

Diploma Thesis

Life cycle analysis of timber-concrete composite floors

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Lebenszyklusanalyse von Holz-Beton-Verbunddecken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Philip Luger, BSc

Matr.Nr.: 01228857

unter der Anleitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alireza Fadai**

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Christian Schranz, M.Sc.**

Institut für Architekturwissenschaften
Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/259.2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im April 2021

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich nicht nur im Laufe dieser Diplomarbeit, sondern während meines gesamten Studiums begleitet und unterstützt haben. Herrn Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadaei möchte ich danken, dass er mich von Beginn an bei der Umsetzung und Realisierung dieser Diplomarbeit bestmöglich unterstützt hat.

Auch möchte ich mich bei Herrn Univ.Lektor Dipl.-Ing. Daniel Stephan, B.A. bedanken, der seine fachlichen Expertise zur Verfügung gestellt hat.

Besonderer Dank gilt Herrn Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Schranz, M.Sc., der mir nicht nur als Nebenbetreuer in dieser Diplomarbeit, sondern seit dem Beginn meines Studiums als Berater und Begleiter zur Seite gestanden ist und mich auf meinem beruflichen Werdegang tatkräftig unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich meinen Eltern Brigitte und Herbert, meiner Schwester Viktoria und allen Freunden danken, die mich in den letzten Jahren stets motiviert und mich in meinem Tun und Handeln bekräftigt haben. Der Rückhalt aus dem familiären Umfeld war und ist ein wesentlicher Faktor, um vergangene und alle kommenden Herausforderungen zu meistern.

Auch meine Studienkollegen tragen einen wesentlichen Anteil an der schönen sowie herausfordernden Zeit meines Studiums bei. Durch die enge Zusammenarbeit und unser gemeinsames Interesse am Bauingenieurwesen, sind aus Kollegen Freunde geworden, die mich auch in Zukunft begleiten werden.

Kurzfassung

Aufgrund des hohen Energieverbrauchs und den beträchtlichen Treibhausgasemissionen, die mit der Errichtung und dem Betrieb von Bauwerken einhergehen, werden im Bauwesen immer höhere Ansprüche an eine nachhaltige Planung und den ressourcenschonenden Einsatz von Baustoffen gestellt. Da auch das öffentliche Interesse für nachhaltige Bauwerke immer stärker ansteigt, wird die Verwendung von nachwachsenden und ökologischen Materialien zunehmend forciert.

Aus diesem Grund wird im Zuge dieser Diplomarbeit eine vergleichende Lebenszyklusanalyse für verschiedene Holz-Beton-Verbunddecken durchgeführt. Diese Verbundvariante stellt eine ideale Verknüpfung des mineralischen Massivbaus mit dem Holzbau dar. Betrachtet werden Deckensysteme mit einer Spannweite zwischen 6 und 8 m, die als Geschossdecken für Wohngebäude im urbanen Raum zum Einsatz kommen. Neben den herkömmlichen Brettstapel- und Holzbalkenunterkonstruktionen wird mit der LVL-Beton-Verbunddecke auch eine neuartige Variante mit einer Unterkonstruktion aus heimischem Buchenurnierschichtholz auf ihre ökologischen Eigenschaften untersucht.

Im Anschluss an die Beschreibung allgemeiner Aspekte zu HBV-Konstruktionen und möglicher Ausführungsvarianten werden die konstruktive Bemessung und die Nachweisführung der in gegenständlicher Arbeit verwendeten, nachgiebig verbundenen Querschnitte vorgestellt, mit besonderem Augenmerk auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Aufgrund der positiven wirtschaftlichen Eigenschaften sowie der einfachen Vorfertigung im Werk kommen bei den betrachteten Querschnitten Kerven als formschlüssige Verbundelemente zur Anwendung.

Das Ziel ist, mit den bis dahin gesammelten Erkenntnissen der statischen Berechnung, möglichst ressourceneffiziente Lösungen für die untersuchten Spannweiten zu eruiieren, um sie anschließend einer systematischen Analyse während des gesamten Lebensweges zu unterziehen. Durch die Erfassung sämtlicher Input- und Outputflüsse an Materialien, Stoffen, Energie, Produkten und Emissionen, die von der Herstellungsphase bis hin zum Rückbau der Produkte entstehen, wird schließlich die Gesamtauswirkung auf das Ökosystem abgeschätzt und transparent dargestellt.

Den Abschluss bildet eine Gegenüberstellung der Umweltwirkungen der betrachteten Holz-Beton-Verbunddecken mit jenen von reinen Stahlbeton- bzw. Massivholzdecken derselben Spannweite. Die Ergebnisse dieses ökologischen Vergleichs können in weiterer Folge als Hilfsmittel für Fachplaner und Architekten in Bezug auf eine ökologisch optimierte Materialwahl im Gebäudeentwurf dienen.

Abstract

Due to the high energy consumption and the considerably large greenhouse gas emissions associated with buildings' construction and operation, the construction industry is becoming demanding in terms of sustainable planning and the resource-conserving use of building materials. As public interest in sustainable buildings is increasing, renewable and ecological materials are being pushed more and more.

For this reason, a comparative life cycle analysis is carried out in the course of this diploma thesis for various timber-concrete composite slabs, which combine concrete construction with timber in several ways. Within the scope of this thesis, ceiling slabs of residential buildings in urban areas with a span between 6 and 8 meters are considered. In addition to the conventional constructions using solid wood such as timber beams, the LVL-concrete composite slab made of beech laminated veneer lumber is also being examined for its ecological properties as a new kind of substructure.

Following the description of general aspects of timber-concrete composite constructions and state-of-the-art design variants, the structural design and the verification of the flexibly connected cross-sections used in the present work are presented, with particular attention to load-bearing capacity and serviceability. Due to the favorable economic properties and the simple prefabrication in factories, the considered slabs are formed with notched connections.

This work aims to identify the most resource-efficient solutions for the examined spans by using the knowledge gained from the structural analysis and subsequently aims to perform a systematic analysis throughout their entire life cycle. By recording all input and output flows of materials, substances, energy, products, and emissions that arise from the manufacturing phase up to the dismantling of the slabs, the overall impact on the ecosystem is finally assessed and presented transparently. The conclusion compares the environmental effects of various timber-concrete composite slabs with pure reinforced concrete or solid timber ceilings of the same span. The results of this ecological comparison can serve as an aid for planners and architects with regard to an ecologically optimized choice of materials in the building design.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
2	Klimasituation	11
2.1	Wissenschaftliche Grundlagen zum Klimawandel	11
2.2	Verursacher des Klimawandels	11
2.3	Globale Treibhausgasemissionen	12
2.4	Treibhausgasemissionen in Österreich	15
2.4.1	Entwicklung der letzten Jahre	15
2.4.2	Anteile der einzelnen Treibhausgase an den Gesamtemissionen	15
2.4.3	Treibhausgase nach Sektoren	16
2.5	Anstieg der globalen CO ₂ -Konzentration	16
2.6	Beobachtete Klimaänderungen	17
2.7	Auswirkungen der Klimaänderung	18
2.8	Internationale Klimaverhandlungen	19
2.9	Der globale Einfluss des Gebäudesektors	20
3	Nachhaltigkeit	21
3.1	Nachhaltiges Bauen	21
3.1.1	Ökologische Nachhaltigkeit	21
3.1.2	Der Nachhaltigkeitsgedanke im Bauwesen	22
3.1.3	Nachhaltige Planung	22
3.1.4	Entwicklungen in der Nachhaltigkeitsbetrachtung	23
3.2	Die Ökobilanzierung	24
3.2.1	Festlegung eines Untersuchungsziels	25
3.2.2	Sachbilanz	26
3.2.3	Wirkungsabschätzung	26
3.2.4	Auswertung	28
3.2.5	Ökobilanzierung als iterativer Prozess	29
3.2.6	Unsicherheiten der Ökobilanzierung	29
3.2.7	Ermittlung des Ökoindex 3	29
3.3	Strategien zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs	30
3.3.1	Optimierung des Gebäudelebenszyklus	31
3.3.2	Betrachtung auf Materialebene	31
4	Die Holz-Beton-Verbunddecke	32
4.1	Vorteile von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	33
4.2	Ausführungsarten und Materialien	34
4.2.1	Balkenbauweise	34
4.2.2	Plattenbauweise	34
4.3	Verbundmittel	36
4.4	Bemessung nachgiebig verbundener Querschnitte	41
4.4.1	Randbedingungen des γ -Verfahrens	42

4.4.2	Systemabmessungen	43
4.4.3	Deckenaufbau und Belastungsermittlung	44
4.4.4	Material- und Verbundmittelsteifigkeit	45
4.4.5	Ermittlung der Fugensteifigkeit	45
4.4.6	Berechnung der wirksamen Biegesteifigkeit	47
4.4.7	Berechnung der Teilschnittgrößen und Spannungsermittlung	47
4.4.8	Ermittlung des maßgebenden Schubflusses und der Einflussbereiche	48
4.4.9	Berücksichtigung des Langzeitverhaltens	49
4.4.10	Nachweisführung	53
4.5	Bemessung der LVL-Beton-Verbunddecke	57
4.5.1	Systemeigenschaften	57
4.5.2	Material- und Verbundmittelsteifigkeit	58
4.5.3	Mögliche Versagensformen	58
4.5.4	Beschreibung des Tragwerkverhaltens	59
4.5.5	Versagensformen auf Kervenebene	64
4.5.6	Ermittlung der erforderlichen Vertikalbewehrung	66
4.5.7	Dimensionierung der Bauteildicke	67
5	Vergleichende Ökobilanzierung verschiedener Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	68
5.1	Untersuchungsrahmen und Ziel	68
5.1.1	Untersuchte Konstruktionen und Funktionseinheit	68
5.1.2	Verwendete Datenbank und weitere Umweltproduktdeklarationen	69
5.1.3	Systemgrenzen und Annahmen	69
5.2	Ökobilanzielle Betrachtung der verwendeten Baustoffe	73
5.2.1	Energiebedarf und Wirkungskategorien der Holzwerkstoffe	74
5.2.2	Energiebedarf und Wirkungskategorien der Betonwerkstoffe	76
5.2.3	Interpretation der Materialwahl	78
5.3	Ressourcenermittlung und Ökobilanz der verwendeten Systeme	78
5.3.1	Systeme mit einer Spannweite von $l_0 = 6$ m	80
5.3.2	Systeme mit einer Spannweite von $l_0 = 7$ m	86
5.3.3	Systeme mit einer Spannweite von $l_0 = 8$ m	92
5.4	Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse	97
5.4.1	Energiebedarf und Wirkungskategorien	97
5.4.2	Berechnung der OI3-Kennwerte	102
5.4.3	Kritische Bewertung der Ergebnisse	104
5.5	Vergleich der HBV-Konstruktionen mit Stahlbeton- und Massivholzdecken	105
5.5.1	Statische Vordimensionierung	106
5.5.2	Ökobilanzieller Vergleich	107
5.5.3	Energiebedarf und Wirkungskategorien im Vergleich	109
5.5.4	Vergleich der OI3-Kennwerte	113
5.5.5	Zusammenfassung des ökobilanziellen Vergleichs	114
6	Zusammenfassung und Ausblick	117
7	Literatur	119

Kapitel 1

Einleitung

Die seit Beginn der Industrialisierung stark steigenden Treibhausgasemissionen können vor allem auf die Verbrennung großer Mengen fossiler Brennstoffe zurückgeführt werden und sind die Hauptursache für die zahlreichen schwerwiegenden sowie irreversiblen Folgen, die mit dem Klimawandel des 20. und 21. Jahrhunderts einhergehen. Da dem Gebäudesektor ca. ein Drittel des globalen Endenergieverbrauchs und etwa 38 % der gesamten energiebezogenen CO₂-Emissionen zuzuordnen sind, wird im Bauwesen ein immer größerer Fokus auf eine nachhaltige Planung und den ressourcenschonenden Einsatz von Baustoffen gelegt.

Neben dem Energieverbrauch während der Nutzungsphase tragen vor allem die Baustoffe in einem hohen Maß zur Umweltbelastung eines Gebäudes bei. Durch die positive Eigenschaften des Holzes, schon während des Wachstums CO₂ zu speichern, gewinnt der moderne Holzbau im Zuge der momentanen Klima- und Nachhaltigkeitsdiskussion immer mehr an Bedeutung. Da auch bei der Herstellung von Holzwerkstoffen weitaus weniger Energie benötigt wird als bei der Produktion anderer Baumaterialien, kann eine verstärkte Verwendung dieses nachwachsenden Rohstoffs bedeutend zur Erhaltung des Klimas beitragen. Da beim Gebäudeentwurf neben den ökologischen Eigenschaften einer Konstruktion auch die statischen und bauphysikalischen Aspekte eine wesentliche Rolle spielen, hat sich im Bauwesen zuletzt die Kombination mehrerer Baumaterialien bewährt.

Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit verschiedene Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, welche die statischen und bauphysikalischen Vorteile des mineralischen Massivbaus mit den umweltschonenden Qualitäten des Holzbaus kombinieren, vor allem im Hinblick auf die ökologischen Qualitäten untersucht. Die Deckensysteme sollen als Geschossdecken für Wohngebäude im urbanen Raum zum Einsatz kommen. Unter Einbeziehung der normativen Regelungen zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit wird das Ziel verfolgt, die Unterschiede der Konstruktionsvarianten im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanzierung bei einer sich ändernden Spannweite aufzuzeigen und anhand der ermittelten Ökobilanzkennwerte zu vergleichen. Die genaue Analyse der einzelnen Decken soll zeigen, welche Werkstoffe den größten Einfluss auf die ökologischen Eigenschaften einer Deckenkonstruktion aufweisen und wo Optimierungen möglich sind.

Abschließend werden die Ergebnisse der untersuchten Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit jenen von herkömmlichen Stahlbeton- bzw. Massivholzdecken in Brettsperrholzausführung gegenübergestellt. Im Zuge einer Diskussion und der kritischen Auseinandersetzung mit den bis dahin gesammelten Erkenntnissen soll die Frage beantwortet werden, inwiefern sich die vorgestellten HBV-Systeme in Anbetracht der definierten Vorgaben als Alternative eignen. Die Ergebnisse sollen eine Hilfestellung für Fachplaner und Architekten bei der Materialwahl während der Planungsphase sein und beim Optimierungsprozess eines Produktsystems unterstützen.

Kapitel 2

Klimasituation

2.1 Wissenschaftliche Grundlagen zum Klimawandel

Wasserknappheit, die Zunahme von extremen Wetterereignissen, andauernde Waldbrände aufgrund von Trockenheit und der Rückgang von Schnee- und Eismengen sowie der damit verbundene Anstieg des Meeresspiegels sind nur einige der schwerwiegenden und irreversiblen Folgen, die das österreichische Umweltbundesamt [53] mit dem Klimawandel des 20. und 21. Jahrhunderts in Verbindung bringt. Die Ursache der klimatischen Veränderungen kann dabei vor allem auf die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zurückgeführt werden. Auch die Sonneneinstrahlung und das Rückstrahlverhalten der Erdoberfläche können als klimaverändernde Faktoren angeführt werden.

Ein Zusammenwirken dieser Faktoren wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Das Umweltbundesamt Deutschland [50] beschreibt diesen Effekt als Resultat der auf der Erde ankommenden kurzwelligeren, energiereichen Sonnenstrahlung, welche die Erdoberfläche erwärmt und als langwellige Strahlung wieder abgegeben wird. Die Moleküle der Treibhausgase, die sich in der Atmosphäre befinden, werden energetisch angeregt und senden langwellige infrarote Strahlung aus. Da die Abgabe in alle Himmelsrichtungen erfolgt, kehrt ein erheblicher Anteil der Strahlung auch wieder zur Erdoberfläche zurück, wodurch die bodennahe Lufttemperatur steigt. Ohne die Treibhausgase – das wichtigste und wohl bekannteste davon ist Kohlenstoffdioxid (CO_2) – würde die Wärmestrahlung zurück in den Weltraum abgestrahlt werden.

Prinzipiell ist die Wirkung der natürlich vorkommenden Treibhausgase, zu denen auch Wasserdampf und Ozon gehören, essenziell für das Leben auf der Erde. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt würde die mittlere bodennahe Temperatur nicht 15°C , sondern etwa -18°C betragen, was das irdische Leben, wie wir es kennen, unmöglich machen würde.

Der Treibhauseffekt ist also eine natürliche sowie lebensnotwendige Erscheinung. In den letzten Jahrzehnten wurde jedoch ein explosionsartiger Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre beobachtet, was mit einem deutlich zu beobachtenden Temperaturanstieg verbunden ist – hauptsächlich verursacht durch das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum. Deshalb werden die aktuell auftretenden Klimaerscheinungen auch stark mit dem Begriff des anthropogenen Treibhauseffekts verbunden [53]. Die Wirkung des beschriebenen Effekts ist in Abb. 2.1 grafisch dargestellt.

Die beobachteten Änderungen des Klimas der letzten Jahrzehnten und die damit verbundenen Ursachen werden in den folgenden Kapitel genauer betrachtet. Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) hat zu diesem Themengebiet einen Synthesebericht veröffentlicht, der als Grundlage für die folgenden Abschnitte dient [17].

2.2 Verursacher des Klimawandels

Der Klimawandel des 20. und 21. Jahrhunderts wird sowohl von natürlichen als auch von anthropogenen Stoffen und Prozessen angetrieben. Zum einen hat die Erhöhung der Treib-

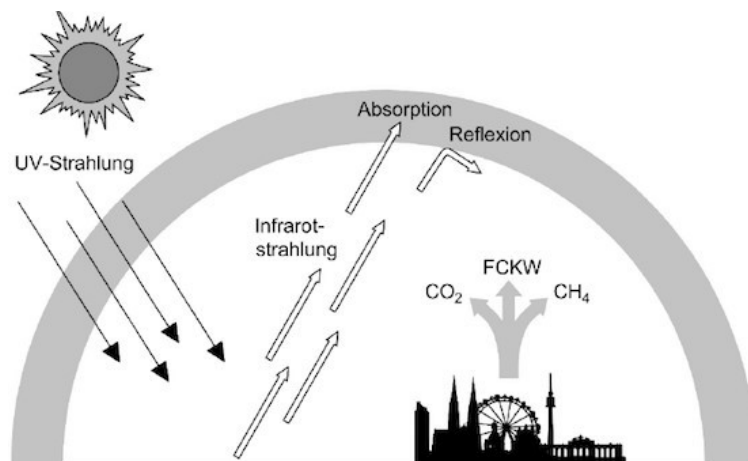


Abb. 2.1: Anthropogener Treibhauseffekt [15]

hausgaskonzentration eine erwärmende Wirkung auf die Atmosphäre, zum anderen führen der Strahlungsantrieb durch Aerosole und die Veränderung der Strahlung nach großen Vulkanausbrüchen zu einem abkühlenden, den Treibhausgasen entgegenwirkenden Effekt. Insgesamt weisen die beiden letztgenannten natürlichen Strahlungseffekte aber einen eher geringen Beitrag zu den Klimaveränderungen auf. Viel größeren Einfluss auf die globale Erwärmung haben dagegen die klimawirksamen Treibhausgase. Anthropogene Treibhausgasemissionen werden vor allem durch den Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, den Energiesektor, die Landnutzung, technologische Entwicklungen und die Klimapolitik beeinflusst. Aufgrund der zentralen Rolle, die die Treibhausgasemissionen in der aktuellen Klimaveränderung einnehmen, werden diese im nächsten Kapitel genauer betrachtet.

2.3 Globale Treibhausgasemissionen

Seit dem Beginn der Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts ist die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre – weltweit betrachtet – deutlich angestiegen. Zu den langlebigen Treibhausgasen, die einen wesentlichen Beitrag zur globalen Erwärmung beitragen, zählen neben Kohlendioxid, Methan und Lachgas die fluorierten Treibhausgase (F-Gase). Wie in Abb. 2.2 ersichtlich, hat sich seit 1750 sowohl die Konzentration von Kohlendioxid (um 40 %) als auch die des Methans (um 150 %) und die des Distickstoffmonoxids (um 20 %) erhöht [17]. Laut Klimaschutzbericht des österreichischen Umweltbundesamts [53] lag beispielsweise die CO₂-Konzentration im Jahr 2019 bereits bei über 410 ppm.

Um die Klimawirksamkeit bzw. die Klimaschädlichkeit der Treibhausgase besser einschätzen zu können, werden sie in CO₂-Äquivalenten umgerechnet. Alle Treibhausgase werden dabei entsprechend ihrer spezifischen Wirksamkeit auf die Klimawirksamkeit von Kohlendioxid bezogen [48]. Methan ist als Klimagas z. B. rund 25-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid, Lachgas sogar rund 300-mal [51], womit diese einen substantiellen Teil des anthropogenen Treibhauseffekts bilden.

Um die angestrebte Obergrenze der Erderwärmung nicht zu überschreiten und so die negativen Folgen des Klimawandels zu beschränken, müsste die gesamte Treibhausgaskonzentration aller Klimagase bis zum Ende des 21. Jahrhunderts bei etwa 450 ppm Kohlendioxid-Äquivalenten stabilisiert werden [47]. Da im Jahr 2019 bereits eine atmosphärische Treibhausgaskonzentration von 500 ppm – mit steigender Tendenz, wie in Abb. 2.3 ersichtlich – gemessen wurde, sind die globalen Treibhausgasemissionen zur Erreichung dieses Ziels in den nächsten Jahrzehnten stark zu senken und bis zum Ende des Jahrhunderts sogar auf null zu reduzieren.

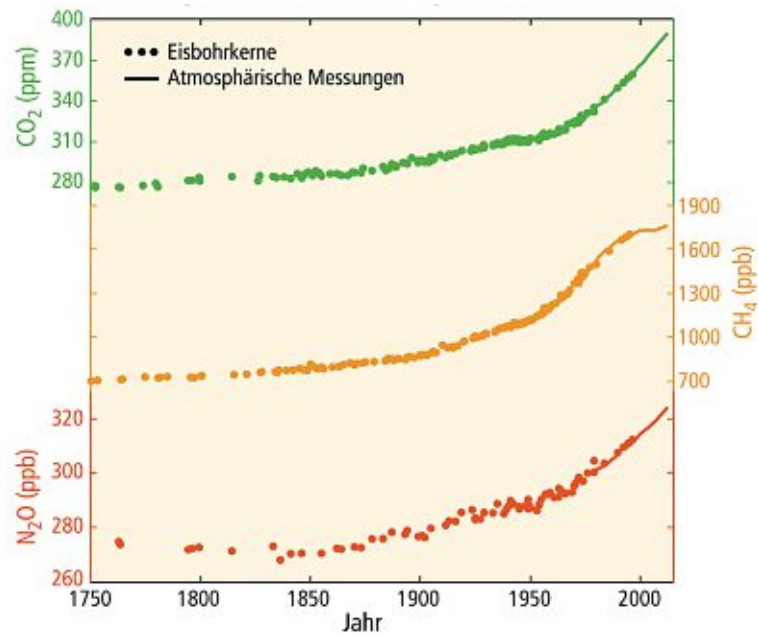


Abb. 2.2: Global gemittelte Treibhausgaskonzentration [17]

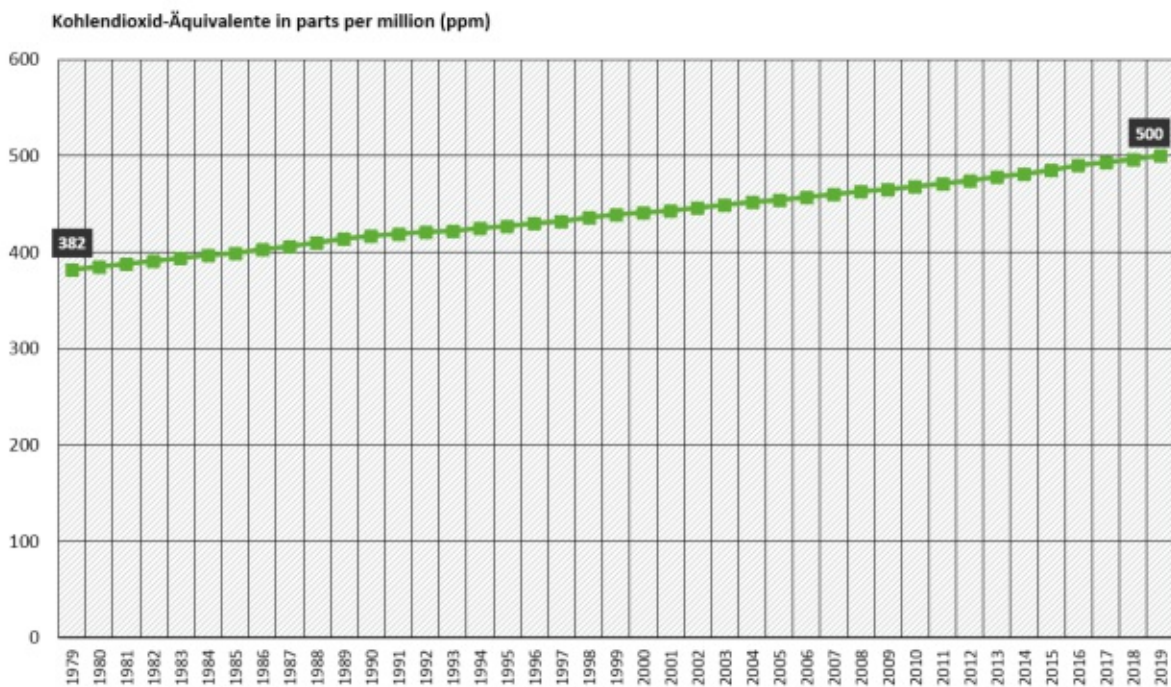


Abb. 2.3: Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre in ppm (Kohlendioxid, Methan, Lachgas, F-Gase) [47]

Kohlendioxid

Das Umweltbundesamt Deutschland [48] beschreibt Kohlendioxid (CO_2) als geruch- und farbloses Gas, das fast ausschließlich bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle zur Strom- und Wärmeerzeugung, für den Verkehr oder die industrielle Produktion entsteht. Kohlendioxid ist das mit Abstand bedeutendste Treibhausgas. Wie in Abb. 2.4 dargestellt, trägt CO_2 mit etwa 66,1 % vor Methan (16,4 %), Lachgas (6,4 %) und den halogenierten Treibhausgasen (mit insgesamt 11 %), den größten Anteil zur Klimaerwärmung bei [47].

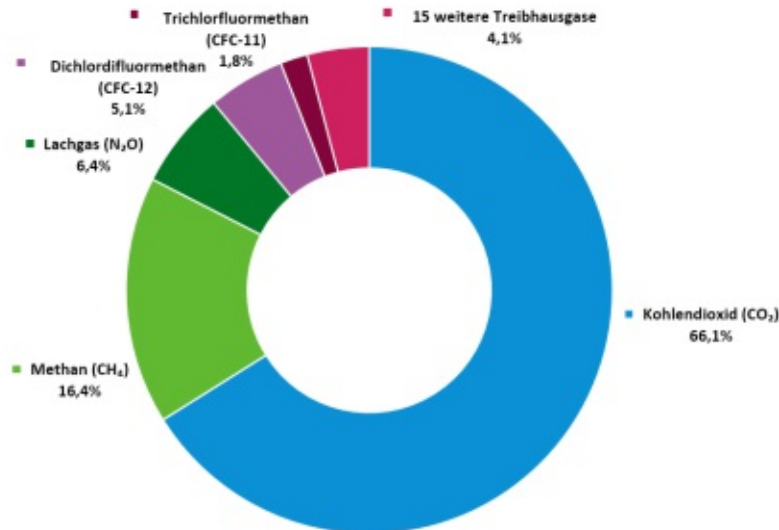


Abb. 2.4: Beitrag zum Treibhauseffekt [47]

Methan

Mit einer etwa 25-fachen Klimawirksamkeit im Vergleich zum Kohlendioxid zählt das ebenfalls geruch- und farblose Methan (CH_4) zu den wichtigsten anthropogenen Treibhausgasen. Das Umweltbundesamt Deutschland [52] nennt die Landwirtschaft als größten Methan-Emittenten. Das hochentzündliche Gas wird vor allem in der Land- und Forstwirtschaft produziert, insbesondere bei der Haltung von Rindern. Auch bei der Brennstoffgewinnung im Steinkohlenbergbau oder auf Abfalldeponien werden große Mengen Methan emittiert.

Lachgas (Distickstoffoxid)

Für den Ausstoß von Distickstoffoxid (N_2O) wird ebenfalls die Landwirtschaft als Hauptemittent genannt [51]. Das farblose, süßlich riechende Lachgas wird meist durch den verstärkten Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel (Kunstdünger) und die landwirtschaftliche Tierhaltung in die Atmosphäre emittiert. Es kommt zwar nur in geringen Mengen vor, dennoch ist es im Hinblick auf den anthropogenen Treibhauseffekt nicht zu vernachlässigen, da es in etwa eine 300-fache Klimawirksamkeit in Bezug auf Kohlendioxid aufweist.

F-Gase

Bei den sogenannten F-Gasen handelt es sich um fluorierte Treibhausgase. Dazu zählen unter anderem die vollhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), die teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), Schwefelhexafluorid (SF_6) und Stickstofftrifluorid (NF_3). Sie weisen sehr unterschiedliche Klimawirksamkeiten auf (100- bis 24 000-mal höher als Kohlendioxid) und sind im Gegensatz zu CO_2 zumeist kein unerwünschtes Nebenprodukt. Fluorierte Treibhausgase

werden vielmehr gezielt produziert und kommen beispielsweise als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlage zum Einsatz [49].

2.4 Treibhausgasemissionen in Österreich

2.4.1 Entwicklung der letzten Jahre

In den Klimaschutzberichten des österreichischen Umweltbundesamts werden jährlich die aktuellsten, qualitätsgeprüften Treibhausgasemissionen in Österreich publiziert – so auch im aktuellen Bericht aus dem Jahr 2020 [53]. Gemäß diesem ist seit dem Jahr 2005 zwar tendenziell ein Rückgang der Treibhausgasemissionen zu verzeichnen, die Gesamtemissionen lagen im Jahr 2018 mit 79,0 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent dennoch über den Emissionswerten von 1990 (78,5 Mio. Tonnen). Zuletzt konnte im Vergleich zum Jahr 2017 eine Reduzierung von 3,4 % verzeichnet werden, was vor allem auf den Produktionsstillstand eines großen Hochofens zurückzuführen ist. Neben den aktuellen Gesamtwerten sind in Abb. 2.5 die Treibhausgasemissionen nach dem Klimaschutzgesetz (KSG) sowie der danach definierte zu erreichende Zielpfad (jeweils ohne Emissionshandel (EH)) dargestellt. Trotz rückläufiger Werte der letzten beiden dokumentierten Jahre ist nach aktuellem Wissensstand auch im Jahr 2019 eine Überschreitung des Zielwerts wahrscheinlich.

