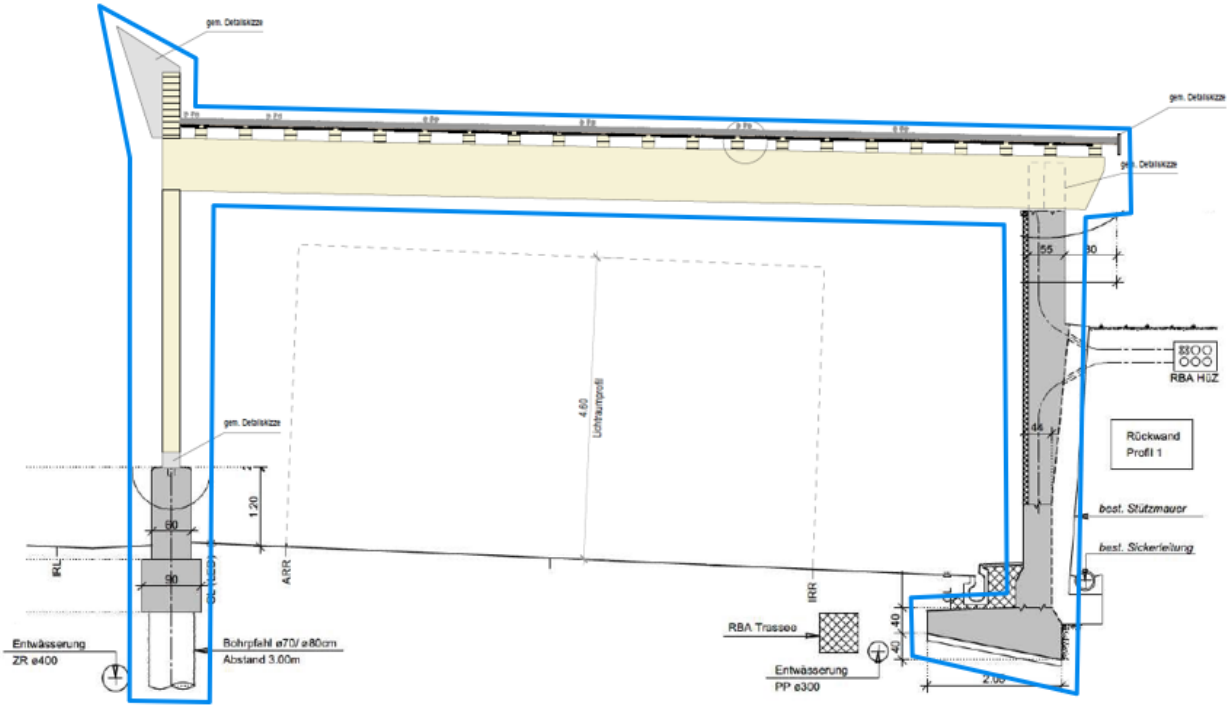
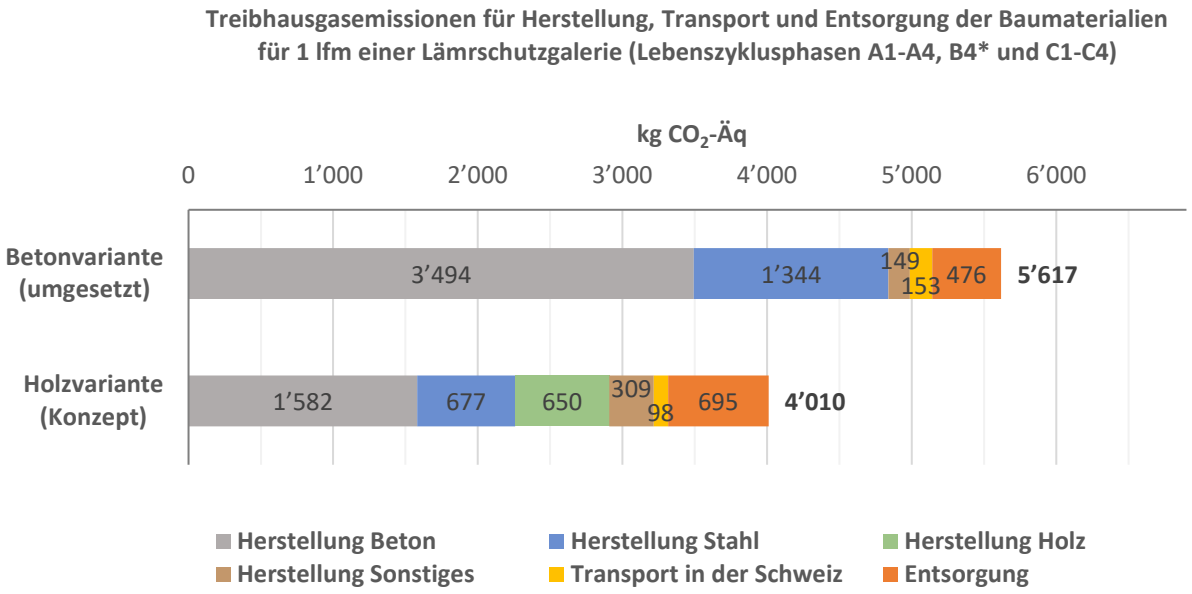


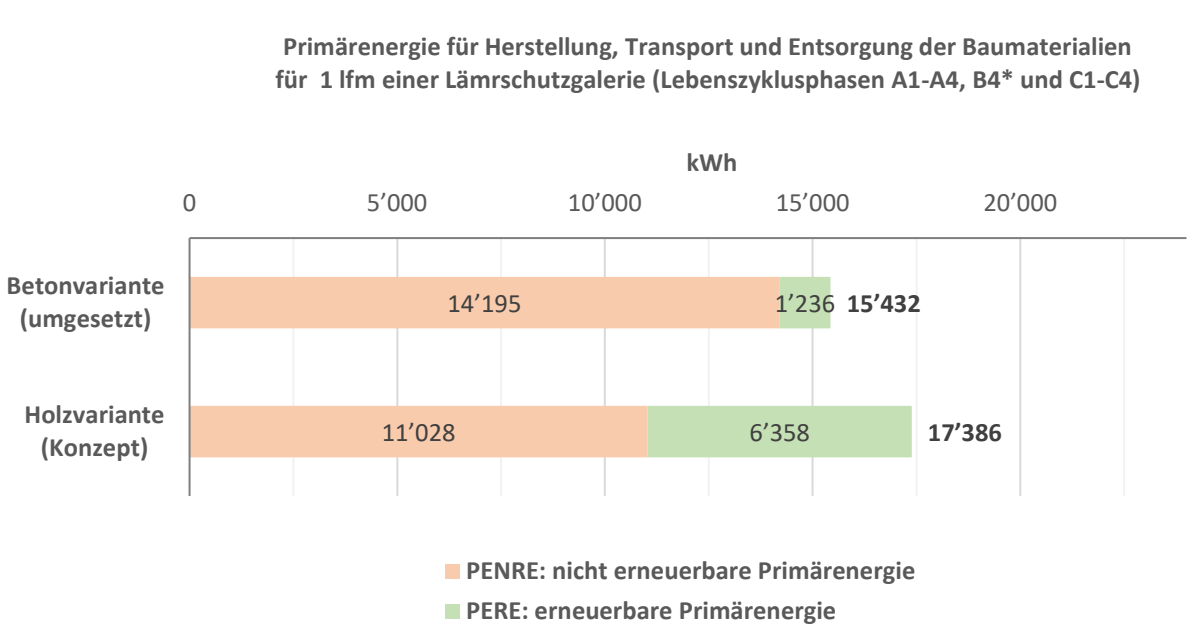
Abb. 18. Zeichnungen der Lärmschutzgalerie aus Beton und Holz. Die betrachteten Baugruppen sind blau umrandet

Die berechneten Treibhausgasemissionen für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung (Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4) der Holzvariante sind 30 % tiefer als jene der Betonvariante (Abb. 19), was hauptsächlich darauf zurückzuführen ist, dass 55 % des Betonvolumens durch Holz (hauptsächlich durch BSH) ersetzt worden ist. Für die nicht-erneuerbare Primärenergie liegt der Wert für die Holzvariante ebenfalls niedriger als für die Betonvariante, während die gesamte Primärenergie (PERE plus PENRE in Abb. 20) für die Holz- im Vergleich zur Betonvariante höher ausfällt.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 19. Treibhausgasemissionen für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie



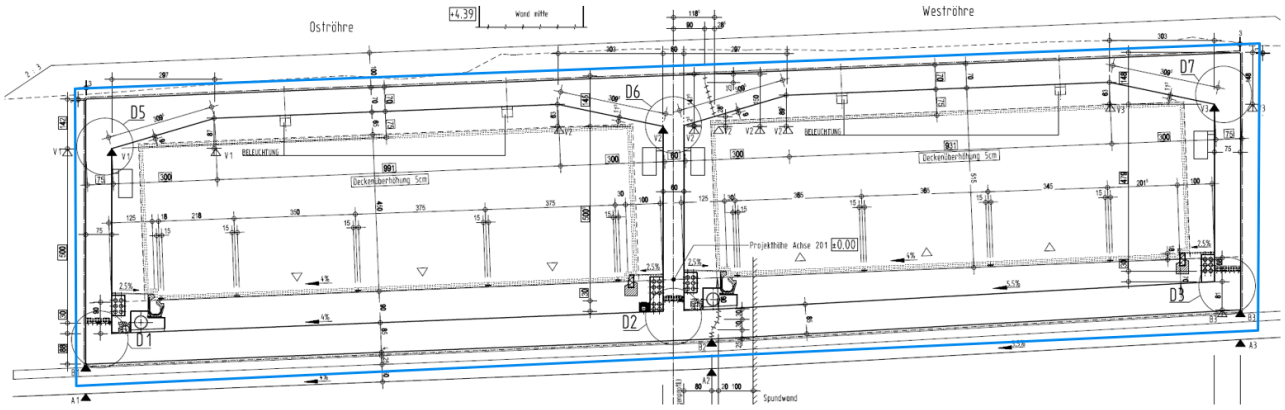
*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 20. Primärenergie für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie

3.2.6 Tagbautunnels

Betrachtet wird ein Laufmeter eines Tagbautunnels. Die Betonvariante wurde realisiert, während die Holzvariante ein Konzept darstellt. Die betrachteten Baugruppen sind: Decke, Wände, Fundament (Abb. 21). Die detaillierten Materiallisten beider Varianten sind im ANHANG (Tab. 12) aufgeführt.

Betonvariante (umgesetzt)



Holzvariante (Konzept)

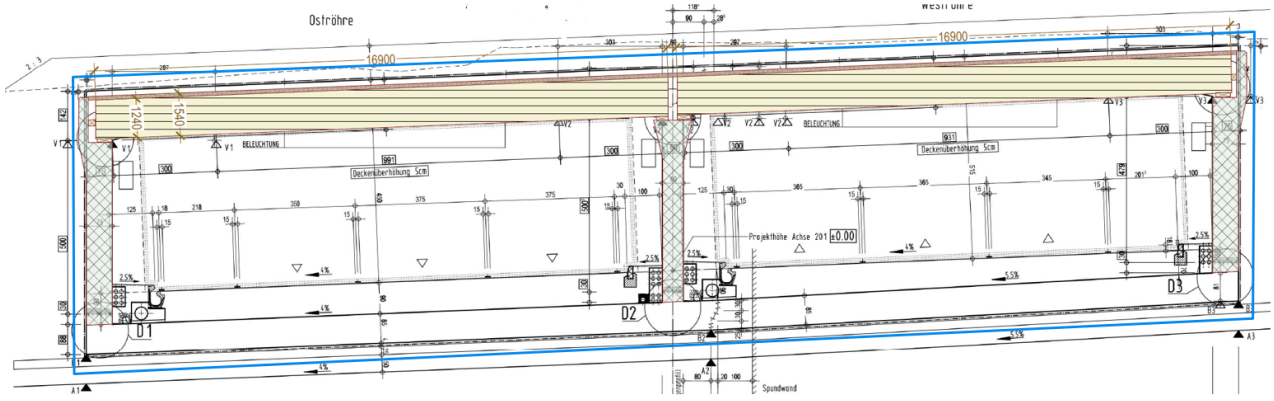
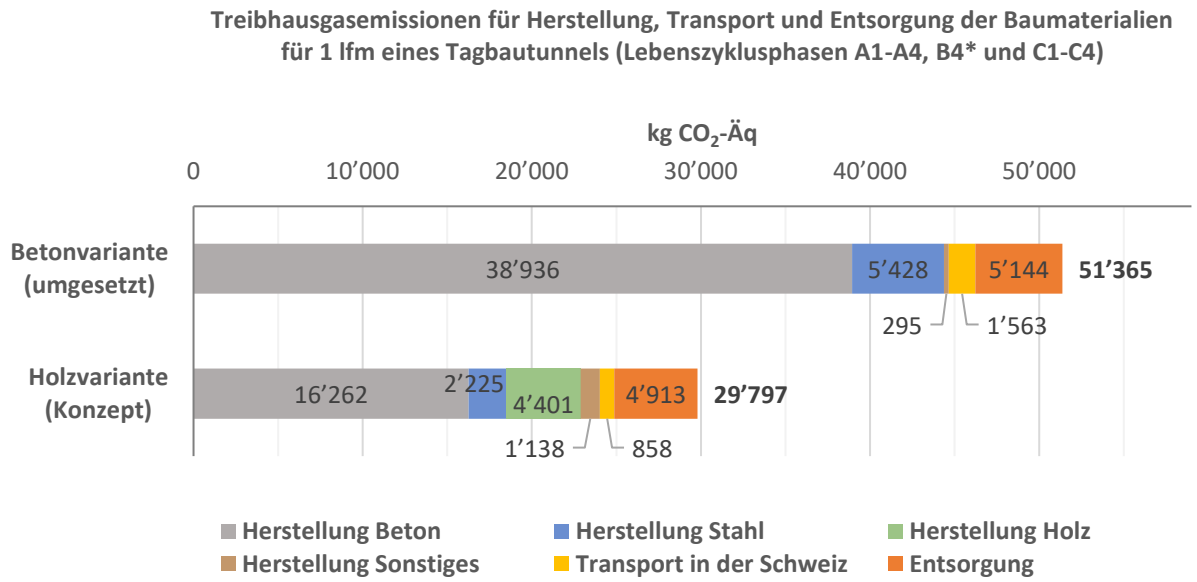


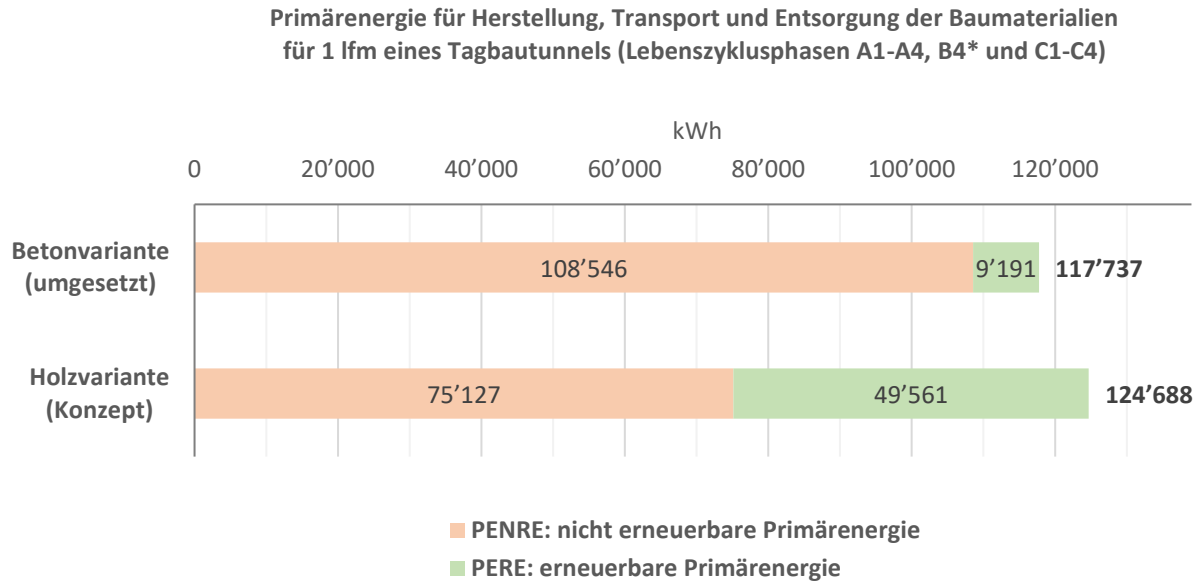
Abb. 21. Zeichnungen des Tagbautunnels aus Beton und Holz. Die betrachteten Baugruppen sind blau umrandet

Die berechneten Treibhausgasemissionen für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung (Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4) der Holzvariante liegen um 40 % niedriger als jene für die Betonvariante (Abb. 22). Für die Primärenergie ergibt sich ein ähnliches Bild, wie bereits für die Lärmschutzgalerie beschrieben, mit einem leicht erhöhten Gesamtwert für die Holz- im Vergleich zur Betonvariante, aber mit einer deutlichen Reduktion der nicht-erneuerbaren Primärenergie (Abb. 23).