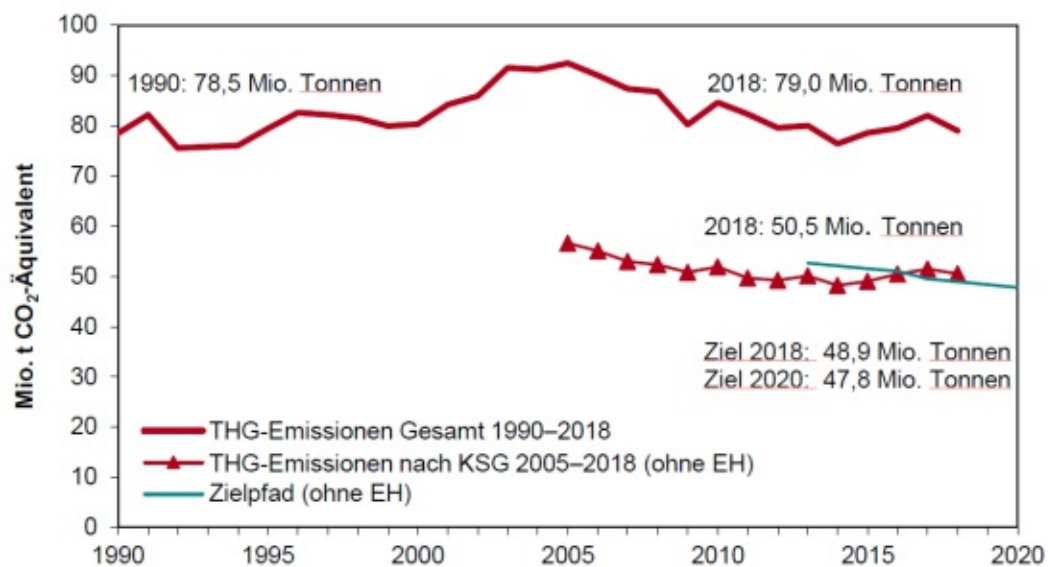


Abb. 2.5: Österreichische Treibhausgasemissionen und Zielpfad [53]

2.4.2 Anteile der einzelnen Treibhausgase an den Gesamtemissionen

Im Jahr 2018 nahm CO₂ mit 84,5 % den größten Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen in Österreich ein [53] – vor allem hervorgerufen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in den Sektoren Verkehr, Gebäude sowie Energie und Industrie (siehe Abb. 2.6). Seit 1990 haben die CO₂-Emissionen in Österreich um 7,4 % zugenommen.

Mit einem Anteil von 8,2 % an den Gesamtemissionen stellt Methan das zweitwichtigste Treibhausgas dar. Produziert wird es vorrangig auf Mülldeponien und bei Verdauungsprozessen in der Massentierhaltung. Die Methan-Emissionen konnten in Österreich seit 1990 um insgesamt 38,0 % gesenkt werden.

Die Lachgase-Emissionen sind seit 1990 ebenfalls gesunken und nehmen 2018 einen Anteil von 4,5 % an den Gesamtemissionen ein.

Einen enormen Emissionsanstieg (um 36,8 %) in Bezug auf das Referenzjahr 1990 konnte in der Gruppe der F-Gase erfasst werden. Insgesamt 2,9 % an den Gesamtemissionen 2018 beträgt der Anteil der fluorierten Treibhausgase, die vorrangig aus Kühltechnik- und Klimaanlage sowie der Industrie entstammen.

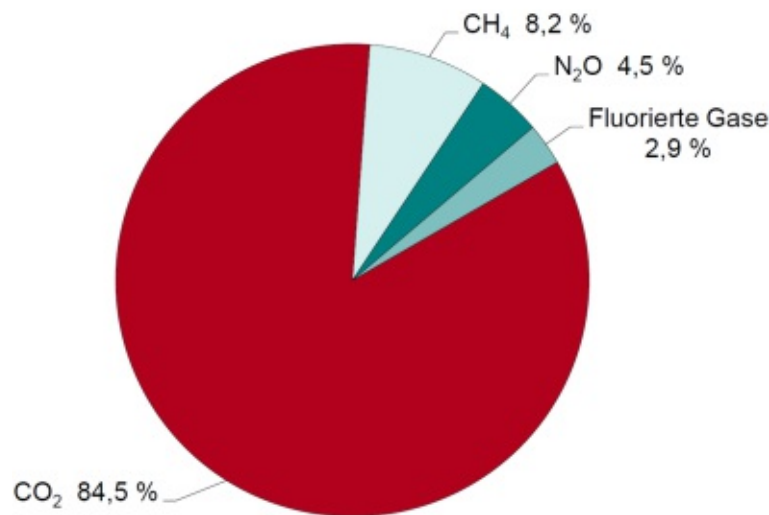


Abb. 2.6: Anteil der einzelnen Treibhausgase an den Gesamtemissionen 2018 [53]

2.4.3 Treibhausgase nach Sektoren

Lässt man den Emissionshandel unberücksichtigt, zählen im Jahr 2018 die Sektoren Verkehr (47,3 %), Landwirtschaft (16,2 %), Gebäude (15,6 %) sowie Energie und Industrie (11,6 %) zu den Hauptverursachern der Treibhausgasemissionen in Österreich [53]. In Anbetracht der letzten Jahre ist hervorzuheben, dass vor allem im Gebäudesektor die Emissionen – im Vergleich zum Jahr 2005 – gesenkt werden konnten. Die Werte lagen um 37,7 % niedriger, was insgesamt einem CO₂-Äquivalent von 4,8 Mio. Tonnen entspricht.

2.5 Anstieg der globalen CO₂-Konzentration

Im Jahr 2018 erreichte der globale CO₂-Ausstoß mit etwa 36,6 Mrd. Tonnen seinen bisherigen Maximalwert und ein künftiger Rückgang ist auch in den nächsten Jahrzehnten nicht zu erwarten [43]. Da das bedeutendste klimawirksame Gas Kohlendioxid mit einem Anteil von etwa 66,1 % den größten Beitrag zum Treibhauseffekt leistet, wird ihm in diesem Kapitel besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Die Treibhausgaskonzentration – und damit auch die Konzentration an Kohlendioxid – ist seit dem Beginn der Industrialisierung durch die Verbrennung großer Mengen fossiler Brennstoffe deutlich angestiegen. Ausgedrückt in ppm (parts per million) erreichte die atmosphärische CO₂-Konzentration im Jahr 2019 einen Wert von deutlich über 410 ppm. Im Vergleich dazu lag die Konzentration am Ende des 18. Jahrhunderts noch bei rund 280 ppm [53]. In Abb. 2.7 wird das globale Kohlenstoffbudget zwischen 1850 und 2018 verglichen. Die Grafik verdeutlicht den

Einfluss der jeweiligen Kategorien auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Die größte Konzentrationssteigerung verursachte demnach die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl und Gas), gefolgt von der Landnutzung (Entwaldung). Auffallend ist außerdem, dass auch die Baubranche mit der energieintensiven Zementindustrie Eingang in diese Aufstellung findet und einen nicht vernachlässigbaren Anteil an der Erhöhung der CO₂-Konzentration bildet. Es gibt aber auch Faktoren, die eine gegensätzliche Wirkung auf das Kohlenstoffbudget vorweisen – durch Land- und Meersenkungen wird z. B. ein Teil der CO₂-Emissionen wieder aufgenommen. Zu den wichtigsten Kategorien zählen die Wiederaufforstung, bei der CO₂ aus der Atmosphäre gebunden wird, oder die ozeanische Aufnahme, bei der Kohlenstoff im Meerwasser gelöst wird.

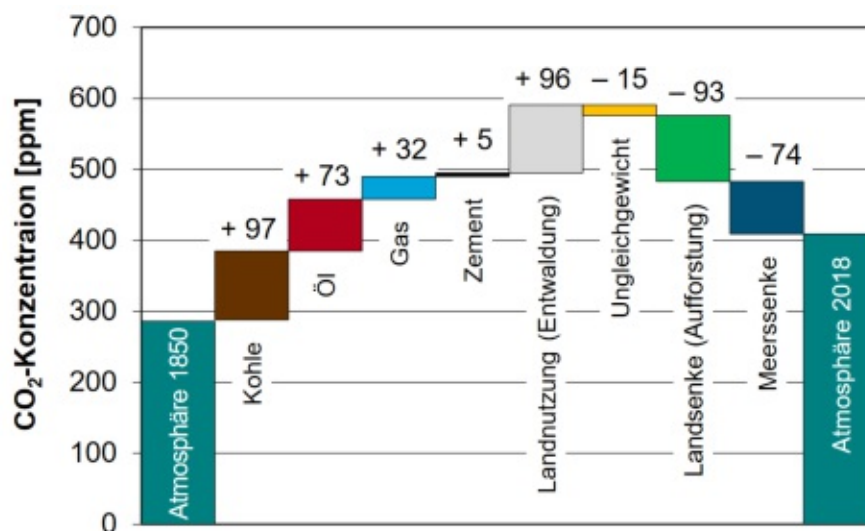


Abb. 2.7: Kumulative Beiträge zum globalen Kohlenstoffbudget von 1850 bis 2018 [53]

2.6 Beobachtete Klimaänderungen

Eine Veränderung des Klimas in den letzten Jahrzehnten ist nicht nur messbar, sondern vielerorts auch schon deutlich spürbar. Es findet eine Erwärmung der Atmosphäre und der gesamten Erdoberfläche statt, die globalen Schnee- und Eismassen sind stark zurückgegangen und gleichzeitig ist der Meeresspiegel angestiegen [17].

Änderung der globalen Temperatur

Seit 1880 hat sich die gemittelte Land- und Meeresoberflächentemperatur bis zum Jahr 2012 um etwa 0,85 °C erhöht. Außerdem war in den letzten acht Jahrhunderten keine 30-Jahres-Periode wärmer als jene zwischen 1983 und 2012, wie der Weltklimarat IPCC beschreibt [17]. Dieser Trend setzt sich in den Jahren darauf weiter fort – seit Beginn der Temperaturlaufzeichnungen im Jahr 1880 gehörten die Jahre 2014 bis 2018 zu den fünf wärmsten. Die globale Land- und Meerestemperatur ist seit 1880 im Durchschnitt um 0,07 °C pro Jahrzehnt gestiegen, seit 1981 ist diese Anstiegsrate mit 0,17 °C jedoch mehr als doppelt so hoch [28].

Änderung der Ozeane

In den Ozeanen ist eine Erwärmung vor allem in den ersten 75 m unterhalb der Meeresoberfläche bemerkbar. Die Temperatur dieser Schicht hat sich im Zeitraum zwischen 1971 und 2010 um etwa 0,44 °C erhöht und die Geschwindigkeit der Ozeanerwärmung nimmt immer stärker zu [17]. Da seit Beginn der Industrialisierung die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre gestiegen ist

(siehe Abschnitt 2.5), hat sich auch die aufgenommene Menge von CO₂ durch die Ozeane erhöht, was zu einer zunehmenden Versauerung der Meere führt. Der pH-Wert an der Meeresoberfläche hat sich seitdem um rund 0,1 verringert.

Schmelzen der Eismassen

Sowohl die Eisschilde in Grönland als auch die Gletscher rund um den Globus haben in den letzten Jahrzehnten einen deutlichen Rückgang der Eismassen zu verzeichnen, wodurch ein gleichzeitiges Ansteigen des Meeresspiegels folgt – und die Geschwindigkeit, in der dies passiert, nimmt von Jahrzehnt zu Jahrzehnt zu. Des Weiteren hat die Ausdehnung der Schneedecken der nördlichen Hemisphäre stark abgenommen. Durch den Anstieg der Oberflächentemperatur und die Abnahme der Schneebedeckung ist auch die Dicke der Permafrostschicht zurückgegangen.

Anstieg des Meeresspiegels

Im 20. Jahrhundert ist ein mittlerer globaler Anstieg des Meeresspiegels um 0,19 m zu verzeichnen, was in enger Verbindung mit dem Schmelzen der Eismassen steht. Durch die zunehmende Geschwindigkeit des Eisschmelzens der arktischen Eisschilde und des Gletschereises schreitet auch die Erhöhung des Meeresspiegels in den letzten Jahrzehnten immer stärker voran. Im Mittel stieg der Meeresspiegel zwischen 1993 und 2010 um rund 3,2 mm pro Jahr.

2.7 Auswirkungen der Klimaänderung

Da der Weltklimarat IPCC für das 21. Jahrhundert neben einer steigenden Erdoberflächentemperatur, eine sich erhöhende Ozeanversauerung, einen weiteren Rückgang von Schnee- und Eismassen und den Anstieg des Meeresspiegels prognostiziert [17], wird der Klimawandel zukünftig die bestehenden Risiken verstärken und neue Risiken für Mensch und Natur hervorrufen. Je stärker die Erderwärmung voranschreitet, desto wahrscheinlicher sind die schwerwiegenden und irreversiblen Auswirkungen für den Menschen, die Artenvielfalt und unser gesamtes Ökosystem. Ein zunehmendes Ausmaß an Erwärmung würde vor allem ein Risiko für die Existenzgrundlage der Zivilisation in Küstenzonen sowie eine Gefährdung der Ernährungssicherheit und der allgemeinen Sicherheit des Menschen bedeuten. Zusätzlich würde ein Aussterben vieler Pflanzen- und Tierarten drohen und der Nahrungsmittelanbau aufgrund der hohen Temperatur und Luftfeuchtigkeit regional eingeschränkt werden.

Der Weltklimarat IPCC zählt in seinem Synthesebericht zur Klimaänderung [17] folgende Schlüsselrisiken der Klimawandelfolgen auf, die nur durch eine Begrenzung der Geschwindigkeit und des Ausmaßes des Klimawandels eingedämmt werden können:

1. Durch Sturmfluten, den Anstieg des Meeresspiegels und Küstenüberschwemmungen folgen für den Menschen starke gesundheitliche Beeinträchtigungen und eine Zerstörung von Existenzgrundlagen. Davon betroffen sind vor allem niedrig gelegene Küstenregionen und kleine Inselstaaten. Das österreichische Umweltbundesamt [53] gibt zudem an, dass bei einer Erderwärmung von 2 °C rund 280 Mio. Menschen ihren Lebensraum in küstennahen Regionen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs verlieren. Auch viele Stadtbewohnerinnen und Stadtbewohner werden von regionalen Überschwemmungen sowie extremen Hitzewellen betroffen sein [17]. Ein besonderes Risiko stellt das für im Freien arbeitende Bevölkerungsgruppen dar.
2. Extremwetterereignisse werden zu einem Zusammenbruch von Infrastrukturnetzen und notwendigen Dienstleistungen wie Strom-, Wasser- und Gesundheitsversorgung führen. Besonders in exponierten Gebieten lebende Menschen werden verstärkt davon betroffen sein.

3. Durch die globale Erwärmung steigt das Risiko der Ernährungs- und Wasserunsicherheit. Infolge von starken Dürreperioden, Überschwemmungen und extremen Niederschlagsereignissen wären besonders ärmere städtische und ländliche Bevölkerungsgruppen benachteiligt. Ein unzureichender Zugang zu Trink- und Bewässerungswasser sowie Einbußen im landwirtschaftlichen Ertrag wären die unumgänglichen Folgen.
4. Zusätzlich droht der Verlust von Meeres- sowie Küstenökosystemen und deren Biodiversität. Insbesondere für vom Fischfang lebende Bevölkerungsgruppen wäre dies ein gravierender Verlust, da sich durch die Ausdehnung von Sauerstoffminimumzonen und die Ozeanversauerung der Lebensraum von Fischen und das Verhalten anderer mariner Organismen ändert. Auch terrestrische Ökosysteme wären von einem signifikanten Artensterben betroffen, da sich viele Pflanzen- und Tierarten dem schnell wandelnden Klima nicht anpassen können. Durch hohe Temperaturen, Dürre und Stürme erhöht sich außerdem das Risiko von Bränden und Krankheitsausbrüchen in der terrestrischen Biosphäre, was eine ansteigende Baumsterblichkeit bedeuten würde. In den Baumbeständen gespeicherter Kohlenstoff droht so an die Atmosphäre abgegeben zu werden.

2.8 Internationale Klimaverhandlungen

Zur Eindämmung der anthropogenen Treibhausgasemissionen und den damit verbundenen Störungen des Klimasystems finden seit dem Jahr 1992 große internationale Konferenzen statt, auf denen Umweltfragen in globalen Diskussionsrunden thematisiert werden [53]. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die wichtigsten Klimaverhandlungen der letzten Jahrzehnte und deren Ergebnisse.

Klimarahmenkonvention

Im Jahr 1992 beschlossen die Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) mit der Klimarahmenkonvention zum ersten Mal ein globales Klimaschutzabkommen [53]. Dabei wurden internationale Ziele definiert, die die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre begrenzen sollen. Damit wollte man den anthropogenen Einfluss auf das Klima verringern und die globale Erwärmung verlangsamen. Bis heute haben insgesamt 197 Vertragsstaaten, die in einem jährlichen Zyklus in Konferenzen zusammentreffen, die Klimarahmenkonvention ratifiziert.

Kyoto-Protokoll

Beim dritten Zusammentreffen der Vereinten Nationen im Jahr 1997 wurde in Japan das Kyoto-Protokoll beschlossen [53]. Darin verpflichteten sich die teilnehmenden Industriestaaten erstmals, ihre Treibhausgasemissionen in einer ersten Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012 zu reduzieren und Vorkehrungen gegen den Klimawandel zu treffen. Die EU-Staaten haben sich zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 8 % gegenüber dem Bezugsjahr 1990 verpflichtet, Österreich übernahm sogar eine Minderungsverpflichtung von 13 %.

Im Dezember 2012 einigten sich die teilnehmenden Länder zu einer zweiten Verpflichtungsperiode, die bis Ende 2020 dauern soll. Im sogenannten „Doha Amendment“ wurde eine weitere Reduktion der Treibhausgasemission als Fortsetzung des Kyoto-Protokolls beschlossen.

Der größte Schwachpunkt des Kyoto-Protokolls ist die Vertragsbasis mit Industrieländern. Für Schwellen- und Entwicklungsländer, die im letzten Jahrzehnt den größten Zuwachs an Treibhausgasemissionen aufwiesen, waren im Kyoto-Protokoll keine Ziele zur Reduzierung der Emissionen definiert. Aus diesem Grund wurde ein neues Klimaschutzabkommen angestrebt, das für die Zeit nach dem Kyoto-Protokoll gelten soll und alle Staaten zu Klimaschutzmaßnahmen verpflichten soll.

Pariser Übereinkommen

Mit dem Pariser Übereinkommen aus dem Jahr 2015 wurde ein neues globales und umfassendes Klimaschutzabkommen beschlossen, mit dem erstmals eine angestrebte maximale Temperaturerhöhung definiert wurde. Die globale Erwärmung sollte demnach maximal $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – im Vergleich zur vorindustriellen Zeit – betragen, wenn möglich sogar unter $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dazu sollte zum einen der globale Emissionshöchststand möglichst rasch erreicht werden, um anschließend die Netto-Emissionen auf null zu setzen. Sobald dieser Zustand erreicht ist, können alle erzeugten Emissionen durch Land- und Meersenkungen kompensiert werden, wodurch die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre langfristig konstant bleibt. Um die Klimaerwärmung in Zaum zu halten, wird die Erfüllung dieses Ziels bis zum Jahr 2050 angestrebt.

2.9 Der globale Einfluss des Gebäudesektors

Nach dem United Nations Environment Programme (2020) [54] waren im Jahr 2019 etwa 35 % des globalen Endenergieverbrauchs sowie 38 % der gesamten energiebezogenen CO_2 -Emissionen dem Gebäudesektor zuzuordnen. Gemäß Chalmers [35], der in seiner Publikation den Fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) für den Bausektor zusammengefasst hat, zählen zu den Hauptverursachern vor allem private Haushalte und Dienstleistungsgebäude wie Hotelanlagen, Bürobauten oder Krankenhäuser. Der größte Teil der verursachten Emissionen stammt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zum Heizen und für die Warmwasseraufbereitung. Zum Kühlen und für den Betrieb von Haushaltsgeräten wird hingegen meist Strom verwendet.

Aufgrund der sich verbessernden Wohnqualität in Entwicklungs- und Schwellenländern könnte sich der Energieverbrauch und die Emission von Treibhausgasen in diesem Sektor in den kommenden Jahrzehnten sogar noch verdoppeln oder verdreifachen, wenn keine zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen getroffen werden. Andererseits wäre es durch geeignete und gezielt eingesetzte Gegenmaßnahmen auch möglich, den zukünftigen Mehrbedarf an Energie im Gebäudesektor einzubremsen. Zu diesen Maßnahmen zählt Chalmers [35] zum Beispiel global einen erhöhten Zugang zu Elektrizität und sauberer Energie zu schaffen oder die Nutzung von energieeffizienten Technologien zu etablieren.

Durch energieeffizienzsteigernde Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden in Industrie- und Schwellenländern als auch durch entscheidende politische Schritte in den Entwicklungsländern können ebenfalls große Energieeinsparungen ermöglicht werden. Ein ökologisch wirksames und zugleich kostengünstiges Instrument stellen hierbei Bauvorschriften und Gerätenormen dar. Vor allem eine weitere Verschärfung der Durchsetzung dieser Normungen sowie eine Ausweitung auf mehrere Bereiche des Bauwesens können einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der gesetzten Klimaziele darstellen.

Chalmers [35] beschreibt aber auch die zahlreichen Folgen für Gebäude, die der Klimawandel mit sich bringen wird. Extreme Niederschläge, auftauende Permafrostböden, die steigende Anzahl an Waldbränden oder schwerere Stürme und Hochwasserereignisse zählen zu den größten Gefahren, die die aktuelle Temperaturerhöhung mit sich bringt. Auch die Baubranche wäre durch vermehrte Bauverzögerungen und eine steigende Anzahl an Aufräum- und Reparaturarbeiten aufgrund der künftigen Klimasituation direkt betroffen.

Kapitel 3

Nachhaltigkeit

3.1 Nachhaltiges Bauen

Da dem Gebäudesektor weltweit etwa ein Drittel des Endenergieverbrauchs und ca. 38 % der CO₂-Emissionen zuzuschreiben sind, ist bereits bei der Planung eines Gebäudes auf eine nachhaltige Herstellung, einen energieeffizienten Betrieb und geeignete Rückbau- bzw. Recyclingmöglichkeiten zu achten [35]. Dadurch können schon in frühen Projektphasen Schwerpunkte in Themenbereichen der Ressourcen- und Energieschonung gesetzt werden.

Gerade wegen dem hohen Energieverbrauch und den beachtlichen Treibhausgasemissionen sind im Gebäudesektor auch große Einsparungspotentiale vorhanden. Durch energieeffizienzsteigernde Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden in Industrie- und Schwellenländern als auch durch entscheidende politische Schritte in den Entwicklungsländern können große Energieeinsparungen ermöglicht werden. Ein ökologisch wirksames und zugleich kostengünstiges Instrument stellen hierbei Bauvorschriften und Gerätenormen dar. Vor allem eine weitere Verschärfung der Durchsetzung dieser Normungen sowie eine Ausweitung auf mehrere Bereiche des Bauwesens können einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der gesetzten Klimaziele darstellen.

Nach El khouli, John und Zeumer [14] ist anzunehmen, dass künftig alle Neubauten in Mitteleuropa im Laufe ihres Lebens nur noch so viel Energie für den Betrieb verbrauchen, wie für die Herstellung gebraucht wird. Ein sinnvoller und nachhaltiger Umgang mit der Ressource „Baustoff“ wird also immer wichtiger. Die nachfolgenden Abschnitte widmen sich demnach dem nachhaltigen Bauen und den Maßnahmen, die damit in Verbindung gebracht werden.

Im Leitfaden für nachhaltiges Bauen definiert das deutsche Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) [2] die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit. Ökologie, Ökonomie und sozialkulturelle Aspekte sollen gleichermaßen berücksichtigt und verbessert werden, um eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten. Da diese drei Säulen stark voneinander abhängig sind und einander in hohem Maße beeinflussen, sollte immer eine ganzheitliche und übergreifende Betrachtung angestrebt werden. Aufgrund der unterschätzten Wirkung, die der ökologischen Dimension heutzutage noch oft zugesprochen wird, widmet sich diese Arbeit vor allem der Säule der Ökologie, um das Bewusstsein für eine gleichbehandelnde Bewertung zu stärken.

3.1.1 Ökologische Nachhaltigkeit

Die primären Ziele zur Verbesserung der ökologischen Qualität stellen gemäß dem (BMI) [2] der Schutz des Ökosystems und die Schonung von natürlichen Ressourcen dar. Der Mensch greift durch die Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung von Gebäuden tief in das bestehende Ökosystem ein [14]. Im Laufe eines Gebäudelebenszyklus werden beträchtliche Mengen an Energie und natürlichen Ressourcen verbraucht und es entstehen gleichzeitig hohe Abgasemissionen sowie erhebliche Massen an Müll. Deshalb wird in der Bauökologie versucht, neben den gebäudebezogenen Umweltbelastungen auch den Ressourcen- und Flächenverbrauch darzustellen. Dies gelingt durch eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Materialien, Bauteilen und Bauwerken

während der Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase. Zusätzlich sollen durch den Einsatz neuer, umweltverträglicherer Baumaterialien und eine optimierte Auswahl der Energiequellen sowohl der Ressourcen- als auch der Energieverbrauch reduziert und somit die Umweltbelastungen des Bausektors möglichst gering gehalten werden [2].

Um die ökologische Wirkung eines Gebäudes beschreiben und deren Umsetzung bemessen zu können, wurde die Methode der Ökobilanzierungsberechnung entwickelt. Mit dieser ist es möglich, eine objektive und global ausgerichtete Einschätzung der Umweltwirkung von Bauwerken und Bauteilen darzustellen. Bevor auf diese Bewertungsmethode genauer eingegangen wird, liefern die nächsten Abschnitte allgemeine Ansätze für nachhaltiges Bauen und eine Darstellung der Entwicklung nachhaltig orientierter Zertifizierungssysteme im europäischen Raum.

3.1.2 Der Nachhaltigkeitsgedanke im Bauwesen

Ebenso alt wie das Bauwesen selbst ist gemäß El khouli, John und Zeumer [14] die Auseinandersetzung mit der Frage nach dem richtigen Material. Dabei waren die Möglichkeiten der zur Verfügung stehenden Baustoffe bis zum Beginn der industriellen Revolution stark eingeschränkt. Durch innovative, maschinelle Fertigungstechniken und effizientere Transportwege hat das Industriezeitalter das Bauwesen bedeutend verändert und befreite somit von einer überwiegend regional geprägten Materialwahl. Dadurch wurde auch die Neuentwicklung von Baustoffen stark angeregt, sodass in den letzten Jahrzehnten vermutlich mehr neue Produkte entwickelt wurden als in der gesamten Geschichte der Materialkunde zuvor.

Nachhaltige Baustoffe spielen nach El khouli, John und Zeumer [14] seit Ende der 70er-Jahre in der Baustoffentwicklung eine immer größer werdende Rolle. Der Fokus liegt seitdem vermehrt wieder bei regionalen Produkten, der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, Materialien mit geringem Primärenergieinhalt und recycelbaren Werkstoffen. Strengere gesetzliche Vorgaben sorgen zudem für einen immer geringer werdenden Energieverbrauch in den Bereichen Heizung, Kühlung, Belüftung und Beleuchtung. Umso stärker drängt sich in der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Gebäuden auch die Frage nach einer nachhaltigen und energieeffizienten Herstellung und Nachnutzung von Baumaterialien – und den Gebäuden selbst – auf.

3.1.3 Nachhaltige Planung

Gangoly, Holzer und Maydl [15] nennen mit der Suffizienz, Effizienz und Konsistenz drei Hauptstrategien für eine nachhaltige Planung im Bauwesen. Mit dem Suffizienzansatz gilt es herauszufinden, welche Bedarfsansprüche der Mensch an ein Bauwerk hat. Eine grundlegende Hinterfragung des tatsächlichen Raumbedarfs und ein maßvoller Umgang mit Material und Fläche sollen schon in der Vorprojektphase eine Optimierung des Ressourcen- und Energieverbrauchs gewährleisten. Gleichzeitig soll mit einer Effizienzsteigerung von Gebäuden eine technische und funktionale Leistungssteigerung erreicht werden – zum Beispiel durch eine Erhöhung der Flächeneffizienz auf Gebäudeebene oder der Konstruktionseffizienz auf Bauteilebene. Als dritte Strategie wird jene der Konsistenz genannt. Der vermehrte Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und erneuerbarer Energien steht hierbei an zentraler Stelle.

Um ein Gebäude nachhaltig zu planen, bedarf es keiner besonderen Vorkehrungen. Entscheidend ist, dass man schon in der frühen Planungsphase Schritte zur ökologischen Realisierung des Projekts setzt, da bestimmte Entscheidungen zu einem späteren Zeitpunkt mit höheren Kosten verbunden sind. Ein Mittel, das bei der Umsetzung nachhaltiger Planung und Ausführung eine hohe Wirksamkeit erzielt, sind die sogenannten Zertifizierungskriterien. Diese dienen für alle Projektbeteiligten in allen Projektstadien als entscheidendes Kommunikationsinstrument für die Durchsetzung nachhaltiger Strategien. Das nächste Kapitel liefert deshalb einen Überblick

über die Entwicklung und den Inhalt dieser Zertifizierungssysteme im europäischen sowie im österreichischen Raum.

3.1.4 Entwicklungen in der Nachhaltigkeitsbetrachtung

Nach Pech et al. [36] besteht im Bausektor ein immer größer werdendes Interesse an der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden. Zu diesem Zweck wurden in den letzten Jahrzehnten Gebäudezertifizierungssysteme entwickelt, die die Qualität eines Gebäudes in ökologischer Hinsicht sichtbar und vergleichbar machen. Diese Systeme werden im Hinblick auf die verwendeten Methoden und Bewertungsparameter laufend überarbeitet und auf den neuesten Stand der Technik gebracht.

3.1.4.1 Internationale Gebäudebewertungssysteme

Das älteste noch bestehende Zertifizierungssystem ist das in Großbritannien entwickelte BREEAM aus dem Jahr 1990. Anhand von neun Parametern (Energie, Wasser, Material, Transport, Abfall, Umwelt, Gesundheit und Management) wurde erstmals eine Bewertung von Gebäuden und Gebäudeteilen bezüglich ihrer Nachhaltigkeitswirkung ermöglicht. Eine verpflichtende Berechnung der Ökobilanz oder der Lebenszykluskosten wurde in diesem System noch nicht integriert.

Mit LEED wurde im Jahr 1998 ein punkteorientiertes Bewertungssystem mit einem Schwerpunkt auf ökologische und energetische Parameter entwickelt. Zu den Bewertungsgruppen zählen unter anderem Wassereffizienz (WE), Energie und Atmosphäre (EA) oder Materialien und Ressourcen (MR). Eine Ökobilanz- oder Lebenszykluskostenberechnung sind nicht Teil dieses Systems.

In Großbritannien erschien im Jahr 2006 mit dem „Code for Sustainable Homes“ ein nationaler Standard für nachhaltiges Bauen. Dieser Kodex legte einen einheitlichen Rahmen fest, mit dem die Bauindustrie nach höheren Umweltstandards entwerfen und bauen konnte. Durch die Einführung von neun Bewertungskategorien (z. B. Energie und CO₂-Emissionen, Wasser, Materialien, Abfall, Ökologie etc.) wird mit dieser Methode ein Gebäude in Bezug auf seine Nachhaltigkeit bewertet [14].

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) hat im Jahr 2007 ein Zertifizierungssystem entwickelt, das die ökologische, die ökonomische und die technische Qualität eines Gebäudes zur Beurteilung der Nachhaltigkeit integriert [36]. Es werden aber auch die Prozess- und Standortqualität sowie soziokulturelle und funktionale Qualitäten in der Bewertung berücksichtigt. Das Gebäudezertifizierungssystem des DGNB ist das erste System, das den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet und gleichzeitig eine Berechnung der Ökobilanz (LCA) und der Lebenszykluskosten (LCC) verpflichtend vorsieht. Zusammen mit einer Bewertungsskala für den Schadstoffgehalt von baulichen Stoffen konnte erstmals die Umweltwirkung von Gebäuden auch in Zahlen ausgedrückt werden.

3.1.4.2 Österreichische Gebäudebewertungssysteme

Angelehnt an das Bewertungssystem der DGNB hat die Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI) das deutsche System adaptiert und an die österreichischen Normvorgaben angepasst. Die Durchführung der Beurteilung entspricht dabei großteils dem Konzept der DGNB.

Des Weiteren hat die Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (ÖGNB) in Österreich das Zertifizierungssystem TQB (Total Quality Building) entwickelt. Dieses vergibt Punkte an das jeweilige Bewertungskriterium (z. B. Standort und Ausstattung, Energie und Versorgung, Baustoffe und Ressourceneffizienz etc.) und stellt so die Qualität eines Gebäudes dar. Ein

wesentlicher Unterschied im Vergleich zum ÖGNI/DGNB-System liegt in der Ermittlung der ökologischen Qualität – diese erfolgt nicht im Rahmen einer klassischen Ökobilanz, sondern mit Hilfe der sogenannten OI3-Bewertung durch bestimmte Umweltindikatoren (PENRT, GWP, AP). Aufgrund der einfachen Handhabung und der quantitativen Bewertungsmöglichkeit von Baustoffen, Bauteilen und gesamten Gebäuden wird die Ermittlung dieses Öko-Indikators in einem eigenen Abschnitt behandelt (siehe Abschnitt 3.2.7).

Ähnliche Bewertungskategorien wie das TQB-System beinhaltet das in Österreich am meisten verwendete Zertifizierungssystem „klima:aktiv“. Aufgebaut nach einem 1000-Punkte-System werden neben der Planungs- und Ausführungsqualität die Energie und Versorgung, die verwendeten Baustoffe sowie der generelle Komfort (inklusive Raumluftqualität) betrachtet. Verstärkten Fokus legt dieses System jedoch auf das Thema Energieeffizienz. So fließt die Kategorie Energie und Versorgung mit einem Anteil von 60 % in die Gesamtbewertung ein und bildet somit die zentrale Rolle dieses Bewertungssystems, wohingegen die anderen Kategorien jeweils mit einem Anteil zwischen 12–15 % berücksichtigt werden.

El khouli, John und Zeumer [14] prognostizieren, dass zukünftig nicht mehr der Betrieb, sondern die Herstellung, Instandhaltung und das Recycling den Großteil der Umweltwirkung eines Gebäudes darstellen wird. Aus diesem Grund stellt eine Einbindung dieser Bewertungssysteme – im Speziellen die Darstellung der Ökobilanzierung mit ihrer ganzheitlichen Betrachtungsweise – ein überaus sinnvolles Werkzeug im Rahmen einer nachhaltigen Gebäudeplanung dar.

3.2 Die Ökobilanzierung

König et al. [20, S. 13] beschreiben die Lebenszyklusanalyse im Sinn der Ökobilanzierung folgendermaßen:

Unter Ökobilanz (life cycle assessment, LCA) versteht man eine systematische Analyse der Ressourcenentnahme aus der Natur und der Umweltwirkungen von Produkten während ihres gesamten Lebenszyklus (von der Wiege bis zur Bahre).

Es werden mit dieser Berechnung also sowohl der Materialinput (Rohstoffe und Energie) als auch der Materialoutput (Abfall- und Emissionsmengen) eines Produkts berücksichtigt – von der Rohstoffgewinnung- und Erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis hin zur Nutzung und dem Rückbau. Zeitgleich werden die umweltbeeinflussenden Faktoren wie Wasser-, Boden- und Ressourcenverbrauch oder auch die Luftemissionen erfasst und aufsummiert. Diese Umweltbelastungen werden anschließend mit potentiellen Umweltwirkungen verknüpft, wodurch die Gesamtauswirkung auf das Ökosystem abgeschätzt und transparent dargestellt werden kann.

Im Bauwesen hat sich die Ökobilanzierung in den letzten Jahren ebenfalls als effektive Methode zur Bewertung umweltbezogener Qualitätsmerkmale von Gebäuden und Bauteilen bewährt [14]. Dies gilt sowohl für Neubauten als auch Bestandsgebäude – über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks. Durch die Ermittlung aller Material- und Energieflüsse eines Bauteils (oder eines gesamten Gebäudes) kann einem einzelnen Produkt eine potentielle Umweltwirkung zugewiesen werden. Eine anschließende Bewertung ermöglicht die gewünschte ökologische Vergleichbarkeit von Baustoffen, Bauteilen und ganzen Gebäudekomplexen. Für Fachplaner und Architekten dient die Ökobilanzierung also als wichtiges Hilfsmittel bei der Bestimmung des Materials für ein spezielles Bauvorhaben. Schon in den ersten Planungsphasen können somit mögliche Optimierungsansätze im Gebäudeentwurf gefunden werden.

Aufgrund des steigenden Interesses und der immer größer werdenden Bedeutung des Umweltschutzes wurde die Methodik zur Erstellung einer Ökobilanzierung in der DIN EN ISO 14040 [11]

festgelegt, welche die Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanz beschreibt. Diese Norm verdeutlicht, dass die einzelnen Phasen der Ökobilanz stark voneinander abhängig sind und die Erstellung einen iterativen Prozess darstellen soll. Die allgemeinen Anforderungen und eine Anleitung, wie die Ökobilanzberechnung durchgeführt werden soll, sind in der DIN EN ISO 14044 [12] verankert. Zusätzlich liefert die DIN EN 15978 [9] Aspekte speziell zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Diese Norm gilt sowohl für neue als auch bereits bestehende Bauwerke sowie für Modernisierungen. Die vier Phasen, die zur Ermittlung einer Ökobilanz notwendig sind, werden gemäß DIN EN ISO 14040 [11] wie folgt beschrieben:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die wichtigsten Schritte einer Ökobilanz sind in Abb. 3.1 dargestellt und werden im Folgenden noch näher erläutert.

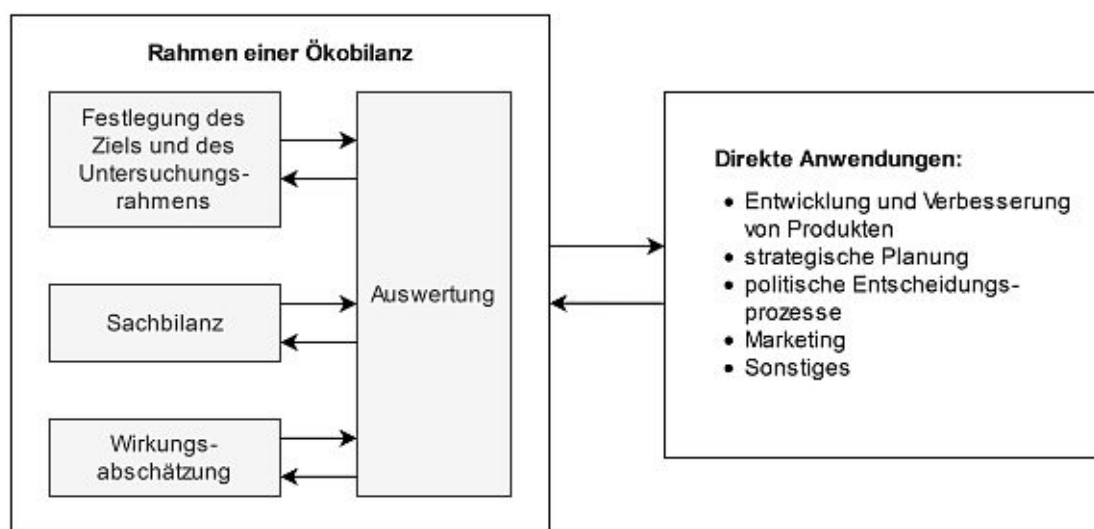


Abb. 3.1: Phasen einer Ökobilanz [11]

3.2.1 Festlegung eines Untersuchungsziels

Der erste Schritt bei der Erstellung einer Ökobilanz beinhaltet nach El khouli, John und Zeumer [14] die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Es gilt, bestimmte Fragestellungen zu finden, die anhand der Ökobilanzierung beantwortet werden sollen und die Gründe für die Durchführung der Studie klarzustellen. Die Frage nach der richtigen Baustoff- oder Bauteilwahl und den dazugehörigen Umweltwirkungen für einen optimierten Gebäudeentwurf können beispielsweise grundlegende Aufgabestellungen darstellen. Somit kann ein mögliches Ziel das Auffinden jener Bauteile mit der größten negativen Umweltwirkung sein, um an dieser Stelle einen Optimierungsprozess anzusetzen. Als nächstes folgt die Definition des Ablaufes der Ökobilanzberechnung. Hierbei sollen die Systemgrenzen abgesteckt, eine Allokationsmethode gewählt und der Bezug zu einer funktionellen Einheit definiert werden. Des Weiteren müssen in diesem Schritt

passende Datenquellen gefunden, die gewünschten Wirkungskategorien ermittelt und weitere Annahmen über die Modellierung festgelegt werden. Da all diese Parameter großen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz haben, ist vor allem auf eine konsistente Betrachtungsweise aller zu untersuchenden Gebäudeteile zu achten.

3.2.2 Sachbilanz

Im zweiten Schritt, der Sachbilanzphase (Life Cycle Inventory, LCI), werden alle erforderlichen Daten erhoben und in Bezug auf die in der ersten Prozessphase festgelegte funktionelle Einheit bezogen. Dies beinhaltet eine Massenermittlung aller in einem Lebenszyklus eines Produkts entstandenen Stoff- und Energieressourcen – sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite. Zuvor definierte Datenbanken dienen als Quelle der für die Bilanzierung notwendigen Erhebung der Basisprozesse (z. B. Rohstoffgewinnung, Abfallbehandlung, Energiebereitstellung oder Transport). Pech et al. [36] nennen mit der European Reference Life Cycle Database, den österreichischen IBO-Ökokennzahlen und der deutschen ÖKOBAUDAT drei Datensätze, die üblicherweise bei einer Ökobilanzierung zum Einsatz kommen. Das Ergebnis der Sachbilanz ist eine Auflistung von Input- und Outputflüssen inklusive den dazugehörigen Umweltbelastungen. Diese Datensätze müssen in einem nächsten Schritt (der Wirkungsabschätzung) mit der potentiellen Umweltauswirkung in Zusammenhang gebracht werden.

3.2.3 Wirkungsabschätzung

Laut Möltner [25] liegt das zentrale Ziel der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) bei der Herstellung von Zusammenhängen zwischen den zuvor ermittelten Sachbilanzdaten und den konkreten Auswirkungen auf die Umwelt. Hierfür müssen zuerst geeignete Wirkungskategorien ausgewählt werden, um ihnen anschließend die erhaltenen Sachbilanzergebnisse zuzuordnen zu können. Im letzten Schritt der Wirkungsabschätzung werden die Wirkungsindikatoren durch entsprechende Gewichtung berechnet.

Abb. 3.2 zeigt die Korrelation zwischen der Sachbilanzphase und der Phase der Wirkungsabschätzung, wobei Möltner [25] nur auf einige wenige beispielhafte Wirkungskategorien verweist.

Wirkungskategorien beschreiben verschiedene Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt, wie den Ressourcenverbrauch, die menschliche Gesundheit oder die ökologischen Effekte. Nach der Bestimmung geeigneter Wirkungskategorien, welche stets in Anbetracht des festgelegten Ziels gewählt werden sollten, folgen die Schritte der Klassifizierung und Charakterisierung [25]. Die Klassifizierung dient dazu, die Verbindung zwischen den Sachbilanzdaten und den Wirkungskategorien herzustellen. So werden beispielsweise die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) der Wirkungskategorie „Klimaveränderung“ zugewiesen. Sollten Daten aus der Sachbilanz zwei (oder mehreren) Kategorien zugeordnet werden können, ist dies unter der Voraussetzung des Bekanntseins der jeweiligen Umweltwirkung ebenfalls möglich. Als Beispiel hierfür können Stickoxide (NO_x) genannt werden, die sowohl für eine Versauerung und Überdüngung des Bodens sorgen als auch das Ozonbildungspotential steigern.

Im abschließenden Schritt der Charakterisierung werden die Umweltauswirkungen aller Wirkungskategorien ermittelt und mit Hilfe von jeweils nur einer quantifizierbaren Größe dargestellt. Hierfür werden sogenannte Wirkungsindikatoren (z. B. „Auswirkungen auf die Klimaveränderung“) berechnet. Zu diesem Zweck werden die einzelnen Sachbilanzwerte mit ihren jeweiligen Charakterisierungsfaktoren, die die Wirkung einer bestimmten Substanz in Bezug zu einer Referenzeinheit darstellen, multipliziert. Ein Aufsummieren all dieser Werte liefert schlussendlich das Ergebnis, welches als Wirkungsindikator bezeichnet wird. Zu den wichtigsten Kategorien im Gebäudesektor zählen folgende:

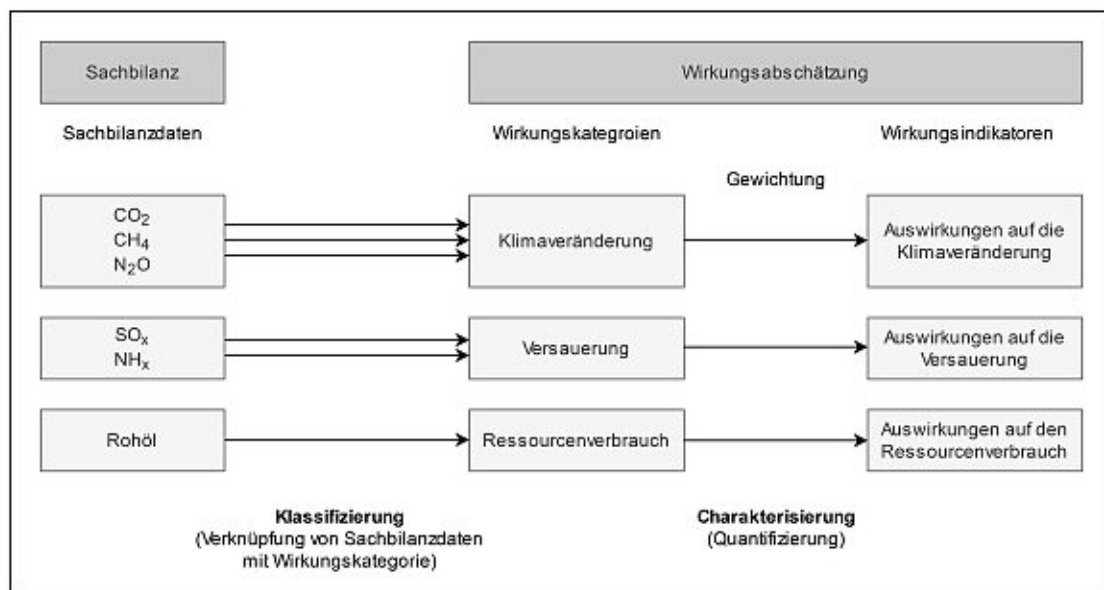


Abb. 3.2: Zusammenhang zwischen Sachbilanz und Wirkungsabschätzung [25]

Primärenergiegehalt erneuerbar (PERT) und nicht erneuerbar (PENRT)

Der zur Herstellung eines Produkts (oder eines Bauteils) notwendige Energieverbrauch wird mit dem sogenannten Primärenergiegehalt (PE) beschrieben. Hierbei wird zwischen erneuerbaren (PER) und nicht erneuerbaren (PENR) Primärenergieträgern differenziert. Zu den erneuerbaren Energieträgern zählen neben Sonnenenergie auch Biomasse, Wasserkraft, Windenergie und Erdwärme. Da sie nur begrenzt zur Verfügung stehen und sich auch nicht regenerieren, zählen fossile Energieträger und Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas, Braun- und Steinkohle zu den nicht erneuerbaren Energieträgern. Der PENRT und der PERT beinhalten neben dem energetischen auch den stofflichen Ressourcenverbrauch.

Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP)

Die Wirkungskategorie „Klimawandel“ beschreibt mit dem Treibhauspotential alle atmosphärischen Veränderungen, die durch die Emission von Treibhausgasen (vor allem CO₂, CH₄, N₂O sowie die F-Gase) entstehen. Das GWP dient als Maßzahl für den relativen Beitrag eines Treibhausgases zur globalen Erwärmung. Da sich die verschiedenen Gase in Bezug auf ihre Umweltwirkung stark unterscheiden, wird CO₂ als Referenzeinheit herangezogen. So wird beispielsweise die Menge an angefallenem CH₄ noch mit einem Charakterisierungsfaktor von 25 multipliziert, da Methan auch eine etwa 25-mal stärkere Treibhauswirkung – bezogen auf Kohlendioxid – aufweist. Nach König et al. [20] spielt auch die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre bei der Ökobilanzberechnung eine Rolle. Im Bauwesen liegt der Betrachtungszeitraum in der Regel bei 100 Jahren (GWP 100). Das Ergebnis ist eine in Kilogramm CO₂-Äquivalente angegebener Wert, der sich aus den einzelnen Treibhausgasen, die mit ihrem jeweiligen Charakterisierungsfaktor multipliziert werden, zusammensetzt. Das Treibhauspotential gilt als einer der wichtigsten Indikatoren für die Umweltwirkung eines Produkts.

Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP)

Trotz der sehr geringen Konzentration in der Troposphäre ist Ozon (O₃) äußerst wichtig für Mensch und Natur [14]. Durch die Ozonschicht wird der Großteil der schädlichen UV-Sonnenstrahlung absorbiert. Somit schützt sie den Menschen vor einer Vielzahl von Haut- und Augenerkrankungen.

Die Emission von Treibhausgasen, insbesondere von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und Stickoxiden (NO_x), führt zu einer Zerstörung der Ozonschicht und damit zu einem Verlust ihrer Schutzwirkung. Als Indikator dieses Zerstörungsprozesses dient das sogenannte Ozonabbaupotential, das ebenso wie das Treibhauspotential auf eine Referenzeinheit bezogen berechnet wird. Als Bezugsgröße dient hierbei Trichlorfluormethan (CFC-11).

Photochemisches Ozonbildungspotential (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)

Während ein zu geringer Gehalt an Ozon in der Atmosphäre umweltschädigend wirkt (siehe Ozonabbaupotential), kann ein zu hoher Ozongehalt in Bodennähe eine humantoxische Wirkung haben. In der unteren Atmosphäre entstehen aus Stickoxiden oder Kohlenwasserstoffen in Verbindung mit UV-Strahlung aggressive Photooxidantien, die sowohl Atmungsorgane angreifen als auch Schädigungen an Pflanzen hervorrufen. Das photochemische Ozonbildungspotential bezieht sich auf die Referenzeinheit Ethen (C_2H_4 -Äquivalente).

Versauerungspotential (Acidification Potential, AP)

Die Umwandlung von Schwefel- und Stickstoffverbindungen aus anthropogen verursachten Emissionen zu Schwefel- bzw. Salpetersäure verursacht eine Verringerung des pH-Wertes von Regenwasser und Nebel. Dies führt anschließend zu einer Versauerung von Böden und Gewässern. Schäden an der Vegetation (z. B. Waldschäden), Nährstoffauswaschung aus dem Erdreich und Schäden an Bauwerken und Baustoffen zählen zu den gravierendsten Folgen der Versauerung. Maß für diese Umweltwirkung im Rahmen der Ökobilanzierung ist das Versauerungspotential, das in SO_2 -Äquivalenten angegeben wird.

Eutrophierungspotential (Eutrophication Potential, EP)

Von einer Eutrophierung bzw. Überdüngung spricht man, wenn Bäche, Flüsse und Seen mit Nährstoffen wie Phosphor- und Stickstoffverbindungen überbelastet werden [20]. Dieser Nährstoffüberschuss wird unter anderem durch Düngemittel aus der Landwirtschaft oder durch Rückstände von Wasch- und Reinigungsmitteln in unseren Abwässern verursacht. Durch die Eutrophierung wird das Algenwachstum in den Gewässern angeregt, wodurch weniger Sonnenlicht in tiefere Lagen gelangt und die Photosynthese in diesen Bereichen verringert. Ein sauerstoffärmeres Gewässer entsteht, was wiederum Fischsterben zur Folge hat. Ausgedrückt wird das Eutrophierungspotential in Phosphatäquivalenten (PO_4 -Äqv.).

3.2.4 Auswertung

Die Ergebnisse aus den bisherigen Ökobilanzschritten alleine sagen noch wenig aus – sie müssen noch einer gesamtheitlichen Betrachtung zugeführt und unter Berücksichtigung der Systemgrenzen interpretiert werden. Die Phase der Auswertung sollte Resultate liefern, die mit dem zuvor festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen in Verbindung stehen und mit deren Hilfe Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen ausgesprochen werden können. Die Auswertungsphase beinhaltet gemäß DIN EN ISO 14044 [12] folgende Teile:

- Identifikation der für die Beurteilung relevanten Parameter aus den Phasen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung in Übereinstimmung mit den zuvor festgelegten Zielen und dem Untersuchungsrahmen
- Beurteilung anhand einer Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung unter Berücksichtigung des Verwendungszwecks
- Iteratives Ziehen von Schlussfolgerung, Identifizierung möglicher Einschränkungen und Definition von Empfehlungen

3.2.5 Ökobilanzierung als iterativer Prozess

Die vier Schritte der Ökobilanzierung sollen gemäß El khouli, John und Zeumer [14] stets iterativ durchgeführt werden. So können sich im Zuge der Ausarbeitung einer definierten Fragestellung andere Systemgrenzen oder eine Anpassung der Wirkungskategorien bzw. Wirkungsindikatoren als sinnvoll erweisen. Auf jeden Fall ist auf eine ausreichende Dokumentation der verwendeten Annahmen zu achten, damit die Ökobilanz auch nachvollziehbar ist.

3.2.6 Unsicherheiten der Ökobilanzierung

Die Stärke der Ökobilanzierung von Gebäuden oder Gebäudeteilen in der Sphäre des Planers liegt in der Vergleichbarkeit verschiedener Materialien, Herstellungsprozesse und Produktsysteme [14]. Auch wenn die Ökobilanzerstellung stets mit Unsicherheiten verbunden ist, die sich aus der Modellierung und den getroffenen Annahmen ergeben, hilft sie doch bei der Abschätzung und dem Vergleich von Umweltauswirkungen verschiedener Rohstoffe oder Produkte. Die Unsicherheiten in der Modellierungsebene ergeben sich z. B. aus den unterschiedlichen Möglichkeiten bei der Definition der Systemgrenzen oder durch die Auswahl der Allokationsmethode, der funktionellen Einheit und der verwendeten Datenbank. Des Weiteren werden für das betrachtete Produktsystem nur Annahmen über die potentiellen zukünftigen Umweltwirkungen getroffen, die zum Zeitpunkt der Bilanzerstellung noch nicht konkret vorhersehbar sind. Aus diesem Grund sollte stets auf eine ausreichende Dokumentation der ausgewählten Annahmen geachtet werden.

Auch wenn die Ökobilanzierung keine präzisen oder gar absoluten Aussagen über die ökologische Wahrheit darstellt und gewisse Unsicherheiten aufweist, können die Ergebnisse doch sehr hilfreich bei der Entscheidungsfindung in der Planungsphase sein und den Optimierungsprozess eines Produktsystems unterstützen.

3.2.7 Ermittlung des Ökoindex 3

Auf Basis der Ökobilanz stellt die Berechnung des Ökoindex 3 (OI3) eine einfache und quantitative Bewertungsmöglichkeit von Bauteilen und Gebäuden in Hinblick auf ihre Umweltwirkung während der Herstellungsphase dar. Anhand der Umweltindikatoren Treibhauspotential (GWP), Versauerungspotential (AP) und dem Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie (PENRT) – und deren Umrechnung in ein Punktesystem – kann die ökologische Qualität einer Konstruktion ermittelt werden. Je höher die Punktezahl, die sich in einem Wertebereich zwischen 0 und 100 befindet, desto größer sind auch die Umweltauswirkungen der Konstruktion bzw. des Bauteils.

Um diese Bewertung zu vereinheitlichen, wurde vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie (IBO) ein Leitfaden zur Berechnung des Ökoindex OI3 [23] entwickelt. Auf Basis der baubook-Datenbank werden hierbei die Lebenszyklusphasen A1 bis A3 (Herstellungsphase) berücksichtigt.

3.2.7.1 Ökoindex OI3_{KON}

Vor der Berechnung des OI3-Kennwerts einer Konstruktion müssen die jeweiligen Teilkennwerte für den Ressourcenverbrauch (OI_{PENRT}), das Treibhauspotential (OI_{GWP}) und das Versauerungspotential (OI_{AP}) mit Hilfe der in Tab. 3.1 dargestellten Umrechnungsfunktionen für 1 m² Konstruktionsfläche ermittelt werden. Anschließend wird der Ökoindex OI3_{KON} – unter Berücksichtigung der Teilkennzahlen zu je einem Drittel – gemäß Gleichung (3.1) ermittelt.

$$OI3_{KON} = \frac{1}{3} \cdot OI_{PENRT} + \frac{1}{3} \cdot OI_{GWP} + \frac{1}{3} \cdot OI_{AP} \quad (3.1)$$

Tab. 3.1: Ermittlung der Teilkennzahlen

Teilkennzahl	Umrechnungsfunktion
OI_{PENRT}	$f(x) = \frac{1}{10} \cdot (x - 500)$
OI_{GWP}	$f(x) = \frac{1}{2} \cdot (x + 50)$
OI_{AP}	$f(x) = \frac{100}{0,25} \cdot (x - 0,21)$

Laut IBO [23] sind der Berechnung des $OI3_{KON}$ folgende Informationen beigefügt:

- Sämtliche Bauteilschichten der Konstruktion
- Rohdichte der jeweiligen Bauteilschicht
- Schichtdicken des Aufbaus
- Ökobilanzwerte der Konstruktion

3.2.7.2 Ökoindex $\Delta OI3$

Mit dem ebenfalls punktebasierten Ökoindex $\Delta OI3$ kann der Einfluss der verschiedenen Baustoffschichten einer Konstruktion im Hinblick auf die ökologische Schwerpunktsetzung nach Gleichung (3.2) ermittelt werden. PENRT stellt darin den aus der Ökobilanz ermittelten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (in MJ/m²) dar, GWP das Treibhauspotential (in kg CO₂-Äqv./m²) und AP das Versauerungspotential (in kg SO₂-Äqv./m²). Da die Wirkungskategorien jeweils durch ihre Bezugseinheit dividiert werden, liefert dieser Index einen Wert, der sich auf 1 m² Konstruktionsfläche bezieht.

Durch diesen Index wird der Einfluss, den die einzelnen Schichten innerhalb einer Konstruktion auf die ökologische Wirksamkeit haben, ermittelt. Somit ist auf den ersten Blick ersichtlich in welcher Ebene das höchste Optimierungspotential in Bezug auf die Ökobilanz steckt.

$$\Delta OI3 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{0,1}{\text{MJ}} \cdot (\text{PENRT}) + \frac{0,5}{\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}} \cdot (\text{GWP}) + \frac{400}{\text{kg SO}_2\text{-Äqv.}} \cdot (\text{AP}) \right) \quad (3.2)$$

3.3 Strategien zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs

In Anbetracht der in Abschnitt 3.1.3 erwähnten übergeordneten Ziele zur nachhaltigen Planung (Suffizienz, Effizienz und Konsistenz) nennen El khouli, John und Zeumer [14] mit der Optimierung des Gebäudelebenszyklus und des Materiallebenszyklus zwei verschiedene Ansätze für die Planung von ressourcenschonenden Baumaßnahmen und damit zum Schutz vor negativen Umweltauswirkungen im Bauwesen. Mit einer Verbesserung des Gebäudelebenszyklus gehen vor allem die Miteinbeziehung der Nutzung und möglicher Nutzungsänderungen einher, wohingegen eine Optimierung des Materiallebenszyklus auf die Verwendung von ressourcen- und umweltschonenden Materialien abzielt. Beide Strategien werden im Folgenden näher betrachtet.

3.3.1 Optimierung des Gebäudelebenszyklus

Um einen Gebäudelebenszyklus in ökologischer sowie ökonomischer Hinsicht optimieren zu können, stellen sich zuallererst die grundlegenden Fragen nach der Gebäudenutzung, etwaiger Umnutzungsmöglichkeiten und der geplanten Nutzungsdauer des Bauwerks. Je höher der Betriebsenergiebedarf während der Nutzungsphase eines Gebäudes ist, desto stärker sollten die Konstruktions- und Materialwahl zu einer energetischen Optimierung beitragen. Zu den wichtigsten Aspekten in der Optimierung des Gebäudelebenszyklus zählen El khouli, John und Zeumer [14] folgende:

- Verwendung möglichst weniger Materialien und konstruktive Reduktion von Anschlusspunkten zur Minimierung des Planungs- und Herstellungsaufwands
- Verringerung der Umweltwirkung eines Bauteils durch Funktionsüberlagerungen (z. B. durch Blechdachkonstruktionen mit integrierten Halterungen für Photovoltaik-Module)
- Minimierung von Betriebs- und Instandhaltungsaufwand durch glatte, fugenfreie und damit leicht zu reinigende Oberflächen und einfach auszutauschende Bauteile
- Optimierung von Austausch- und Instandhaltungsprozessen am Ende des Lebenszyklus ohne die Beschädigung anderer Bauteile
- Recyclingfähiges Konstruieren in Anbetracht der Rückführung in den Materialkreislauf aller Bauteile

3.3.2 Betrachtung auf Materialebene

Der Materiallebenszyklus gilt als wichtiger Bewertungsparameter, wenn man von nachhaltigem Bauen spricht [14]. Will man den Lebenszyklus auf Materialebene optimieren, muss man diesen in die Stadien Rohstoffgewinnung, Produktion, Weiterverarbeitung, Transport, Nutzung (bzw. Nachnutzung) und Entsorgung unterteilen und die einzelnen Prozessschritte gesondert betrachten. Eine Effizienzsteigerung bei der Herstellung und die erneute Verwendung von recycelten Baustoffen kann somit zu einer deutlich besseren Ökobilanz führen.