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 22. Treibhausgasemissionen für 1 lfm eines Tagbautunnels



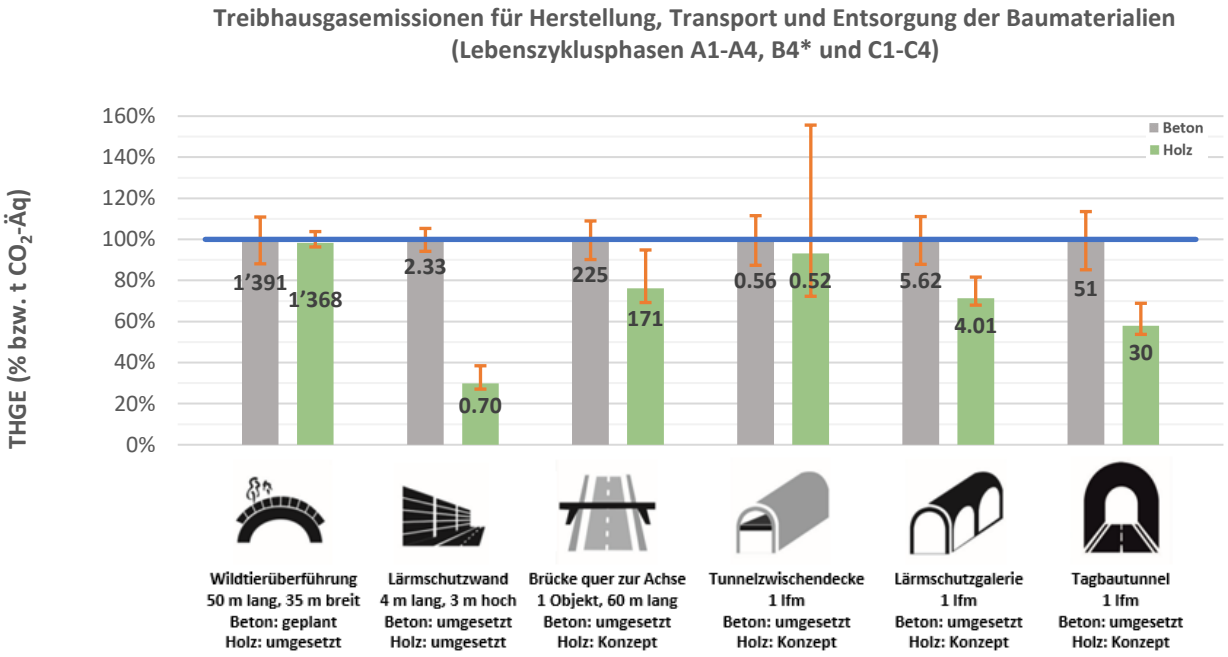
*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 23. Primärenergie für 1 lfm eines Tagbautunnels

3.3 Schlussfolgerung – Sensitivitätsanalysen, Vergleichsstudien, Interpretation

3.3.1 Übersicht der Ergebnisse aller Objekte mit Sensitivitätsanalysen

Zum einfacheren Vergleich der Ergebnisse untereinander werden in (Abb. 24) die zuvor berechneten Treibhausgasemissionen für jedes Objekt in Prozent der Treibhausgasemissionen der Betonvarianten dargestellt, ergänzt um die Angabe der Absolutwerte auf den Balken. Abb. 25 zeigt eine entsprechende Grafik für die Primärenergie und Abb. 27 im ANHANG für Umweltbelastungspunkte.



*) Für das Modul B4 sind die Emissionen von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 24. Übersicht der Treibhausgasemissionen (THGE) aller Objekte. Darstellung der Emissionen in Prozent des jeweiligen Wertes für die Betonvariante, mit absoluten Zahlenwerten auf den Balken in t CO_2-Äq. Die Fehlerbalken stellen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen dar (Beton mit tiefen oder hohen CO_2-Emissionen, Holzherkunft 100 % Schweiz oder 100 % Einfuhr)

Auf diesen Übersichtsgrafiken sind zusätzlich die folgenden Sensitivitätsanalysen als Fehlerbalken dargestellt:

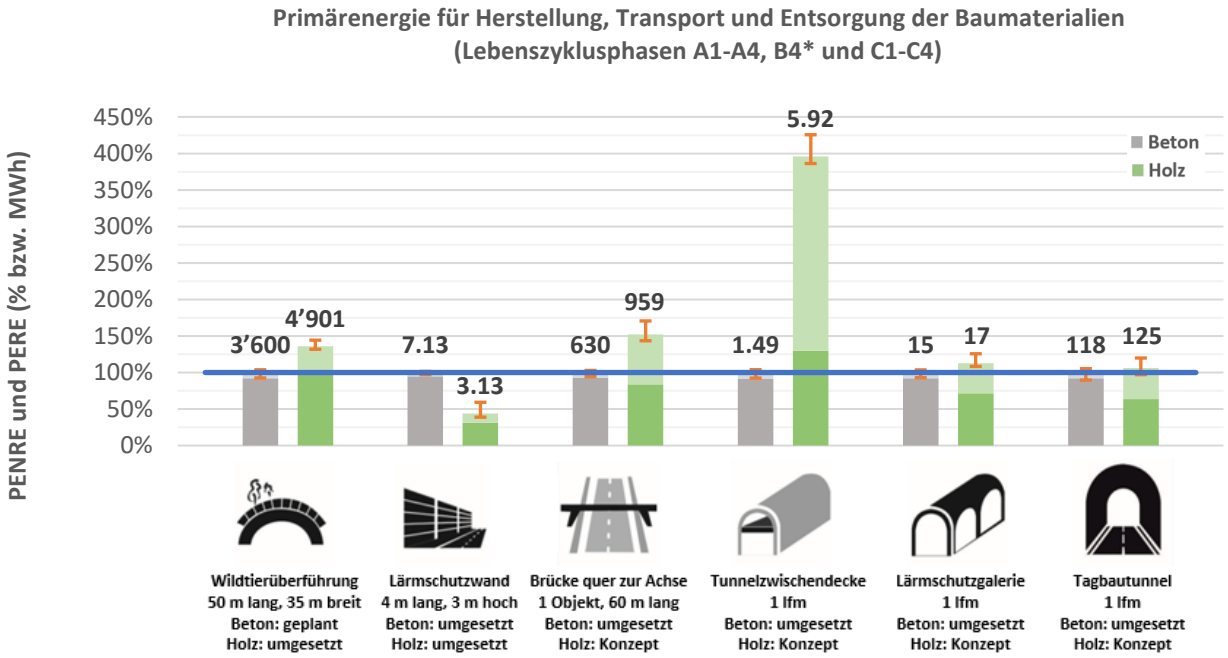
- Für die Betonvarianten, wurde ein Beton mit um 20 % reduzierten CO_2-Emissionen und ein Beton mit um 20 % erhöhten CO_2-Emissionen betrachtet, ermittelt anhand des Betonrechners[2] von Treeze bzw. vom Büro für Umweltchemie berechnet (siehe Umweltauswirkungsdaten im ANHANG, Tab. 13 und Tab. 14). Mit dem heutigen Stand der Technik können sich Emissionswerte je nach Betonrezeptur in Abhängigkeit der Korngrössenverteilung, des Zementtyps und der Zementdosierung im hier gewählten Schwankungsbereich ergeben.
- Für die Holzvarianten wurden die Fälle *Holz 100 % aus der Schweiz* und *Holz 100 % aus der Einfuhr* betrachtet, berechnet anhand verfügbarer Daten aus der KBOB-Datenbank (siehe Umweltauswirkungsdaten im ANHANG, Tab. 13 und Tab. 14). Weitere Parameter wie z.B. die Holzart wurden unverändert gelassen, da sie in Abhängigkeit ihrer Funktion im entsprechenden Objekt definiert worden sind.

[2] https://treeze.ch/de/rechner

Bei der Betrachtung der Ergebnisse von Tunnelzwischendecken, Lärmschutzgalerien und Tagbautunnels ist zu beachten, dass diese Objekte bisher noch nicht in Holzbauweise realisiert wurden und für diese Bauweise lediglich Konzepte darstellen. Eine Optimierung dieser Objekte hat noch nicht stattgefunden.

Für die hier betrachteten Infrastrukturobjekte liegen die Treibhausgasemissionen der Holzvarianten ausschliesslich unter jenen der Betonvarianten (Abb. 24). Jedoch zeigen die Sensitivitätsanalysen, dass sich der Unterschied bei einigen Objekten verringern oder in einem Fall sogar umkehren kann. Dabei sind insbesondere die folgenden Objekte zu erwähnen:

- Brücken quer zur Achse
  Die Treibhausgasemissionen der Holzvariante liegen bei knapp 80 % im Vergleich zur Betonvariante, wenn mit dem in der KBOB-Datenbank verwendeten Herkunftsmix für das Holzmaterial gerechnet wird. Dieser Wert erhöht sich auf fast 100 %, wenn davon ausgegangen wird, dass das Holz zu 100 % eingeführt wird. Der Einfluss der Holzherkunft auf die Treibhausgasemissionen ist in diesem Fall sehr gross, da in der Holzvariante der Brücke quer zur Achse eine relativ grosse Menge Holz zum Einsatz kommt.
- Tunnelzwischendecken
  Aus dem gleichen Grund wie für die Brücken quer zur Achse, aber noch verschärft durch den Umstand, dass die Holz-Tunnelzwischendecken fast ausschliesslich aus Holz gefertigt ist, führt eine 100-prozentige Einfuhr des Holzes dazu, dass die Treibhausgasemissionen der Holzvariante deutlich über jenen der Betonvariante liegen können.



*) Für das Modul B4 sind die Primärenergiewerte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 25. Übersicht der Primärenergie aller Objekte. Dunkel: PENRE, Primärenergie nicht erneuerbar; hell: PERE, Primärenergie erneuerbar. Darstellung der Emissionen in Prozent des jeweiligen Wertes für die Betonvariante, mit absoluten Zahlenwerten auf den Balken in MWh. Die Fehlerbalken stellen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen dar (Beton mit tiefen oder hohen CO_2-Emissionen, Holzherkunft 100 % Schweiz oder 100 % Einfuhr)

Imprägniertes Holz verursacht bei der Herstellung zwischen 15 % und 30 % höhere Treibhausgasemissionen als nicht imprägniertes Holz (siehe Umweltauswirkungsdaten im ANHANG, Tab. 13), was grundsätzlich zu einer Verschlechterung der Treibhausgasemissionsbilanz der Holzvarianten führt. In den diesem Bericht zugrundeliegenden Berechnungen wird davon ausgegangen, dass für die Erstellung der folgenden Objekte imprägniertes Holz in erheblichem Umfang eingesetzt wird:

- Wildtierüberführungen (imprägniertes BSH und imprägniertes Nadelschnittholz)
- Lärmschutzwände (imprägniertes Nadelschnittholz)
- Tunnelzwischendecken (imprägniertes BSH)
- Tagbautunnels (imprägniertes BSH und imprägniertes CLT)

Bei Verzicht auf die Imprägnierungen würden sich die Emissionswerte der Holzvarianten also noch verringern. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Anmerkungen zum chemischen Holzschutz für Infrastrukturbauten in Abschnitt 6.2.1 verwiesen.

Für vier der sechs betrachteten Objekte liegt die *Primärenergie nicht-erneuerbar* (PENRE in Abb. 25) für die Holzvariante niedriger als für die Betonvariante. Für die Wildtierüberführungen und für die Tunnelzwischendecken liegt dieser Wert um 10% bzw. 40 % über dem Referenzwert. Die *Primärenergie nicht-erneuerbar* korreliert mit den Treibhausgasemissionen, ohne aber die CO_2-Freisetzung durch die chemische Reaktion bei der Zementherstellung zu berücksichtigen. In Abb. 25 ebenfalls für die sechs Objekte dargestellt ist der jeweilige Wert für die *Primärenergie erneuerbar* (PERE). Bei den Holzvarianten in diesem Wert enthalten ist z.B. die Trocknungsenergie, welche durch das Verbrennen von Rinden- oder Holzabfällen erzeugt wird. Die gesamte Primärenergie, also die Summe aus PENRE und PERE, liegt in einem Fall (Lärmschutzwände) für die Holzvariante unterhalb der Betonvariante, zwei mal etwa gleich auf (Lärmschutzgalerien und Tagbautunnels), und für drei Objekte (Wildtierüberführungen, Brücken quer zur Achse und Tunnelzwischendecken) deutlich oberhalb der Betonvariante.

Die Definition der Lebensdauer spielt eine zentrale Rolle in Ökobilanzierungen. Die hier beschriebenen Berechnungen gehen von der Annahme aus, dass die in Holzbauweise errichteten Infrastrukturbauten die gleiche Lebensdauer haben müssen wie die in Betonbauweise errichteten. Darüber hinaus wurde für die Holzvarianten jeweils die minimale Lebensdauer berechnet, ab der die positive Auswirkung der Holzvariante gegenüber der Betonvariante effektiv wird (Tab. 4 für THGE und PENRE sowie Tab. 15 im ANHANG für Umweltbelastungspunkte, UBP).

Tab. 4. Minimal erforderliche Lebensdauer der Holzvarianten, bei welcher Treibhausgasemissionen bzw. Primärenergie den gleichen Wert aufweisen wie die Betonvarianten

Objekt	SOLL	Minimale Lebensdauer der Holzbauten	
	Lebensdauer	THGE	PENRE
Wildtierüberführungen	100 Jahre	100 Jahre	-
Lärmschutzwände	100 Jahre	30 Jahre	35 Jahre
Brücken quer zur Achse	100 Jahre	75 Jahre	90 Jahre
Tunnelzwischendecken	60 Jahre	55 Jahre	-
Lärmschutzgalerien	100 Jahre	70 Jahre	80 Jahre
Tagbautunnels	100 Jahre	60 Jahre	70 Jahre

Den Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass die Lebensdauer von Betonbauten gleich der SOLL-Lebensdauer ist

Den Berechnungen liegen die Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4 zugrunde

3.3.2 Vergleichsstudien

Wildtierüberführungen

Als Vergleich liegt die Studie *Ökobilanz Wildtierbrücke: Das Wichtigste zum Vergleich Holz – Stahlbeton* von Susanne Kytzia für den Kanton Zürich (2021) vor. In dieser Studie liegen die Treibhausgasemissionen der Wildtierüberführung (Bogentragwerk) aus Holz 40 % unterhalb jener der Betonvariante (Herstellungs- und Entsorgungsphase zusammengerechnet), was hauptsächlich an der deutlich geringeren Tonnage Baumaterial in der Holzvariante liegt, gekoppelt mit dem Sachverhalt, dass Holz volumenbezogen deutlich kleinere Treibhausgasemissionen als Beton und Armierungsstahl aufweist (siehe Umweltauswirkungsdaten im ANHANG). Dagegen liegen in der vorliegenden Studie die Treibhausgasemissionen der Holzvariante nur 2 % tiefer als die der Betonvariante. Dieser Unterschied zwischen den zwei Studien lässt sich durch den Umstand erklären, dass unterschiedliche Baukonstruktionen betrachtet wurden: In der Studie von Susanne Kytzia wird über 70 % des Betons durch Holz ersetzt, während dieser Wert in der vorliegenden Studie nur 25 % beträgt. Zudem liegen in der vorliegenden Studie nicht vergleichbare Annahmen für Sanierungsmassnahmen der Holz- gegenüber der Betonvariante vor (siehe Abschnitt 3.2.1).

Lärmschutzwände

Frank Werner vergleicht eine Holz-Lärmschutzwand mit einer Beton-Lärmschutzwand in seiner Studie *Ökobilanz von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände* für den ASTRA und Lignum (2019). In beiden Studien, jener von Frank Werner und der hier beschriebenen, wurden die gleichen Beton- und Holzvarianten betrachtet. Die Unterschiede zwischen beiden Studien liegen insbesondere in der Rahmendefinition:

- Betrachtung des Fundaments und der Pfosten in der vorliegenden Studie, welche in der Studie von Frank Werner nicht betrachtet wurden;
- Die betrachteten Baugruppen werden in der Studie von Frank Werner für die Holzvariante nach 40 Jahren bzw. für die Betonvariante nach 50 Jahren ausgetauscht. In der vorliegenden beträgt die Gesamtlebensdauer (incl. Fundamente und Pfosten) 100 Jahre, mit Austausch der Schallschutzelemente nach 30 Jahren und der Wandkonstruktion nach 50 Jahren (jeweils für Beton- und Holzbauweise).
- Berücksichtigung des Einbaus nur in der Studie von Frank Werner. Unterhaltsarbeiten sind dort zudem als Pauschale angesetzt.

Trotz dieser Unterschiede liegen die Treibhausgasemissionen der Holzvarianten in beiden Fällen zwischen 70 % und 80 % unter denen der Betonvarianten. Die absoluten Werte der Treibhausgasemissionen in der vorliegenden Studie liegen aber etwa um Faktor 3 höher als die in der Studie von Frank Werner aufgeführten, und zwar insbesondere aus dem Grund, dass das Betonfundament und die Stahlpfosten in die Betrachtung einbezogen wurden, sowie aufgrund eines häufigeren Austausches der Bauteile. Werden diese Unterschiede ausgeglichen, so liegen die absoluten Treibhausgasemissionen beider Varianten in beiden Studien in gleicher Grössenordnung.

Brücken quer zur Achse

In der vorliegenden Studie liegen, für eine gleiche Lebensdauer, die Treibhausgasemissionen der Holzvariante für die Brücke quer zur Achse 25 % niedriger als die der Betonvariante. Im Buch *Ökobilanzen im Brückenbau: eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung* (1999) von Heiko Lünser fallen die Treibhausgasemissionen der Holzvariante für die Herstellungsphase sogar 50 % tiefer aus als die der Betonvariante. Dieser Unterschied zwischen den beiden Studien ergibt sich aus den unterschiedlichen Bauweisen der betrachteten Brücken.

4 Speicherleistung Holz – Temporäre Speicherung biogenes CO_2

4.1 Einleitung

Es ist relativ einfach, die Menge des in Bauwerken gespeicherten biogenen Kohlenstoffs zu erfassen. Für die sechs betrachteten Objekte ergibt sich diese direkt aus den Massen des verbauten Holzes (siehe Materiallisten im Anhang) und den Werten für den im entsprechenden Material enthaltenen biogenen Kohlenstoff (siehe Abschnitt 4.3).