Im Bauwesen lässt sich eine Verbesserung des Materialkreislaufs z. B. durch folgende Punkte erreichen:

- Optimierung der Rohstoffgewinnung und Effizienzsteigerung der Produktion
- Einsatz ressourcenschonender Baustoffe durch eine vermehrte Verwendung von Holz bzw. eine Optimierung der Tragkonstruktion
- Weiterentwicklung des Systembaus und der damit verbundenen Vorteile, die mit einem höheren Vorfertigungsgrad einhergehen (wie z. B. verbesserte Ressourceneffizienz, geringere Bautoleranzen, schlankere Dimensionierungen, oder eine höhere Bauwerksqualität)
- Verwendung gesundheitlich unbedenklicher Materialien
- Rückführung baulicher Stoffe in den Materialkreislauf durch recyclingfähige Konstruktionen und sortenreine Bauabfälle

Kapitel 4

Die Holz-Beton-Verbunddecke

Ursprünglich zur Ertüchtigung bestehender Holzbalkendecken entwickelt, kommt die Holz-Beton-Verbundbauweise heutzutage aufgrund ihrer positiven ökologischen sowie ökonomischen Eigenschaften gegenüber herkömmlichen Massivholz- bzw. Stahlbetondecken auch bei neu errichteten Wohn-, Büro- und Gewerbebauten verstärkt zum Einsatz [24]. Holz-Beton-Verbunddecken sind Tragwerkselemente, bei denen der mineralische Massivbau und der Holzbau ideal miteinander kombiniert werden. So zeichnet sich das Holz als umweltschonendes, nachwachsendes Material aus, wohingegen der Beton als nicht brennbarer und abschließender Baustoff andere bauphysikalische Merkmale aufweist.

Durch die Unterkonstruktion aus Holz und einer darüber liegenden Betonschicht gelingt es, sowohl die hohe Zugfestigkeit des Holzes in Faserrichtung als auch die Druckfestigkeit des Betons in einem Deckenbauteil zu vereinen [26]. Durch den möglichst schubfest ausgeführten Verbund beider Materialien entsteht ein Bauteil mit günstigen Eigenschaften sowohl in Bezug auf die Tragfähigkeit als auch auf die Gebrauchstauglichkeit. Der Beton wird in Form einer durchgängigen Platte ausgeführt (mit einer Stärke von 8–15 cm), wohingegen auf Seiten des Holzes verschiedene Vollholz- bzw. Holzwerkstoffkonstruktionen verwendet werden. Als Verbundmittel kommen entweder mechanische Verbindungen (z. B. in Form von Schrauben) oder Verbindungen durch reinen Formschluss (Kerven) zum Einsatz. Auch Verklebungen oder die Kombination mehrerer Verbindungsmittelvarianten ist möglich.

Bei der Kombination dieser beiden Werkstoffe nimmt das im unteren Querschnittsteil angeordnete Holz mit seinen guten Zugfestigkeitseigenschaften die Biegezugkräfte auf, wohingegen die darauf aufgebrachte Betonplatte mit ihrer hohen Druckfestigkeit die Biegedruckkräfte übernimmt. Aufgrund des nachgiebigen Verbunds wird ein gewisser Teil der Druckspannungen in das Holz geleitet und der Beton wird zum Teil auf Zug beansprucht, was eine Bewehrung der Betonschicht erfordert. Dennoch gestalten sich Momentenumkehrungen, wie es bei Durchlaufträgern oder großen Auskragungen der Fall ist, als problematisch, weshalb HBV-Decken vor allem als Einfeldträger ausgeführt werden.

Holz-Beton-Verbundkonstruktionen kommen bereits seit mehreren Jahrzehnten bei der Sanierung bestehender Holzbalkendecken zum Einsatz. Durch das einfache Aufbringen einer Betonschicht auf die Balkendecke inklusive Herstellung eines mechanischen Verbunds durch geeignete Verbindungsmittel (Schrauben, Lochbleche etc.) können Bestandsdecken aus Holz hinsichtlich ihrer Tragfähigkeits- und bauphysikalischen Eigenschaften optimiert werden, ohne in die Untersicht der Decke einzugreifen. In diesem Fall spricht man von der HBV-Balkendecke. Immer stärker etabliert sich aber auch die sogenannte Brettstapel-Beton-Verbunddecke, bestehend aus aufrecht stehend miteinander verleimten Holzbrettern. Ein ähnliches System stellt die Verbindung von massiven Brettsperrholzelementen und Beton dar.

Zusätzlich zu den herkömmlichen Systemen wird in dieser Arbeit ein in den letzten Jahren am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der ETH Zürich entwickeltes Holz-Beton-Verbundsystem mit Buchenholz untersucht. Das innovative Deckensystem besteht aus dünnen

Furnierschichtholzplatten, die mit Hilfe von Einkerbungen den Verbund zu einer 12–16 cm dicken Betonschicht herstellen [5].

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung eines Berechnungsverfahrens verschiedener Holz-Beton-Verbundkonstruktionen und eine darauf aufbauende Erstellung einer vergleichenden Ökobilanz, um die betrachteten Systeme einerseits untereinander und andererseits mit herkömmlichen Massivholz- und Stahlbetondecken zu vergleichen und ihre Auswirkungen auf die Umwelt abzuschätzen. Die erhaltenen Ergebnisse sollen die Basis zur Erstellung von Optimierungsvorschlägen darstellen und in der planerischen Gestaltung im Hochbau als Entscheidungshilfe dienen.

4.1 Vorteile von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen

Das Aufbringen einer Betonplatte auf eine Holzunterkonstruktion bringt zahlreiche Vorteile mit sich. Durch die Erhöhung der Steifigkeit der Decke werden größere Spannweiten als bei reinen Holzkonstruktionen ermöglicht, gleichzeitig werden das Schwingungsverhalten und damit auch die akustischen Eigenschaften der Decke verbessert [27]. Des Weiteren wird durch die Ausführung des Betons als fugenlose Platte die Dichtheit des Bauteils gewährleistet, und somit die Anforderungen an die Brandschutzeigenschaften. Schänzlin [40] zählt außerdem folgende Vorteile der Holz-Beton-Verbundbauweise im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbeton- und Massivholzdecken auf:

- Erhöhung der Tragfähigkeit und Steifigkeit um etwa 60 % bei gleicher Bauteilhöhe aufgrund einer optimalen Ausnutzung der spezifischen Baustoffeigenschaften
- Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer im Vergleich zu reinen Holzkonstruktionen durch die aufgebrachte Betonplatte
- Erhöhung des Schallschutzes im Vergleich zu reinen Holzkonstruktionen aufgrund der Eigengewichtserhöhung durch den Beton
- Schutz der Holzkonstruktion vor eindringender Feuchte durch den Aufbeton – vor allem im Falle eines Wasserrohrbruches im Gebäudeinneren
- Möglichkeit eines hohen Vorfertigungsgrad im Werk und damit eine deutliche Verringerung der Bauzeit
- Gleichzeitige Nutzung der Holzunterkonstruktion als verlorene Schalung und Untersicht, wodurch aufwändige Schalungsarbeiten auf der Baustelle und weitere Ausbaumaßnahmen entfallen
- Bildung einer aussteifenden Ebene durch die Betonplatte, was sich mit traditionellen Holzdecken aus stabförmigen Elementen nur schwierig realisieren lässt
- Deutliche Reduzierung des Eigengewichts bei annähernd gleicher Tragfähigkeit im Vergleich zu Stahlbetonkonstruktionen, was wiederum zu Erleichterungen im Transportprozess führt
- Deutliche Verbesserung der Ökobilanz aufgrund der Verwendung des nachwachsenden und umweltschonenden Baustoffs Holz
- Einfache Rückbaubarkeit nach Ende des Bauteillebenszyklus

4.2 Ausführungsarten und Materialien

In der Baupraxis haben Deckenkonstruktionen in HBV-Bauweise also einige Vorteile gegenüber den konventionellen Decken in Stahlbeton- und Holzbauweise. Dies gelingt durch die erfolgreiche Kombination der positiven Eigenschaften zweier doch sehr unterschiedlicher Materialien, sowohl in technischer als auch in bauphysikalischer und baubetrieblicher Hinsicht.

Der druckbeanspruchte obere Querschnittsteil besteht in der Regel immer aus einer etwa 6–12 cm dicken Betonplatte, die entweder auf der Baustelle oder – um den Vorfertigungsgrad zu erhöhen und somit die Bauzeit zu verringern – schon im Werk auf die Holzunterkonstruktion aufgebracht wird [40]. Zur Anwendung kommt ein Beton, der zumindest der Druckfestigkeitsklasse C 20/25 entspricht.

Holz-Beton-Verbundkonstruktionen unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer zugbeanspruchten Holzunterkonstruktion. Neben Vollholz- und Brettschichtholzträgern, flächigen Brettstapel- und Brettsperrholzelementen kommen nach Schänzlin [40] auch andere Holzwerkstoffe zum Einsatz, die sich teilweise stark in ihren jeweiligen Eigenschaften unterscheiden. Somit können verschiedene ästhetische Ansprüche als auch diverse Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt werden.

Bei der Deckenausbildung von HBV-Konstruktionen unterscheidet Moro [27] zwischen der Balken- bzw. Rippenbauweise und der Plattenbauweise.

4.2.1 Balkenbauweise

Bei der Balkenbauweise besteht die Holzkonstruktion aus einer Trägerschar und einer dazwischen spannenden Abdeckung aus Holz oder Holzwerkstoffen [27]. Als Holzträger kommen dabei sowohl Vollholz- als auch Brettschichtholzträger in Frage. Die darauf aufgebrachte Holzabdeckung dient als verlorene Schalung für die Betonplatte, welche mit Hilfe von Schrauben oder Schubverbindern statisch mit den Holzträgern verbunden wird (siehe Abb. 4.1). Eine Beschreibung der verschiedenen Verbindungsvarianten folgt in Abschnitt 4.3. Eingesetzt wird ein Beton, der zumindest der Druckfestigkeitsklasse C 20/25 entspricht. Diese Deckenvariante eignet sich für Spannweiten bis 10 m.

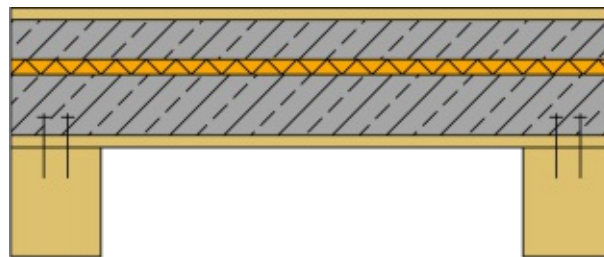


Abb. 4.1: HBV-Balkendecke

4.2.2 Plattenbauweise

Bei der zweiten Konstruktionsart handelt es sich um die sogenannte Plattenbauweise, bei der Beton auf eine flächige, plattenartige Unterkonstruktion aus Holz aufgebracht wird [27]. Der zugbeanspruchte Holzquerschnitt wird meist in Form eines Brettstapel- oder Brettsperrholzelements ausgebildet, als innovative Alternative dazu werden im Folgenden Furnierschichtholzplatten aus verleimten Nadel- oder Buchenholzfurnieren vorgestellt. Durch den hohen Vorfertigungsgrad

und die Verwendung der flächigen Holzunterkonstruktionen als verlorene Schalung entstehen ökologische Bauteile, die zudem durch baubetriebliche Vorteile geprägt sind.

Brettstapelelemente

Bei den Brettstapelkonstruktionen werden vorgetrocknete, stehend angeordnete Brettquerschnitte – mit ihren Breitseiten rechtwinkelig zur Bauteilebene – flächig verklebt, vernagelt oder verdübelt, wodurch ein plattenförmiges, tragendes Bauteil mit stark anisotropen Eigenschaften entsteht [26]. Die Anisotropie folgt aus der Tatsache, dass die Kräfte bei diesem Element praktisch nur in Faserlängsrichtung aufgenommen werden können. Darum werden Brettstapelelemente bei Deckensystemen unter Biegebeanspruchung als einachsig gespannte Platten eingesetzt. Diese Konstruktionsart weist zwar eine hohe Tragfähigkeit in Faserrichtung auf, aufgrund der niedrigen Querkzugfestigkeit des Holzes ist eine Lastquerverteilung jedoch nur begrenzt möglich. Um diese zu erreichen, müssen auch quer verlaufende Brettlagen angeordnet werden, wie es bei Brettsperrholzelementen der Fall ist. In Abb. 4.2 ist ein typischer Deckenaufbau einer Brettstapel-Beton-Verbunddecke dargestellt.

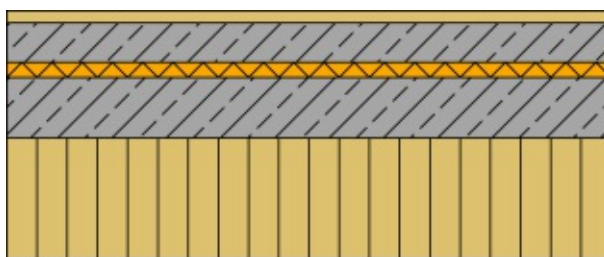


Abb. 4.2: HBV-Brettstapeldecke

Brettsperrholzelemente

Konstruktionen aus Brettsperrholz bestehen aus mehreren Lagen liegender Holzbretter mit einer Dicke von 15–30 mm [26]. Die Brettlagen werden abwechselnd längs und quer angeordnet und miteinander verbunden bzw. verleimt, wodurch ein weitgehend isotropes Flächenelement entsteht. Herkömmliche Brettsperrholz-Deckenelemente bestehen aus drei, fünf oder sieben Lagen, wobei die Ausrichtung der zwei äußeren Brettlagen die Hauptspannrichtung vorgibt. Durch die quer angeordneten Brettlagen besitzt das Bauteil eine gute Lastquerverteilungswirkung, wodurch seitliche Auskragungen und punktuelle Lagerungen möglich sind. Die darauf aufgebrachte Betonschicht wird mit Hilfe von Kerven oder Schubverbindern möglichst schubfest mit dem Holz verbunden (siehe Abb. 4.3).

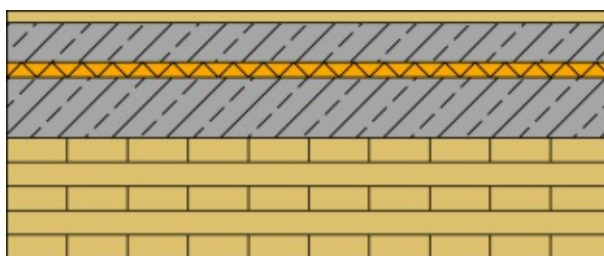


Abb. 4.3: HBV-Brettsperrholzdecke

Furnierschichtholzelemente

Furnierschichtholzelemente (laminated veneer lumber, LVL) sind dünne Platten aus schichtweise verleimten Nadel- oder Buchenholzurnieren mit denen eine sehr hohe Tragfähigkeit erreicht

werden kann [26]. Die einzelnen Schichten werden so miteinander verbunden, dass die Fasern jeweils in dieselbe Richtung verlaufen, wodurch wie bei den Brettstapelelementen ein weitgehend anisotropes Bauteil entsteht. Durch die stark ausgeprägte Anisotropie werden die auftretenden Biegezug- und Biegedruckkräfte hauptsächlich entlang der Faser abgeleitet, die Lastquerverteilung lässt sich jedoch durch einzelne quer angeordnete Lagen verbessern.

Wurden bislang vorrangig Nadelhölzer für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen verwendet, entwickelte man am Institut für Baustatik und Konstruktionen (IBK) der ETH Zürich nun eine neuartige HBV-Decke aus heimischem Laubholz [4]. Dünne Furnierschichtplatten aus Buchenholz (etwa 40–60 mm dick) dienen gleichzeitig als Schalung und Zugbewehrung für eine 12–16 cm dicke Betonschicht (siehe Abb. 4.4). Um den schubfesten Verbund zwischen Holzfurnier und Beton herzustellen, werden 15 mm tiefe Kerfen in das Holz gefräst.

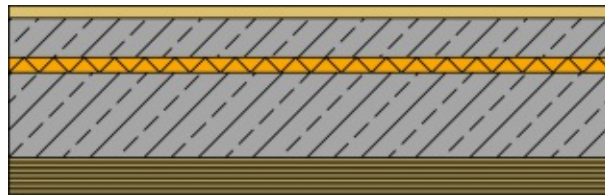


Abb. 4.4: HBV-Furnierschichtholzdecke

Durch die Anwendung von dünnen Platten aus Buchenfurnierschichtholz können sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile gegenüber herkömmlichen Deckensystemen generiert werden [5]. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Vorteilen von HBV-Konstruktionen kommen bei der Anwendung von Buchenfurnieren die sehr guten mechanischen Materialeigenschaften von Buchenholz hinzu, wodurch sich die Dicke der Holzschicht weiter verringern lässt – und damit die Gesamtkosten der Decke.

Einen weiteren positiven Aspekt sieht Boccadoro [5] in der Ressource Buchenholz. Trotz seiner konsistenten mechanischen Eigenschaften, wurde es bislang kaum für konstruktive Anwendungen im Bauwesen verwendet. Erst die experimentelle Untersuchung von Holz-Beton-Verbunddecken aus Buche nach Boccadoro [4] führt das unterschätzte Laubholz weg von einer primär energetischen Verwertung hin zum konstruktiven Einsatz.

4.3 Verbundmittel

Um die Materialien Holz und Beton schubfest miteinander zu verbinden, stehen kraftschlüssige und formschlüssige Verbindungsvarianten zur Verfügung. Zusätzlich nennt Winter [55] die Möglichkeit zur Herstellung eines Haftverbunds:

- **Kraftschluss:** Beim Verbund durch Kraftschluss werden Verbindungsmittel in das Holz eingebracht, die jedoch nicht ganz versenkt werden. Durch einen gewissen Überstand in die Betonschicht entsteht somit ein Schubverbund. Zum Einsatz kommen stiftförmige Verbindungsmittel wie Nägel, Schrauben, eingeklebte Gewindestangen oder Kopfbolzendübel. Aber auch Flachstahlschlösser, Nagelplatten oder der BVD-Schubverbinder zählen zu den kraftschlüssigen Verbindungsvarianten.
- **Formschluss:** Um einen formschlüssigen Verbund zu schaffen, werden entweder Kerfen in das Holz gefräst oder Betonnocken in Kombination mit Stahlstiften aus Betonstahl angeordnet. Diese Art wird vor allem bei Massivholzplatten eingesetzt, da sich diese zur Herstellung eines großflächigen Verbunds zwischen Holz und Beton besonders gut eignen.

- **Haftverbund:** Bei flächigen Holzunterkonstruktionen besteht die Möglichkeit, durch die Verwendung hinterschnittener Holzleisten oder unterschiedlich hoher Brettlamellen (bei Brettstapeldecken) einen Haftverbund zwischen Holz und Beton herzustellen.

Neben den Materialeigenschaften wird die Steifigkeit des Systems entscheidend von der Art des Verbindungsmittels und deren Eigenschaften beeinflusst. Besonders im Hinblick auf die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten spielt das Verbindungsmittel eine entscheidende Rolle. Um Holz und Beton möglichst schubfest miteinander zu verbinden, steht heutzutage eine Vielzahl an Verbindungsvarianten zur Auswahl. Im Folgenden werden die wichtigsten Verbindungen aufgezählt, die aktuell zum Einsatz kommen, wobei auch Kombinationen einzelner Varianten zur Erhöhung der Tragfähigkeit verwendet werden können.

Schrauben

Nach Winter [55] kommen bei den stiftförmigen Verbindungsmitteln vor allem Vollgewindeschrauben zum Einsatz, die unter einem Einschraubwinkel von 45° bzw. 90° in das Holz eingelassen werden, wobei ein gewisser Überstand zur Verbundherstellung verbleibt (siehe Abb. 4.5a). Durch Profilierung dieses Schraubenüberstands kann eine zusätzliche Verbesserung des Verbunds zwischen Holz und Beton erreicht werden. Eine weitere Ausführungsmöglichkeit stellt die Anordnung von gekreuzten Schraubenpaaren mit der SFS-Verbundschraube dar (siehe Abb. 4.5b). Durch die fachwerkartige Ausbildung wird eine Schraube auf Zug und die andere auf Druck beansprucht, wodurch die Verbundsteifigkeit auch bei Ausführung einer Holzschalung zwischen Holzbalken und Betonschicht gewährleistet ist. Stiftförmige Verbindungsmittel kommen vor allem bei der Sanierung von bestehenden Holzbalkendecken zum Einsatz. Bei flächigen Massivholzdecken erwiesen sich diese aufgrund der großen Anzahl an notwendigen Schrauben und der damit verbundenen Herstellungsdauer als unwirtschaftlich. Der Einsatzbereich dieses Verbindungsmittels ist auf Einfeld-Biegeträger begrenzt.

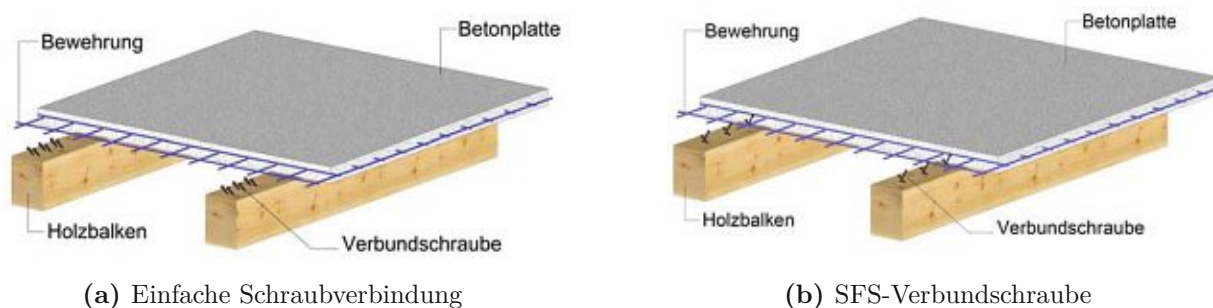


Abb. 4.5: Verbindung mittels Verschraubung [38]

Eingeklebte Lochbleche (HBV-Schubverbinder)

Bei den HBV-Schubverbindern handelt es sich um Streckmetallformteile, die rechtwinklig zur Holzoberfläche und parallel zur Faser in das Holz eingeklebt werden (siehe Abb. 4.6). Die Schubübertragung bei diesem System erfolgt einerseits durch die Verklebung im Holzquerschnitt und andererseits über die Verzahnung des Betons in der mineralischen Bauteilebene. Gleichzeitig dient der HBV-Schubverbinder als Distanzhalter für die Bewehrungsmatten. Dieses System kommt sowohl bei der Sanierung von Holzbalkendecken als auch im Neubau bei flächigen HBV-Systemen (Einfeld- und Durchlaufträger sowie Wandelementen) zum Einsatz.

Flachstahlschlösser

Ein Sondersystem von eingeklebten Streckmetallen bei HBV-Brettstapeldecken stellen sogenannte Flachstahlschlösser dar, wie in Abb. 4.7 dargestellt. Hierbei wird der schubfeste Verbund

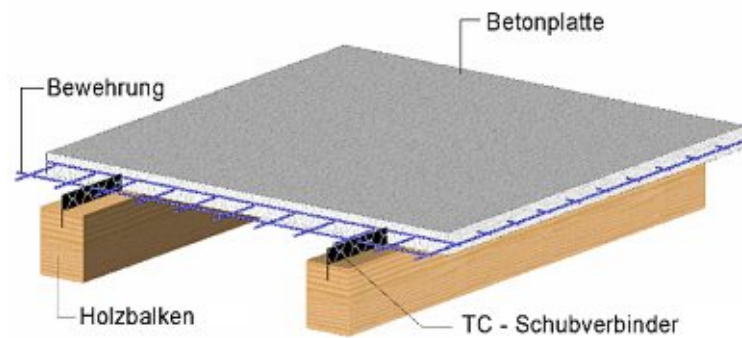


Abb. 4.6: Verbindung mittels HBV-Schubverbinder [38]

über verzinkte Vollmetallstreifen hergestellt, die mit einem Neigungswinkel von 5° quer zur Tragrichtung in eine Holznut eingesetzt werden. Flachstahlschlösser sind in ihrer Anwendung auf Einfeldträger mit einer Spannweite von maximal 10 m begrenzt. Neben dem Kerrenverbund zählen Flachstahlschlösser zu den effizientesten und kostengünstigsten Verbindungsmitteln im Holz-Beton-Verbundbau.

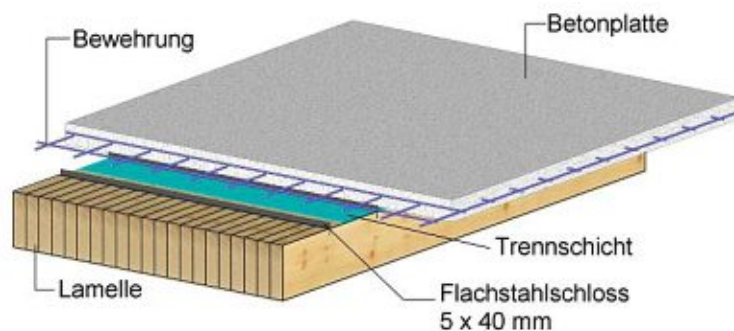


Abb. 4.7: Verbindung mittels Flachstahlschlösser [38]

Nagelplatten

Die Verbindung zwischen Holz und Beton mittels Nagelplatten (auch Dennert Holz-Beton-Verbundelemente genannt) kommt ausschließlich in Deckenkonstruktionen zum Einsatz, die aus einer untenliegenden, zugbeanspruchten Leichtbetonplatte, DUO-Holzbalcken aus Vollholz, keilgezinktem Vollholz oder Balkenschichtholz bestehen. Aus diesem Grund wird auf das System in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Eingeklebte Gewindestangen

Ähnlich wie bei einfachen Schraubverbindungen wird bei der Herstellung des Verbunds zwischen Holz und Beton mittels werksseitig eingeklebte Gewindestangen eine Übertragung der Schubkraft vor allem über den Haftverbund entlang des Schaftes erreicht. Zusätzlich können Muttern mit Unterlegscheiben verwendet werden, um den Schubverbund zu verbessern (wie in Abb. 4.8 dargestellt).

Kopfbolzendübel

Der Verbund mittels Kopfbolzendübel stammt ursprünglich aus dem Stahl-Beton-Verbundbau, wird heutzutage aber vermehrt auch in Kombination mit Holz eingesetzt. Beim diesem System wird ein Kopfbolzen auf eine Stahlplatte mit gefalteten Ecken geschweißt. Bolzen und Platte

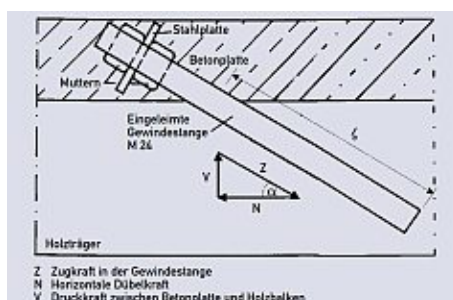


Abb. 4.8: Verbindung mittels Gewindestangen [55]

werden dann anschließend mittels Schrauben im Holz befestigt. Vor allem im Brückenbau sind quer zur Tragrichtung angeordnete Stahlplatten mit aufgeschweißten Kopfbolzen eine gängige Methode, um den Verbund zwischen Holz und Beton herzustellen.

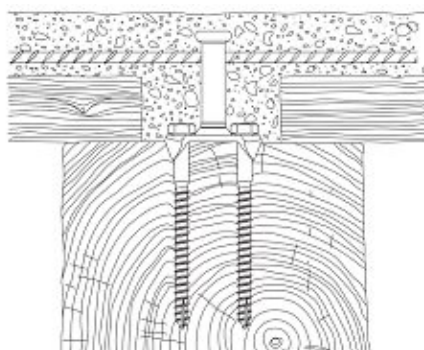


Abb. 4.9: Verbindung mittels Kopfbolzendübeln [55]

BVD-Schubverbinder

Der BVD-Schubverbinder besteht aus einem rahmenartigen Stahlteil (Anker), der in das Holz eingelassen wird und mit einer V-förmigen Bewehrung kombiniert wird. Bei diesem System werden Schubkräfte aus einem großen Bereich über die abgewinkelten Bewehrungsstäbe in das Stahlformteil eingeleitet, weshalb sie besonders beim Holzbalkensystem Anwendung finden [27].

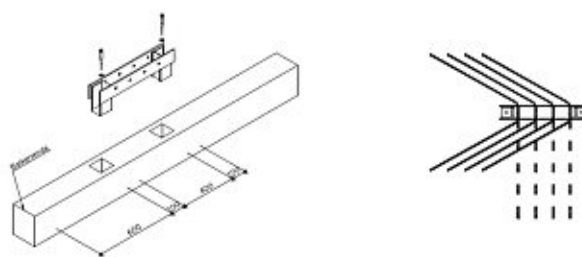


Abb. 4.10: Verbindung mittels BVD-Schubverbinder [55]

Kervenverbund

Im Vergleich zu den bisher vorgestellten kraftschlüssigen Verbundsystemen handelt es sich bei Kerven um formschlüssige Verbundelemente, die durch Fräsen von 1,5 bis 4,0 cm tiefen Aussparungen quer zur Deckenspannungsrichtung ausgebildet werden (siehe Abb. 4.11). In der Vergangenheit kam diese Verbundart überwiegend bei Brettstapelelementen in Kombination mit

stiftförmigen Verbindungsmitteln zum Einsatz. Aufgrund des Erreichens einer hohen effektiven Biegesteifigkeit innerhalb des Systems und der positiven wirtschaftlichen sowie baubetrieblichen Eigenschaften, wird diese Methode heutzutage auch in innovativen Deckenelementen, wie der LVL-Beton-Verbunddecke verwendet.