Dagegen gibt es in der wissenschaftlichen Literatur wie auch in der politischen und normativen Diskussion bisher keinen Konsens, wie die Speicherung biogenen Kohlenstoffs in Bauwerken hinsichtlich ihres Klimaeffekts zu bewerten ist. Deshalb kann die Frage der Anrechenbarkeit der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten (hier Infrastrukturbauten) zum Erreichen der nationalen Klimaziele gemäss Pariser Klimaabkommen an dieser Stelle nicht abschliessend behandelt werden. Als Beitrag zur grundsätzlichen Diskussion und zur Einordnung der im Abschnitt 4.3 ausgewiesenen Mengen an gespeichertem Kohlenstoff sollen in Abschnitt 4.2 aber einige grundsätzliche Anmerkungen zur Anrechenbarkeit temporärer Kohlenstoffspeicher gemacht werden.

4.2 Grundsätzliche Anmerkungen zur Anrechenbarkeit temporärer Kohlenstoffspeicher

4.2.1 Wirkung temporärer Speicher (allgemein)

Die im Folgenden beschriebene Wirkung temporärer Kohlenstoffspeicher ergibt sich unabhängig davon, ob biogener oder fossil-basierter Kohlenstoff gespeichert wird.

Unter Annahme einer konstanten oder weiter steigenden CO_2-Konzentration in der Atmosphäre und damit weiter steigender globaler Durchschnittstemperaturen ist zunächst einmal davon auszugehen, dass die temporäre Speicherung von Kohlenstoff einen Verzögerungseffekt mit sich bringt, über den Zeitraum der temporären Speicherung hinaus aber keinen Minderungseffekt hat. Nach Freisetzung des temporär gespeicherten Kohlenstoffs ergibt sich eine CO_2-Konzentration in der Atmosphäre, wie sie sich auch ohne temporäre Speicherung eingestellt hätte, eben nur zeitlich versetzt.

Es mögen noch sekundäre Effekte die zwischenzeitliche CO_2-Konzentration beeinflussen. Beispielsweise beschreibt Kirschbaum (2006), dass der durch anthropogenen CO_2-Anstieg verursachte erhöhte Übertritt von CO_2 von der Atmosphäre in die Ozeane einen Einfluss auf die Temperaturentwicklung hat. Grundsätzlich ist aber auch unter Berücksichtigung solcher Effekte davon auszugehen, dass eine temporäre Kohlenstoffspeicherung lediglich zu einer Zeitverzögerung führt.

Anders stellt sich die Situation allerdings dar, wenn die Weiterentwicklung von permanenten Negativemissionstechnologien (NET) in Verbindung mit einer deutlichen Reduktion der weltweiten CO_2-Emissionen in den kommenden Jahrzehnten zu einer Umkehrung der Temperaturentwicklung führt. Wie von Matthews *et al.* (2022) beschrieben, kann in diesem Fall eine temporäre Kohlenstoffspeicherung zu einer abnehmenden Maximalerwärmung mit positiven Effekten für den Erhalt der Artenvielfalt und dem Vermeiden von Extremwettersituationen führen (Abb. 26). Nach Freisetzung des temporär gespeicherten Kohlenstoffs ergibt sich zwar auch hier eine Temperatur, wie sie sich bei sofortiger CO_2-Emission eingestellt hätte. Wenn der Zeitpunkt der Freisetzung aber hinter dem Zeitpunkt der Maximalerwärmung liegt, so ergeben sich die oben beschriebenen abmildernden Effekte.

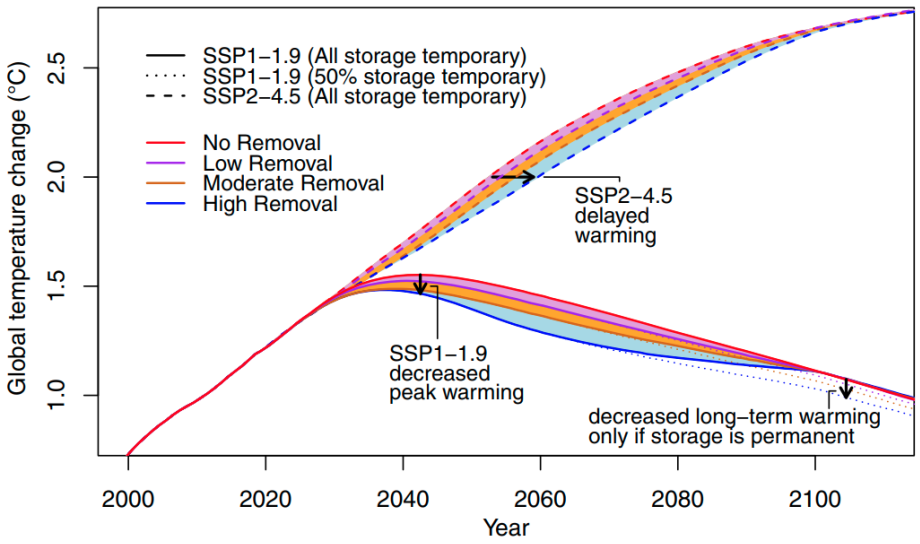


Abb. 26. Modellierter globaler Temperaturanstieg in Abhängigkeit von vier verschiedenen Szenarien zur CO_2-Entfernung aus der Atmosphäre und zwei Szenarien, die zukünftige Minderungsambitionen abdecken: Von relativ schwach (SSP2-4.5, mit anhaltenden CO_2-Emissionen bis 2100) bis sehr stark (SSP1-1.9, mit CO_2-Emissionen, die bis zur Mitte des Jahrhunderts auf Null sinken); (Matthews *et al.*, 2022)

4.2.2 Definition von Permanenz und temporärer Speicherung

Bei der Frage nach einer sinnvollen Definition für die Permanenz eines Kohlenstoffspeichers ist zu beachten, dass es sich hier primär um einen interessengruppenübergreifenden Konsens zum Betrachtungszeitraum handelt, und nur in zweiter Linie um die Frage der physikalischen Permanenz. Allein in der Schweiz gibt es etliche Definitionen der Permanenz, von denen zwei sehr unterschiedliche hier erwähnt werden sollen:

- In der Schweizer CO_2-Verordnung (nach Änderungen von 2022) wird für Projekte und Programme von Permanenz der Kohlenstoffbindung ausgegangen, wenn die Kohlenstoffspeicherung für mindestens 30 Jahre sichergestellt ist. Dieser Zeitraum mag als stimmige Mindestlebensdauer von langlebigen Produkten oder als minimale Wirkdauer von Kohlenstoffspeicherprojekten gedacht sein; der Begriff der Permanenz erscheint hier aber unglücklich gewählt für Massnahmen, welche über etliche Generationen wirksam sein sollen.
- Brunner (2022) schlägt einen physikalischen Ansatz zur Definition der Permanenz vor. Das Kriterium der Permanenz ist demnach bei einer Halbwertszeit eines Kohlenstoffspeichers von 3'000 bis 8'000 Jahren gegeben. Die Abschätzung basiert auf einer Extrapolation einer Grafik des IPCC AR5 und wurde bisher weder im Rahmen eines wissenschaftlichen Reviewprozesses bestätigt, noch ist aus der vorliegenden Präsentation erkennbar, in wie weit es sich hier um eine Einzelmeinung handelt. Herr Brunner selbst erwähnt in seinem Vortrag beim 80. LCA-Forum in 2022, dass es zu diesem Thema bisher nur sehr wenig Forschung gibt.

Auch die Verhandlungen um die Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens zeigen, dass es international nach wie vor keinen Konsens zur Frage gibt, ab wann die Annahme der Permanenz gerechtfertigt ist. Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Definitionen findet sich in UNFCCC (2023).

Im Sinne einer klaren Begrifflichkeit wird im vorliegenden Bericht die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten (hier Infrastrukturbauten) als *temporäre* Kohlenstoffspeicher bezeichnet.

4.2.3 Anrechenbarkeit temporärer Kohlenstoffspeicher

Die *qualitative* Wirkung temporärer Kohlenstoffspeicher (siehe Abschnitt 4.2.1) ist weitgehend unstrittig. Dagegen gibt es keinen Konsens zur *quantitativen* Bewertung der Klimawirkung temporärer Speicher und zu ihrer Anrechenbarkeit. Dieses liegt auch daran, dass die Wirkung in starkem Masse vom (noch unsicheren) zukünftigen Temperaturverlauf der Atmosphäre abhängt; verschiebt sich das Temperaturmaximum in Abb. 26 nach hinten, so verlängert sich auch die notwendige Dauer der temporären Speicherung.

Zudem ist eine Rückbuchung von angerechneten Klimaleistungen am Ende der temporären Speicherung nur schwer kontrollier- und durchsetzbar. Eine gute Übersicht zu möglichen Bewertungskriterien für die Anrechnung temporären Kohlenstoffspeicher findet sich ebenfalls in UNFCCC (2023).

Zielführend erscheinen aber Überlegungen, wonach die temporäre Speicherung von Kohlenstoff in Bauprodukten als Negativemission angerechnet werden kann, wenn für sie eine rechtsverbindliche Verpflichtung zur permanenten Speicherung besteht. Konzepte, die eine rechtsverbindliche Verpflichtung garantieren, sind noch nicht etabliert. Eine entsprechende Regelung könnte aber zulassen, dass in biogenen Baustoffen eingelagerter Kohlenstoff unter Voraussetzung z.B. eines Eintrags ins Grundbuch als Negativemission anrechenbar ist. Um den Grundbucheintrag zu einem späteren Zeitpunkt zu löschen wäre der temporär gespeicherte Kohlenstoff oder die entsprechende Kohlenstoffmenge durch eine permanente Negativemissionstechnologie zu binden. Die hier skizzierte Vorgehensweise zielt darauf ab, Anreize für eine temporäre Kohlenstoffspeicherung zur Reduktion des Erderwärmungsmaximums zu schaffen, gleichzeitig aber die langfristige Wirksamkeit angerechneter Massnahmen sicherzustellen. Es geht sozusagen um ein Vorziehen der Wirkung heute noch nicht ausgereifter permanenter NET, motiviert durch die Dringlichkeit einer sofortigen Reduktion der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre.

4.3 Abschätzung der CO_2-Speicherung im Holz für jedes Objekt

Eine Abschätzung der Speichermenge biogenen CO_2 für die sechs betrachteten Infrastrukturobjekte dieser Studie findet sich in Tab. 5. Die Massen des verbauten Holzes je Objekt entstammen den Materiallisten im Anhang. Diese Angaben enthalten für CLT und BSH auch fossil-basierten Klebstoff. Bei einer angenommenen Lamellenstärke von 30 mm, einer angenommenen Dichte (Nadelholz) von 480 kg/m^3 und einem Klebstoffauftrag von 200 g/m^2 ergibt sich ein massebezogener Klebstoffanteil von weniger als 1.5 %. Die hier verwendeten Werte stellen konservative Annahmen dar. In der Literatur wird der Klebstoffanteil für CLT und BSH in der Regel mit kleiner als 1 % angegeben. Damit erscheint die vereinfachende Annahme gerechtfertigt, die gesamte Masse des verbauten Holzes als biogenes Material zu zählen. Für die hier gemachte Überschlagsrechnung werden zudem etwaige Imprägnierungen nicht berücksichtigt.

Der Kohlenstoffgehalt von trockenem Holz wird gemäss Diestel und Weimar (2014) von zahlreichen Autoren mit «ca. 50 %» angegeben und unterliegt aufgrund der je nach Holzart unterschiedlichen Anteile der Holzkomponenten leichten Schwankungen. Unter der Annahme, dass sich die in Tab. 5 angegebenen Massen auf eine Holzfeuchte von 12 % beziehen, ergibt sich ein Kohlenstoffgehalt des (feuchten) Holzes von ca. 45 %. Im Folgenden wird dementsprechend mit einem Verhältnis von *Masse Kohlenstoff* zu *Masse (feuchtes) Holz* von 0.45 gerechnet. Dieser Wert entspricht den in der KBOB-Datenbank gemachten Angaben für biogenen Kohlenstoff in Vollholzprodukten. Kohlenstoff hat eine molare Masse von 12 g und CO_2 von 44 g. Somit ergibt sich die *Masse CO_2* als *Masse Kohlenstoff* multipliziert mit 44/12 = 3.67. In Kombination der beiden Rechenschritte erhält man die *Masse CO_2* als *Masse (feuchtes) Holz* multipliziert mit dem Faktor 0.45 x 3.67 = 1.65. Im vorliegenden Bericht wird – entsprechend den üblichen Angaben von Emissionswerten – die Masse gespeicherter Kohlenstoff als *Masse CO_2* und nicht als *Masse C* dargestellt.

In Tab. 5 ist neben der absoluten Masse gespeichertes biogenes CO_2 je funktionelle Einheit dieser Wert noch ins Verhältnis zu den Treibhausgasemissionen, die während der Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4 (jeweils einschliesslich der Austauschmaterialien) des gesamten Bauwerks generiert werden, gesetzt und in Prozent angegeben. Die Prozentangabe dient nicht dem Gegenrechnen von Emissionen aus der Herstellung und gespeicherter CO_2-Menge, sondern insbesondere dem erleichterten Vergleich *zwischen* den betrachteten Infrastrukturobjekten und der Veranschaulichung der Grössenordnung der Speicherleistung. Die Zahlenwerte verdeutlichen aber auch, dass die Mengen an in den Infrastrukturbauten zurückgehaltenem CO_2 erheblich sind, und dass durch die Etablierung von Mechanismen zur Nutzung der positiven Effekte temporärer Kohlenstoffspeicher (siehe Abschnitt 4.2.3) ein quantitativ relevanter Beitrag zum Erreichen der Klimaziele geleistet werden kann.

Tab. 5. Temporäre CO_2-Speicherung durch die Bindung von biogenem CO_2, Werte pro Objekt, ggf. abgerundete Werte

Objekt und **Funktionelle Einheit**	**Masse verbautes Holz**	**Speicherung biogenes CO_2 je funktionelle Einheit**
Wildtierüberführungen 1 Objekt, 50 m lang, 35 m breit	316'492 kg	522'212 kg CO_2 *38 %*
Lärmschutzwände 4m lang, 3 m hoch	383 kg	632 kg CO_2 *91 %*
Brücken quer zur Achse 1 Objekt, 60 m lang	147'348 kg	243'062 kg CO_2 *142 %*
Tunnelzwischendecke 1 lfm	993 kg	1'638 kg CO_2 *314 %*
Lärmschutzgalerien 1 lfm	2'047 kg	3'378 kg CO_2 *84 %*
Tagbautunnel 1 lfm	14'731 kg	24'306 kg CO_2 *82 %*

Prozentwerte beziehen sich auf die Treibhausgasemissionen für A1-A4, B4 und C1-C4 aus Abschnitt 3.2 (gesamtes Bauwerk, Variante Holz, kumuliert auf Lebensdauer gemäss Tab. 2)*
** Für das Modul B4 wurden allein die Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 betrachtet*

5 Speicherleistung Beton – Permanente Speicherung durch Karbonatisierung

5.1 Phänomen und Einflussfaktoren

Die Karbonatisierung der Zementmatrix im Beton ist ein natürliches Phänomen, welches selbständig und kontinuierlich stattfindet, wenn die Betonoberfläche frei zugänglich ist (d.h. ohne Abdichtung oder Verputz) bzw. freigestellt wird. Das Phänomen ist diffusionsbasiert und schreitet mit der Quadratwurzel der Zeit fort: Das gasförmige CO_2 tritt in den Beton durch Poren ein, diffundiert von der Oberfläche ins Innere des Materials und reagiert mit dem Kalzium aus den zwei Haupthydratprodukten des Zements (Portlandit und C-S-H). Das Reaktionsprodukt ist Kalziumcarbonat $CaCO_3$, welches unter üblichen Umgebungsbedingungen inert ist, weshalb von permanenter Speicherung von CO_2 durch die Karbonatisierung gesprochen wird.

Die Karbonatisierung des Betons bzw. der Zementmatrix findet sowohl auf dem Objekt während der Nutzungsphase statt, wie auch auf Betonabbrüchen und insbesondere im Betongranulat nach dem Lebensende des Objekts. Die Karbonatisierungstiefe von Beton in Abhängigkeit von der Zeit, und damit die Menge an gespeichertem CO_2 im Beton, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst:

Nutzungsphase

1. Abdichtung (Verputz, Beschichtung, …)
2. Betonklasse (Festigkeitsklasse)
3. Umgebungsfeuchtigkeit
4. Verhältnis Oberfläche/Vol. der Betonteile
5. Zeit (Dauer der Exponierung)

Ende des Lebenszyklus'

1. Betonklasse (Festigkeitsklasse)
2. Umgebungsfeuchtigkeit
3. Grösse der Bruchstücke bzw. des Granulats
4. Zeit (Dauer der Exponierung)

Der Zementtyp – CEM I und CEM II sind die zwei in der Schweiz verwendeten Hauptzementtypen – spielt eine untergeordnete Rolle bezüglich der Karbonatisierungstiefe im Beton (Nygaard und Leemann 2012).

5.2 Abschätzung der CO_2-Speicherung durch die Karbonatisierung für jedes Objekt

Die grosse Anzahl an Einflussfaktoren für die Karbonatisierung im Beton führt zu einer grossen Spannweite der entsprechenden CO_2-Speicherleistung des Betons. Wegen dieser inhärenten Ungenauigkeit wird von Frischknecht (2022) empfohlen, die Karbonatisierung im Beton nicht zu betrachten. Im Gegensatz dazu kann sie gemäss EN 15804 (2022) und SN EN 16908+A1 (2022) berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Studie wird die CO_2-Speicherung im Beton durch die Zement-Karbonatisierung bestimmt, sie wird aber in den Grafiken der Abschnitte 1, 3.2, 3.3 und im ANHANG nicht als Negativemission dargestellt. Die Karbonatisierung findet während der Nutzungsphase B und der Entsorgungsphase C statt (oder als Vorteil ausserhalb der Systemgrenzen in Phase D).