Nach Michelfelder [24] werden die entstehenden Längsschubkräfte über den Druckkontakt an der Kervenflanke übertragen. Ihre Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass der Beton im Kervenverbund auch ohne zusätzlich eingebaute mechanische Verbindung unbeschädigt bleibt, wodurch sich die Verwendung von Kerven noch effizienter und vor allem ressourcenschonender gestalten lässt.

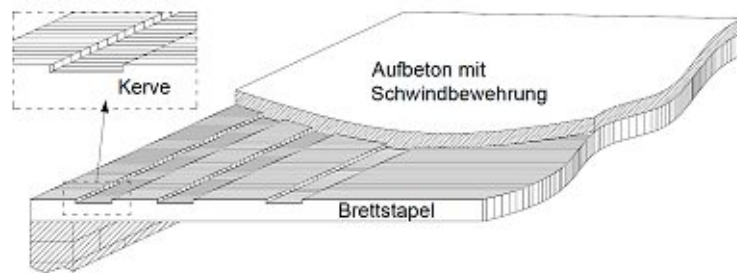


Abb. 4.11: Brettstapel-Beton-Verbunddecke mit Kerven [24]

Aufgrund der zahlreichen Vorteile, die der Kervenverbund mit sich bringt, werden die Berechnungen in dieser Arbeit auf diese Verbindungsvariante bezogen. Vor allem die einfache Vorfertigung im Werk und der Entfall zusätzlicher kraftschlüssiger Verbindungsmittel haben den Ausschlag gegeben, dieses System einer genaueren Betrachtung, auch in Hinblick auf die Ökobilanzierung, zu unterziehen.

Betonnocken

Eine weitere formschlüssige Verbindungsart stellen Betonnocken mit Stahlstiften aus Betonstahl dar [55]. Nach dem Einfräsen einer kreisrunden Vertiefung in den Holzquerschnitt wird eine Gewindestange in ein vorgebohrtes Loch eingesetzt, die nach dem Ausbetonieren gemeinsam mit der Nocke die Übertragung der Längsschubkraft übernimmt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Stabstahl ausreichend weit in den Beton krägt, wie in Abb. 4.12 ersichtlich.

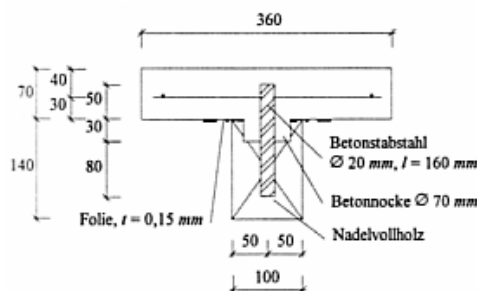


Abb. 4.12: Betonnocke mit Gewindestange [24]

Unterschiedlich hohe Brettstapellamellen

Ein weiteres formschlüssiges System wird von Kolb [19] beschrieben und ist in Abb. 4.13 dargestellt. In Kombination mit der sägerauen Oberfläche ermöglichen unterschiedlich hohe Brettstapellamellen die Schubkraftübertragung. Durch die etwa 20 mm tiefen Längsnuten entsteht

eine Klemmwirkung, die zusammen mit dem Haftverbund einen annähernd starren Schubverbund herstellen [13].

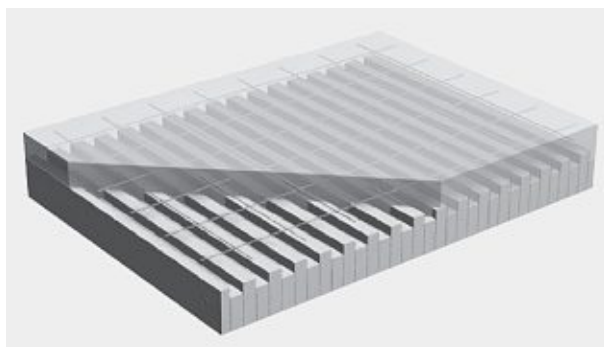


Abb. 4.13: System „Plus/Minus“ [19]

Klebeverbund

Moro [27] nennt zusätzlich eine Verbundart, bei der die Schubkräfte mit Hilfe einer dünnen Klebstoffschicht übertragen werden. Durch den Einsatz von Epoxidharzen werden bei diesem System Betonfertigteile mit dem Holzquerschnitt verklebt, wodurch ein starrer Verbund entsteht. Weitere Vorteile sind die gleichmäßige Verteilung der Schubkräfte über die gesamte Verbundfläche sowie der Entfall einer Querschnittsverjüngung, wie es bei Kernen oder dem System mit unterschiedlich hohen Brettstapellamellen der Fall ist.

Eine zweite Möglichkeit ergibt die Verwendung von Polymerbeton, der eine Mischung aus Kunstharz und Quarzsand darstellt. Aufgrund des hohen Preises, der überwiegenden Verwendung in der Altbausanierung und der ungünstigen Recyclingfähigkeit wird dieses System an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

4.4 Bemessung nachgiebig verbundener Querschnitte

Holz-Beton-Verbundbauteile stellen mit ihren nachträglich miteinander verbundenen Einzelquerschnitten Systeme dar, deren Tragverhalten stark von der Verbindungsmittelwahl und den gewählten Rahmenbedingungen abhängt. Ausgenommen vom Klebeverbund (starrer Verbund) liegt bei den meisten HBV-Konstruktionen nachgiebiger Verbund vor. Das bedeutet, dass die Schubkräfte zwar in der Verbundfuge übertragen werden können, es aber dennoch zu Relativverschiebungen zwischen den einzelnen Materialkomponenten kommt, was in der Berechnung berücksichtigt werden muss. Der andere Grenzfall ergibt sich aus lose miteinander verbundenen Bauteilschichten. Hier können keine Schubkräfte übertragen werden und es folgt eine ungehinderte Relativverschiebung zwischen Holz und Beton [13]. Die beiden Extremformen (starrer und loser Verbund) sowie deren Zwischenvariante (nachgiebiger Verbund) sind zusammen mit den damit resultierenden Spannungsverläufen schematisch in Abb. 4.14 dargestellt.

Die Grundlage der Bemessung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen stellt die Berechnung der Teilschnittgrößen in den einzelnen Querschnitten dar. Bei der Schnittgrößenberechnung ist besonders auf die akkurate Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zu achten, da diese das Trag- und Verformungsverhalten der Gesamtkonstruktion maßgebend beeinflusst. Der für die Bemessung notwendige Verschiebungsmodul des Verbindungsmittels folgt entweder aus einer entsprechenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, oder wird direkt aus Versuchen generiert.

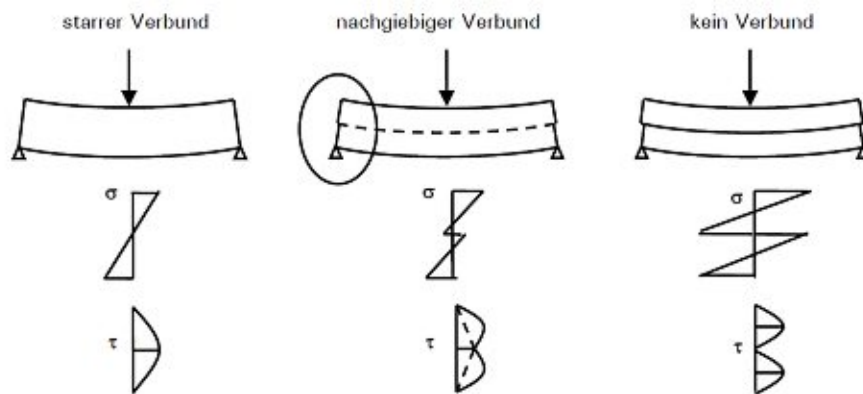


Abb. 4.14: Grenzzustände bei Verbundträgern [55]

Kudla [21] stellt in ihrer Dissertation mit dem Stabwerksmodell und dem γ -Verfahren zwei mögliche Berechnungsmodelle zur Schnittgrößenermittlung für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen vor. Weitere Möglichkeiten stellen die Lösung eines Differentialgleichungssystem, das Schubanalogieverfahren oder die Finite-Elemente-Methode dar. Da sich das γ -Verfahren als relativ einfache Methode zur näherungsweise Berechnung biegebeanspruchter Holz-Beton-Verbundkonstruktionen herausgestellt hat, wird es in dieser Arbeit zur Dimensionierung der zum Vergleich herangezogenen Deckenkonstruktionen verwendet. Bei der Auswahl der Konstruktionsvarianten wird versucht, mit dem Holzbalken- und Brettstapelsystem zwei ältere mit einer nur wenige Jahre alten Variante aus Furnierschichtholz (nach Boccadoro [3]) zu vergleichen und auf deren Unterschiede hinzuweisen – sowohl in konstruktiver als auch ökologischer Hinsicht. Um einen möglichst wirkungsvollen Vergleich zu erzielen, wird für alle Systeme ein Verbund mittels Kerfen verwendet. Folgende Deckensysteme werden in dieser Arbeit bemessen, um sie anschließend einer Ökobilanzierung zu unterziehen:

- Brettstapel-Beton-Verbunddecke
- Holzbalken-Beton-Verbunddecke mit Trägern aus Brettschichtholz
- LVL-Beton-Verbunddecke

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Eingangsparameter der Konstruktion, grundlegenden Berechnungsschritte sowie die für das γ -Verfahren notwendigen Parameter näher erläutert. Auf die exakte Abbildung des Berechnungsverfahrens wird an dieser Stelle jedoch verzichtet, da diese in der Vergangenheit, wie etwa von Winter [55] oder Dobler [13], schon ausreichend und detailliert behandelt wurde. Für die Berechnung der LVL-Beton-Verbunddecke wird der technische Bericht von Boccadoro [3] herangezogen. Aufgrund der Unterschiede, die dieses Deckenelement im Vergleich zu den anderen beiden betrachteten Varianten aufweist (Brettstapel- und Holzbalken-Beton-Verbunddecke), wird auf die charakterisierenden Berechnungsmerkmale separat eingegangen (siehe Abschnitt 4.5).

4.4.1 Randbedingungen des γ -Verfahrens

Beim γ -Verfahren, welches normativ in der ÖNORM EN 1995-1-1 [34] festgehalten ist, handelt es sich um ein vereinfachtes, analytisches Berechnungsverfahren, mit dem die Verformungs- und Schnittgrößen nachgiebig verbundener Querschnitte ermittelt werden können. Um die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel darzustellen, werden bei dieser Methode die Steiner-Anteile

des Flächenträgheitsmoments mit dem Faktor γ multipliziert und somit abgemindert. Bezogen auf die in Abb. 4.14 gezeigten Grenzzustände, resultiert aus der Annahme eines starren Verbunds $\gamma = 1$, beziehungsweise $\gamma = 0$, sofern kein Verbund zwischen den Materialien besteht. Um das γ -Verfahren anwenden zu können, nennt Winter [55] folgende Randbedingungen, die eingehalten werden müssen:

- Statisch bestimmt gelagerter Einfeldträger unter Gleichlast (entspricht sinusförmiger Belastung)
- Konstante Teilquerschnitte
- Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese in den Einzelquerschnitten
- Linear elastisches Materialverhalten
- Kontinuierlicher und konstanter Schubverbund über die gesamte Trägerlänge
- Vernachlässigung der Schubverformung

4.4.2 Systemabmessungen

Spannweite und Elementbreite

Um einen ganzheitlichen Überblick über die Ökobilanz der genannten Deckenvarianten zu erhalten, werden verschiedene, im Hochbau übliche Spannweiten untersucht ($l_0 = 6\text{ m}$, 7 m und 8 m). Als statisches System wird jeweils ein statisch bestimmt gelagerter Einfeldträger mit einer Elementbreite von $b = 1\text{ m}$ gewählt. Einzig bei der Berechnung der LVL-Beton-Verbunddecke, die an Boccadoro [3] angelehnt ist, beträgt die Breite des betrachteten Deckenelements $b = 0,53\text{ m}$. Die Holzbalken-Beton-Verbunddecke wird mit einem Trägerabstand von $e_{\text{Träger}} = 0,625\text{ m}$ bemessen.

Bauteildicke

Ziel dieser Arbeit ist es, in Anbetracht der unterschiedlichen Deckenvarianten und Spannweiten, jeweils die minimale Bauteildicke unter Einhaltung der geführten Nachweise zu eruieren. Anschließend werden diese Bauteile einer Massen- bzw. Ressourcenermittlung unterzogen, um sie schlussendlich im Hinblick auf ihre Ökobilanz zu vergleichen. Zu den wesentlichsten Variablen in dem hierfür angelegten Excel-Tool zählen die Dicken der Einzelquerschnitte. Michelfelder [24] hat gemäß ihrer Untersuchungen bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken ein ideales Höhenverhältnis zwischen Holz und Beton von 60:40 empfohlen (bei einer Mindestbetondicke von 8 cm), das auch in dieser Arbeit zur Orientierung bei der Dimensionierung dient. Dieser Ansatz ist bei der Berechnung der Holzbalken-Beton-Verbunddecke soweit angepasst worden, bis auch hier die Nachweise erfüllt wurden. Die Dimensionierung der Furnierschichtholzdecke erfolgt auf Basis des Gebrauchstauglichkeitsnachweises, der nach Boccadoro [3] ausschlaggebend für die Ermittlung der notwendigen Bauteildicken ist.

Kervenausbildung

Bei der Ausbildung der Kerven werden die Empfehlungen von Michelfelder [24] herangezogen. Dabei wird bei der Berechnung die Vorholzlänge (Abstand zwischen Auflagerpunkt und Beginn der ersten Kerbe) mit 25 cm , eine Kervertiefe von 2 cm , eine Kervlänge von 20 cm sowie eine Neigung der Kervenflanke von 0° gewählt. Bei Brettstapel- und Holzbalken-Beton-Verbunddecken werden unabhängig von der Spannweite jeweils drei Kerven pro Trägerhälfte angeordnet. Die Abstände zwischen den einzelnen Kerven sind dem Schubflussverlauf entsprechend angepasst. Dobler [13] hat sich in seiner Arbeit detailliert mit den einzelnen von Michelfelder empfohlenen Parametern der Kervenausbildung und deren Auswirkungen auf das Trag- und Verformungsverhalten auseinandergesetzt, weshalb an dieser Stelle auf weitere Erläuterungen verzichtet wird.

4.4.3 Deckenaufbau und Belastungsermittlung

Beansprucht werden die untersuchten Holz-Beton-Verbunddecken durch das jeweilige Eigengewicht g_E , eine Aufbaulast g_A und eine Nutzlast q . Die Auflast ergibt sich aus der Auswahl eines für Geschossdecken üblichen Fußbodenaufbaus, wie er in Abb. 4.15 dargestellt ist. Der Aufbau setzt sich aus einem Fußbodenbelag aus Massivholz, einem Zementestrich sowie einer Trittschalldämmung aus Glaswolle zusammen. Mit einer Gesamthöhe von 11 cm folgt unter Berücksichtigung der jeweiligen Materialrohddichten eine Belastung des Systems zu $1,6 \text{ kN/m}^2$.

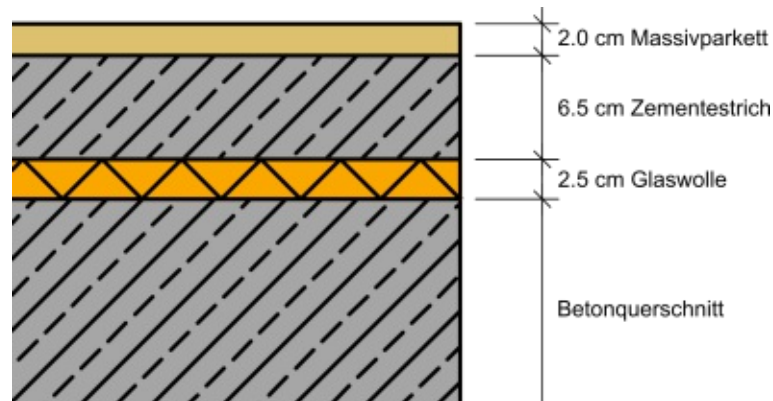


Abb. 4.15: Fußbodenaufbau HBV-Decke

Für die Berechnung der Nutzlast q wird die ÖNORM EN 1991-1-1 [32] verwendet. Gemäß Nutzlastkategorie A (Wohnflächen) beträgt die flächenbezogene Nutzlast für Geschossdecken $2,0 \text{ kN/m}^2$. Diese Belastung wird zusätzlich mit einem Trennwandzuschlag von $0,8 \text{ kN/m}^2$ versehen. Der Bemessungswert der Einwirkung wird anschließend nach ÖNORM EN 1990-1-1 [31] wie folgt berechnet:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.1)$$

$$\text{mit } \gamma_{G,j} = 1,35 \text{ und } \gamma_{Q,i} = 1,5$$

Mit dem Ergebnis aus Gleichung (4.1) lassen sich die Gesamtschnittgrößen auf das statische System eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers nach Gleichungen (4.2) und (4.3) ermitteln. Das maßgebende Biegemoment M_d befindet sich in Feldmitte, die größte Querkraft V_d am Auflager. Diese Schnittgrößen liefern die Grundlage für die in Abschnitt 4.4.7 berechneten Teilschnittgrößen auf den jeweiligen Einzelquerschnitt.

$$M_d = \frac{E_d \cdot l_0^2}{8} \quad (4.2)$$

$$V_d = \frac{E_d \cdot l_0}{2} \quad (4.3)$$

4.4.4 Material- und Verbundmittelsteifigkeit

Festigkeiten von Holz und Beton

Bei der Dimensionierung der Deckenvarianten werden die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der verwendeten Baustoffe den jeweiligen aktuellen Normen entnommen. Für die Berechnung der Brettstapel-Beton-Verbunddecke sowie der Holzbalken-Beton-Verbunddecke werden die Eigenschaften von homogenem Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 24h gemäß DIN EN 14080 [7] herangezogen. Aufgrund der Empfehlung von Schänzlin [40], zumindest einen Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 einzusetzen, wird zur Erhöhung der Sicherheit in dieser Arbeit für die beiden oben genannten Systeme ein Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 verwendet (gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [33]). Boccadoro [3] hingegen stützt sich in seiner Doktorarbeit zur Untersuchung des Tragverhaltens von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen aus Buchenfurnierschichtholz mit Kervenverbindung auf die Mittelwerte des Betons mit der Festigkeitsklasse C 50/60 gemäß der Schweizer Norm SIA 262 [42]. Das Buchenfurnierschichtholz aus dieser Publikation wurde von der Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH zur Verfügung gestellt und beruht auf einer Allgemeinen Bauartgenehmigung [56]. Dessen mechanische Eigenschaften stammen direkt aus Boccadoro [3] und werden in Abschnitt 4.5.2 genauer erläutert.

Verbundsteifigkeit der Kerven

Die Verbundsteifigkeit der Kerven wird neben der Kerventiefe und der Kervenausbildung auch von der Vorholzlänge, der Materialsteifigkeit des Holzes, dem Höhenverhältnis zwischen Holz und Beton sowie der Verwendung zusätzlicher stiftförmiger Verbindungsmittel beeinflusst. Aufgrund dieser zahlreichen Parameter und den teils stark variierenden Angaben in der Fachliteratur zur Verbundmittelsteifigkeit hat Dobler [13] in seiner Diplomarbeit zur Entwicklung einer Bemessungshilfe für HBV-Decken einen Ansatz zur Höhe des Verschiebungsmoduls von Kerven in einem Bereich von $K_{\text{ser}} = 500\text{--}1500 \text{ kN/mm}$ abgeleitet. In dieser Arbeit wird deshalb für die Berechnung der Brettstapel- sowie der Balkendecken im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ein Verschiebungsmodul von $K_{\text{ser}} = 1000 \text{ kN/mm}$ gewählt. Unter Berücksichtigung der Kerventiefe von 20 mm entspricht diese Annahme auch den Empfehlungen von Schänzlin [39].

Anders als bei den stiftförmigen Verbindungsmitteln wird bei Kervenverbindungen der Verschiebungsmodul im Grenzzustand der Tragfähigkeit im Vergleich zum Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht um den Faktor $2/3$ reduziert, sodass $K_u = K_{\text{ser}}$ gilt.

4.4.5 Ermittlung der Fugensteifigkeit

Über die zuvor genannten Randbedingungen hinaus werden nach ÖNORM EN 1995-1-1 [34] ausschließlich Querschnitte aus maximal drei Einzelteilen behandelt. Die in dieser Arbeit untersuchten Holz-Beton-Verbundkonstruktionen setzen sich aus zwei Teilquerschnitten zusammen, wie in Abb. 4.16 illustriert. Index 1 bezieht sich dabei auf den Betonquerschnitt, Index 2 bezeichnet den Holzquerschnitt. Des Weiteren sind in dieser Abbildung jene Parameter dargestellt, die die Verbundsteifigkeit k_i charakterisieren. Aus dem rechnerischen Verbundmittelabstand s_i und dem Verschiebungsmodul K_i folgt die Fugensteifigkeit gemäß Gleichung (4.4):

$$k_i = \frac{K_i}{s_i} \quad (4.4)$$

Bei der Verwendung von stiftförmigen Verbindungsmitteln ist der Abstand s_i abhängig von der tatsächlichen Anzahl an Verbindungsmitteln [55]. Sollten diese in n Reihen mit jeweils konstantem Abstand s angeordnet sein, werden alle Stifte gedanklich in eine Reihe übertragen, womit sich der rechnerische Verbindungsmittelabstand zu $s_i = s/n$ ergibt.

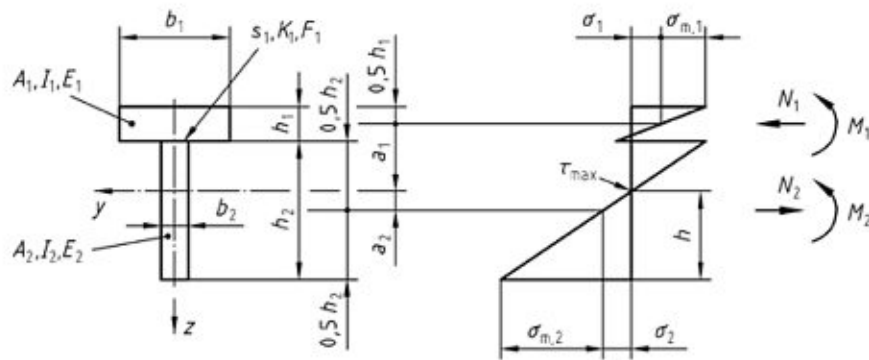


Abb. 4.16: Geometrische Zusammenhänge im Querschnitt (links) und Verteilung der Biegespannungen (rechts) [55]

Eine Besonderheit bei der in dieser Arbeit verwendeten Kervenverbindung liegt in der Diskontinuität des Verbindungsmittelabstandes. Da bei dieser Art der geforderte kontinuierliche Schubverbund über die Trägerlänge nicht gegeben ist, sondern nur einzelne punktuell angeordnete Kerven für den Schubverbund sorgen, muss ein effektiver Verbindungsmittelabstand s_{eff} ermittelt werden, der in Gleichung (4.7) einfließt. Für den Fall diskontinuierlich angeordneter Verbindungsmittel, die dem Querkraftverlauf angepasst sind, hat Michelfelder [24] durch Regressionsanalyse einen Ansatz zur Ermittlung des an dieser Stelle maßgebenden Abstandes entwickelt. Der effektive Verbindungsmittelabstand kann mit Hilfe des minimalen (s_{min}) bzw. des maximalen Verbindungsmittelabstandes (s_{max}), die nach Gleichung (4.5) bis (4.6) definiert und in Abb. 4.17 dargestellt sind, berechnet werden. Darin wird mit $l_{VH,i}$ die jeweilige Vorholzlänge und mit l_k die Kervlänge beschrieben.

$$s_{min} = l_k + l_{VH,2} \quad (4.5)$$

$$s_{max} = \frac{l_0}{2} - l_{VH,1} - l_k - l_{VH,2} - l_k - l_{VH,3} \quad (4.6)$$

$$s_{eff} = 1,14 \cdot s_{min} + 3,14 \cdot \frac{s_{max}}{l} \cdot (s_{max} - s_{min}) \quad (4.7)$$

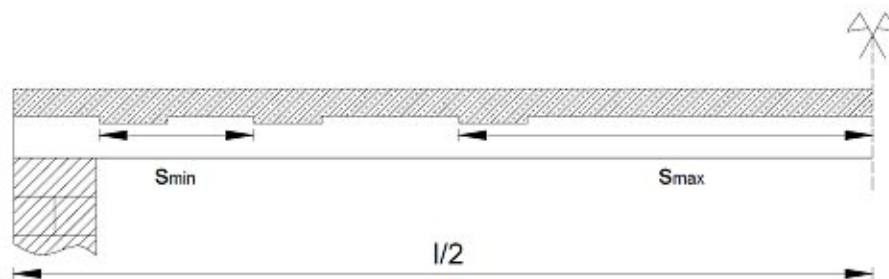


Abb. 4.17: Minimaler bzw. maximaler Kervenabstand [24]

4.4.6 Berechnung der wirksamen Biegesteifigkeit

Unter Berücksichtigung der Dehnsteifigkeit des Betons (EA_1) kann der Abminderungsfaktor γ_1 , der die Nachgiebigkeit der Verbundfuge und damit die Reduzierung der Biegesteifigkeit des Gesamtquerschnitts darstellen soll, gemäß Gleichung (4.8) ermittelt werden, γ_2 ergibt sich demnach zu 1.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + E_1 \cdot A_1 \cdot \frac{\pi^2}{k_i \cdot l^2}} \quad (4.8)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (4.9)$$

Für einen Querschnitt, der sich aus zwei Einzelteilen zusammensetzt, kann die wirksame Biegesteifigkeit EI_{eff} eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers nach Gleichung (4.10) berechnet werden.

$$EI_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^2 \left(E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \right) \quad (4.10)$$

Die für diese Berechnung notwendigen Schwerpunktsabstände der Teilquerschnitte (a_i) werden in Abhängigkeit der Schubnachgiebigkeit und der jeweiligen Dehnsteifigkeit berechnet (siehe Gleichungen (4.12) und (4.13)). Der Abstand a folgt aus den Höhen der Einzelquerschnitte gemäß Gleichung (4.11).

$$a = \frac{h_1 + h_2}{2} = a_1 + a_2 \quad (4.11)$$

$$a_1 = a \cdot \frac{E_2 \cdot A_2}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \quad (4.12)$$

$$a_2 = a \cdot \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \quad (4.13)$$

4.4.7 Berechnung der Teilschnittgrößen und Spannungsermittlung

Anschließend können unter Berücksichtigung der maßgebenden Belastung – die sich aus Eigengewicht, Ausbaulast und Nutzlast zusammensetzt – bzw. dem daraus resultierenden Biegemoment M_d die Bemessungsschnittgrößen in den Einzelquerschnitten ermittelt werden:

$$N_i = \frac{M_d}{EI_{\text{eff}}} \cdot \gamma_i \cdot a_i \cdot E_i \cdot A_i \quad (4.14)$$

$$M_i = \frac{M_d}{EI_{\text{eff}}} \cdot E_i \cdot I_i \quad (4.15)$$

Die resultierenden Normal- und Schubspannungen in den Teilquerschnitten sind in den Gleichungen (4.16) bis (4.18) dargestellt. Auf der sicheren Seite liegend, wird die Aufnahme der Schubspannungen rein dem Holzquerschnitt zugeordnet, wodurch sich $\tau_1 = 0$ ergibt.

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{A_1} + \frac{M_1}{I_1} \cdot z_1 \quad (4.16)$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{A_2} + \frac{M_2}{I_2} \cdot z_2 \quad (4.17)$$

$$\text{mit } -\frac{h_i}{2} \leq z_i \leq \frac{h_i}{2}$$

$$\tau_2 = 1,5 \cdot \frac{V_d}{A_2} \quad (4.18)$$

4.4.8 Ermittlung des maßgebenden Schubflusses und der Einflussbereiche

Der Bemessungswert des Schubflusses in der Verbundfuge ergibt sich bei nachgiebig verbundenen Querschnitte zu:

$$t_F = \frac{V_d \cdot \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1}{EI_{\text{eff}}} \quad (4.19)$$

Michelfelder [24] hat – in Kombination mit dem von ihr nach Regressionsanalyse bestimmten Verbindungsmittelabstand s_{eff} – folgenden Ansatz zur Bestimmung der maximalen Kervenbeanspruchung beschrieben:

$$F_{\text{eff}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_d \cdot \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s_{\text{eff}}}{EI_{\text{eff}}} \\ N_2 \end{array} \right. \quad (4.20)$$

Aufgrund der starken Überschätzung der Kervenkräfte bei der von Michelfelder geschilderten Methode nach Gleichung (4.20), hat Dobler [13] ein eigenes Berechnungsverfahren entwickelt, das eine wirklichkeitsnähere Darstellung der Kervenbeanspruchung liefert. Wie in Abb. 4.18 gezeigt wird, erfolgt im ersten Schritt eine Stauchung des Schubflusses t_F bis zum Beginn der Verbundmittelanordnung (entspricht der äußersten Kervenflanke). Anschließend erfolgt eine Einteilung der Einflussbereiche bis zur jeweils nächsten Kerne, über die der Schubfluss schlussendlich aufsummiert wird. Dies liefert für jeden Bereich die zugehörige Kervenkraft. Der Schubfluss t_F steht mit dem gestauchten Schubflusses t'_F und der maximalen Normalkraft im Betonquerschnitt $N_{1,\text{max}}$ folgendermaßen in Zusammenhang:

$$\frac{t'_{F,\text{max}} \cdot (l_0 - x_1)}{4} = \frac{t_{F,\text{max}} \cdot l_0}{4} = N_{1,\text{max}} \quad (4.21)$$

Im Vergleich dazu ermittelt Michelfelder durch Multiplikation des maximalen Schubflusses am Auflager mit dem effektiven Verbindungsmittelabstand nur eine Kervenkraft, wodurch in manchen Fällen die bereits erwähnte Überschätzung der Kervenbeanspruchung resultiert.