Wegen der inhärenten Ungenauigkeit einer solchen Abschätzung wird in der vorliegenden Studie die permanente CO_2-Speicherleistung im Beton durch die Zement-Karbonatisierung konservativ berechnet, und die Ungenauigkeit wird bestimmt. Die CO_2-Speicherung für die Nutzungsphase in Tab. 6 wurde auf Basis der Betonkubaturen in den Materiallisten im ANHANG und unter den folgenden Annahmen berechnet:

- Anwendung der Formel von Nygaard und Leemann (2012) für einen Klinkeranteil von 88 %: Maximale CO_2-Aufnahme von 0.383 kg CO_2/kg Klinker
- Die Karbonatisierungstiefe und deren Spannweite ist abgeleitet aus Werten für alte Infrastrukturobjekte gemäss Hermann und Hunkeler (1999)
- Karbonatisierter Volumenanteil wurde angenähert mittels karbonatisiertem Querschnittsanteil
- Keine Berücksichtigung des Fundamentbetons für alle Objekte, da er keinen Kontakt zur Luft hat und damit nicht dem CO_2 exponiert ist

Tab. 6. Permanente CO_2-Speicherung in den Betonbauten durch die natürliche Zement-Karbonatisierung während der Nutzungsphase, Werte pro Objekt, konservative Abschätzung

Objekt und **Funktionelle Einheit**	**Durchschnittsstärke der Elemente (cm)**	**Lebensdauer**	**Karbonatisierungstiefe (mm)**	**CO_2-Speicherung durch die Zement-Karbonatisierung während der Nutzungsphase**		
				Menge (kg CO_2 per m^3 exponiertes Betons)	**Anteil der Treibhausgasemissionen für A1-A4, B4* und C1-C4 (%)**	
					des gesamten Betons	**des Bauwerks**
Wildtierüberführungen 1 Objekt, 50 m lang, 35 m breit	40	100 Jahre	10	2.5 ± 2	*0.7 ± 0.5*	*0.4± 0.3*
Lärmschutzwände 4 m lang, 3 m hoch	10	100 Jahre	15	20 ± 10	*15.2 ± 7.8*	*12.8 ± 6.6*
Brücken quer zur Achse 1 Objekt, 60 m lang	40	100 Jahre	10	2.5 ± 2	*0.7 ± 0.5*	*0.4 ± 0.3*
Tunnelzwischendecken 1 lfm	18	60 Jahre	8	9 ± 6	*3.8 ± 2.8*	*2.5 ± 1.8*
Lärmschutzgalerien 1 lfm	45	100 Jahre	10	4.5 ± 3	*1.5 ± 1.1*	*0.9 ± 0.7*
Tagbautunnels 1 lfm	70	100 Jahre	10	1.5 ± 1	*0.5 ± 0.4*	*0.4 ± 0.3*

Prozentwerte beziehen sich auf die Treibhausgasemissionen für A1-A4, B4 und C1-C4 aus Abschnitt 3.2 (gesamtes Bauwerk, Variante Beton, kumuliert auf Lebensdauer gemäss Tab. 2)*
** Für das Modul B4 wurden allein die Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 betrachtet*

Die konservativ berechneten Werte der permanenten CO_2-Speicherleistung im Beton durch die Zement-Karbonatisierung liegen in gleicher Grössenordnung wie die für verschiedene Betonsorten berechneten Werte nach 100 Jahren gemäss Pittau *et al.* (2022) sowie Werner und Frischknecht (2018) für ein Gebäude nach 60 Jahren.

Das grössere Potential der permanenten CO_2-Speicherleistung im Beton durch die Zement-Karbonatisierung liegt am Lebenszyklusende der Bauwerke. In der Schweiz wird gemäss Nygaard und Leemann (2012) zwischen 67 % und 88 % des Betons von abgebrochenen Betonbauten zerkleinert und als Betongranulat in Recyclingbeton eingesetzt. Die genannten Autoren führen weiter aus, dass Betongranulat an der Luft unter nassen Bedingungen bereits innerhalb von wenigen Wochen karbonatisieren kann, und dass bei zweimonatiger Lagerung unter genannten Bedingungen bis zu 10 % der Treibhausgasemissionen, welche während der Herstellung des Zements verursacht wurden, permanent gespeichert werden können. Dieser Anteil entspricht nahezu 25 kg CO_2/m^3 Beton. Für die in diesem Bericht betrachteten Infrastrukturbauten könnte nach diesen Angaben bis zu 5 % bis 8 % der Treibhausgasemissionen, die während der Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4 (jeweils einschliesslich der Austauschmaterialien) des gesamten Bauwerks generiert werden, am Lebenszyklusende wieder gebunden werden.

Die vorliegende Studie betrachtet nicht die forcierte Karbonatisierung von Betongranulat durch Begasung mit konzentriertem CO_2-Gas, da diese noch nicht den Stand der Technik widerspiegelt. Gemäss der Firma Neustark[3] lässt sich durch eine forcierte Karbonatisierung aber ebenfalls rund 10 kg CO_2/t Beton speichern, was in etwa dem Wert von 25 kg CO_2/m^3 Beton entspricht.

[3] https://www.neustark.com/en/

6 End-of-Life – Szenarien für die Holzbauweise

6.1 Einleitung

Ressourcenschonendes Handeln erfordert vermehrt Konzepte für den gesamten Lebenszyklus von Produkten (einschliesslich Bauprodukte), welche eine stoffliche Verwertung am Ende des Lebenszyklus', im Folgenden kurz als EoL («End of Life») bezeichnet, einschliesst. Zwar wird Stand heute der überwiegende Teil an Holzabfällen aus Gebäudeabbrüchen nach wie vor energetisch genutzt. Es ist aber allein aus wirtschaftlichen Gründen wahrscheinlich, dass es auch für Holzabfälle in Zukunft zu einer vermehrten stofflichen Verwertung kommen wird.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes sind in Bezug auf das EoL von Infrastrukturbauten insbesondere die beiden folgenden Fragen zu beantworten:

1. Welche EoL-Strategien bestehen grundsätzlich für Holzbauteile aus Infrastrukturbauten?
2. Welche spezifischen Massnahmen sind heute zu ergreifen, um eine stoffliche Verwertung am EoL von Infrastrukturbauten zu ermöglichen oder zu unterstützen?

Bei der Betrachtung von Lebenszyklen neu zu erstellender Infrastrukturbauten handelt es sich um lange Zeiträume von bis zu 100 Jahren. In solchen Zeiträumen dürften sich die relevanten regulatorischen und normativen Rahmenbedingungen in starkem Masse ändern. Aus diesem Grund soll im Folgenden auf Annahmen oder Vorschläge zu konkreten Vorschriften, welche am Ende der Nutzungsphase der betrachteten Infrastrukturbauten gelten könnten, weitgehend verzichtet werden.

Für die Beschreibung der stofflichen Nutzung von Material am EoL findet sich eine Vielzahl an Begriffen. Die deutsche VDI-Richtlinie 2243 von 2002 definiert die vier Begriffe Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung und Weiterverwertung und nennt das Wort «Recycling» als Oberbegriff. In der Schweiz wird dagegen sowohl im Umweltschutzgesetz von 1983, Fassung 2022 (USG; SR 814.01) als auch in der Abfallverordnung von 2015, Fassung 2023 (VVEA; SR 814.600) grundsätzlich von «Verwertung» gesprochen, wobei in der Abfallverordnung noch folgende Differenzierung erkennbar ist: Wenn wir von Material am Lebensende sprechen, dann wird der Begriff «Verwertung» genutzt; am Lebenszyklusanfang spricht man dagegen von «Verwendung». Zum Beispiel wird Altholz als Rohstoff für die Spanplattenherstellung «verwendet», and am EoL stofflich oder energetisch «verwertet». Im englischen Sprachgebrauch werden insbesondere die beiden Begriffe «Recycling» und «Reuse» genutzt, wobei eine direkte Übersetzung ins Deutsche nicht zielführend ist. Im Vorliegenden Bericht wird der Begrifflichkeit der Abfallverordnung gefolgt und im Wesentlichen auf die Begriffe «Verwertung» und «Verwendung» zurückgegriffen.

6.2 Voraussetzungen für spätere stoffliche Nutzung

Technologien und reglementarische Rahmenbedingungen, wie sie am EoL der hier betrachteten Infrastrukturbauten vorliegen werden, sind nur schwer absehbar. Dagegen lassen sich bereits heute Bedingungen formulieren, welche Voraussetzung für eine spätere Verwertbarkeit des Holzes von Infrastrukturbauten sind, oder welche die Verwertung voraussichtlich erleichtern werden.

6.2.1 Holzschutz

Eine stoffliche Verwertung des Holzes aus Infrastrukturbauten ist nur dann möglich, wenn keine chemischen Holzschutzmittel eingebracht wurden. Stand heute gelten für eine stoffliche Verwertung die in der Abfallverordnung, Anhang 7.1 definierten Grenzwerte für im Holz enthaltene Substanzen. Deshalb bleibt schon heute nur die thermische Verwertung für Holz, welches mit chemischen Holzschutzmitteln behandelt wurde, vorausgesetzt, dass auch hier die entsprechenden Grenzwerte eingehalten werden. Bei der Diskussion um chemischen Holzschutz in Infrastrukturbauten ist zudem zu berücksichtigen, dass es zu Auswaschungen kommen kann, mit negativen Folgen für das Erdreich und Grundwasser im Bereich der Bauten, und für die verbleibende Wirkung des Holzschutzmittels im Bauteil. Aber auch ohne eine erhöhte Holzfeuchte im Bauteil ist davon auszugehen, dass die Wirksamkeit des chemischen Holzschutzes über die Jahre nachlässt und am EoL von Infrastrukturbauten kaum noch vorhanden ist.

Im Sinne einer schlüssigen EoL-Strategie von Infrastrukturbauten aus Holz, aber auch aufgrund der Gefahr von Auswaschungen und Wirkungsverlusten, ist in der Regel auf chemische Holzschutzmassnahmen zu verzichten. Ausnahmen können besonders exponierte oder gefährdete sowie leicht zugängliche und damit austauschbare Elemente sein. Grundsätzlich ist aber, statt der Anwendung eines chemischen Holzschutzes, durch entsprechende konstruktive Massnahmen sicherzustellen, dass es im Bauwerk nicht zu Feuchtenestern kommen kann, und dass witterungsbedingte Oberflächenbefeuchtungen nicht in die Holzstruktur eindringen können. Nur so lässt sich vermeiden, dass es aufgrund von erhöhten Holzfeuchtewerten (i.d.R. oberhalb von 20 %) zu Fäulnis durch Pilzbefall kommt.

Alternativ zum chemischen Holzschutz sind mittlerweile Verfahren zum thermischen Holzschutz verfügbar. Für die oben angesprochenen besonders exponierten Elemente ist der Einsatz von thermisch vergütetem Holz durchaus denkbar. Auswaschungen und die Abnahme der Wirksamkeit über längere Zeiträume ist nach Hydrophobierung durch eine Temperaturbehandlung nicht zu erwarten. Auch liesse sich thermisch modifiziertes Holz am EoL problemlos stofflich verwerten. Beim Auftreten von Feuchtestellen kann aber auch eine thermische Vergütung des Holzes einen Pilzbefall nicht über die bei Infrastrukturbauten relevanten Zeiträume verhindern. Insofern stellt der thermische Holzschutz keine Alternative zum konsequenten konstruktiven Holzschutz dar.

6.2.2 Langzeitverhalten der Materialkomponenten

Holz selber unterliegt keinem nennenswerten Alterungsprozess. Unter der Voraussetzung, dass es zu keinem Pilz-, Insekten- oder Termitenbefall der Holzbauteile kommt, und dass andere Rahmenbedingungen eingehalten werden, behält Holz seine chemische Zusammensetzung und seine mechanischen Eigenschaften. So gibt es zahlreiche Beispiele, dass entsprechend geschützte Dachstühle historischer Bauwerke noch nach Jahrhunderten weitgehend aus den Originalbalken bestehen. Zu Schwächungen der Holzstruktur in den maximal wenige Millimeter dicken Aussenschichten kann es durch Oberflächenverwitterung, einem kombinierten Effekt von UV-Licht und Auswaschungen durch Regen, kommen. Des Weiteren können Risse, welche durch Quell- und Schwindvorgänge induziert werden, die mechanischen Eigenschaften des Holzes negativ beeinflussen. Und schliesslich können hohe statische oder dynamische Dauerbelastungen zu Kriecherscheinungen und damit zu einer Abnahme der Festigkeit führen. Ohne die hier dargestellten externen Einflüsse kann Holz aber als Material angesehen werden, welches seine Eigenschaften über lange Zeiträume weitgehend unverändert beibehält. Es ist also unter den oben gemachten Einschränkungen davon auszugehen, dass das Holz am EoL von Infrastrukturbauten annähernd seine ursprünglichen Eigenschaften aufweist.

Das Langzeitverhalten von Klebstoffen und Klebfugen ist dagegen schwieriger abzuschätzen, da die ältesten synthetischen Klebstoffe kaum älter als 100 Jahre sind. Welche Festigkeiten die Verklebungen am EoL der Infrastrukturbauten noch aufweisen, ob das Holz also in Form von grossskaligen Elementen für tragende Zwecke verwertet werden kann (siehe unten Abschnitt 6.3.2), ist heute nicht abschliessend zu entscheiden und muss zu gegebener Zeit überprüft werden.

6.2.3 Metall- und fremdstofffreie Bauteile

Im Sinne einer effizienten Verwertung von Holz aus Infrastrukturbauten sind Fremdstoffe und hier insbesondere gehärtete Metalle, welche nicht sichtbar und nicht einfach entfernbar sind, zu vermeiden. Während Klebfugen und eingeschlossene Kunststoffelemente für eine spätere Bearbeitung unproblematisch sind, stellen metallische oder keramische Einschlüsse nach heutigem Stand der Technik ein grosses Hindernis für eine schneidende Bearbeitung dar. Das Entfernen von Metallbauteilen am EoL ist nur eingeschränkt möglich. So können Schrauben mit der Zeit verformen und sind möglicherweise nach jahrzehntelanger Nutzungsdauer nicht mehr zu lösen. (Block)verklebungen erleichtern dagegen eine spätere Verwertung. Gewindestangen, welche ggf. für das Aufbringen von Vorspannungen anzubringen sind, sollten nicht eingeklebt werden.

6.3 Verwertungsoptionen

Die Verwertung von Holz aus Infrastrukturbauten bringt eine Reihe von Besonderheiten mit sich und unterliegt damit in Teilen anderen Rahmenbedingungen, als dass diese bei der Verwertung von Holz aus Gebäuden oder anderen Holzprodukten vorliegen. Insbesondere liegen grosse, kompakt verbaute Holzmengen vor. Die Elemente sind entweder flächig bei grosser Bauteildicke, oder (zum geringeren Teil) stabförmig bei grossen Querschnitten. Verklebungen sind grundsätzlich feuchtebeständig ausgeführt.

Infrastrukturbauten können an ihrem EoL als wichtige Rohstoffquelle angesehen werden. Die Baumartenzusammensetzung in der Schweiz und in Teilen Mitteleuropas verschiebt sich seit geraumer Zeit aufgrund der Umstellung der Waldbaukonzepte wie auch aufgrund der sich ändernden Klimabedingungen hin zu grösseren Erntemengen an Laubholz. Die Verfügbarkeit von Nadelholz nimmt dagegen ab. Es ist nicht ausgeschlossen, dass sich das in Infrastrukturbauten eingelagerte Nadelholz als begehrter Rohstoff für den Holzbau oder andere Anwendungen erweist.

Im Folgenden werden unterschiedliche Verwertungsoptionen aufgezeigt und bewertet. Auch hierbei sind die langen Betrachtungszeiträume zu beachten: Das Holz aus Infrastrukturbauten wird am EoL überwiegend zu Produkten verarbeitet werden, welche heute noch gar nicht entwickelt sind. Im Sinne einer konstruktiven Diskussion orientieren sich die aufgeführten Optionen jedoch am heutigen «State of the Art», schliessen aber zukünftige Entwicklungen mit ein.

6.3.1 Vollständige Bauelemente

Eine Wiederverwendung von ganzen Bauelementen einschliesslich der entsprechenden Anschlüsse erscheint aufgrund der langen Lebensdauer der Infrastrukturbauten nicht realistisch. Bauweisen sind nicht statisch und entwickeln sich weiter. Dieses gilt insbesondere für Bauten, welche als Einzelfertigungen konzipiert sind. Die Vorstellung, dass in 60 oder gar 100 Jahren Bauteile unverändert einem zweiten Lebenszyklus zugeführt werden, erscheint unrealistisch.

6.3.2 Grossskalige Elemente mit Klebfugen

Die Brettsperrholz- oder Brettschichtholzelemente in Infrastrukturbauten bieten das Potential, wieder als entsprechende Elemente verwendet zu werden. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen vollständigen Bauelementen ist aber eine Redimensionierung sowie die Entfernung bestehender und ggf. Montage neuer Befestigungssysteme vorgesehen. Die Verwertung von Holz aus Infrastrukturbauten für grossskalige Elemente setzt voraus, dass die Klebfugen zwischen den Lamellen nicht an Festigkeit einbüssen (siehe Abschnitt 6.2.2). Die Bewertung, ob diese Forderung eingehalten werden kann, ist zu gegebener Zeit vorzunehmen.

6.3.3 Klebstofffreie Vollholzelemente (Lamellen)

Grundsätzlich können Brettsperrholz- oder Brettschichtholzelemente entlang der Klebfugen zwischen den Lamellen aufgetrennt werden. Auf diese Weise ergeben sich Lamellen oder auch kleinere Vollholzelemente, die je nach Qualität und Vorschädigungen des Holzes wieder für tragende oder nicht-tragende Zwecke eingesetzt werden können. Heute gibt es zwar noch keine ausgereifte Auftrenntechnologie für die hier beschriebene Verwertung. Das Potential, aus Brettsperrholz oder Brettschichtholz standardisierte Vollholzprodukte herzustellen erscheint aber gegeben.

Alternativ zum mechanischen Auftrennen von Holzelementen entlang der Klebfugen wird in der wissenschaftlichen Literatur in letzter Zeit vermehrt die Einführung reversibler Klebstoffe diskutiert. Die Idee entsprechender Systeme ist es, einen chemischen oder thermischen Trigger vorzusehen, welcher gezielt zur Lösung der Klebverbindung verwendet werden kann. Entsprechende Ansätze gehen bisher aber noch kaum über die Ideenphase hinaus, und es ist unwahrscheinlich, dass diese kurz- oder mittelfristig für den Bau von Infrastrukturbauten verfügbar sein werden.

6.3.4 Span- und Faserwerkstoffe

Die stoffliche Verwertung von Holz nach einem ersten Lebenszyklus besteht heute fast ausschliesslich in der Verwendung für die Spanplattenproduktion, abgesehen von der mengenmässig untergeordneten Verwendung von Balken oder Brettern für historische Anwendungen. Selbst die Gewinnung von Hackschnitzeln für die Zellstoffherstellung oder die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF) aus Altholz ist bis heute aufgrund dessen Inhomogenität kaum möglich.

Bei Einsatz der in den Abschnitten 6.3.2 und 6.3.3 skizzierten Verwertungskonzepten ergeben sich durch die Bearbeitung der Holzelemente (Sägen, Hobeln, Redimensionieren) grössere Mengen an Spänen für die Spanplattenherstellung. Darüber hinaus sind die Technologien für die gezielte Herstellung von Spänen aus Altholz bereits heute verfügbar und im Einsatz. Im Gegensatz zur Verwertung gemischter Altholzsortimente liegt bei der Verwertung von Holz aus Infrastrukturbauten hochwertiges, homogenes und leicht zu analysierendes Material vor. Die Spanplattenherstellung stellt also eine niederschwellige Verwertungsstrategie für Holz aus Infrastrukturbauten dar. Darüber hinaus erscheint es zielführend, Verfahren zur Herstellung von (im Vergleich zu Spänen höherwertigen) Hackschnitzeln aus grossen Bauelementen, wie sie in Infrastrukturbauten vorliegen, zu entwickeln.

6.3.5 Energetische Nutzung

Die energetische Nutzung von Holz sollte immer den letzten Schritt entlang der Kaskadennutzung darstellen. Da Holz aus Infrastrukturbauten im Vergleich zu gemischten Altholzsortimenten qualitativ hochwertig und homogen ausfallen wird, erscheinen die Voraussetzungen für eine vorwiegend stoffliche Verwertung gegeben.

6.4 Fazit End-of-Life

Holzbasierte Infrastrukturbauten können am EoL eine relevante Rohstoffquelle für den Holzbau und andere Anwendungen darstellen. Wichtige Voraussetzungen dafür sind aber, dass auf einen chemischen Holzschutz verzichtet wird, und dass die zu verwertenden Bauteile möglichst metall- und fremdstofffrei ausgeführt sind. Nach einem ersten Lebenszyklus ist für Holzelemente, abgesehen von der Witterung direkt ausgesetzten Aussenschichten, nicht mit nennenswerten Festigkeitseinbussen zu rechnen. Zu den Festigkeiten der Klebfugen am EoL sind dagegen zum heutigen Zeitpunkt keine gesicherten Aussagen möglich.

7 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie zeigt auf, in welchem Masse die Ausführung von Infrastrukturbauten in Holzbauweise zur Reduktion der CO_2-Emissionen führen können. Die betrachteten Objekte sind exemplarisch und ergebnisoffen ausgewählt oder als Konzept ausgearbeitet worden. Sie stellen damit zwar keinen repräsentativen Querschnitt der in der Schweiz verfügbaren oder geplanten Infrastrukturbauten dar. Die Aussagekraft der Ergebnisse wird aber dadurch untermauert, dass diese einen Querschnitt über sechs Objektpaare darstellen und in ihren wesentlichen Aussagen durch drei Vergleichsstudien gestützt werden.

Die Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Treibhausgasemissionen für Herstellung, Transport und Entsorgung der Baumaterialien (Module A1 bis A4 und C1 bis C4, mit Einbezug der Ersatzmaterialien für Sanierungen in diese Module) lassen sich bei Ausführung in Holz- statt in Betonbauweise um 2 bis 70 % reduzieren, mit erheblichen Unterschieden zwischen den betrachteten Objekten. Die Fundamente sind in diesen Wert eingeschlossen, wobei gleiche Fundamente für Holz- und Betonbauweise angenommen wurden. Bei den Berechnungen wurde von gleicher Lebensdauer der Holz- und Betonvarianten mit materialspezifischen Ersatzintervallen einzelner Baugruppen oder -elemente ausgegangen. Verkehrliche Auswirkungen sind nicht Teil der vorliegenden Studie.
- Die deutlichste Absenkung auf 30 % ergibt sich für die Lärmschutzwände, die geringste Reduktion der CO_2-Emissionen auf 98 % zeigte sich dagegen für die Wildtierüberführungen.
- Für die hier dargestellten Werte der CO_2-Reduktion wurde mit den Standardwerten der KBOB-Datenbank gerechnet. Diese stellen eine Kombination aus Datensätzen für Schweizer Holz einerseits und eingeführtes Holz andererseits dar. Unter der Annahme, dass zu 100 % Schweizer Holz verwendet wird, erniedrigen sich die Werte für die Holzvarianten nochmals um 1 bis 19 Prozentpunkte. Wird dagegen mit einer 100-prozentigen Einfuhr des Holzes gerechnet, so erhöhen sich die Treibhausgasemissionen der Holzvarianten erkennbar; für die Tunnelzwischendecken liegt der Wert für das betrachtete Szenario sogar oberhalb des Wertes für die Betonvariante.
- In den meisten Fällen liegt die *Primärenergie nicht-erneuerbar* (PENRE) für die Holzvariante niedriger als für die Betonvariante; einzig für die Tunnelzwischendecken liegt dieser Wert über dem Referenzwert. Unter Einbezug der *Primärenergie erneuerbar* (PERE) erhöht sich der Gesamtenergieverbrauch und erreicht für Objekte, in welchen vergleichsweise viel Holz verbaut wird, Werte oberhalb jener für die Betonvarianten.
- Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die Lebensdauern der Holzvarianten zum Teil deutlich reduzieren dürften, um auf gleiche Treibhausgasemissionen zu kommen wie die jeweilige Betonvariante. Die deutlichste Abnahme der Lebensdauer von 100 auf 30 Jahre ergibt sich dabei für Lärmschutzwände. Verkehrliche Auswirkungen sind in dieser Abschätzung nicht betrachtet. Die reduzierten Lebensdauerwerte liegen möglicherweise unterhalb von Vorgaben und dienen lediglich als Zusatzinformation.
- Die in Infrastrukturbauten aus Holz gespeicherten Mengen an biogenem CO_2 sind erheblich und können ein Vielfaches der CO_2-Emissionen erreichen, welche bei Herstellung, Transport und Entsorgung der Baumaterialien emittiert werden. Bei den Lebensdauern, die für Infrastrukturbauten angesetzt werden, ist die CO_2-Speicherung als langfristig, aber nicht als permanent zu definieren.
- Die durch die Zement-Karbonatisierung über die Lebensdauer der Infrastrukturbauten gespeicherten Mengen an CO_2, bezogen auf die Treibhausgasemissionen aus Herstellung, Transport und Entsorgung der insgesamt verbauten Materialien, fallen aufgrund der grossen Bauteildicken der betrachteten Objekte relativ gering aus. Die Werte liegen für die betrachteten Infrastrukturobjekte i.d.R. zwischen 0.4 und 2.5 %; lediglich für die Lärmschutzwände liegt der Wert aufgrund des häufigen Austausches der relativ dünnen Schallschutzelemente bei knapp 13 %.

- Die Verwertung von Holz aus Infrastrukturbauten an deren Lebenszyklusende (EoL) ist dadurch gekennzeichnet, dass grosse, kompakt verbaute Holzmengen vorliegen. Holzbasierte Infrastrukturbauten können damit am EoL eine Rohstoffquelle für den Holzbau und andere Anwendungen darstellen. Voraussetzungen für die Nutzbarkeit des Holzes sind aber, dass auf einen chemischen Holzschutz verzichtet wird, und dass die zu verwertenden Bauteile möglichst metall- und fremdstofffrei ausgeführt sind. Mögliche Festigkeitseinbussen insbesondere der Klebfugen sind zu gegebener Zeit zu überprüfen.

Der vorliegende Bericht wurde in Anlehnung an den Review-Prozess nach dem ISO 14044:2006 Standard durch Dritte verifiziert. Der Reviewbericht steht im ANHANG.

8 Grundlegende Massnahmen zur Umsetzungs- und Forschungsstrategie

8.1 Technische Massnahmen

- Aufgrund der langen Lebensdauer von Infrastrukturbauten können weder chemische Holzschutzmittel noch der Einsatz von thermisch modifiziertem Holz Fäulnisschäden vermeiden, sollte es zu Feuchtenestern im oder am Bauwerk kommen. Stattdessen sind ***konstruktive Holzschutzmassnahmen*** konsequent anzuwenden, damit Feuchtenester erst gar nicht entstehen können. Massnahmen, wie sie heute bereits im Holzbau eingesetzt werden, sind weiterzuentwickeln und an die spezifischen Gegebenheiten von holzbasierten Infrastrukturbauten anzupassen.
- Infrastrukturbauten bieten an ihrem Lebenszyklusende (EoL) grundsätzlich gute Bedingungen für eine stoffliche Verwertung der eingebauten Holzelemente. Voraussetzung dafür, dass dieses Potential am EoL auch tatsächlich genutzt werden kann, ist aber, dass die ***Werkstofftrennung*** einfach zu realisieren ist. Bei der Planung und Realisierung von Infrastrukturbauten aus Holz ist also die Trennbarkeit der Komponenten sicherzustellen. Eine erschwerte Trennbarkeit aufgrund von Dauerbelastungen und klimatischen Randbedingungen muss antizipiert werden. So ist z.B. davon auszugehen, dass Metallschrauben nach jahrzehntelangem Einsatz nicht mehr aus Holzelementen entfernt werden können. Entsprechende Konzepte und Massnahmen zur Trennbarkeit von Komponenten sind zu entwickeln, wobei flankierende Forschungsarbeiten Grundlagen für diese Entwicklungen schaffen müssen.
- Die Ausführung von Infrastrukturbauten in Holzbauweise führt zwar zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen. Eine Abnahme der Emissionen auf nahezu Null ist aber mit heutigen Technologien auch in Holzbauweise nicht erreichbar. Konzepte zur weiteren drastischen ***Reduktion*** der Treibhausgasemissionen während der ***Herstellung von Holzbauelementen*** sind zu entwickeln. Diese Konzepte sollten auch eine Reduktion des Verbrauchs erneuerbarer Primärenergie, zusätzlich zur nicht-erneuerbaren Primärenergie, einschliessen, da auch erneuerbare Energie in absehbarer Zeit ein knappes Gut bleiben wird.
- In gleicher Weise ist auch die Weiterentwicklung von Technologien zur ***Minderung*** der CO_2-Emissionen bei der ***Herstellung von Zement-Klinker*** und bei der Weiterverarbeitung zu Beton voranzutreiben.

8.2 Methodenentwicklung

- Der in der vorliegenden Studie gewählte Betrachtungsrahmen umfasst Herstellung, Transport und Entsorgung von Baumaterialien für den Infrastrukturbau (A1–A4 und C1–C4), wobei Emissionen und Primärenergiewerte von Austauschmaterialien den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen sind. ***Detaillierte Lebenszyklusanalysen*** unter Einbezug der Phasen Errichtung (A5), Nutzung (B) und evtl. von Effekten ausserhalb der Systemgrenzen (D) wären wichtig zur Validierung der Ergebnisse der vorliegenden Studie, und zur Ableitung von Massnahmen zur Emissionsreduzierung. In stärker detaillierten Analysen sind auch die Fundamentgrössen spezifisch anzupassen.

- Eine wissenschaftlich fundierte Abklärung des ***Karbonatisierungspotentials*** von Betonbauten ist dringend geboten, um als validierte Berechnungs- und Entscheidungsgrundlage verfügbar zu sein.

8.3 Politische und normative Massnahmen

- Bei der Planung von neuen Infrastrukturbauten oder beim Ersatz von bestehenden Infrastrukturbauten sollten neben den technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen auch die Treibhausgasemissionen als Kriterium für die Technologie- und Materialwahl eingeführt werden, ggf. ergänzt um weitere Indikatoren. Dazu sind ein Bewertungssystem für Infrastrukturbauten zu entwickeln und entsprechende Grenzwerte zu definieren. Die Grenzwerte haben sich an dem bis 2040 bzw. 2050 abnehmenden Emissionsbudget zu orientieren und sollten dementsprechend einen ***Absenkpfad*** für die zulässigen Treibhausgasemissionen im Infrastrukturbau beschreiben.
- Positive Klimaeffekte können unter Berücksichtigung der in dieser Studie beschriebenen Annahmen und des gewählten Betrachtungsperimeters bereits dann auftreten, wenn bei der Neubauplanung eine Betonvariante mit herkömmlicher Lebensdauer durch eine Holzvariante mit ***verkürzter Lebensdauer*** ersetzt wird. Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Normung haben zu überprüfen, ob im Sinne der Reduktion der Treibhausgasemissionen von bisher geforderten Werten für die Lebensdauer abgewichen werden darf, wenn dadurch eine deutliche Reduktion der jahresbezogenen Treibhausgasemissionen erreicht wird. Verkehrliche Auswirkungen sind bei einer vertieften Analyse in die Betrachtung einzubeziehen.
- Das Speicherpotential an biogenem Kohlenstoff in Infrastrukturbauten ist erheblich, die Schaffung eines seriösen Anreizsystems für die Speicherung biogenen Kohlenstoffs aber herausfordernd, da die Speicherung nicht permanent ist. Zu vermeiden sind Anreizsysteme, welche zulassen, dass gespeicherter Kohlenstoff, für den eine Gutschrift ausgestellt wurde, zu einem späteren Zeitpunkt wieder unkontrolliert und ohne Rückgängigmachung der Gutschrift emittieren kann. Sinnvoll erscheint deshalb die Entwicklung eines Ansatzes zur Anrechenbarkeit temporärer Kohlenstoffspeicher bei ***rechtsverbindlicher Verpflichtung zur permanenten Speicherung***. In jedem Fall sind Doppelanrechnungen auszuschliessen.
- Normen sollten leistungs- statt materialbezogene Vorgaben machen. So wird heute beispielsweise bei der Betonherstellung ein minimaler Zementgehalt vorgegeben. Sinnvoll erscheint, dass stattdessen ***Leistungskriterien als Vorgabe*** eingeführt werden. Damit liesse sich der Zementgehalt reduzieren, ohne dass die Leistungsfähigkeit des Betons einen kritischen Wert unterschreitet.
- Prozesse in der ***Normung*** und in ***Zulassungsverfahren*** sind zu beschleunigen.