Diskontinuierlich angeordnete Verbindungsmittel sollten prinzipiell dem Schubkraftverlauf angepasst werden um eine gleichmäßige Beanspruchung zu erreichen. In Auflagernähe liegen deshalb geringere Verbindungsmittelabstände vor als in Richtung Trägermitte. Für die in dieser Arbeit bemessenen Brettstapel- und Holzbalken-Beton-Verbunddecken wird nach Empfehlung von Michelfelder [24] eine Kervenanzahl von $n = 3$ pro Trägerhälfte, bei einer Vorholzlänge

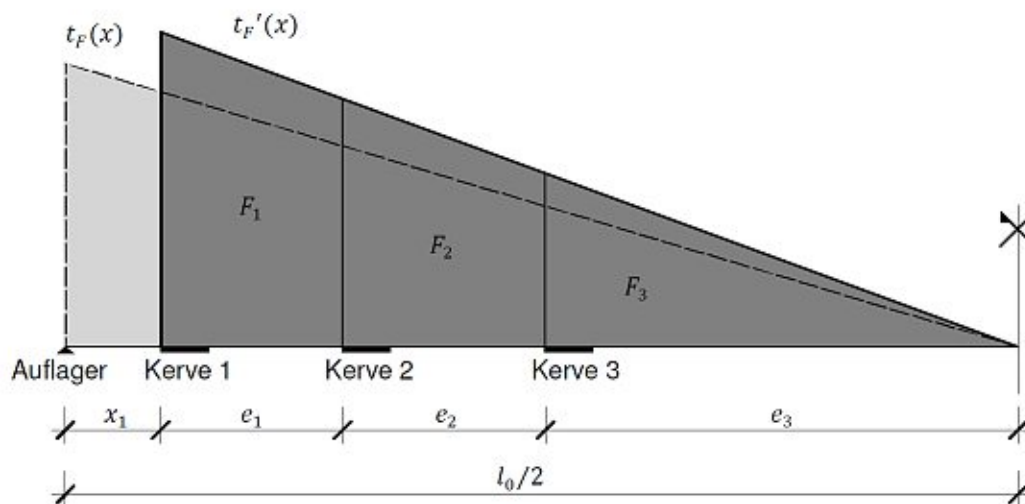


Abb. 4.18: Schubflussstauchung zur Ermittlung der Kervenkräfte [13]

$x_1 = 250$ mm und einer Kerventiefe von $t_k = 2$ cm, verwendet – unabhängig von der betrachteten Spannweite. Die dem Schubfluss angepassten Kervenabstände e_1 bis e_3 werden, in Abhängigkeit von der Kervenanzahl, gemäß Gleichungen (4.22) bis (4.24) berechnet, wobei die Länge l den Abstand zwischen den äußersten Kerven beschreibt ($l = l_0 - 2 \cdot x_1$).

$$e_1 = \frac{3 - \sqrt{6}}{6} \cdot l \quad (4.22)$$

$$e_2 = \frac{\sqrt{6} - \sqrt{3}}{6} \cdot l \quad (4.23)$$

$$e_3 = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot l \quad (4.24)$$

4.4.9 Berücksichtigung des Langzeitverhaltens

Das Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen wird maßgebend von der Langzeitentwicklung der einzelnen Materialkomponenten beeinflusst [13]. Durch Schwinden und Kriechen, sowohl des Beton- als auch des Holzquerschnitts, entstehen zeitabhängige Verformungen im Bauteil, die sich beträchtlich auf die Spannungs- und Endverformungsberechnung auswirken. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die angeführten Nachweise nicht nur zum Zeitpunkt $t = 0$, sondern auch zum Zeitpunkt $t = \infty$ geführt.

Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung und Höhe der Endkriechzahlen der Verbundmaterialien sind die erforderlichen Spannungsnachweise nach Schänzlin [39] bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen zusätzlich auch im Zeitraum von 3 bis 7 Jahren nach Belastungsbeginn zu führen. Da bei Deckensystemen im Hochbau zumeist der Gebrauchstauglichkeitsnachweis maßgebend ist, kann die Betrachtung dieses Zeitraums bei Führung der Spannungsnachweise zu den Zeitpunkten $t = 0$ sowie $t = \infty$ mit einer um 25 % erhöhten Spannung zufolge der ständigen Einwirkungen vereinfacht vernachlässigt werden. Die Bauteildimensionierungen der untersuchten Systemvarianten entsprechen dieser Vorgabe.

4.4.9.1 Kriechen

Als Kriechen werden die zeitabhängigen Verformungen unter dauerhafter Beanspruchung bezeichnet. Im Betonquerschnitt lassen sich die Kriechdeformationen auf Wasserumlagerungsprozesse im Zementstein zurückführen, die insbesondere bei Druckbeanspruchung auftreten. Das Kriechen von Holz ist stark abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt, der Umgebungstemperatur sowie der Belastungsart und -dauer [13].

Schänzlin [39] beschreibt zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Verhaltens von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen ein Berechnungsmodell, das die Lastumlagerungsprozesse zufolge der unterschiedlichen Kriechzahlen von Holz und Beton miteinbezieht. Ausgehend von den materialspezifischen Endkriechzahlen gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [33] und ÖNORM EN 1995-1-1 [34] wird der E-Modul zum Zeitpunkt $t = \infty$ durch die Gleichungen (4.25) und (4.26) ermittelt.

$$E_{B,\infty} = \frac{E_{B,0}}{1 + \psi_B \cdot \varphi} \quad (4.25)$$

$$E_{H,\infty} = \frac{E_{H,0}}{1 + \psi_H \cdot k_{\text{def}}} \quad (4.26)$$

Basierend auf einer Endkriechzahl des Betons von $\varphi(\infty, t_0) = 3,5$ und einem Deformationsbeiwert von $k_{\text{def}} = 0,6$ sind die Verbundfaktoren zur Ermittlung der Verbundkriechzahl nach Gleichung (4.27) und Gleichung (4.28) zu berechnen.

$$\psi_B(t = \infty) = 2,6 \cdot 0,8 \cdot \gamma_1^2 \quad (4.27)$$

$$\psi_H(t = \infty) = 1,0 \quad (4.28)$$

4.4.9.2 Schwinden

Als Schwinden wird nach Kuhlmann, Schänzlin und Michelfelder [22] die zeitabhängige Volumenverringerung bezeichnet, die unabhängig von der Belastung stattfindet. Bei HBV-Konstruktionen tendiert vor allem der Beton dazu, sich durch den Einfluss der Umgebungstemperatur volumenmäßig zu verkleinern, was durch den Holzquerschnitt behindert wird. Im Betonquerschnitt entsteht somit eine Zugkraft N_S , was wiederum zu einer Druckbeanspruchung des Verbundquerschnitts führt. Abb. 4.19 zeigt die aus diesem Zustand resultierende Erhöhung der Durchbiegung. Umgekehrten Einfluss übt das Holzschwinden auf den Gesamtquerschnitt aus. Durch die Verkürzung des Holzes und die Behinderung durch den Betonquerschnitt entsteht insgesamt ein negatives Moment und eine Verringerung der Enddurchbiegung.

In dieser Arbeit wird in der Berechnung lediglich das Betonschwinden berücksichtigt, eine Vernachlässigung des Schwindens des Holzquerschnitts kann durch eine auf der sicheren Seite liegenden Betrachtungsweise begründet werden [13]. Zu diesem Zweck wird die Festhaltekraft F_0 eingeführt, die sich aus der Endschwinddehnung des Betons (ε_{cs}), dem Nachgiebigkeitsfaktor γ_1 und der Dehnsteifigkeit EA_1 nach Gleichung (4.29) ergibt. Die Schwinddehnung des Betons setzt sich aus der Trocknungsschwinddehnung und der autogenen Schwinddehnung zusammen und kann gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [33] berechnet werden. In dieser Arbeit wird ε_{cs} mit 0,3 ‰ angenommen.

$$F_0 = \varepsilon_{\text{cs}} \cdot \gamma_1 \cdot EA_1 \quad (4.29)$$

Dobler [13] hat in einem ersten Lastfall die Betonplatte gedanklich vom Bauteil gelöst und die Verhinderung der Verkürzung des Betons mit der zentrisch angreifenden Zugkraft F_0 dargestellt.

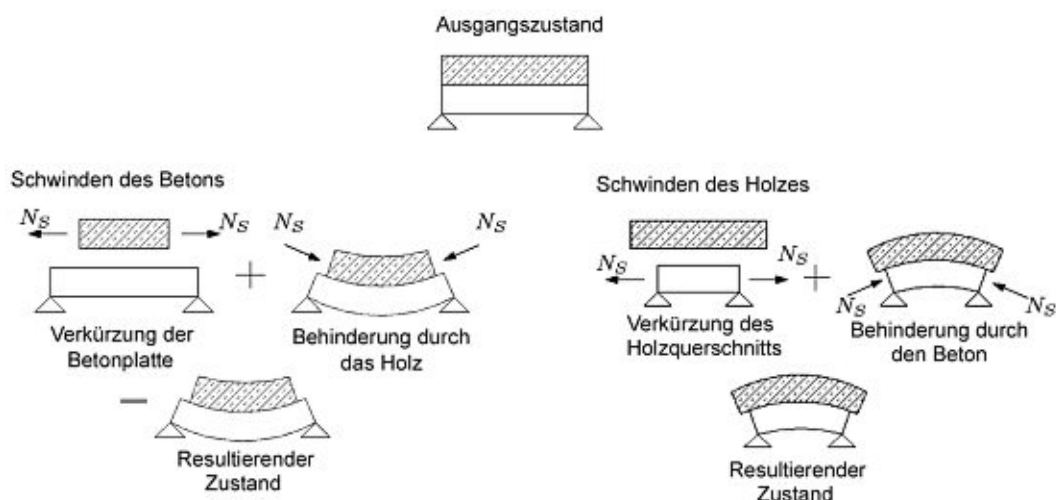


Abb. 4.19: Schwinden des Betons und des Holzes [22]

Der Holzquerschnitt bleibt vorerst unbelastet. Die resultierenden Normalkräfte aus diesem Lastfall ergeben sich zu:

$$N_{1,S;LF1} = F_0 \quad (4.30)$$

$$N_{2,S;LF1} = 0 \quad (4.31)$$

Nach erneuter Herstellung des Verbunds wird diese Festhaltekraft im zweiten Lastfall in entgegengesetzter Richtung auf den Gesamtquerschnitt aufgebracht. Daraus ergibt sich folgende querschnittsbezogene Druckbeanspruchung:

$$N_{1,S;LF2} = -F_0 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \cdot \left(1 + a^2 \cdot \frac{(E_2 \cdot A_2)^2}{(\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2) \cdot EI_{\text{eff}}} \right) \quad (4.32)$$

$$N_{2,S;LF2} = -F_0 \cdot \frac{E_2 \cdot A_2}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \cdot \left(1 - a^2 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2}{(\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2) \cdot EI_{\text{eff}}} \right) \quad (4.33)$$

Aus der Überlagerung von Lastfall 1 und Lastfall 2 ergeben sich schlussendlich jene Normalkräfte, die aus dem Schwinden des Betonquerschnitts resultieren. Diese werden anschließend mit den Normalkräften, die sich zufolge der Belastung ergeben, in Verbindung gesetzt und in der Spannungsermittlung im Grenzzustand der Tragfähigkeit zum Zeitpunkt $t = \infty$ berücksichtigt.

Des Weiteren wirkt durch den exzentrischen Angriffspunkt von F_0 ein positives Moment M_S auf den Gesamtquerschnitt, das sich wiederum auf die Einzelquerschnitte zu $M_{1,S}$ und $M_{2,S}$ aufgliedern lässt:

$$M_S = F_0 \cdot a_1 \quad (4.34)$$

$$M_{1,S} = M_S \cdot \frac{EI_1}{EI_{\text{eff}}} \quad (4.35)$$

$$M_{2,S} = M_S \cdot \frac{EI_1}{EI_{\text{eff}}} \quad (4.36)$$

Auch dieser Momentenanteil ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit zum Zeitpunkt $t = \infty$ mit jenem zu überlagern, der sich aus der äußeren Belastung nach Gleichung (4.2) ergibt. Zusätzlich führt die Momentenbeanspruchung M_S zu einer Erhöhung der Enddurchbiegung, die im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit folgendermaßen berücksichtigt wird:

$$w_{S,\text{fin}} = \frac{M_S \cdot l_0^2}{8 \cdot EI_{\text{eff}}} \quad (4.37)$$

4.4.9.3 Einfluss auf das Verbundmittel

Die Auswirkung der zeitabhängigen Verformungen auf das Verbundmittel – insbesondere zufolge Kriechens – zum Zeitpunkt $t = \infty$ beschreibt Schänzlin [39] durch Gleichung (4.38). Auch hier erfolgt die Berücksichtigung durch Einbeziehung des Verbundfaktors in die Berechnung der Kervensteifigkeit (mit $\psi_{\text{VBM}}(t = \infty) = 1,0$). Die Multiplikation der Kriechzahl mit dem Faktor 2 resultiert dabei aus den verstärkt auftretenden Verformungen im Kervenbereich.

Anders als bei den stiftförmigen Verbindungsmitteln ist beim Verschiebungsmodul der Kervenverbindung zu beachten, dass der Anfangsverschiebungsmodul K_{ser} im Grenzzustand der Tragfähigkeit im Vergleich zum Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht um den Faktor $2/3$ zu verringern ist. Der Verschiebungsmodul für den Nachweis im GZT ergibt sich somit zu $K_{\text{u}} = K_{\text{ser}}$. Tab. 4.1 liefert eine Übersicht zur Berücksichtigung des Kriechens in der jeweiligen Bauteilebene.

$$K_{\infty} = \frac{K_{\text{ser}}}{1 + \psi_{\text{VBM}} \cdot 2 \cdot k_{\text{def}}} \quad (4.38)$$

Tab. 4.1: Material- und Verbundmittelsteifigkeiten zum Zeitpunkt $t = 0$ und $t = \infty$

Bauteilebene	Grenzzustand	$t = 0$	$t = \infty$
Beton	GZG, GZT	$E_{B,0}$	$\frac{E_{B,0}}{1 + \psi_B \cdot \varphi}$
Holz	GZG, GZT	$E_{H,0}$	$\frac{E_{H,0}}{1 + \psi_H \cdot k_{\text{def}}}$
Verbindungsmittel	GZG	K_{ser}	$\frac{K_{\text{ser}}}{1 + \psi_{\text{VBM}} \cdot 2 \cdot k_{\text{def}}}$
	GZT	K_{u}	$\frac{K_{\text{u}}}{1 + \psi_{\text{VBM}} \cdot 2 \cdot k_{\text{def}}}$

4.4.10 Nachweisführung

Da für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen kein eigenes und vollständiges Bemessungskonzept vorliegt, ist es notwendig, die einzelnen Ansätze für Holz, Beton bzw. Verbundbauteile zu vergleichen und sie für den eigenen Bedarfsfall anzupassen. Für die Bemessung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen unter Verwendung des γ -Verfahrens gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [34] werden in dieser Arbeit die Spannungsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) sowie die Durchbiegungs- und Schwingungsnachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) geführt. Die für die Nachweisführung notwendigen Rechenschritte werden ebenso wie die maßgebenden Beiwerte und Parameter aus den jeweiligen materialspezifischen Normen (ÖNORM EN 1992-1-1 [33] für Beton bzw. ÖNORM EN 1995-1-1 [34] für Holz) entnommen, wobei die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften für Brettschichtholz aus der DIN EN 14080 [7] stammen. Im Folgenden wird auf die geführten Nachweise etwas genauer eingegangen.

4.4.10.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit werden folgende Nachweise sowohl zum Zeitpunkt $t = 0$ als auch zum Zeitpunkt $t = \infty$ geführt:

- Momententragfähigkeit am Beton- und Holzquerschnitt
- Querkrafttragfähigkeit am Holzquerschnitt
- Kerentragfähigkeit am maßgebenden Verbindungsmittel

Momententragfähigkeit

Für den Nachweis der Momententragfähigkeit ist zu überprüfen, ob im jeweiligen Querschnittsteil die maximal aufnehmbaren Spannungen aufgrund der Momentenbeanspruchung nicht überschritten werden. Für beide Querschnitte ist hierbei das Moment in Feldmitte maßgebend. Im Betonquerschnitt sind demnach folgende Bedingungen am oberen (Gleichung (4.39)) bzw. unteren Querschnittsrand (Gleichung (4.40)) zu erfüllen:

$$\frac{\sigma_{1,o,d}}{f_{cd}} \leq 1 \quad (4.39)$$

$$\frac{\sigma_{1,u,d}}{f_{ctd}} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sigma_{1,u,d}}{f_{cd}} \leq 1 \quad (4.40)$$

Wird die Betonplatte an beiden Enden druckbeansprucht, ist auch derselbe Nachweis mit der zulässigen Betondruckfestigkeit f_{cd} zu führen. Wenn die auf diesen Teilquerschnitt wirkende Normalkraft die Zugspannungen aus der Momentenbeanspruchung nicht überdrückt, verbleibt am unteren Querschnittsrand eine Zugspannung im Beton und es ist der Nachweis hinsichtlich der zulässigen Biegezugfestigkeit f_{ctd} zu führen. Wird diese Bedingung nicht eingehalten, wird eine neue Betonspannung in Form einer lokalen Spannungsumlagerung berechnet, mit der der Nachweis erneut zu führen ist. Da bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen die Betonzugzone meist lokal begrenzt ist, kann eine derartige Umlagerung ohne Auswirkungen auf die Biegesteifigkeit des Gesamtsystems angenommen werden. Wird dieser Nachweis wiederum nicht erfüllt, ist eine zusätzliche Biegebewehrung anzusetzen.

Für den Holzquerschnitt ist der Nachweis in Anbetracht einer kombinierten Beanspruchung aus Biegung und Zug zu führen:

$$\frac{\sigma_{2,t,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{2,m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.41)$$

Querkrafttragfähigkeit

Die maximale Querkraft – und somit üblicherweise auch die maximale Schubspannung – liegt bei statisch bestimmt gelagerten Einfeldträgern am Auflager. Bei Holz-Beton-Verbunddecken mit Kervenverbindung kann die maßgebende Beanspruchung aufgrund der Einkerbungen auch am äußeren Ende der auflagernächsten Kerbe situiert sein. Deshalb ist, neben der Schubspannung am Auflager, auch die Schubspannung an der vom Auflager ausgehenden ersten Kervenflanke zu ermitteln. Auf der sicheren Seite liegend, wird die gesamte Querkraftbeanspruchung dem Holzquerschnitt zugeordnet:

$$\tau_{2,d,\max} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_2 \cdot h_2} \\ \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{VH1,d}}{b_2 \cdot (h_2 - t_k)} \end{array} \right. \quad (4.42)$$

Die sich daraus ergebende maßgebende Schubspannung hat gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [34] folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\frac{\tau_{2,d,\max}}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (4.43)$$

Kerventragfähigkeit

Schönborn, Flach und Feix [41] haben im Zuge ihrer theoretischen und experimentellen Untersuchung zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken mit Kervenverbindungen die Wirkung des Verbindungsmittels in Abscherversuchen analysiert. Dabei haben sie insgesamt vier unterschiedliche Kervenversagensbilder festgestellt:

- Druckversagen des Holzes aufgrund zu hoher Druckspannungen an der Kervenflanke
- Abscheren des Vorholzes durch Spannungskonzentrationen im Druckbereich hinter der Kerbe aufgrund zu kurzer Vorholzlängen
- Konsolversagen des Betons an der druckbeanspruchten Kervenseite
- Schubversagen des Betons über dem Kervenbereich bei zu kurzen Kervenzlängen oder zu geringen Kervenzbreiten

In Anlehnung an ihre Versuchsergebnisse haben Schönborn, Flach und Feix [41] ein Bemessungsmodell entwickelt, indem sie für jeden Versagensfall eine Bestimmungsgleichung aufgestellt haben:

$$F_{\text{Druck,Holz,d}} = 1,2 \cdot b_k \cdot t_k \cdot f_{c,\alpha,d} \cdot k_\alpha \quad (4.44)$$

$$F_{\text{Abscher,Holz,k}} = 1,0 \cdot b_k \cdot 8 \cdot t_k \cdot f_{v,k} \quad (4.45)$$

$$F_{\text{Teilflächenpressung}} = 2,25 \cdot b_k \cdot t_k \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{l_k}{180} \quad (4.46)$$

$$F_{\text{Rd}} = 2,55 \cdot b_k \cdot l_k \cdot 2,4 \cdot (0,09 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}}) \quad (4.47)$$

Die maximal aufnehmbare Kervenkraft ergibt sich aus dem kleinsten Wert der Gleichungen (4.44) bis (4.47) und ist mit der maßgebenden Kervenbeanspruchung gemäß Abschnitt 4.4.8 zu vergleichen. Im Gegensatz zu den Spannungsnachweisen am Beton- und Holzquerschnitt ist der

Nachweis der Kerventragfähigkeit nur zum Zeitpunkt $t = 0$ zu führen, was auf eine sich verringerende effektive Systemsteifigkeit (und somit auch der Kerwenbeanspruchung) aufgrund von Langzeiteinflüssen zurückzuführen ist.

Kerventragfähigkeit nach Schänzlin

Im Hinblick auf die zukünftige Fassung der EN 1995, in der auch Regelungen zur Holz-Beton-Verbundbauweise integriert sein sollen, hat Schänzlin [39] die grundlegenden Inhalte zusammengefasst. Teil dieser Schlussfolgerung ist ein alternatives Konzept zum Nachweis der Kerventragfähigkeit, das folgende Versagensmodi berücksichtigt:

- Abscheren der Betonnocke
- Druckversagen des Betons an der Kerwenflanke
- Schubversagen des Vorholzes
- Druckversagen des Holzes an der Kerwenflanke

Diese Versagensarten werden durch die Bemessungsgleichung (4.48) bestimmt.

$$F_{\text{Abscher}} = \min \begin{cases} f_{v,c,d} \cdot b_N \cdot l_N \\ f_{c,d} \cdot b_N \cdot h_N \\ f_{v,h,d} \cdot b_N \cdot \min(l_v; l_s) \\ f_{h,d} \cdot b_N \cdot h_N \end{cases} \quad (4.48)$$

Der Bemessungswert der Abscherbeanspruchbarkeit in der Fuge ergibt sich aus dem kleinsten Wert gemäß Gleichung (4.48) und wird ebenfalls mit der maßgebenden Kerwenbeanspruchung nach Abschnitt 4.4.8 verglichen. Da die Beanspruchung aller untersuchten Systemvarianten in beiden beschriebenen Verfahren unterhalb der Beanspruchbarkeit liegt, gilt der Nachweis der Kerventragfähigkeit als erfüllt.

4.4.10.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden in dieser Arbeit folgende Nachweise geführt, die auf der ÖNORM B 1995-1-1 [30] beruhen:

- Durchbiegungsnachweis
- Schwingungsnachweis

Durchbiegungsnachweis

Für den Durchbiegungsnachweis sind folgende Bemessungssituationen zu berücksichtigen:

- Anfangsverformung
 - charakteristische Kombination mit $w_{\text{inst}} \leq l/300$
- Endverformung
 - charakteristische Kombination mit $w_{\text{fin}} \leq l/200$
 - quasi-ständige Situation mit $w_{\text{net,fin}} \leq l/250$

Die darin enthaltenen Grenzwerte folgen den normativen Empfehlungen für beidseitig aufliegende Decken mit gerader Stabachse. Neben der elastischen Anfangsdurchbiegung w_{inst} wird auch für die Berechnung der Endverformung w_{fin} eine charakteristische Einwirkungskombination vorausgesetzt. Zusätzlich ist der Grenzwert der Endverformungen $w_{\text{net,fin}}$ unter quasi-ständiger Bemessungssituation einzuhalten. Bei der Berechnung der Verformungen sind die zeitlich veränderlichen Steifigkeitswerte im Anfangs- und Endzustand nach Tab. 4.1 zu berücksichtigen.

Um die maßgebenden Durchbiegungen berechnen zu können, haben Winter, Kreuzinger und Mestek [55] einen passenden Deformationsbeiwert k_{def} für den Holz-Beton-Verbundquerschnitt bestimmt:

$$k_{\text{def}} = \frac{EI_{\text{eff},0}}{EI_{\text{eff},\infty}} - 1 \quad (4.49)$$

Da bei den gewählten Systemen jeweils nur eine ständige und eine veränderliche Belastung vorhanden ist, vereinfacht sich die Durchbiegungsberechnung unter Berücksichtigung des Verformungsanteils, der sich aus der Schwindverkürzung des Betons ergibt und bereits in Gleichung (4.37) berechnet wurde, zu:

$$w_{\text{inst}} = w_{\text{inst},G} + w_{\text{inst},Q} \leq l/300 \quad (4.50)$$

$$w_{\text{fin}} = w_{\text{inst},G} \cdot (1 + k_{\text{def}}) + w_{\text{inst},Q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{\text{def}}) + w_{S,\text{fin}} \leq l/200 \quad (4.51)$$

$$w_{\text{net,fin}} = (w_{\text{inst},G} + \psi_2 \cdot w_{\text{inst},Q}) \cdot (1 + k_{\text{def}}) + w_{S,\text{fin}} - w_c \leq l/250 \quad (4.52)$$

Mit w_c wird darin eine allfällige Überhöhung des Bauteils bezeichnet. Diese wird mit $w_c = 0$ angenommen.

Schwingungsnachweis

Der Nachweis personeninduzierter Schwingungen von Deckenkonstruktionen aus Holz wird in der ÖNORM B 1995-1-1 [30] geregelt und schließt folgende Nachweis mit ein:

- Nachweis der Eigenfrequenz
- Nachweis der Schwingbeschleunigung (bei Nichteinhalten des Frequenzkriteriums)
- Nachweis der Steifigkeit

In einem ersten Schritt der Nachweisführung ist die Eigenfrequenz f_1 des Systems nach Gleichung (4.53) zu berechnen. Die Längsbiegesteifigkeit $EI_{\text{längs}}$ setzt sich dabei aus der effektiven Biegesteifigkeit der HBV-Decke (im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zum Zeitpunkt $t = 0$) und der Biegesteifigkeit des Estrichs zusammen. Der in dieser Arbeit gewählte Zementestrich weist einen Elastizitätsmodul von $25\,000\text{ N/mm}^2$ auf. Die Flächenmasse m ergibt sich aus der Summe der ständigen Einwirkungen (Deckeneigengewicht und Fußbodenaufbau).

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l_0^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{\text{längs}}}{m}} \quad (4.53)$$

Wird der vorgegebene Grenzwert der Eigenfrequenz nicht unterschritten ($f_1 \geq f_{\text{gr}}$), kann mit dem Nachweis der Steifigkeit fortgesetzt werden, wobei für die Erbringung dieses Nachweises der Mindestwert der ersten Eigenfrequenz von $f_{1,\text{min}} \geq 4,5\text{ Hz}$ unbedingt einzuhalten ist. Der Steifigkeitsnachweis gilt als erfüllt, sofern die größte vertikale Anfangsdurchbiegung w_{stat} infolge

einer in Feldmitte angreifenden Einzellast von $F = 1 \text{ kN}$ kleiner als der vorgegebene Grenzwert w_{gr} ist. Die Durchbiegung w_{stat} wird dabei wie folgt berechnet:

$$w_{\text{stat}} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI_{\text{längs}} \cdot b_{\text{F}}} \quad (4.54)$$

Bei Deckensystemen mit $f_{1,\text{min}} \leq f_1 \leq f_{\text{gr}}$ ist zusätzlich der Grenzwert der Schwingbeschleunigung (a_{rms} nach Gleichung (4.55)) einzuhalten.

$$a_{\text{rms}} = \frac{0,4 \cdot \alpha \cdot F_0}{2 \cdot \zeta \cdot M^*} \quad (4.55)$$

Zur Berechnung des Fourierkoeffizienten α , der Gewichtskraft F_0 , des modalen Dämpfungsgrads ζ und der modalen Masse M^* wird an dieser Stelle auf die ÖNORM B 1995-1-1 [30] verwiesen. In Abhängigkeit der Deckenklasse sind die einzuhaltenden Grenzwerte des Schwingungsnachweises nochmals in Tab. 4.2 dargestellt. In dieser Arbeit wird darauf geachtet, die Werte für die Deckenklasse I (z. B. Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten) einzuhalten.

Tab. 4.2: Grenzwerte zur Erfüllung des Schwingungsnachweises nach ÖNORM B 1995-1-1 [30]

Grenzwert	Deckenklasse I	Deckenklasse II
Frequenzkriterium	$f_1 \geq f_{\text{gr}} = 8 \text{ Hz}$	$f_1 \geq f_{\text{gr}} = 6 \text{ Hz}$
Steifigkeitskriterium	$w_{\text{stat}} \leq w_{\text{gr}} = 0,25 \text{ mm}$	$w_{\text{stat}} \leq w_{\text{gr}} = 0,50 \text{ mm}$
Schwingbeschleunigung	$a_{\text{rms}} \leq a_{\text{gr}} = 0,05 \text{ m/s}^2$	$a_{\text{rms}} \leq a_{\text{gr}} = 0,10 \text{ m/s}^2$

4.4.10.3 Maßgebender Bemessungsnachweis

Im Zuge der Nachweisführung zeigte sich, dass bei der Berechnung von Brettstapel- und Holzbalken-Beton-Verbunddecken meist der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (im Speziellen der Durchbiegungsnachweis) maßgebend für die Querschnittdimensionierung ist. Es sind jedoch stets alle vorgestellten Nachweise zu führen, da vor allem bei Deckenvarianten mit Holzbalken-Unterkonstruktionen eine höhere Kervenbeanspruchung vorliegt. Weil die Verbindungsmittel nicht über die gesamte Deckenbreite zur Schubübertragung angeordnet werden können, ist bei diesem System speziell auf den Nachweis der Kerne zu achten.

4.5 Bemessung der LVL-Beton-Verbunddecke

4.5.1 Systemeigenschaften

Um das Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken aus Buchenurnierschichtholz (LVL) mit Kervenverbindung beschreiben zu können, hat Boccadoro in Zusammenarbeit mit verschiedenen Autoren [3–6] ein analytisches Berechnungsmodell entwickelt, das ebenso wie die bereits behandelten Systeme auf dem γ -Verfahren beruht. Ziel dieser theoretischen sowie experimentellen Untersuchungen war, das Tragverhalten der Verbunddecken zu untersuchen, mögliche Versagensformen zu beschreiben, um anschließend eine Grundlage für die Erarbeitung eines Bemessungsverfahrens zu erhalten. Des Weiteren hat die Arbeit von Boccadoro [3] gezeigt, dass

unter Verwendung von Buchenfurnierschichtholz anstelle von Massivholz oder Brettschichtholz, das Holzverhalten deutlich besser vorhersehbar ist und eine duktile Kervenkonstruktion bei Holz-Beton-Verbunddecken möglich wird. Voraussetzung für die Duktilität der Gesamtkonstruktion ist die Verwendung einer Vertikalbewehrung, die den Holz- und den Betonquerschnitt zusammenhält und die Vergrößerung von Rissen im Beton verhindert. Die Konstruktion sollte so ausgelegt sein, dass bei stetiger Lasterhöhung zuerst ein Versagen der Kerven aufgrund der Druckspannungen im Holz und anschließend ein Betonversagen am oberen Querschnittsrand auftritt. Im Gegenzug dazu sollte der Holzquerschnitt aus Buchenfurnieren so gestaltet werden, dass ein Biegezugversagen so spät wie möglich eintritt. Diese Vorgaben werden auch in dieser Arbeit berücksichtigt und sollen sicherstellen, dass ein Versagen des Verbundbauteils erst nach Ausbildung sehr großer Verformungen zu verzeichnen ist.