9 Literatur

Brunner, C. (2022) *Climate effect of temporarily stored CO_2 within building materials*, 80. LCA Forum, Zurich

Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strasseninfrastruktur I (2023) *Fachhandbuch Trasse / Umwelt*

Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strasseninfrastruktur I (2023) *Fachhandbuch Kunstbauten*

Diestel S. und Weimar H. (2014) *Der Kohlenstoffgehalt in Holz- und Papierprodukten – Herleitung und Umrechnungsfaktoren*, Thünen Working Paper, 38

EN 15804 (2022) EN 15804:2012 + A2:2019 + AC:2021, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Berlin

Frischknecht R. (2022) *Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz*, Version 6.0, KBOB, ecobau, IPB, Bern

Görtz S. und T. K. D. Pham (2023) *CO_2-Bilanzierung und Optimierung von Brückenbauwerken*, Institut für Bauwesen der Fachhochschule Kiel, Studie gefördert durch EKSH (Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH)

Hermann K. und Hunkeler F. (1999) *La carbonatation du béton*, Bulletin du ciment, issue 12

Kern D. und Müllhaupt R. (2023) *Machbarkeitsstudie Einhausung Mühlehorn*, Studentenarbeit, ETH Zürich

Kirschbaum, M. (2006) *Temporary Carbon Sequestration Cannot Prevent Climate* Change – Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11(5–6), 1151–1164, https://doi.org/10.1007/s11027-006-9027-8

Kytzia S. (2021) *Ökobilanz Wildtierbrücke: Das Wichtigste zum Vergleich Holz – Stahlbeton*, Ostschweizer Fachhochschule, Kanton Zürich

Lünser H. (1999) *Ökobilanzen im Brückenbau: eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung*, Birkhäuser Verlag, Basel, Bosten, Berlin, Birkhäuser, ISBN 3-7643-5946-3

Matthews D., Zickfeld K., Dickau M., Macisaac A. J., Mathesius S., Nzotungicimpaye C.-M., und Luers A. (2022) *Temporary nature-based carbon removal can lower peak warming in a well-below 2°C scenario*, 3(65). https://doi.org/10.1038/s43247-022-00391-z

Nygaard P. und Leemann A. (2012) EMPA Abteilung Beton/Bauchemie, *Kohlendioxidaufnahme von Stahlbetonbauten durch Karbonatisierung*, Cemsuisse-Projekt 201106, Forschungsförderung durch Cemsuisse, Verband der Schweizerischen Zementindustrie

Pittau F., Habert G., Savi D., Klingler M. (2022) *Methodology for biogenic carbon accounting and carbonation in LCA of buildings and construction products*, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen

SN EN 16908+A1 (2022) *Zement und Baukalk - Umweltproduktdeklarationen - Produktkategorieregeln in Ergänzung zu EN 15804*, SIA 215.008, Zürich

UNFCCC (2023) *Information note: Removal activities under the Article 6.4 mechanism*, version 4.0, published as an annex to the annotated agenda of SB 005. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb001.pdf

Werner F. (2017) *Background report for the life cycle inventories of wood and wood based products for updates of ecoinvent 2.2*, commissioned by the Swiss Federals Office for the Environment (FOEN), Bern

Werner F. (2019) *Ökobilanz von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände*, eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA und des Verbands der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft Lignum

Werner F. (2020) *Complementary life cycle inventories for wood products*, commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), section Forestry and Wood, Bern

Werner F. und Frischknecht R. (2018) *Technische Grundlagen zur Prüfung eines Wechsels auf die europäischen EPD-Normen für die ökologische Bewertung von Baustoffen und Gebäuden*, Eine Studie im Auftrag der Cemsuisse, Lignum, Stahlbau Zentrum Schweiz, KBOB, BAFU, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich & Uster

ANHANG

I. Materiallisten und Lebensdauer

Wildtierüberführungen

Tab. 7. Materialliste und Lebensdauer für eine 50 m lange und 35 m breite Wildtierüberführung mit einer gesamten Lebensdauer von 100 Jahren

Bauweise	Baugruppe	Materialien	Material-typen	Volumen (m^3)	Dichte (kg/m^3)	Masse (kg)	Lebensdauer Baugruppe (Jahre)	Lebensdauer Materialien (Jahre)	Lebensdauerfaktor
Beton (umgesetzt)	Oberflächenschutz	Dispersionsputz [1)]	Sonstiges	1.50	1'540	2'310	15	15	6.67
	Decke und Wände	Beton	Beton	2'260	2'350	5'309'825	100	100	1
		Armierung	Stahl	41	7'850	319'267		100	1
		Bitumenabdichtung	Sonstiges	23	1'100	25'500		100	1
	Fundament	Beton	Beton	1'486	2'350	3'492'570	100	100	1
		Armierung	Stahl	7.4	7'850	58'333		100	1
	Summe			**3'818**		**9'207806**			
Holz (umgesetzt)	Decke (zu tauschen)	BSH imprägniert (CH + Einfuhr) [2)]	Holz	2.48	443	1'098	20-50	20	5
		CLT (Einfuhr) [2)]	Holz	0.87	436	378		20	5
		Nadelschnittholz imprägniert (CH + Einfuhr) [3)]	Holz	4.80	469	2'251		50	2
	Decke (nicht zu tauschen)	BSH imprägniert (CH + Einfuhr)	Holz	626	443	277'106	100	100	1
		CLT (Einfuhr)	Holz	61	436	26'654		100	1
		Nadelschnittholz imprägniert (CH + Einfuhr)	Holz	19	469	9'005		100	1
		Befestigung	Stahl	4.23	7'900	33'399		100	1
		Bitumenabdichtung	Sonstiges	23	1'100	25'500		100	1
	Oberflächenschutz	Dispersionsputz	Sonstiges	1.50	1'540	2'310	15	15	6.67
	Wände	Beton	Beton	1'347	2'350	3'165'450	100	100	1
		Armierung	Stahl	24	7'850	190'331		100	1
	Fundament	Beton	Beton	1'486	2'350	3'492'100	100	100	1
		Armierung	Stahl	7.43	7'850	58'326		100	1
	Summe			**3'608**		**7'283'908**			

Annahmen zu Ersatzintervallen: [1)] Erneuerung des Oberflächenschutzes von Betonwänden im Salzsprühbereich alle 15 Jahre, gemäss ASTRA
[2)] Während der Objektlebensdauer finden 4 Leckage statt, welche ein Austausch von je 30 m^2 auf gesamte Objektoberfläche zur Folge hat, gemäss Timbatec
[3)] Während der Objektlebensdauer müssen 20 % aufgrund mangelnden Unterhalts ausgetauscht werden, gemäss Timbatec

Lärmschutzwände

Tab. 8. Materialliste und Lebensdauer für eine 4 m lange und 3 m hohe Lärmschutzwand mit einer gesamten Lebensdauer von 100 Jahren

Bauweise	Baugruppe	Materialien	Material-typen	Volumen (m^3)	Dichte (kg/m^3)	Masse (kg)	Lebensdauer Baugruppe (Jahre)	Lebensdauer Materialien (Jahre)	Lebensdauerfaktor
Beton (umgesetzt)	Schallschutz	Leichtbeton	Beton	1.3600	900	1'224	30	30	3.33
	Wand-konstruktion	Beton	Beton	1.2255	2'350	2'880	50	50	2
		Armierung	Stahl	0.0069	7'850	54		50	2
		Pfosten	Stahl	0.0076	7'850	60		50	2
	Fundament	Beton	Beton	0.6200	2'350	1'457	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0029	7'850	23		100	1
	Summe			**3.2230**		**5'698**			
Holz (umgesetzt)	Schallschutz	Nadelschnittholz imprägniert (CH + Einfuhr)	Holz	0.1560	469	73	30	30	3.33
		Mineraldämmung	Sonstiges	0.3544	57	20		30	3.33
		Gittergewebe	Sonstiges	0.0031	1'050	3.3		30	3.33
	Wand-konstruktion	Nadelschnittholz imprägniert (CH + Einfuhr)	Holz	0.6600	469	310	50	50	2
		Befestigung	Stahl	0.0003	7'900	2.2		50	2
		Pfosten	Stahl	0.0076	7'850	60.0		50	2
		Abdeckung	Stahl	0.1037	57	5.9		50	2
	Fundament	Beton	Beton	0.6200	2'350	1'457	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0029	7'850	23		100	1
	Summe			**1.9081**		**1'954**			

Annahmen zu Ersatzintervallen gemäss dem Fachhandbuch Trasse – Umwelt (2023) des Bundesamts für Strassen ASTRA für beide Variante: Schallschutzelement alle 30 Jahre und Wandkonstruktion alle 50 Jahre

Brücken quer zur Achse

Tab. 9. Materialliste und Lebensdauer für eine 60 m lange Brücke quer zur Achse mit einer gesamten Lebensdauer von 100 Jahren

Bauweise	Baugruppe	Materialien	Material-typen	Volumen (m^3)	Dichte (kg/m^3)	Masse (kg)	Lebensdauer Baugruppe (Jahre)	Lebensdauer Materialien (Jahre)	Lebensdauerfaktor
Beton (umgesetzt)	Belag (gem. ASTRA-Anforderungen zu tauschen)	Gussasphalt	Sonstiges	12	63.3 kg/m^2	19'548	50	50	2
		Epoxidharz	Sonstiges	0.91	4.55 kg/m^2	1'850		50	2
		Bitumenabdichtung	Sonstiges	2.03	1'100	2'440		50	2
	Fahrbahn	Beton	Beton	87	2'350	204'027	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.16	7'850	1'256		100	1
	Träger	Beton	Beton	189	2'350	444'150	100	100	1
		Armierung	Stahl	2.57	7'850	20'175		100	1
		Baustahl	Stahl	1.70	7'850	13'345		100	1
	Übergang Damm-Brücke	Beton	Beton	80	2'350	186'825	100	100	1
		Armierung	Stahl	1.68	7'850	13'188		100	1
	Aufschüttung	Kies	Sonstiges	273	2'000	546'000	100	100	1
	Fundament	Beton	Beton	144	2'350	338'400	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.75	7'850	5'888		100	1
	Summe			**794**		**1'797'091**			
Holz (Konzept)	Belag (gem. ASTRA-Anforderungen zu tauschen)	Gussasphalt	Sonstiges	12	63.3 kg/m^2	15'443	50	50	2
		Epoxidharz	Sonstiges	0.87	4.55 kg/m^2	1'461		50	2
		Bitumenabdichtung	Sonstiges	1.93	1'100	1'928		50	2
	Belag (wegen Fahrbahn zusätzlich zu tauschen)	Gussasphalt	Sonstiges	0.62	63.3 kg/m^2	4'105	20	20	5
		Epoxidharz	Sonstiges	0.05	4.55 kg/m^2	388		20	5
		Bitumenabdichtung	Sonstiges	0.10	1'100	512		20	5
	Fahrbahn (zu tauschen)	CLT (Einfuhr) [1]	Holz	0.86	424	363	20	20	5
		Nadelschnittholz (CH + Einfuhr) [1]	Holz	2.20	465	1'021		20	5
	Fahrbahn (nicht zu tauschen)	CLT (Einfuhr)	Holz	16	424	6'888	100	100	1
		Nadelschnittholz (CH + Einfuhr)	Holz	42	465	19'393		100	1
		Stahl	Stahl	0.13	7'850	1'038		100	1
	Trägerverkleidung	Nadelschnittholz (CH + Einfuhr) [2]	Holz	5.13	465	2'387	40	40	2.5
	Träger	BSH (CH + Einfuhr)	Holz	262	439	115'206	100	100	1
		Schnittholz hart (CH + Einfuhr)	Holz	1.20	675	810		100	1
		Stahl	Stahl	0.19	7'850	1'511		100	1
	Übergang Damm-Brücke	Baustahl	Stahl	0.21	7'850	1'635	100	100	1
		Beton	Beton	46.45	2'350	109'148		100	1
		Mörtel	Sonstiges	0.48	1'400	672		100	1
	Aufschüttung	Kies	Sonstiges	273	2'000	546'000	100	100	1
	Fundament	Beton	Beton	144	2'350	338'400	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.75	7'850	5'888		100	1
	Summe			**810**		**1'174'196**			

Annahmen zu Ersatzintervallen gemäss Timbatec: [1] Während der Objektlebensdauer treten 4 Leckage auf, welche einen Austausch von je 20 m^2 auf gesamter Objektoberfläche zur Folge hat
[2] Muss während der Objektlebensdauer 2x komplett ausgetauscht werden

Tunnelzwischendecken

Tab. 10. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm einer Tunnelzwischendecke mit einer gesamten Lebensdauer von 60 Jahren

Bauweise	Baugruppe	Materialien	Material-typen	Volumen (m^3)	Dichte (kg/m^3)	Masse (kg)	Lebensdauer Baugruppe (Jahre)	Lebensdauer Materialien (Jahre)	Lebensdauerfaktor
Beton (umgesetzt)	Zwischendecke	Beton	Beton	1.60	2'350	3'760	60	60	1
		Armierung	Stahl	0.02	7'850	173		60	1
	Summe			**1.62**		**3'933**			
Holz (Konzept)	Zwischendecke (zu tauschen)	BSH imprägniert (CH + Einfuhr) [1)]	Holz	0.6552	443	290	30	30	2
		OSB (Einfuhr) [1)]	Holz	0.0125	605	7.56		30	2
		Schrauben [1)]	Stahl	0.0001	7'900	0.486		30	2
		Steinwolle [1)]	Sonstiges	0.0084	50	0.42		30	2
		Brandschutzband [1)]	Sonstiges	8 m	0.057 kg/m	0.46		30	2
	Zwischendecke (nicht zu tauschen)	BSH imprägniert (CH + Einfuhr)	Holz	1.5288	443	677	60	60	1
		OSB (Einfuhr)	Holz	0.0292	605	17.64		60	1
		Schrauben	Stahl	0.0001	7'900	1.134		60	1
		Steinwolle	Sonstiges	0.0195	50	0.98		60	1
		Brandschutzband	Sonstiges	19 m	0.057 kg/m	1.08		60	1
	Summe			**2.25**		**997**			

Annahme zu Ersatzintervallen gemäss Timbatec: [1)] Während der Objektlebensdauer müssen 30 % aufgrund von Leckagen ausgetauscht werden

Lärmschutzgalerien

Tab. 11. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie mit einer gesamten Lebensdauer von 100 Jahren

Bauweise	Baugruppe	Materialien	Material-typen	Volumen (m^3)	Dichte (kg/m^3)	Masse (kg)	Lebensdauer Baugruppe (Jahre)	Lebensdauer Materialien (Jahre)	Lebensdauerfaktor
Beton (umgesetzt)	Decke	Beton	Beton	8.4500	2'350	19'858	100	100	1
		Vorspannstahl	Stahl	0.0006	7'850	4.4		100	1
		Armierung	Stahl	0.1020	7'850	801		100	1
	Seitenwand	Anker	Stahl	0.0001	7'900	0.6	100	100	1
		Baustahl	Stahl	0.0159	7'850	125		100	1
		Stahlbeschichtung	Sonstiges	0.474 m^2	-	0.5		100	1
	Oberflächenschutz	Dispersionsputz [1)]	Sonstiges	0.0150	1'540	23	15	15	6.67
	Rückwand	Beton	Beton	2.3171	2'350	5'445	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0633	7'850	497		100	1
		Baustahl	Stahl	0.0000	7'850	0.3		100	1
	Stützwand	Beton	Beton	0.9638	2'350	2'265	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0083	7'850	65		100	1
	Fundament	Beton	Beton	3.7095	2'350	8'717	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0318	7'850	250		100	1
	Summe			**15.6774**		**38'051**			
Holz (Konzept)	Decke (zu tauschen)	BSH (CH + Einfuhr) [2)]	Holz	0.0277	439	12	20-50	20	5
		CLT (Einfuhr) [2)]	Holz	0.0015	436	1		20	5
		Nadelschnittholz (CH + Einfuhr) [3)]	Holz	0.0090	465	4.2		33.3	3
		Stahl [4)]	Stahl	0.0003	7'850	2.6		50	2
		Bitumenabdichtung [5)]	Sonstiges	0.0710	1'100	78		50	2
	Decke (nicht zu tauschen)	BSH (CH + Einfuhr)	Holz	3.2483	439	1'426	100	100	1
		CLT (Einfuhr)	Holz	0.3835	436	167		100	1
		Nadelschnittholz (CH + Einfuhr)	Holz	0.0003	465	0.1		100	1
	Seitenwand (zu tauschen)	CLT (Einfuhr) [4)]	Holz	0.0725	436	32	33-50	50	2
		Nadelschnittholz (CH + Einfuhr) [6)]	Holz	0.1354	465	63		33.3	3
		Stahl [4)]	Stahl	0.0040	7'850	31		50	2
		Akustikdämmung [7)]	Sonstiges	0.0289	400	12		33.3	3
	Seitenwand (nicht zu tauschen)	Nadelschnittholz (CH + Einfuhr)	Holz	0.3337	465	155	100	100	1
		Akustikdämmung	Sonstiges	0.4381	400	175		100	1
		Mörtel	Sonstiges	0.0094	1'400	13		100	1
	Oberflächenschutz	Dispersionsputz [1)]	Sonstiges	0.0150	1'540	23.1	15	15	6.67
	Rückwand	Beton	Beton	2.3171	2'350	5'445	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0633	7'850	497		100	1
		Baustahl	Stahl	0.0000	7'850	0.3		100	1
	Stützwand	Beton	Beton	0.9638	2'350	2'265	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0083	7'850	65		100	1
	Fundament	Beton	Beton	3.7095	2'350	8'717	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.0318	7'850	250		100	1
	Summe			**11.8724**		**19'434**			

Fussnoten zu Tab. 11. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm einer Lärmschutzgalerie mit einer gesamten Lebensdauer von 100 Jahren

Annahme zu Ersatzintervallen gemäss ASTRA:
[1)] Erneuerung des Oberflächenschutzes von Betonwänden im Salzsprühbereich alle 15 Jahre gemäss ASTRA

Annahmen zu Ersatzintervallen gemäss Timbatec:
[2)] Während der Objektlebensdauer treten 4 Leckagen auf, welche einen Austausch von je 30 m^2 auf gesamter Objektoberfläche zur Folge hat (und aufgrund Leckage muss 25 % des Überzugs ausgewechselt werden)
[3)] Muss während der Objektlebensdauer 2x komplett ausgetauscht werden
[4)] Muss während der Objektlebensdauer 1x komplett ausgetauscht werden (entspricht den Vorgaben des Fachhandbuchs Kunstbauten (2023) des Bundesamts für Strassen ASTRA)
[5)] Muss während der Objektlebensdauer 1x komplett ausgetauscht werden (entspricht den Vorgaben des Fachhandbuchs Kunstbauten (2023) des Bundesamts für Strassen ASTRA)
[6)] Aufgrund mangelnden Unterhalts an Verkleidung muss 10 % der Stützen während der Lebensdauer ausgewechselt werden
[7)] Während der Objektlebensdauer treten 4 Leckage auf, welche einen Austausch von je 30 m^2 auf gesamter Objektoberfläche zur Folge hat

Tagbautunnels

Tab. 12. Materialliste und Lebensdauer für 1 lfm eines Tagbautunnels mit einer gesamten Lebensdauer von 100 Jahren

Bauweise	Baugruppe	Materialien	Material-typen	Volumen (m^3)	Dichte (kg/m^3)	Masse (kg)	Lebensdauer Baugruppe (Jahre)	Lebensdauer Materialien (Jahre)	Lebensdauerfaktor
Beton (umgesetzt)	Decke	Beton	Beton	100	2'350	235'457	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.44	7'850	3'488		100	1
	Oberflächenschutz	Dispersionsputz [1)]	Sonstiges	0.03	1'540	46	15	15	6.67
	Wände	Beton	Beton	42	2'350	98'935	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.33	7'850	2'618		100	1
	Fundament (Bodenplatte)	Beton	Beton	30	2'350	69'930	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.12	7'850	916		100	1
	Summe			**173**		**411'390**			
Holz (Konzept)	Decke (zu tauschen)	CLT imprägniert (Einfuhr) [2)]	Holz	0.07	440	30	50	50	2
		Bitumenabdichtung [3)]	Sonstiges	68 m^2	6.2 kg/m^2	422		50	2
	Decke (nicht zu tauschen)	BSH (CH + Einfuhr)	Holz	24	439	10'712	100	100	1
		BSH imprägniert (CH + Einfuhr)	Holz	4.00	443	1'772		100	1
		CLT imprägniert (Einfuhr)	Holz	4.73	440	2'082		100	1
		Schnittholz hart (CH + Einfuhr)	Holz	0.20	675	135		100	1
		Schrauben	Stahl	0.004	7'900	34		100	1
	Oberflächenschutz	Dispersionsputz [1)]	Sonstiges	0.03	1'540	46	15	15	6.67
	Wände	Beton	Beton	42	2'350	98'935	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.33	7'850	2'618		100	1
	Fundament (Bodenplatte)	Beton	Beton	30	2'350	69'930	100	100	1
		Armierung	Stahl	0.12	7'850	916		100	1
	Summe			**106**		**187'632**			

Annahme zu Ersatzintervallen gemäss ASTRA:
[1)] Erneuerung des Oberflächenschutzes von Betonwänden im Salzsprühbereich alle 15 Jahre gemäss ASTRA

Annahmen zu Ersatzintervallen gemäss Timbatec:
[2)] Während der Objektlebensdauer treten 15 Leckagen auf, welche einen Austausch von je 30 m^2 auf gesamter Objektoberfläche zur Folge hat
[3)] Muss während der Objektlebensdauer 1x komplett ausgetauscht werden (entspricht den Vorgaben des Fachhandbuchs Kunstbauten (2023) des Bundesamts für Strassen ASTRA)

II. Umweltauswirkungsdaten von den Hauptbaumaterialien

Tab. 13. Umweltauswirkungsdaten (Treibhausgasemissionen, Primärenergie und UBP) für die Herstellung von 1 m^3 und 1 t jedes Hauptbaumaterials

Baumaterial	Menge	Herstellung				Entsorgung				Menge	Herstellung				Entsorgung			
		THGE	PENRE	PERE	UBP	THGE	PENRE	PERE	UBP		THGE	PENRE	PERE	UBP	THGE	PENRE	PERE	UBP
Beton (ohne Armierung)	**1 m³**	0.226	0.324	0.032	301	0.029	0.121	0.004	82.5	**1 t**	0.096	0.138	0.014	128	0.013	0.051	0.002	35.1
Beton «CO_2-tief» [1] (ohne Armierung)	**1 m³**	0.186	0.266	0.028	239	0.026	0.113	0.004	76.6	**1 t**	0.079	0.113	0.012	102	0.011	0.048	0.002	32.6
Beton «CO_2-hoch» [1] (ohne Armierung)	**1 m³**	0.268	0.355	0.039	338	0.028	0.120	0.004	82.0	**1 t**	0.114	0.151	0.017	144	0.012	0.051	0.002	34.9
Armierung	**1 m³**	6.068	26.61	2.748	12'325	0.096	0.396	0.015	153	**1 t**	0.773	3.390	0.350	1'570	0.012	0.051	0.002	19.5
Baustahl	**1 m³**	5.723	26.30	1.920	10'048	0.054	0.214	0.004	87.1	**1 t**	0.729	3.350	0.245	1'280	0.007	0.027	0.001	11.1
BSH (CH + Einfuhr)	**1 m³**	0.125	0.571	1.348	266	0.022	0.040	0.003	32.4	**1 t**	0.285	1.300	3.070	695	0.049	0.091	0.006	73.8
CLT (CH + Einfuhr)	*CLT in der Schweiz kommt aus 100 % Einfuhr gemäss F. Werner (2020), daher liegt keine Herkunftsverteilung vor*																	
Nadelschnittholz (CH + Einfuhr)	**1 m³**	0.062	0.320	0.413	192	0.018	0.041	0.003	29.2	**1 t**	0.134	0.688	0.889	413	0.039	0.089	0.006	62.9
BSH (CH)	**1 m³**	0.090	0.452	1.273	266	0.022	0.040	0.003	32.4	**1 t**	0.204	1.030	2.900	606	0.049	0.091	0.006	73.8
CLT (CH)	**1 m³**	0.085	0.615	0.233	271	0.034	0.041	0.003	44.9	**1 t**	0.201	1.450	0.549	638	0.080	0.098	0.006	106
Nadelschnittholz (CH)	**1 m³**	0.054	0.299	0.360	184	0.018	0.041	0.003	29.2	**1 t**	0.117	0.644	0.774	396	0.039	0.089	0.006	62.9
BSH (Einfuhr)	**1 m³**	0.232	0.926	1.572	422	0.022	0.040	0.003	32.4	**1 t**	0.528	2.110	3.580	962	0.049	0.091	0.006	73.8
CLT (Einfuhr)	**1 m³**	0.137	0.715	1.304	338	0.035	0.043	0.003	46.2	**1 t**	0.315	1.640	2.990	775	0.080	0.098	0.006	106
Nadelschnittholz (Einfuhr)	**1 m³**	0.086	0.381	0.574	216	0.018	0.041	0.003	29.2	**1 t**	0.185	0.820	1.234	464	0.039	0.089	0.006	62.9
BSH imprägniert (CH + Einfuhr) [2]	**1 m³**	0.145	0.576	1.360	309	0.022	0.040	0.003	32.7	**1 t**	0.328	1.300	3.070	698	0.049	0.091	0.006	73.8
CLT imprägniert (CH + Einfuhr)	*CLT in der Schweiz kommt aus 100 % Einfuhr gemäss F. Werner (2020), daher liegt keine Herkunftsverteilung vor*																	
Nadelschnittholz imprägniert (CH + Einfuhr) [2]	**1 m³**	0.082	0.323	0.417	195	0.018	0.042	0.003	29.5	**1 t**	0.175	0.688	0.889	415	0.039	0.089	0.006	62.9
BSH imprägniert (CH) [2]	**1 m³**	0.109	0.456	1.285	270	0.022	0.040	0.003	32.7	**1 t**	0.247	1.030	2.900	609	0.049	0.091	0.006	73.8
CLT imprägniert (CH) [2]	**1 m³**	0.115	0.680	0.257	300	0.037	0.046	0.003	49.7	**1 t**	0.245	1.450	0.549	641	0.080	0.098	0.006	106
Nadelschnittholz imprägniert (CH) [2]	**1 m³**	0.074	0.302	0.363	187	0.006	0.042	0.003	29.5	**1 t**	0.158	0.644	0.774	398	0.013	0.089	0.006	62.9
BSH imprägniert (Einfuhr) [2]	**1 m³**	0.253	0.935	1.586	427	0.022	0.040	0.003	32.7	**1 t**	0.571	2.110	3.580	965	0.049	0.091	0.006	73.8
CLT imprägniert (Einfuhr) [2]	**1 m³**	0.158	0.722	1.320	342	0.035	0.043	0.003	46.6	**1 t**	0.358	1.640	2.990	778	0.080	0.098	0.006	106
Nadelschnittholz imprägniert (Einfuhr) [2]	**1 m³**	0.106	0.385	0.579	219	0.018	0.042	0.003	29.5	**1 t**	0.226	0.820	1.234	466	0.039	0.089	0.006	62.9

Alle Daten kommen aus dem KBOB-Datenbank 2009/1:2022 Version 3 ausser:

[1] Daten für Beton «CO_2-tief» und «CO_2-hoch»: Betonrechner von Treeze bzw. vom Büro für Umweltchemie (2022, Version 4) berechnet

[2] Daten für imprägniertes Holz: Holzdaten der KBOB-Datenbank (2022, Version 3) unter Einbezug des Datensatzes für Holzimprägnierung «wood preservation, oscillating pressure method, organic salt, Cr-free, outdoor use, ground» von Frank Werner (Version 6.3.0.0) aus Ecoinvent 3.7.1 berechnet

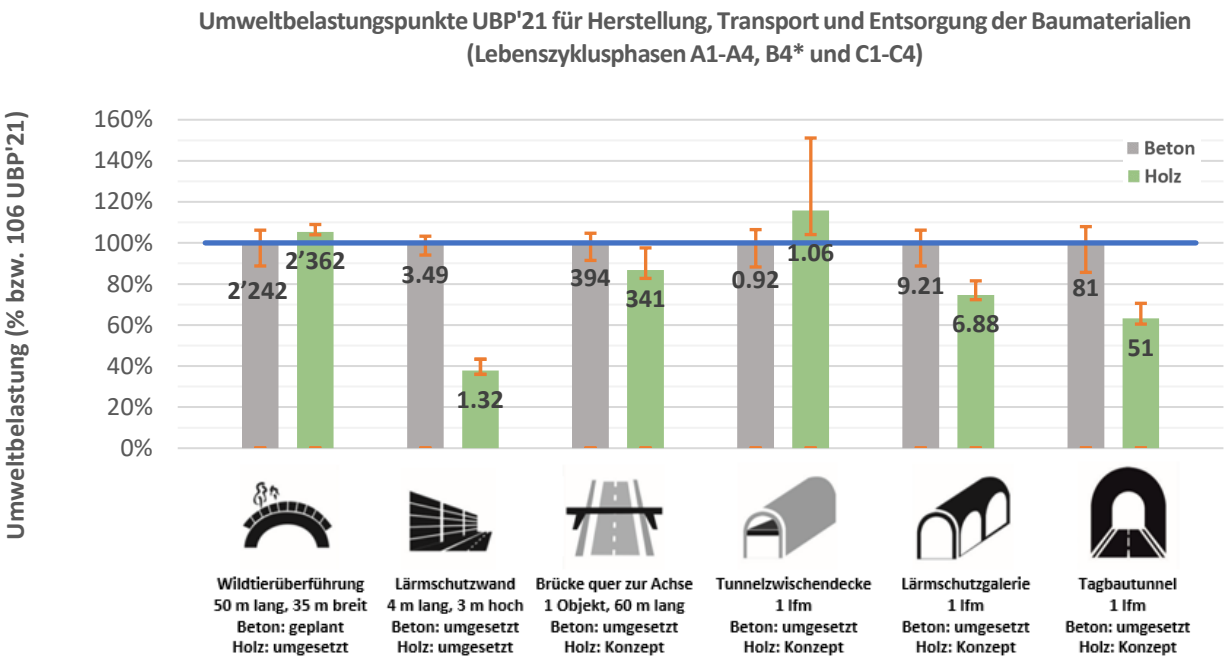
THGE: Treibausgasemissionen in t CO_2-Äq
PENRE: Primärenergie nicht erneuerbar in MWh
PERE: Primärenergie erneuerbar in MWh
UBP: Umweltbelastungspunkte in 10^3 UBP'21

Tab. 14. Quellen der Umweltauswirkungsdaten jedes Baumaterials

Baumaterial	Datenquelle	Datensatz
Beton		
Beton (ohne Armierung)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Hochbaubeton (ohne Bewehrung) [ID-Nr 01.003]
Beton «CO_2-tief» (ohne Armierung)	*Mit dem Betonrechner von Treeze bzw. vom Büro für Umweltchemie (2022, Version 4) berechnet, welcher sich auf die KBOB-Datenbank 2009/1:2022 basiert*	
Beton «CO_2-hoch» (ohne Armierung)	*Mit dem Betonrechner von Treeze bzw. vom Büro für Umweltchemie (2022, Version 4) berechnet, welcher sich auf die KBOB-Datenbank 2009/1:2022 basiert*	
Leichtbeton	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Leichtzementstein, Blähton [ID-Nr 02.004], *zurück für die Dichte von 900 kg/m³ berechnet*
Stahl		
Armierung	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Armierungsstahl [ID-Nr 06.003]
Baustahl	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Stahlprofil, blank [ID-Nr 06.012]
Abdeckung (für Lärmschutzwände aus Holz)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Stahlblech, verzinkt [ID-Nr 06.011]
Schrauben, Kopfbolzendübel, Anker, Befestigung	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Chromnickelstahlblech 18/8 verzinnt [ID-Nr 06.005]
Holz		
BSH (CH + Einfuhr)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Brettschichtholz [ID-Nr 07.003]
Nadelschnittholz (CH + Einfuhr)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, kammergetr., gehobelt [ID-Nr 07.011]
Schnittholz hart (CH + Einfuhr)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, rau [ID-Nr 07.007]
BSH (CH)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Brettschichtholz, Produktion Schweiz [ID-Nr 07.003.01]
CLT (CH)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Brettsperrholz, Produktion Schweiz [ID-Nr 07.020.01], *100 % Einfuhr gem. Hintergrundbericht von F. Werner (2020)*
Nadelschnittholz (CH)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, kammergetr., gehobelt, Produktion Schweiz [ID-Nr 07.011.01]
Schnittholz hart (CH)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Massivholz Buche / Eiche, kammergetrocknet, rau [ID-Nr 07.007.01]
BSH (Einfuhr)	*Berechnet aus den Datensätzen für «BSH (CH + Einfuhr)» und «BSH (CH)», mit der Herkunftsverteilung aus dem Hintergrundsbericht von F. Werner (2017)*	
CLT (Einfuhr)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Brettsperrholz [ID-Nr 07.020], *100 % Einfuhr gem. Hintergrundbericht von F. Werner (2020)*
Nadelschnittholz (Einfuhr)	*Berechnet aus den Datensätzen für «Nadelschnittholz (CH + Einfuhr)» und «Nadelschnittholz (CH)», mit der Herkunftsverteilung aus dem Hintergrundsbericht von F. Werner (2017)*	
Schnittholz hart (Einfuhr)	*Berechnet aus den Datensätzen für «Schnittholz hart (CH + Einfuhr)» und «Schnittholz hart (CH)», mit der Herkunftsverteilung aus dem Hintergrundsbericht von F. Werner (2017)*	
OSB (Einfuhr)	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	OSB-Platte, PF-gebunden, Feuchtbereich [ID-Nr 07.013], *100 % Einfuhr gem. Hintergrundbericht v. F. Werner (2017)*
Holzimprägnierung	Ecoinvent 3.7.1 [1)]	Wood preservation, oscillating pressure method, organic salt, Cr-free, outdoor use, ground (Version 6.3.0.0), *von F. Werner*
Sonstiges		
Dispersionsputz	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Kunststoffputz (Dispersionsputz) [ID-Nr 04.003]
Mörtel	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Baukleber/Einbettmörtel mineralisch [ID-Nr 04.008]
Kies	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Kies gebrochen [ID-Nr 03.011]
Bitumenabdichtung	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Dichtungsbahn bituminös [ID-Nr 09.003]
Gussasphalt	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Gussasphalt, 27.5 mm [ID-Nr 11.004]
Epoxidharz	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	2K-Fliessbelag Industrie (Epoxidharz), 2.25 mm [ID-Nr 11.001]
Akustikdämmung	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Holzwolle-Leichtbauplatte, zementgebunden [ID-Nr 07.005]
Steinwolle, Mineraldämmung	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Steinwolle [ID-Nr 10.008]
Kunststoff, Gittergewebe, Dichtungen	KBOB-Datenbank 2009/1:2022, Version 3	Polystyrol (PS) [ID-Nr 15.005]
Brandschutzband	Ecoinvent 3.7.1 [1)]	Polyurethane, flexible foam, flame retardant

[1)] Aufgrund des Fehlens eines passenden Datensatz für dieses Material in der KBOB-Datenbank, und da der Einfluss auf die Ökobilanz der betroffenen Objekte gering ist, wurden Daten aus Ecoinvent 3.7.1 verwendet

III. Umweltbelastungspunkte



* Für das Modul B4 sind die UBP-Werte von Austauschmaterialien gem. Abschnitt 3.1.3 den Modulen A1-A4 und C1-C4 zugeschlagen

Abb. 27. Übersicht der Umweltbelastungspunkte UBP'21 aller Objekte. Darstellung der Emissionen in Prozent des jeweiligen Wertes für die Betonvariante, mit absoluten Zahlenwerten auf den Balken. Die Fehlerbalken stellen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen dar (Beton mit tiefen oder hohen CO_2-Emissionen, Holzherkunft 100 % Schweiz oder 100 % Einfuhr)

Tab. 15. Minimal erforderliche Lebensdauer der Holzvarianten, bei welcher Umweltbelastungspunkte den gleichen Wert aufweisen wie die Betonvarianten

Objekt	SOLL Lebensdauer	Minimale Lebensdauer von den Holzbauten betreffend UBP (UBP'21)
Wildtierüberführungen	100 Jahre	-
Lärmschutzwände	100 Jahre	40 Jahre
Brücken quer zur Achse	100 Jahre	85 Jahre
Tunnelzwischendecken	60 Jahre	-
Lärmschutzgalerien	100 Jahre	75 Jahre
Tagbautunnels	100 Jahre	65 Jahre

Den Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass die Lebensdauer von Betonbauten gleich der SOLL-Lebensdauer ist

Den Berechnungen liegen die Lebenszyklusphasen A1-A4 und C1-C4 zugrunde

IV. Teilnehmende am Expert:innenworkshop zum Teilprojekt 3 am 30. Juni 2023

Ort: Berner Fachhochschule, Departement Architektur, Holz und Bau, Solothurnstrasse 102, 2504 Biel

Zeit: 30. Juni 2023, 09.00 bis 12.30 Uhr

Expert:innen:

René Bäbler	KBOB Nachhaltiges Bauen
Juliane Buchheister	ASTRA
Simon Hess	Timbatec
Susanne Kytzia	SIA
Lukas Leu	Timbatec
Lukas Rüegsegger	Timbatec
Hansueli Schmid	Lignum
Louis Trümpler	WaltGalmarini
Felix Wenk	Ostschweizer Fachhochschule

Motionsbeauftragter

Christian Aebischer	BAFU

Projektbeteiligte:

Prof. Dr. Aude Chabrelie	BFH, TP3 – Dekarbonisierungspotential
Prof. Dr. Steffen Franke	BFH, Gesamtprojektleitung
Thomas Näher	BFH, TP1 – Entscheidungsprozesse zur Materialisierung
Prof. Dr. Heiko Thömen	BFH, TP3 – Dekarbonisierungspotential

V. Reviewbericht vom Verifizierer

In Anlehnung an den Review-Prozess von Ökobilanzen nach dem ISO 14044:2006 Standard, hat eine unabhängige kritische Überprüfung stattgefunden, die von R. Hischier (EMPA) durchgeführt worden ist. Die folgenden Seiten sind eine exakte Kopie dieses Reviewberichts.