Untersucht werden in dieser Arbeit LVL-Beton-Verbunddecken mit einer Spannweite zwischen 6 m und 8 m und einer Elementbreite von 0,53 m unter der Annahme einer gleichförmigen Belastung. Für den Verbund zwischen Holz und Beton sorgen 15 mm tiefe Kerven, die sich nicht durch Variation des Abstands, sondern durch unterschiedliche Kervenbreiten dem Querkraftverlauf des statischen Systems anpassen.

In den folgenden Abschnitten wird auf die möglichen Versagensformen bei HBV-Konstruktionen mit Buchenfurnierschichtholz und die wichtigsten Bestandteile und Formeln zur Beschreibung des Tragwerkverhaltens etwas genauer eingegangen. Eine detailliertere Ausführung ist der Arbeit von Boccadoro [3] zu entnehmen.

4.5.2 Material- und Verbundmittelsteifigkeit

Bei der Auswahl geeigneter Materialien ist in erster Linie darauf zu achten, dass die charakteristische Betondruckfestigkeit $f_{c,1}$ eine höhere Druckfestigkeit als der Holzquerschnitts $f_{c,0,2}$ aufweist. Dies folgt aus der Bedingung, dass zur Optimierung des duktilen Verhaltens des Bauteils zuerst ein Druckversagen des LVL-Querschnitts eintreten soll (siehe Abschnitt 4.5.3). Die in dieser Arbeit verwendeten Mittelwerte der Materialeigenschaften sind in Tab. 4.3 bzw. Tab. 4.4 dargestellt. Die Verbundmittelsteifigkeit K_{ser} wird in Anlehnung an die Testergebnisse der Schubversuche nach Boccadoro [3] mit 300 kN/mm angenommen.

Tab. 4.3: Mittelwerte der Materialeigenschaften des LVL-Querschnitts [3]

E-Modul	$E_{0,2}$	13 800 N/mm ²
Druckfestigkeit parallel zur Faser	$f_{c,0,2}$	45,7 N/mm ²
Zugfestigkeit parallel zur Faser	$f_{t,0,2}$	58,5 N/mm ²
Biegefestigkeit parallel zur Faser	$f_{m,0,2}$	77,9 N/mm ²
Schubfestigkeit parallel zur Faser	$f_{v,2}$	10,7 N/mm ²
Rollschubfestigkeit	$f_{Rv,2}$	3,6 N/mm ²

4.5.3 Mögliche Versagensformen

In Abb. 4.20 bzw. Tab. 4.5 sind die von Boccadoro [6] vorgestellten verschiedenen Versagensformen von LVL-Beton-Verbundkonstruktionen mit Kervenverbindung dargestellt. Darunter stellen die einzigen beiden duktilen Versagensarten das Druckversagen im Holzquerschnitt (2C) und das Erreichen der Betondruckfestigkeit (1C,c) dar. Der Träger soll so ausgebildet werden, dass zuerst

Tab. 4.4: Mittelwerte der Materialeigenschaften des Beton-Querschnitts [3]

E-Modul des ungerissenen Betonquerschnitts	E_1	38 800 N/mm ²
Druckfestigkeit	$f_{c,1}$	58 N/mm ²
Zugfestigkeit	$f_{t,1}$	4,1 N/mm ²
Maximale Stauchung	$\epsilon_{u,1}$	0,003

ein Druckversagen des LVL-Bausteils an der Kontaktfläche der Kerne (A_{Ni}) eintritt, da durch diese Versagensform die höchste Duktilität erzielt werden kann. Dabei sind die Kerne proportional zur Schubkraft ausgebildet, sodass ein gleichzeitiges Versagen aller Kerne verzeichnet werden kann. Anschließend soll die Betondruckfestigkeit am oberen Querschnittsrand erreicht werden. Sofern alle anderen Arten, bei denen es sich um spröde Versagensformen handelt, aufgrund konstruktiver Maßnahmen (richtige Kervenausbildung sowie Anordnung einer Vertikalbewehrung) ausgeschlossen werden können, treten vor Versagen des Gesamtbauteils die gewünschten großen Verformungen auf.

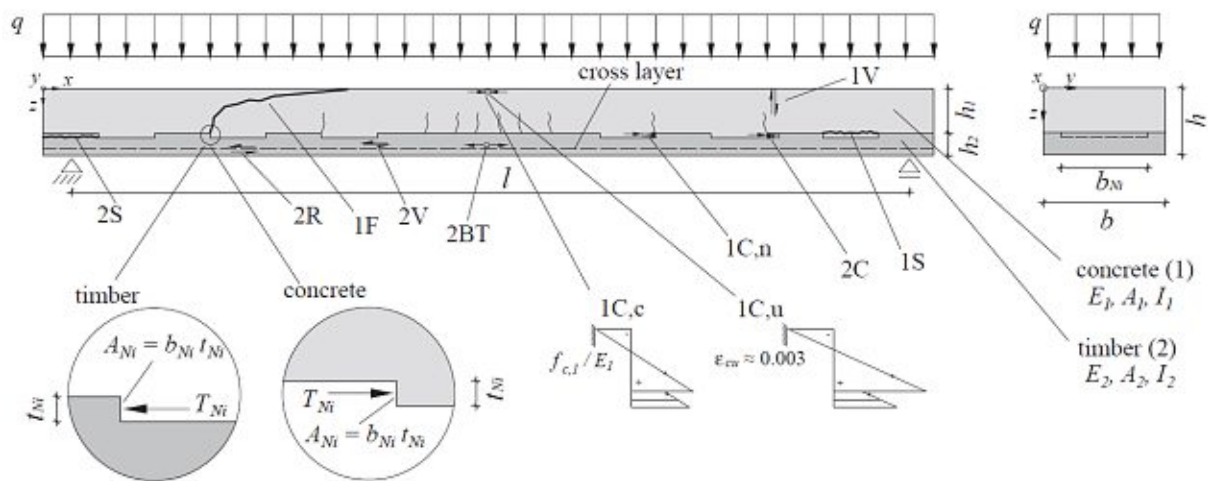


Abb. 4.20: Mögliche Versagensformen bei der LVL-Beton-Verbunddecke (ohne Vertikalbewehrung) [6]

4.5.4 Beschreibung des Tragwerkverhaltens

Sind die genannten Maßnahmen eingehalten, kann das strukturelle Verhalten der LVL-Beton-Verbunddecke vereinfacht anhand von vier Zuständen beschrieben werden. In Zustand I verhält sich das gesamte Bauteil elastisch und im Beton treten keine Risse auf. Nachdem die kritische Zugspannung im Beton erreicht ist, werden die ersten Risse gebildet und das Verbundbauteil gerät in Zustand II. In diesen beiden ersten Zuständen wird linear elastisches Materialverhalten angenommen, was die Verwendung des γ -Verfahrens ermöglicht. Das Versagen auf Kervenebene leitet das duktile Bauteilverhalten ein (Zustand III und IV).

Tab. 4.5: Mögliche Versagensformen bei der LVL-Beton-Verbunddecke (ohne Vertikalbewehrung) [6]

Ebene	Versagen	Maßgebende Stelle	
Beton	1C,n	Druckversagen	Kervenkontaktfläche (A_{Ni})
	1C,c	Erreichen der Betondruckfestigkeit	Betonquerschnittsrand ($z = 0$)
	1C,u	Absoluten Betonbeanspruchung	Betonquerschnittsrand ($z = 0$)
	1S	Horizontales Schubversagen	in Kervennähe ($z = h_1$)
	1F	Biegeschubversagen	in Kervennähe ($z = x$)
	1V	Vertikales Schubversagen	in Kervennähe in der Druckzone
LVL	2BT	Biegezugversagen	LVL-Querschnitt
	2V	Schubversagen	LVL-Querschnitt
	2R	Rollschubversagen	Querlage
	2C	Druckversagen entlang der Faser	Kervenkontaktfläche (A_{Ni})
	2S	Scherversagen	in Kervennähe ($z = h_1 + t_{Ni}$)

4.5.4.1 Zustand I

Im ersten Zustand kann der Beton die auftretenden Zugspannungen aufnehmen und weist keine Risse auf. Zur Berechnung der Querschnittswerte, der Spannungen sowie der Verformungen kommt das γ -Verfahren zur Anwendung. Anders als bei den bisher behandelten Systemen ist bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion der Betonquerschnitt größer dimensioniert als der Holzquerschnitt, wodurch sich der Systemschwerpunkt verschiebt und sich die γ -Faktoren nach Gleichung (4.56) bzw. Gleichung (4.57) ergeben. Der Faktor s in Gleichung (4.57) beschreibt darin den Kervenabstand. Die Verbundmittelsteifigkeit wird mit K_i ausgedrückt.

$$\gamma_1 = 1 \quad (4.56)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{1 + E_2 \cdot A_2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot s}{K_i \cdot I^2}} \quad (4.57)$$

Die Grenze der ersten Phase ist erreicht, sobald der Beton Risse aufgrund der Zugspannungen an der Stelle $z = h_1$ entwickelt. Das Biegemoment, unter dessen Einwirkung die ersten Risse im Betonquerschnitt entstehen, wird unter Berücksichtigung des Widerstandsmoments $W_{1,b,I}$ und der Betonzugfestigkeit $f_{t,1}$ folgendermaßen berechnet:

$$M_{cr} = \frac{f_{t,1} \cdot W_{1,b,I}}{n_1} = \frac{f_{t,1}}{n_1} \cdot \frac{I_I}{\gamma_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} - x_I\right) + \frac{h_1}{2}} \quad (4.58)$$

$$\text{mit } n_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad (4.59)$$

Die dazugehörige Krümmung im Zustand I, die für die Berechnung der axialen Dehnung und weiterführend zur Spannungsermittlung benötigt wird, ergibt sich nach Gleichung (4.60).

$$\chi_{\text{cr}} = \frac{M_{\text{cr}}}{EI_{\text{I}}} \quad (4.60)$$

Handelt es sich beim statischen System um einen gelenkig gelagerten Einfeldträger, der durch eine Gleichlast beansprucht wird, kann die Durchbiegung in Feldmitte nach Gleichung (4.61) ermittelt werden.

$$w_{\text{cr}} = \frac{5}{384} \cdot \chi_{\text{cr}} \cdot l_0^2 \cdot 8 \quad (4.61)$$

4.5.4.2 Zustand II

Zustand II ist durch Risse im Beton bei weiterhin elastischem Materialverhalten gekennzeichnet. Da der Beton in diesem Zustand keine Zugspannungen mehr übernimmt, sind neue Querschnittswerte unter Einbeziehung einer veränderten Druckzonenhöhe wie in Zustand I zu ermitteln. Fließen der Kervenverbindungen charakterisiert das Ende des elastischen Verhaltens. Die Summe der Scherkräfte (T_{Ni}), die in den einzelnen Kontaktflächen wirken, kann mit der Zugkraft im Schwerpunkt des Holzquerschnitt in Feldmitte gleichgesetzt werden. Bei Kervenversagen kann die Zugspannung im Holz demnach wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{2,y} = \frac{\sum T_{y,Ni}}{A_2} \quad (4.62)$$

Die Kraft, bei der Kervenversagen aufgrund zu hoher Druckspannungen eintritt, kann durch Multiplikation der Holzdruckfestigkeit $f_{c,2}$ mit der Kontaktfläche berechnet werden:

$$T_{y,Ni} \approx b_{Ni} \cdot t_{Ni} \cdot f_{c,2} \quad (4.63)$$

Das Biegemoment und die zugehörige Krümmung, die sich am Ende von Zustand II einstellen, lassen sich anschließend folgendermaßen beschreiben:

$$M_y = \frac{\sigma_{2,y} \cdot W_{2,\text{II}}}{n_2} = \frac{\sum T_{y,Ni}}{n_2 \cdot A_2} \cdot \frac{I_{\text{II}}}{\gamma_2 \cdot (h_1 + \frac{h_2}{2} - x_{\text{II}})} \quad (4.64)$$

$$\chi_y = \frac{M_y}{EI_{\text{II}}} \quad (4.65)$$

Analog zu Zustand I kann die Durchbiegung in Feldmitte wie folgt ermittelt werden:

$$w_y = \frac{5}{384} \cdot \chi_y \cdot l_0^2 \cdot 8 \quad (4.66)$$

Da in der Konstruktion zuerst ein Versagen der Kerven eintreten soll (siehe Abschnitt 4.5.3), ist sicherzustellen, dass jene Biegemomente, die andere Versagensformen einleiten würden, kleiner als das zuvor beschriebene Moment M_y sind. Weitere mögliche Versagensformen im Zustand II sind:

- Biegezugversagen im LVL-Querschnitt (2BT)
- Schub- bzw. Rollschubversagen im LVL-Querschnitt (2V bzw. 2R)
- Druckversagen des Betons am oberen Querschnittsrand (1C,c)

- Schubversagen im Beton
- Sprödes Verbindungsmittelversagen

Um ein Biegezugversagen im Holzquerschnitt zu verhindern, ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$\frac{\sigma_2}{f_{t,0,2}} + \frac{\sigma_{2,m}}{f_{m,2}} \leq 1 \quad (4.67)$$

Schubversagen im Holzquerschnitt tritt ein, wenn die elastische Schubspannung die Schubfestigkeit bzw. die Rollschubfestigkeit erreicht, wodurch sich folgende Bedingung ergibt:

$$\frac{\tau}{f_{v,2}} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\tau}{f_{R,v,2}} \leq 1 \quad (4.68)$$

Die anderen Versagensformen sind von der Kervenkonstruktion abhängig und werden in Abschnitt 4.5.5 beschrieben.

4.5.4.3 Zustand III

Beim Übergang von Zustand II auf Zustand III beginnen die Kerven plastische Verformungen auszubilden, der Holz- sowie der Betonquerschnitt folgen jedoch weiterhin einem elastischen Verhalten. Die Kraft, die in Zustand II zwischen den Einzelquerschnitten in den Kervenkontaktflächen übertragen wird, bleibt auch in Zustand III und IV konstant, weshalb $\sigma_2 = \sigma_{2,y}$ gilt. Der Verbundquerschnitt sollte so gestaltet werden, dass am Ende dieses Zustands am oberen Querschnittsrand der Beton aufgrund der einwirkenden Druckkraft versagt (1C,c). Die sich in diesem Endzustand einstellende Krümmung kann aus der Druckspannung und der Druckzone aus Zustand III ermittelt werden (siehe Gleichung (4.69)). In dieser Gleichung fließt jene Bedingung mit ein, dass die Konstruktion so ausgebildet werden soll, dass kein Biegezugversagen des Holzquerschnitts bis zum Ende von Zustand III möglich ist. Das Bauteil würde sonst nach Ausbildung kleiner plastischer Deformationen plötzlich versagen.

$$\chi_{1C,c} = \frac{f_{c,1}}{E_1 \cdot x_{III}} \leq \frac{2 \cdot f_{m,0,2}}{h_2 \cdot E_2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2,y}}{f_{t,0,2}}\right) \quad (4.69)$$

Das Biegemoment, bei dem die Druckfestigkeit des Betons in Zustand III erreicht wird, kann wie folgt berechnet werden:

$$M_{R,1C,c} = \sum T_{y,Ni} \cdot \left(h_1 - \frac{x_{III}}{3} + \frac{h_2}{2}\right) + \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} \cdot \chi_{1C,c} \cdot \frac{h_2}{2} \cdot E_2 \quad (4.70)$$

4.5.4.4 Zustand IV

Im Zustand IV entstehen zusätzlich plastische Verformungen in der Druckzone des Betons und es kommt aufgrund der Spannungsüberschreitung zu einer Umlagerung. Anschließend wächst die Krümmung weiter an, bis schlussendlich das absolute Bauteilversagen eintritt.

Unter der Voraussetzung, dass die Druckspannung im Beton während Zustand IV gleich der Druckfestigkeit ist, wird die Druckzonenhöhe im Beton (x_{IV}), ähnlich wie bei bewehrten Stahlbetondecken, als gleichmäßig verteilt über die Höhe $0,85 \cdot x_{IV}$ angenommen und wie folgt berechnet:

$$x_{IV} = \frac{\sigma_2 \cdot A_2}{0,85 \cdot f_{c,1} \cdot b_1} = \frac{\sum T_{y,Ni}}{0,85 \cdot f_{c,1} \cdot b_1} \quad (4.71)$$

Ausreichende Duktilität kann bei diesem Modell nur unter Anordnung von Vertikalbewehrung gewährleistet werden, welche zum einen den Beton und das Holz zusammenhält und zum anderen eine Vergrößerung der Schubrisse im Beton verhindert. Das Versagen des Bauteils kann somit auf zwei Ursachen reduziert werden – ein kombiniertes Biegezugversagen im Holzquerschnitt (2BT) oder Druchversagen im Betonquerschnitt (1C,u).

Die Querschnittskrümmung zufolge eines Biegezugversagens im LVL-Teilquerschnitt kann wie folgt ermittelt werden:

$$\chi_{u,2} = \frac{2}{h_2} \cdot \frac{f_{m,0,2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2,y}}{f_{t,0,2}}\right)}{E_2} \quad (4.72)$$

Andererseits kann bei Erreichen der maximalen Stauchung im Beton (ε_{cu}) zuerst ein Versagen des Betonquerschnitts eintreten. Die Krümmung kann in diesem Fall nach folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\chi_{u,1} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_{IV}} \quad (4.73)$$

Die maßgebende Krümmung ergibt sich aus dem Minimum dieser beiden Werte:

$$\chi_u = \min \begin{cases} \chi_{u,1} \\ \chi_{u,2} \end{cases} \quad (4.74)$$

Das maximale Widerstandsmoment M_u in Zustand IV und die zugehörige Bruchlast q_u werden anschließend folgendermaßen ermittelt:

$$M_u = \sum T_{y,Ni} \cdot \left(h_1 - \frac{0,85 \cdot x_{IV}}{2} + \frac{h_2}{2} \right) + \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} \cdot \chi_u \cdot \frac{h_2}{2} \cdot E_2 \quad (4.75)$$

$$q_u = \frac{8 \cdot M_u}{l_0^2} \quad (4.76)$$

4.5.4.5 Durchbiegungsberechnung für Zustand III und IV

Die Ermittlung der Durchbiegung in den Zuständen III und IV erfolgt anders als in den bisher untersuchten Zuständen, da die Länge auf der plastische Verformungen auftreten (l_{pl}) eine Unbekannte darstellt. Vereinfacht kann die plastische Zone im Bereich zwischen den beiden mittleren Kernen mit einer Länge von 750 mm angenommen werden. Anschließend können die Rotationen im Verbundquerschnitt und die sich daraus ergebenden Durchbiegungen während den Zuständen III und IV gemäß Gleichung (4.77) bis (4.80) abgeschätzt werden.

$$\theta_{\text{III}} \approx \frac{\frac{f_{c,1}}{E_1} - \varepsilon_{1,t,y}}{x_{\text{III}}} \cdot l_{\text{pl}} \quad (4.77)$$

$$\theta_{\text{IV}} \approx \frac{\chi_u \cdot x_{\text{IV}} - \frac{f_{c,1}}{E_1}}{x_{\text{IV}}} \cdot l_{\text{pl}} \quad (4.78)$$

$$\Delta w_{\text{III}} \approx \frac{l_0}{2} \cdot \tan\left(\frac{\theta_{\text{III}}}{2}\right) \quad (4.79)$$

$$\Delta w_{\text{IV}} \approx \frac{l_0}{2} \cdot \tan\left(\frac{\theta_{\text{IV}}}{2}\right) \quad (4.80)$$

Die daraus resultierenden Durchbiegungen des Verbundquerschnitts am Ende von Zustand III bzw. Zustand IV ergeben sich nach Gleichung (4.81) bzw. Gleichung (4.82) zu:

$$w_{1C,c} \approx w_y + \Delta w_{\text{III}} \quad (4.81)$$

$$w_{1C,u} \approx w_y + \Delta w_{\text{III}} + \Delta w_{\text{IV}} \quad (4.82)$$

4.5.5 Versagensformen auf Kervenebene

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Versagensarten werden in diesem Abschnitt folgende weitere Formen beschrieben, die in der Kontaktfläche der Kerne auftreten und dementsprechend stark von der Kervenausbildung abhängen:

- Druckversagen im Holz
- Abscherversagen im Holz
- Druckversagen im Beton

Um ein Versagen in Kervennähe ausschließen zu können, muss zuerst jene Kraft ermittelt werden, die in der Kontaktfläche der Kerne wirkt. Ausgehend von einer gleichmäßig verteilten Belastung ergeben sich die Kervenkraften – nach Berechnung der Schubkräfte τ_{N_i} jeweils an der auflagnäheren Kervenflanke – zu:

$$T_{N_i} = b \cdot s \cdot \frac{\tau_{N_i} + \tau_{N_{(i+1)}}}{2} \quad (4.83)$$

$$\text{mit } s = 2 \cdot l_N \quad (4.84)$$

Die jeweiligen geometrischen Zusammenhänge sind in Abb. 4.21 dargestellt.

Die Kervenkraft T_{N_i} erzeugt in der Kontaktfläche zwischen dem Holz- und Betonquerschnitt eine Druckspannung, die sich in Abhängigkeit der Kervenausbildung ermitteln lässt:

$$\sigma_{2x,N_i} = \frac{-T_{N_i}}{b_{N_i} \cdot t_{N_i}} \quad (4.85)$$

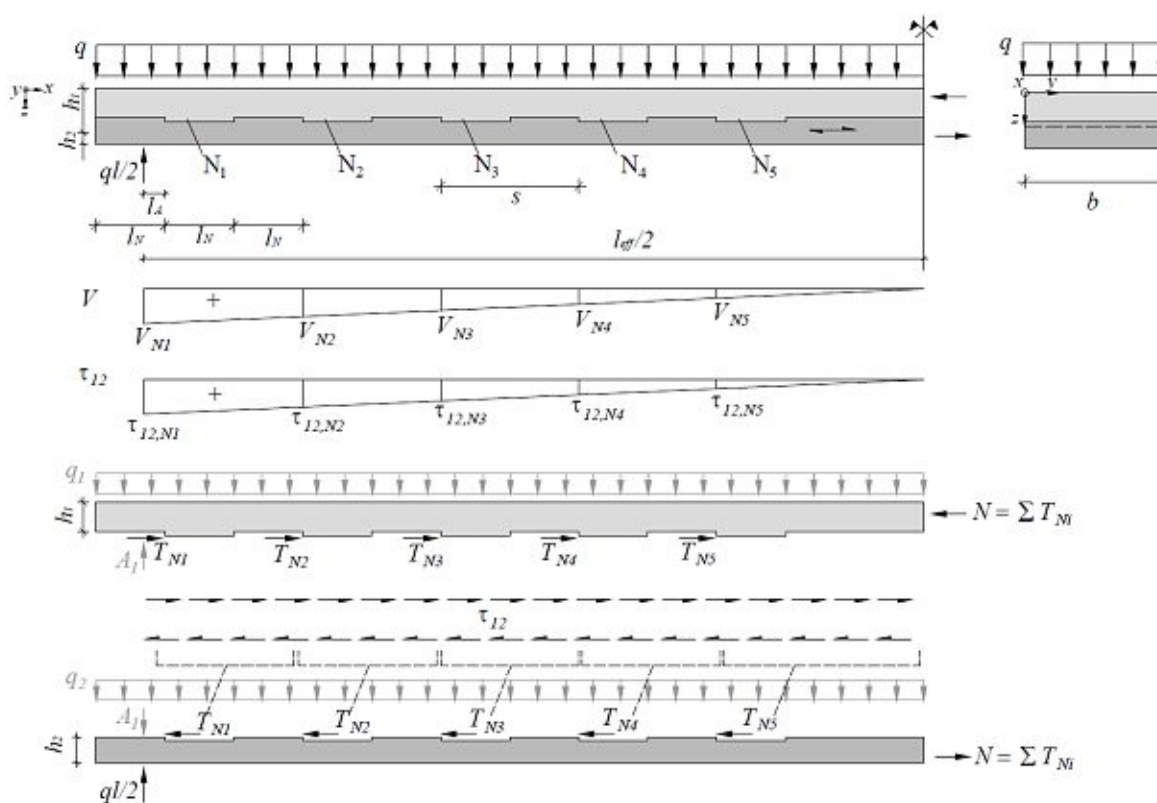


Abb. 4.21: Ermittlung der Kerkraften T_{Ni} an der auflagnäheren Kervenflanke [3]

Aufgrund der Anpassung der Kervenbreite an den Querkraftverlauf wird jede Kerbe in etwa mit derselben Druckspannung beansprucht. Somit wird bei Erhöhung der Belastung auch bei allen Kerven ca. zur selben Zeit die maximale Spannung erreicht und ein gleichzeitiges Kervenversagen tritt ein.

4.5.5.1 Druckversagen im Holz

Sofern die Druckspannung in x-Richtung im Vergleich zu den vertikal wirkenden Spannungen überwiegen, kann der biaxiale Spannungszustand vernachlässigt werden und die Kraft, die ein Druckversagen im Holzquerschnitt hervorruft, nach Gleichung (4.86) berechnet werden.

$$T_{R,2C,Ni}^* = f_{c,0,2} \cdot b_{Ni} \cdot t_{Ni} \quad (4.86)$$

4.5.5.2 Abscherversagen im Holz

Ein Abscherversagen in der Holzebene ist auf jeden Fall zu verhindern, um duktilen Kervenverhalten zu gewährleisten. Dies wird vor allem durch einen ausreichenden Abstand der einzelnen Kerven sichergestellt. Unter Annahme einer über die Länge von $8 \cdot t_N$ konstanten Schubspannung und der Vernachlässigung der Vertikalspannungen, kann die Kraft, aus der ein Abscheren des Holzes resultiert, wie folgt ermittelt werden:

$$T_{R,2S,Ni}^* = f_{v,2} \cdot b_{Ni} \cdot 8 \cdot t_{Ni} \quad (4.87)$$

4.5.5.3 Druckversagen im Beton

Die auftretende Druckspannung im Beton in Kervennähe hängt neben den geometrischen Gegebenheiten vor allem von der eingebauten Vertikalbewehrung ab. Die Bewehrung nimmt dabei die auftretenden Zugkräfte auf und der Beton wird auf einer diagonalen Strebe C_i druckbeansprucht. Um Druckversagen des Betons auf Kervenebene zu verhindern ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$\sigma_i = \frac{C_i \cdot \cos(\alpha)}{t_N \cdot b_N} = \frac{T_{Ni}}{t_N \cdot b_N} \leq f_c \quad (4.88)$$

Da sowohl im Beton- als auch im Holzquerschnitt an der Kervenkontaktfläche Druckspannungen in der selben Höhe auftreten, ist bei der Materialwahl darauf zu achten, dass der Beton eine höhere Druckfestigkeit aufweist als der LVL-Baustoff, um ein duktileres Kervenverhalten sicherzustellen.

4.5.6 Ermittlung der erforderlichen Vertikalbewehrung

Um ein duktileres Verhalten der LVL-Beton-Verbundkonstruktion zu erreichen, ist die Verwendung einer entsprechenden Vertikalbewehrung vorausgesetzt. Diese hält den Holz- und Betonquerschnitt zusammen und verhindert die Vergrößerung von Rissen im Beton. Im Folgenden wird auf die Dimensionierung der erforderlichen Bewehrungsfläche genauer eingegangen.

4.5.6.1 Vertikalbewehrung zur Aufnahme der Zugkräfte

Die Bewehrung ist so auszubilden, dass sie die vertikalen Zugkräfte, die im Betonquerschnitt infolge der maximalen Belastung q_u nach Gleichung (4.76) auftreten, aufnehmen kann. Dabei ist der Stahl an der Stelle der maximalen Zugspannungen anzuordnen und in der Druckzone des Betons zu verankern. Eine vereinfachte Ermittlung der erforderlichen Bewehrungsfläche kann dabei unter Annahme eines Fachwerkmodells erfolgen. Die vertikale Zugkraft wird nach Gleichung (4.89) berechnet, wobei T_{Ni} die horizontale Kervenkraft bezeichnet, s den Kervenabstand und h_1^* die Länge zwischen dem Angriffspunkt der Kervenkraft und der resultierenden Druckkraft im Betonquerschnitt.

$$T_i = T_{Ni} \cdot \frac{h_1^*}{s} \quad (4.89)$$

$$\text{mit } h_1^* = \frac{t_N}{2} + h_1 - \frac{x_{II}}{3} \quad (4.90)$$

Die notwendige Bewehrungsfläche zur Aufnahme der vertikalen Zugkraft kann somit folgendermaßen ermittelt werden, wobei f_s die Zugfestigkeit des Stahls bezeichnet, welche in einer Größe von 1000 N/mm^2 angenommen werden kann:

$$A_{s,T,Ni} = \frac{T_i}{f_s} = \frac{T_{Ni} \cdot h_1^*}{s \cdot f_s} \quad (4.91)$$

4.5.6.2 Vertikalbewehrung zur Vermeidung von Spaltöffnungen

Die notwendige Bewehrungsfläche erhöht sich zusätzlich um $A_{s,v}$, um ein Abheben der Betonplatte vom Buchenfurnierschichtholz zu verhindern. In Abhängigkeit einer vertikalen Gleichlast $q(v_u)$,

welche eine Durchbiegung des Holzquerschnitts um v_u hervorruft, kann die Vertikalbewehrung zur Vermeidung von Spaltöffnungen wie folgt berechnet werden:

$$A_{s,v} = \frac{q(v_u) \cdot l_0}{f_s} \quad (4.92)$$

Die gesamte erforderliche Bewehrungsfläche des LVL-Beton-Verbundquerschnitts errechnet sich anschließend zu:

$$A_s = 2 \cdot \sum_{i=1}^5 A_{s,T,Ni} + A_{s,v} \quad (4.93)$$

Für eine detailliertere Beschreibung zur Ermittlung der Vertikalbewehrung wird an dieser Stelle auf Boccadoro [3] verwiesen.

4.5.7 Dimensionierung der Bauteildicke

Analog zur Brettstapel-Beton-Verbunddecke sind bei der Querschnittsdimensionierung von LVL-Beton-Verbunddecken die Langzeiteffekte der einzelnen Materialien in der Berechnung zu berücksichtigen. Dies erfolgt in Form einer Abminderung der materialspezifischen Elastizitätsmoduln durch den Kriechfaktor φ_i :

$$E_\infty = \frac{E_0}{1 + \varphi_i} \quad (4.94)$$

Für den Beton wird bei den LVL-Beton-Verbundkonstruktionen ein Kriechfaktor von $\varphi_1 = 0,8$ angenommen, wohingegen die Langzeiteffekte des Buchenfurnierschichtholzes mit dem Faktor $\varphi_2 = 2,1$ berücksichtigt werden.