Empa
Materials Science and Technology

Reviewbericht

«Dekarbonisierung Infrastrukturbauten: CO_2-Reduktionspotenzial und End-of-Life-Szenarien für den Holzbau
Technischer Bericht – Teilprojekt 3»

Studie durchgeführt von: Berner Fachhochschule, Biel/Bienne
Departement Architektur, Holz und Bau

Studie im Auftrag von: Bundesamt für Umwelt (Bafu), Bern
Abteilung Wald

Anzahl Seiten: **6**
Version: **V1.0**

1 Organisation und Ablauf des Review-Prozesses

Der im vorliegenden Gutachten beschriebene Review-Prozess in Anlehnung an die ISO-Normen 14'040/ 14'044 [1a,b] fand im letzten Quartal 2023 und ersten Quartal 2024 im Auftrag der Abteilung Wald des Bundesamtes für Umwelt (Bafu), Bern, dem Auftraggeber der Studie "Dekarbonisierung Infrastrukturbauten - CO2-Reduktionspotenzial und End-of-Life-Szenarien für den Holzbau" statt. Die Studie wurde durch Mitarbeitende des Departementes Architektur, Bau und Holz der Berner Fachhochschule (BFH) in Biel/Bienne erstellt.

Der vorliegende Reviewbericht basiert auf der Version v5 des Schlussberichtes [2] (Version datiert mit 13. März 2024, der dem Reviewer gleichentags per Mail zugestellt wurde). Die finale Version des Reviewberichtes ist im Anhang der endgültigen Version des Schlussberichtes der Studie enthalten. Das vorliegende kritische Gutachten ist das Ergebnis eines so genannten "a posteriori" Review, da die Überprüfung in der finalen Phase der Studie stattfand. Der Gutachter erhielt am 23. Oktober 2023 eine erste Fassung des Abschlussberichtes, zusammen mit einer Excel-Datei mit den benutzten Daten, zur kritischen Durchsicht. Die per Mail gesandten Kommentare und Feedbacks des Reviews wurden in einem Treffen zwischen Auftragnehmer und Reviewer am 9. November 2023 diskutiert und die weiteren Schritte für die Finalisierung der Studie vereinbart. Eine überarbeitete Version des Berichtes wurde am 8. Dezember 2023 an den Reviewer gesandt und von diesem wiederum kommentiert. Am 13. März erhielt der Reviewer eine weiter revidierte und korrigierte Fassung, diese Version bildet die Grundlage für den vorliegenden Reviewbericht.

2 Kommentare zum Studien-Bericht

Der gesamte Prozess dieser kritischen Prüfung hat (in Anlehnung an den Review-Prozess nach dem ISO 14044: 2006 Standard [1b]) zum Ziel, die folgenden Aspekte zu begutachten:

- **Methodik** – d.h. ist Vorgehensweise der Studie kohärent zu Zielen sowie Umfang der Studie?
- **Daten** – d.h. sind die für diese Studie benutzten Daten und Annahmen in Bezug auf die Ziele der Studie vernünftig und angemessen?
- **Bericht** – d.h. ist der Bericht transparent und entspricht den Zielen der Studie?
- **Resultate** – d.h. Entsprechen die Ergebnisse und deren Interpretationen den identifizierten Grenzen und Zielen der Studie?

2.1 Methodik

Ziel und Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie sind klar dokumentiert. Der Bericht enthält ein Kapitel mit dem Titel "Infrastrukturobjekte und Methodik", in welchem die verschiedenen Punkte logisch strukturiert und umfassend dargestellt werden. Aus dem Beginn dieses Kapitels wird deutlich, dass das Ziel des Auftraggebers mit dieser Studie darin besteht, das Dekarbonisierungspotential von Infrastrukturbauten zu bestimmen unter der Annahme, dass die Bauten in Holz statt in Beton ausgeführt sind als Reaktion auf einen Motion im Ständerat[1] betreffend der Erforschung von Möglichkeiten zur

[1] Motion 21.3293, Ständerat Jakob Stark, mit dem Titel "*Erforschung und Innovation des Werkstoffs Holz für den Einsatz im Infrastrukturbau als Dekarbonisierungs-Beitrag*"

Dekarbonisierung des Infrastrukturbaus. Die Studie ist in sich transparent aufbereitet und dokumentiert und kann damit gut für eine interne (i.e. im politischen Kontext), aber auch eine externe (i.e. an die breite Öffentlichkeit gerichtete) Kommunikation genutzt werden.

Die **funktionale Einheit** wurde für jede Fallstudie individuell festgelegt und in einer tabellarischen Übersicht im Bericht dokumentiert. Die gewählten Grössen stellen in allen hier betrachteten Fällen eine logische und richtige Wahl dar, denn sie erlauben in jedem Fall einen objektiven und auch anschaulichen Vergleich zwischen den untersuchten Optionen (i.e. Holz und Beton). Die Umsetzung dieser Vergleichseinheiten ist im gesamten Bericht klar und transparent dokumentiert.

Die **Systemgrenzen** wurden in Anlehnung und in Übereinstimmung mit der Systematik des EN15'804 Standards [3] für EPDs im Baubereich bezeichnet. Sie umfassen die Bereitstellung der Materialien sowie deren Transport zum Ort der Nutzung (Module A1-A4 nach [3]), die über die Lebensdauer auszutauschenden Materialien (Modul B4), sowie die Entsorgung aller Materialien am Lebensende (Module C1-C4). Allfällige Gutschriften für ein Recycling (separates Element, Modul D nach [3]) sind nicht direkt in den Berechnungen enthalten; diesem Punkt wird nur qualitativ Rechnung getragen. Kein Teil des hier untersuchten Systems ist der Bauprozess selber (i.e. Modul A5), sowie alle weiteren Elemente der Nutzung (wie z.B. Instandhaltung oder Reparaturen). Der Ausschluss von Modul A5 wird mit dem Verweis auf zwei anderen Studien begründet, welche Strassenbrücken untersucht haben, und zeigen, dass der Bau der Brücke nur einen geringen Anteil an die Gesamtbelastung beiträgt. Es handelt sich nach [3] um einen "Cardle-to-Gate mit Optionen"-Ansatz. Da es sich bei der vorliegenden Studie um eine vereinfachende Ökobilanzstudie zur Potentialabschätzung handelt, erscheint die gemachte Wahl für den Reviewer als sinnvoll. Die ganze Vorgehensweise ist zudem transparent dokumentiert im Bericht.

Für die anschliessende **Wirkungsabschätzung** oder Bewertung werden in der vorliegenden Studie die Resultate mit drei verschiedenen Indikatoren ausgewiesen – als Treibhauseffekt in kg CO_2-Äquivalenten, als Primärenergie (aufgetrennt in erneuerbar/nicht erneuerbar) in MJ-Äquivalenten, sowie – im Anhang – als gesamte Umweltbelastung in Umweltbelastungspunkten (UBP). Alle drei Methoden wurden hier gemäss den Regeln für die Baubranche in der Schweiz, dokumentiert in Frischknecht (2022), angewandt [4]. Das Hauptziel der Studie ist die Bestimmung des Dekarbonisierungspotentiales – weshalb die Autoren im Bericht nur die Resultate der ersten beiden Indikatoren (Treibhauseffekt und Primärenergie) diskutieren. Dies ist zwar im Einklang mit der Zielsetzung – aus Sicht des Reviewers würden die Autoren mit einer kurzen Diskussion der Resultate in UBP der Studie einen klaren Mehrwert geben (statt diese Resultate nur – unkommentiert – im Anhang aufzuführen).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Ansatz und die Annahmen im Rahmen der Studie als ausreichend logisch und köhärent im Bezug auf die Zielsetzung der Studie angesehen werden können.

2.2 Daten

Die Anforderungen und der Prozess der Datenerhebung werden im zweiten Teil des Kapitels "Methodik" (i.e. Kapitel 3.1.3) des Gesamtberichtes beschrieben. Im Hintergrund wird für diese Studie primär eine Datenquelle verwendet – die Datenbank KBOB:2022 der Schweizer Bundesämter (welche auf der Datenbank ecoinvent 2.2 von 2010 aufbaut). Für einige wenige Hilfsmittel werden diese Daten mit solchen aus der Version 3.7.1 von ecoinvent kombiniert. Die Vordergrunddaten für die Beton-Varianten stammen mit einer Ausnahme von Dokumentationen des ASTRA für realisierte Bauwerke, während für die Holzvarianten in 4 Fällen ein spezialisiertes Holzbauingenieurbüro eine Spezifizierung auf Konzept-

Stufe vorgenommen hat. In Abbildung 4 (Kapitel 3.1.1, "Ziel") sind die Quellen der Vordergrund-Daten zu den verschiedenen Objekten aufgeführt; die dazugehörenden Zahlenwerte sind im Anhang tabellarisch zu finden. In diesem Anhang ist allerdings nicht weiter ausgeführt, ob und wenn ja, was für Annahmen hinter einzelnen Zahlenwerten stecken.

Während für Holz zwischen einer Reihe von unterschiedlichen Baustoffen unterschieden wird, werden beim Stahl nur zwei Datensätze (Armierungseisen, Baustahl) und für Beton gar nur ein einzelner Datensatz für die Berechnung aller sechs Objekte benutzt. Je nach Bauteil (wie z.B. Fundament oder tragendes Element bei Brücke) gelten unterschiedliche, technische Anforderungen und es wird dafür nicht die gleiche Art von Beton eingesetzt werden. Diesem Umstand wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (indirekt) Rechnung getragen – denn verschiedene Betonarten können zu grossen Unterschieden bezüglich CO_2-Fussabdruck führen (eine Studie des Hochbauamts der Stadt Zürich [5] zeigt mehr oder weniger einen Faktor 2 zwischen dem Carbon Footprint von Magerbeton und Bohrpfahlbeton). Als zweite Sensitivität wurde der Einfluss der Herkunft des Holzes (Schweiz / Europa) untersucht. Mit diesen beiden Sensitivitäten haben die Autoren zwei relevante Aspekte auf deren Einfluss hin untersucht; ein dritter Faktor mit relevantem Einfluss wäre das Thema "Stahl". Gemäss der jüngsten Studie des Bafu zum Thema [6] liegt Europäischer Armierungsstahl bei etwa doppelt so hohen Treibhausgasemissionen wie der Schweizer Stahl – und könnte somit ebenfalls einen sichtbaren Einfluss auf die Resultate der vorliegenden Studie haben. Da eine Nutzung von Europäischem Armierungsstahl (aufgrund des höheren Carbon Footprints) die Vorteile der Holzvarianten weiter aktzentuieren würde, kann das Weglassen als konservativer Ansatz für die Betonvariante angeschaut werden.

Gesamthaft gesehen sind die hier benutzten Daten und Informationen im Einklang mit der Zielsetzung der Studie (i.e. was ist das Dekarbonisierungspotential von Infrastrukturbauten unter der Annahme, dass die Bauten in Holz statt in Beton ausgeführt werden) und erlauben es, eine adäquate Antwort auf die gestellte Frage zu bekommen.

2.3 Bericht

Der Bericht (für die Überprüfung wurden die per Mail am 13. März 2024 erhaltene Version des Schlussberichtes verwendet) ist klar und logisch strukturiert und korrekt gegliedert.

2.4 Resultate

Die Autoren haben die Resultate von zwei der betrachteten Indikatoren (i.e. Treibhausgaseffekt sowie Primärenergie (aufgetrennt in erneuerbar/nicht erneuerbar)) zusammen mit den Eckwerten der betrachteten Objekte im Kapitel 3.2 in einer übersichtlichen und kompakten, jedoch trotzdem aussagekräftigen und transparenten Form dargestellt. Die Resultate des dritten Indikators (i.e. die Gesamtumweltbelastung in UBP) sind– unkommentiert – jedoch nur im Anhang des Berichtes zu finden.

Im Nachfolgenden Kapitel 3.3 sind die Resultate der verschiedenen Objekte gemeinsam dargestellt, zusammen mit dem Einfluss der untersuchten Sensitivitäten (i.e. CO_2-Intensität der Betonproduktion resp. die Herkunft des Holzes). Aus der Figur mit den Resultaten in MJ Primärenergie wird gut ersichtlich, dass die Variabilität der Holzoptionen um so grösser wird, je mehr Holz das dominierende Element ist. Wenn sich nur wenig Beton durch Holz ersetzen lässt, so sind keine grossen Variabilitäten sichtbar (wie z.B. für die Wildtierüberführung). Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die Resultate – soweit dies sich machen lässt – auch mit den Resultaten von anderen Studien verglichen und auf Ihre Plausibilität hin

geprüft. All dies steigert die Transparenz der Studie und erlaubt damit auch eine höhere Glaubwürdigkeit der vorliegenden Resultate.

In den nachfolgenden Kapiteln 4 und 5 wird – ausserhalb der eigentlichen Ökobilanz-Berechnung – auf das Thema der CO_2-Speicherung (im Holz resp. im Beton) eingegangen. Die Autoren zeigen auch hier in einer klar strukturierten und transparenten Art auf, wie sich dieses Thema für die beiden Materialien quantifizieren lässt – und setzen den Wert in den Kontext der erhaltenen Ökobilanz-Resultate für den Treibhauseffekt. Im Kapitel 6 wird dann noch – auf eine qualitative Art und Weise – dem Modul D für die Holzvarianten Rechnung getragen. Die hohe Transparenz in der Darstellung erlaubt dem Leser sich in allen drei Kapitel seine eigene Meinung zum jeweiligen Thema zu bilden.

In den beiden abschliessenden Kapiteln fassen die Autoren in einem ersten, kurz aber doch prägnant gehaltenen Teil die Hauptaussagen aus den Resultaten nochmals zusammen. Im zweiten Teil machen die Autoren einen Blick nach vorne und Listen nächste Schritte/Massnahmen auf, welche notwendig wären, um einen vermehrten Einsatz von Holz für Infrastrukturbauten realisieren zu können. Alle hier aufgeführten Punkte sind richtig und auch relevant; was fehlt ist lediglich noch eine Kontextualisierung in Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Mengen an Holz für diese Art von Bauwerken.

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Studie "Dekarbonisierung Infrastrukturbauten: CO_2-Reduktionspotenzial und End-of-Life-Szenarien für den Holzbau (Technischer Bericht – Teilprojekt 3)" – durchgeführt von Mitarbeitenden des Departementes Architektur, Bau und Holz der Berner Fachhochschule (BFH) in Biel/Bienne – transparent und nachvollziehbar durchgeführt wurde und, obschon es sich um eine vereinfachende Ökobilanz handelt (wie im Bericht auch klar geschrieben), die Vorgehensweise im Einklang mit den internationalen Normen für Ökobilanzen (ISO 14'040 und 14'044) ist. Der Gutachter befürwortet und unterstützt deshalb eine Veröffentlichung der vorliegenden Studie. Der gesamte Bericht gibt einen guten Überblick über die Studie und ihre Ergebnisse. Aus ökologischer Sicht zeigt die Studie dass der Einsatz von Holz als Baustoff in Infrastrukturelementen bezüglich den Treibhausgasemissionen, je nach Bauelement, zu einer mehr oder weniger grossen Reduktion führen kann (zwischen 2 und 70%); während bei einer Betrachtung der Primärenergie (oder der gesamten Umweltbelastung in UBP) der Umstieg auf Holz nicht automatisch zu einer Reduktion führt.

St. Gallen, 14. März 2024;
der Reviewer der Studie

Roland Hischier
Leiter "Advancing Life Cycle Assessment" Gruppe
Empa | Abteilung Technologie und Gesellschaft | Lerchenfeldstrasse 5 | 9014 St. Gallen
Mail: roland.hischier@empa.ch | Tel. +41 58 765 78 47

4 Referenzen

[1a] International Standard (ISO) (2006): Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Standard ISO 14040:2006.

[1b] International Standard (ISO) (2006): Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and Guidelines. Standard ISO 14044:2006.

[2] Aude Chabrelie und Heiko Thömen (2023): Dekarbonisierung Infrastrukturbauten: CO2-Reduktionspotential und End-of-Life-Szenarien für den Holzbau. Technischer Bericht – Teilprojekt 3. Biel/Bienne, 1. Dezember 2023.

[3] Deutsches Institut für Normung (DIN) (2022): Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, EN 15804: 2012 + A2: 2019 + AC: 2021, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Berlin.

[4] Rolf Frischknecht (2022): Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 6.0, KBOB, ecobau, IPB, Bern.

[5] Laura Tschümperli, Livia Ramseier und Rolf Frischknecht (2016): Ökobilanz ausgewählter Betonarten. Schlussbericht – Version 4.1 im Auftrag der Fachstelle Nachhaltiges Bauen, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.

[6] Mischa Zschokke, Philipp Bolt, und Stefanie Conrad (2021): Life cycle inventories of steel and iron processes. Studie der Carbotech AG für das Bundesamt für Umwelt (BAFU).