Neben den bereits beschriebenen Nachweisen bzw. einzuhaltenden Bedingungen werden in dieser Arbeit auch die Durchbiegungen ermittelt – unter Voraussetzung einer quasi-ständigen Lastkombination – sowohl zum Zeitpunkt $t = 0$ als auch zum Zeitpunkt $t = \infty$. Dabei ist bei den maßgebenden Verformungen, die nach Gleichung (4.95) berechnet werden, darauf zu achten, dass der von Boccadoro [3] beschriebene Maximalwert von $l_0/300$ nicht überschritten wird. Sofern die Grenzwerte gemäß Abschnitt 4.5.4.2 eingehalten werden, ist elastisches Bauteilverhalten gegeben und es wird Biegesteifigkeit aus Zustand II (EI_{II}) verwendet:

$$w_d = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{qs} \cdot l^4}{EI_{II}} \quad (4.95)$$

Im Zuge der Berechnungen hat sich die Beschränkung der Durchbiegung – ähnlich wie bei den anderen bereits betrachteten Systemen – als maßgebender Faktor bei der Dimensionierung von LVL-Beton-Verbundkonstruktionen herausgestellt.

Kapitel 5

Vergleichende Ökobilanzierung verschiedener Holz-Beton-Verbundkonstruktionen

In diesem Abschnitt werden die Schritte zur Ermittlung einer Ökobilanz (wie in Abschnitt 3.2 beschrieben) auf die in Abschnitt 4.4 und Abschnitt 4.5 dimensionierten Holz-Beton-Verbunddecken für den Einsatz als Geschossdecken der Nutzlastkategorie A (Wohnflächen) angewendet. Nach Definition des Untersuchungsrahmens und des Ziels dieser Berechnungen erfolgt eine Beschreibung der Systemgrenzen und der getroffenen Annahmen. Basierend auf der Massenermittlung der dimensionierten Systeme wird anschließend mit Hilfe passender Datenbanken die Wirkungsabschätzung anhand zuvor festgelegter Umweltparameter durchgeführt. Nach grafischer Auswertung und Interpretation der Ergebnisse bildet ein ökobilanzieller Vergleich der untersuchten HBV-Konstruktionen mit herkömmlichen Massivkonstruktionen in Stahlbeton- und Holzbauweise den Abschluss dieses Kapitels.

5.1 Untersuchungsrahmen und Ziel

Ziel dieser ökobilanziellen Gegenüberstellung ist eine effektive und übersichtliche Bewertung ausgewählter und im Hochbau üblicher Holz-Beton-Verbundkonstruktionen im Hinblick auf umweltbezogene Qualitätsmerkmale. Durch die Ermittlung aller Material- und Energieflüsse werden die potentiellen Umweltwirkung dieser Bauteile eruiert, was für Fachplaner und Architekten schon in den ersten Planungsphasen als wichtiges Hilfsmittel bei der Materialauswahl dienen kann. Diese Studie soll zeigen, wo die Vor- und Nachteile der einzelnen Konstruktionen liegen und wie sie zu interpretieren sind.

5.1.1 Untersuchte Konstruktionen und Funktionseinheit

Im Folgenden werden im Hochbau bereits seit mehreren Jahrzehnten eingesetzte Deckensysteme, wie die Brettstapel-Beton-Verbunddecke oder die Holzbalken-Beton-Verbunddecke, mit einer neuen Konstruktionsvariante, der LVL-Beton-Verbunddecke, auf ökobilanzieller Ebene verglichen. Um einen ganzheitlichen Überblick zu erhalten, umfasst die Untersuchung Tragsysteme mit verschiedenen Spannweiten ($l_0 = 6 \text{ m}$, 7 m und 8 m) – jeweils ausgeführt als statisch bestimmt gelagerter Einfeldträger. Die Ökobilanzierung bezieht sich dabei auf 1 m^2 Deckenfläche, wobei der Fußbodenaufbau – unter Voraussetzung, dass dieser bei jeder Deckenvariante gleich ausgebildet wird – in einem ersten Schritt der ökobilanziellen Berechnung vernachlässigt wird, um eine Gegenüberstellung der reinen Tragkonstruktion zu ermöglichen.

Die Systeme werden rein im Hinblick auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit dimensioniert. Weitere konstruktive Aspekte, wie Brandschutz, Schallschutz und die Berechnung des U-Wertes, fließen nicht in die Gegenüberstellung mit ein.

5.1.2 Verwendete Datenbank und weitere Umweltproduktdeklarationen

Neben den österreichischen IBO-Richtwerten für Baumaterialien stellt die ÖKOBAUDAT des deutschen Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) eine Plattform mit Daten, Informationen und Links rund um die Ökobilanzierung von Bauteilen dar. Da in den IBO-Richtwerten rein die Phasen der Herstellung (A1–A3) berücksichtigt werden, wird in dieser Arbeit auf die Datenbank ÖKOBAUDAT zurückgegriffen. Im Zentrum dieser Plattform stehen Datensätze zu Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen, die im Einklang mit der DIN EN 15804 [8] jährlich aktualisiert werden. Sie liefert somit eine umfassende Abbildung aller Lebenszyklusphasen eines Produkts. Ist diesem Datensatz ein Baustoff entweder gar nicht enthalten, oder fehlen einige betrachtete Lebenszyklusphasen, wird auf Umweltproduktdeklarationen vergleichbarer Produkte zurückgegriffen. So stammen die Daten für den in dieser Arbeit verwendeten Betonstahl aus der Datensammlung der Bau EPD GmbH [1] und beziehen sich konkret auf den Betonstahl des Stahl- und Walzwerks Marienhütte. Des Weiteren werden für die Holzwerkstoffe Brettschichtholz und Konstruktionsvollholz (das anstelle von Brettstapelholz verwendet wird) Umweltproduktdeklarationen des Instituts Bauen und Umwelt e.v. (IBU) herangezogen [16]. Besonders für die Produkte aus Holz wird versucht, von der Datenquelle der ÖKOBAUDAT abzuweichen, da im Vergleich mit anderen Deklarationen, die nach DIN EN 15804 [8] erstellt wurden, einige Daten zu den Holzwerkstoffen kritisch hinterfragt werden sollten. Im Speziellen betrifft dies den Bedarf an erneuerbarer (PERT) und nicht erneuerbaren Primärenergie (PENRT) während der Entsorgungsphase.

5.1.3 Systemgrenzen und Annahmen

5.1.3.1 Standort und Nutzungsdauer

Als Gebäudestandort wird der Karlsplatz in 1040 Wien gewählt. Dies spiegelt sich in der Berücksichtigung des Transportwegs vom Werk zur Baustelle wider – sofern zu den einzelnen Baustoffen in der gewählten Datenbank keine Angaben gemacht sind. Als Transportweg wird eine mittlere Distanz von 30 km angenommen, was in Anbetracht einer möglichst regionalen Produktion einen nachhaltigen Ansatz darstellt; als Transportmittel wird der LKW gewählt.

Für alle Bauteile wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren definiert. In diesem Zeitraum sind auf Konstruktionsebene keine Austauschprozesse zu erwarten.

5.1.3.2 Phasen des Lebenszyklus

Die Systemgrenze bestimmt jene Prozesse, die in die Bewertung der betrachteten Systeme mit einfließen. Unter Voraussetzung eines Neubaus muss die Systemgrenze den gesamten Lebenszyklus berücksichtigen (siehe Abb. 5.1). Diese schließt alle Prozesse von der Ressourcengewinnung bis hin zur endgültigen Beseitigung des Bauteils ein [9]. In dieser Abbildung wird die Organisation der für die Bewertung der Bauteile verwendeten Module beschrieben, die gemäß DIN EN 15804 [8] in einer Umweltproduktdeklaration (environmental product declaration, EPD) enthalten sind. Die Module A1 bis C4 decken Umweltauswirkungen ab, die direkt mit den Prozessen und Vorgängen innerhalb der Systemgrenze eines Bauteils zusammenhängen, wohingegen das Modul D die Vorgänge der Wiederverwendung, Recycling und Energierückgewinnung jenseits der Systemgrenze abbildet. In dieser Arbeit wird der gesamte Lebensweg der verschiedenen Systeme „von der Wiege bis zur Bahre“ betrachtet. Dies beinhaltet neben den Modulen A–C (Herstellung bis Entsorgung) das gesondert ausgewiesene Modul D (Recyclingpotential). Da das Modul D stark von herstellerepezifischen Annahmen abhängt, liegt der Fokus in dieser Arbeit auf den Modulen A–C. Das Modul D wird in einigen Fällen zur Darstellung der Problematik ergänzend abgebildet.

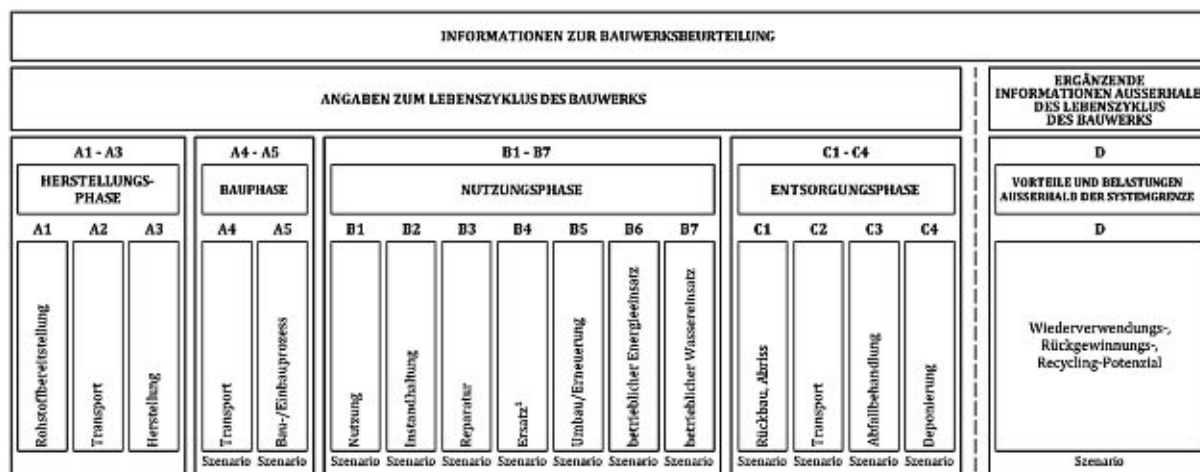


Abb. 5.1: Verschiedene Lebenszyklusphasen eines Gebäudes bzw. eines Bauteils [8]

Die einzelnen Lebenszyklusphasen werden folgendermaßen unterteilt:

- Herstellungsphase A1–A3: Dieses Modul umfasst neben der Rohstoffgewinnung und Rohstoffverarbeitung den Transport zum Hersteller sowie alle Prozesse der Herstellung
- Bauphase A4–A5: Neben dem Transport zur Baustelle und dem Einbau in das Gebäude beinhaltet dieses Modul auch die Bereitstellung von Stoffen, Produkten und Energie während der Errichtungsphase
- Nutzungsphase B1–B7: In dieser Phase werden alle Umweltwirkungen berücksichtigt, die während der Nutzung bzw. dem Betrieb des Gebäudes anfallen und beinhaltet neben den Prozessen der Wartung und Reinigung, die Reparatur, den Austausch, Ersatz und Modernisierungsmaßnahmen auch den Energie- und Wassereinsatz während des Gebäudebetriebs
- Entsorgungsphase C1–C4: Die Entsorgungsphase umfasst neben den Prozessen für den Rückbau bzw. Abriss, auch den Transport zur Abfallbehandlung und die Prozesse zur Beseitigung der Baustoffe
- Das gesondert ausgewiesene Modul D beschreibt die Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- bzw. das Recyclingpotential eines Bauteils

5.1.3.3 Betrachtete Wirkungskategorien

Als nächstes werden nach El khouli, John und Zeumer [14] die Wirkungskategorien und Umweltindikatoren definiert, die in der Ökobilanz untersucht werden sollen. Durch diese ist es möglich, die Umweltwirkung der untersuchten Bauteile darzustellen. Dabei werden die Umweltwirkungen verschiedener Stoffe in einer Wirkungskategorie jeweils auf eine Referenzeinheit bezogen.

Die Grundlage für diese Wirkungsabschätzung stellt die Datenbank der ÖKOBAUDAT dar. In dieser wird eine Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungsindikatoren vorgenommen. Die wichtigsten Kategorien für den Gebäudesektor werden im Folgenden dargestellt und werden auch in dieser Arbeit berücksichtigt:

- Primärenergieeinsatz: Der Primärenergieinhalt umfasst den für die Herstellung eines Produkts benötigten Energieverbrauch. Es wird differenziert zwischen den gesamten erneuerbaren Primärenergieträgern (PERT) und den gesamten nicht erneuerbaren Primärenergieträgern (PENRT). Vor allem die Sonnenenergie ist unter den erneuerbaren Energieressourcen

bei den hier betrachteten Holz-Beton-Verbundkonstruktionen von Bedeutung, wohingegen die Verwendung fossiler Rohstoffe als nicht erneuerbare Energiequellen angesehen werden. Ausgedrückt wird der Energieverbrauch in MJ pro funktioneller Einheit eines Produkts.

- Treibhauspotential (GWP): Mit dieser Wirkungskategorie werden die emittierten Treibhausgase und deren Auswirkungen auf die Umwelt erfasst. Neben Kohlendioxid (CO_2) finden vor allem Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) sowie die F-Gase Eingang in dieser Darstellung. Da Kohlendioxid (CO_2) im Vergleich zu den anderen Treibhausgasen den geringsten Einfluss auf die Umwelt hat, wird es als Referenzeinheit herangezogen. Je geringer der Betrag an CO_2 -Äquivalenten einer Konstruktion ausfällt, desto niedriger ist auch die potentielle Wirkung auf den Klimaerwärmungsprozess.
- Ozonabbaupotential (ODP): Diese Wirkungskategorie dient zur Beschreibung der Zerstörung der Ozonschicht, die bei einer Anreicherung von R-11-Äquivalenten in der Atmosphäre einhergeht. Je stärker der Zerstörungsgrad, desto weniger UV-Strahlung wird gefiltert. Als Referenzeinheit dieser Kategorie dient Trichlorfluormethan (CFC-11 bzw. R-11).
- Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP): Die toxische Wirkung von bodennahem Ozon, das durch Stickoxide oder Kohlenwasserstoffe unter dem Einfluss von Sonnenlicht entsteht, wird mit dem photochemischen Ozonbildungspotential dargestellt. Die dabei entstehenden Verunreinigungen sind auch als Sommersmog bekannt. Als Bezugsgröße dient die Umweltwirkung von 1 kg Ethen (C_2H_4). Je geringer dieser Wert einer Konstruktion, desto kleiner sind die negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt.
- Versauerungspotenzial (AP): Die Umwandlung von bestimmten Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid (SO_2) oder Stickoxiden (NO_x) zu Säuren und die damit verbundene Versauerung von Böden und Gewässern wird durch die Wirkungskategorie des Versauerungspotentials beschrieben. Die Bewertung dieses Parameters wird SO_2 -Äquivalenten ausgedrückt. Bei einem kleinem AP-Wert sind auch die damit verbundenen Umweltschädigungen gering.
- Eutrophierungspotenzial (EP): Eine Überdüngung des Bodens durch eine übermäßige Zufuhr von Nährstoffen wie Stickstoff- oder Phosphorverbindungen wird mit dem Eutrophierungspotential beschrieben. Diese gelangen z. B. bei der Herstellung von Bauprodukten in die Umwelt. Der größte Überdüngungsbeitrag resultiert jedoch aus der Auswaschung von Verbrennungsemissionen. Zur Beurteilung des Überdüngungspotentials wird das flächenbezogene Phosphatäquivalent (PO_4 -Äqv.) einer Konstruktion herangezogen. Ein niedriger PO_4 -Wert ist auch mit geringen negativen Umweltauswirkungen verbunden.

5.1.3.4 Betrachtete Szenarien

Neben den verpflichtend anzuführenden Lebenszyklusphasen A1–A3 berücksichtigt ein erstes Szenario (A–C) die Umweltwirkungen aus den Modulen A4–A5, B1–B7 sowie C1–C4. Dabei wird angenommen, dass das jeweilige Bauteil am Ende des Lebenszyklus vollständig der Entsorgung zugeführt wird. Das zweite Szenario (A–D) bezieht zusätzlich das Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- bzw. das Recyclingpotential der Baustoffe durch geeignete Recyclingfaktoren mit ein. Mit diesen Faktoren sollen die unvermeidbaren Materialverluste, die bei der Trennung der einzelnen Bauteilschichten sowie der anschließenden Abfallbehandlung entstehen, möglichst realistisch abgebildet werden.

Während der Fußbodenaufbau (bis auf den Belag aus Massivholz) auch im angenommenen Szenario A–D zur Gänze einer Deponie zugeführt wird, sind für die Tragwerksbestandteile gewisse Recyclingansätze gemäß Tab. 5.1 vorgesehen.

Tab. 5.1: Angenommene Recycling- bzw. Entsorgungsanteile

Baustoff	Recyclinganteil	Entsorgungsanteil
Massivparkett	70 %	30 %
Zementestrich	0 %	100 %
Dampfbremse PE	0 %	100 %
Mineralwolle	0 %	100 %
Betonwerkstoffe	60 %	40 %
Betonstahl	60 %	40 %
Holzwerkstoffe	70 %	30 %

Da bei den verwendeten Holzwerkstoffen (Konstruktionsvollholz, Brettschichtholz sowie Furnierschichtholz) im Modul C3 bereits die Gutschriften aus der thermischen Verwertung inkludiert sind, werden die betrachteten Lebenszyklusphasen für diese Materialien im Szenario A–D auf die Module A–C2 reduziert und mit dem Modul D eine alternative Verwertung im Biomassekraftwerk berücksichtigt.

Aufgrund der stark von Annahmen geprägten Darstellung der Werte in der letzten Lebenszyklusphase (Modul D) wird in dieser Arbeit primär das Szenario A–C untersucht. Ergänzend werden unter Einbeziehung der genannten Recycling- bzw. Entsorgungsanteile einige Umweltwirkungen für das Szenario A–D abgebildet. Da jedoch die Hersteller bei der Entwicklung der Umweltproduktdeklarationen teilweise unterschiedliche Szenarien verfolgen, sind vor allem die Daten aus dem Modul D kritisch anzusehen.

5.1.3.5 Weitere Annahmen

Im Folgenden werden weitere wesentliche Annahmen und materialspezifische Gesichtspunkte dokumentiert, unter denen die vergleichende Ökobilanz der betrachteten Bauteile durchgeführt wurde. Ziel dieser Annahmen ist die Schaffung einer repräsentativen Vergleichsbasis für die Berechnung der Ökobilanz.

- **Betonstahl:** Da im Datensatz der ÖKOBAUDAT zum Bewehrungsstahl nicht alle Lebenszyklusphasen angegeben sind, wird die Datensammlung der Bau EPD GmbH herangezogen. Der Betonstahl des Stahl- und Walzwerks Marienhütte liefert neben der Produktionsphase (A1–A3) auch Daten zum Transport zur Baustelle (A4) und zur Entsorgung (C1–C3). Während der Nutzungsphase (B1–B7) finden – wie bei den anderen betrachteten Baustoffen auch – keine für die Ökobilanz relevanten Stoff- und Energieflüsse statt. Zusätzlich wird gemäß dieser EPD angenommen, dass der verwendete Betonstahl bereits zu 100 % aus Sekundärmaterial produziert wird, wodurch in der Lebenszyklusphase D ebenfalls keine Stoffflüsse anfallen.
- **Konstruktionsvollholz anstelle von Brettstapelholz:** Aufgrund des Fehlens von Daten während des gesamten Lebenszyklus für den Baustoff Brettstapelholz wird für die Ökobilanz der Brettstapel-Beton-Verbunddecke auf einen möglichst ähnlichen Baustoff, nämlich Konstruktionsvollholz nach einer Umweltproduktdeklaration gemäß dem Institut Bauen und Umwelt e.v. (IBU), zurückgegriffen. Bei der Holzbalken-Beton-Verbundvariante wird für die zwischen den Balken liegende Lattung ebenfalls Konstruktionsvollholz angenommen.
- **Bewehrungsgrad:** Der Stahlbetonquerschnitt beinhaltet neben dem Beton auch eine gewisse Menge an Stahl. Dieser ist zwar für die Bemessung nicht relevant, es wird dennoch

ein konstruktiver Mindestbewehrungsgrad von 2 % angesetzt. Dies spiegelt sich bei der Ressourcenermittlung mit den Faktoren 0,98 bzw. 0,02 wider.

- Furnierschichtholz: Mit dem LVL-Buchenfurnierschichtholz wurde von der ETH Zürich ein innovativer Baustoff entwickelt, zu dem bislang (Stand: Dezember 2020) keine Umweltproduktdeklaration (EPD) vorhanden ist. Aus diesem Grund wird mit dem STEICO LVL gemäß ÖKOBAUDAT für die ökobilanzielle Berechnung auf einen ähnlichen Furnierwerkstoff aus Nadelholz zurückgegriffen.
- Transport: Nicht bei jedem Baustoff sind die Transportwege vom Werk bis zur Baustelle in den ökobilanziellen Daten inkludiert. In der EPD für Baustahl von Marienhütte wird beispielsweise ein mittlerer Transportweg vom Stahl- und Walzwerk zu den Biegereien und von den Biegereien zur Baustelle von 260 km angenommen. Diese Stoffflüsse finden direkt Einklang in die EPD, wodurch keine zusätzlichen Transportflüsse berücksichtigt werden müssen. Sind keine Angaben in den Umweltproduktdeklarationen gemacht, wird eine mittlere Distanz von 30 km angenommen. Als Transportmittel wird ein LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 20–26 t gemäß ÖKOBAUDAT gewählt. Sind für einen Baustoff rein Angaben zum Einbau (A5) vorhanden, wird dieser Transportprozess zusätzlich addiert.

5.2 Ökobilanzielle Betrachtung der verwendeten Baustoffe

Um die Umweltwirkungen der einzelnen Materialien besser abschätzen zu können, werden im folgenden Abschnitt – in Anlehnung an die Berechnung des Ökoindex OI3 gemäß Abschnitt 3.2.7 – mit dem Primärenergiebedarf, dem Treibhauspotential und dem Versauerungspotential die wichtigsten Wirkungskategorien von jeweils 1 m³ der verwendeten Holzwerkstoffe sowie der unterschiedlichen Druckfestigkeitsklassen betrachtet. Neben der Herstellungsphase (A1–A3) werden auch die Entsorgungsphase (C1–C4) sowie das Recyclingpotential (D) gegenübergestellt. Bei der Darstellung des Szenarios A–D müssen die hier angeführten Werte der Lebenszyklusphasen C und D bei der ökobilanziellen Berechnung noch mit den jeweiligen Recycling- bzw. Entsorgungsansätzen nach Tab. 5.1 versehen werden.

Auf die Angabe der restlichen Module (A4–A5 und B1–B7) wird im Hinblick auf die Abhängigkeit der gewählten Parameter und den geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz an dieser Stelle verzichtet.

In Anlehnung an die untersuchten Holz-Beton-Verbundsysteme werden für folgende Holzwerkstoffe die Wirkungskategorien je m³ verglichen:

- Konstruktionsvollholz
- Brettschichtholz
- Furnierschichtholz

Im ökobilanziellen Vergleich der Betonarten, welcher auf der Datenbank der ÖKOBAUDAT beruht, wird vor allem auf die Unterschiede während der Herstellungsphase hingewiesen. Folgende Druckfestigkeitsklassen sind Teil der Ökobilanz:

- Beton C 25/30
- Beton C 50/60

5.2.1 Energiebedarf und Wirkungskategorien der Holzwerkstoffe

Erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ Holzwerkstoff

Bei der Herstellung von Holz wird erneuerbare Energie benötigt (z. B. Sonnenenergie), die in der Entsorgungs- und Recyclingphase teilweise zurückgewonnen werden kann. Neben dem Konstruktionsvollholz, das bei Ökobilanzierung der Brettstapeldecke verwendet wird, und dem Brettschichtholz (Holzbalken-Beton-Verbunddecke), wird in Abb. 5.2 auch der erneuerbare Primärenergiebedarf von Furnierschichtholz pro m³ dargestellt. Aufgrund des aufwändigeren Produktionsverfahrens beträgt der Energiebedarf beim letztgenannten Werkstoff während der Herstellungsphase etwa 15 000 MJ/m³ und liegt damit deutlich über jenem der Referenzwerkstoffe. Bei annähernd gleichen Bilanzwerten in der Entsorgungsphase (etwa -8000 MJ/m³) wird bei der Herstellung (A1–A3) eines Kubikmeters Brettschichtholz im Vergleich zum Konstruktionsvollholz nur geringfügig mehr Energie benötigt.

Abb. 5.2 liefert einen ersten Ansatzpunkt zur ökobilanziellen Bewertung der verwendeten Holzwerkstoffe, dennoch ist nach Ströbele [44] den im Folgenden behandelten Wirkungskategorien eine höhere Priorität zuzuordnen.

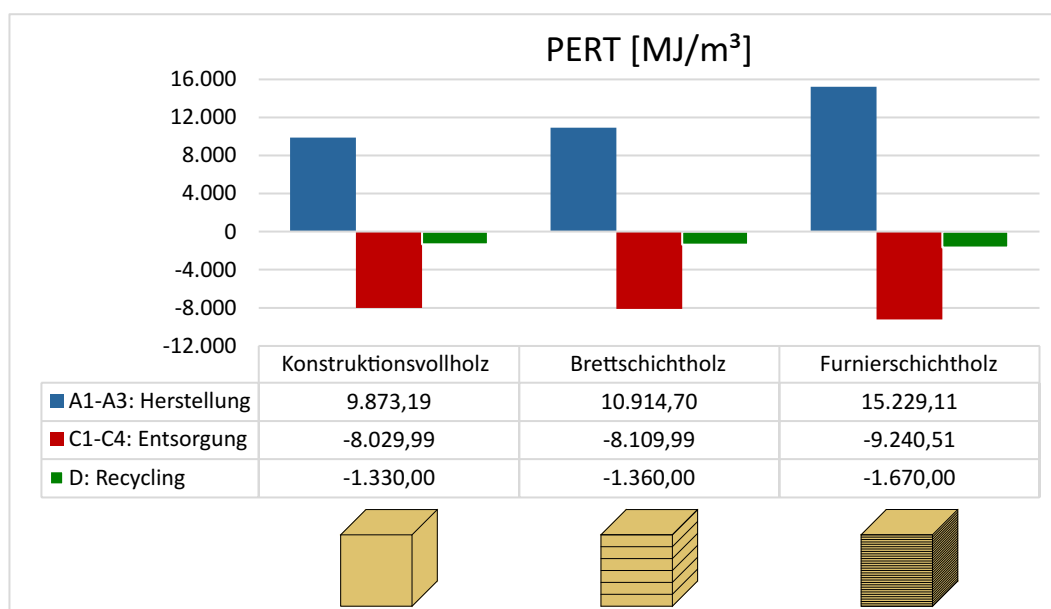


Abb. 5.2: Erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ des jeweiligen Holzwerkstoffs

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ Holzwerkstoff

Während der Herstellungsphase wird für die unten angeführten Holzwerkstoffe – im Vergleich zu den erneuerbaren Energieträgern – weitaus weniger an nicht erneuerbarer Primärenergie benötigt. Während für einen Kubikmeter Konstruktionsvollholz in dieser Phase etwa 1200 MJ/m³ und für Brettschichtholz etwa 2350 MJ/m³ gebraucht werden, liegt der Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen beim Furnierschichtholz bei etwa 4900 MJ/m³.

Darüber hinaus sorgt die thermische Verwertung des Holzes während der letzten Lebenszyklusphase (Modul D) bei allen Werkstoffen für beträchtliche ökobilanzielle Gutschriften. Bei den ersten beiden Materialien liegt dieser Wert bei etwa -6200 MJ/m³, wohingegen das Furnierschichtholz Gutschriften von knapp -7200 MJ/m³ aufweist.

Während der Entsorgungsphase treten in dieser Wirkungskategorie kaum Bilanzwerte auf, was auch der Abb. 5.3 zu entnehmen ist.

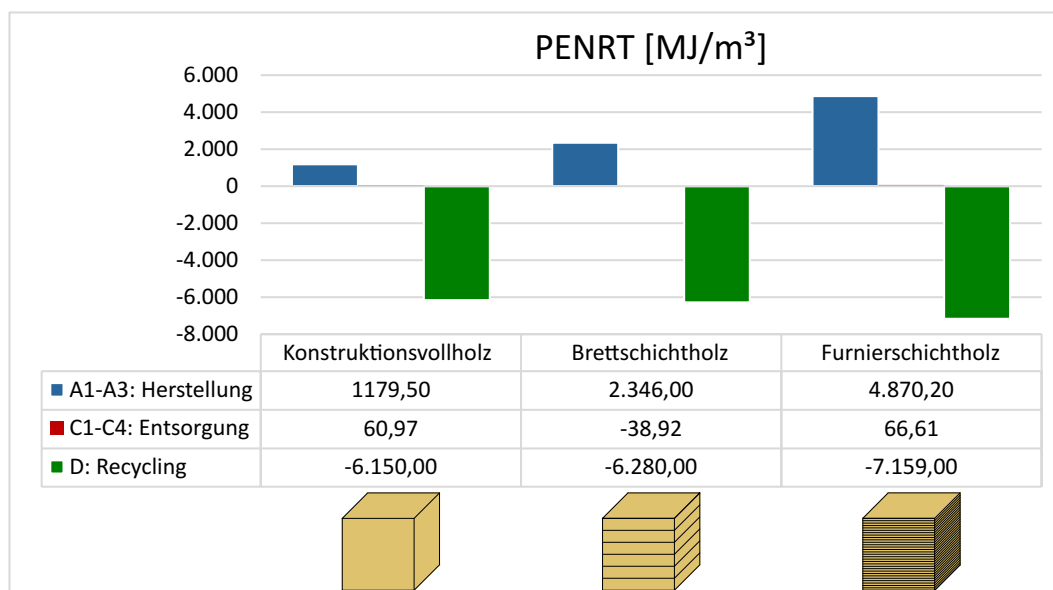


Abb. 5.3: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ des jeweiligen Holzwerkstoffs

Treibhauspotential pro m³ Holzwerkstoff

Das Treibhauspotential (GWP) und das Versauerungspotential (AP) zählen nach Ströbele [44] zu den wichtigsten Wirkungskategorien der Ökobilanz und sind im Vergleich zum Eutrophierungspotential, dem Ozonabbaupotential und dem Ozonbildungspotential als prioritär einzustufen.

Insgesamt fließen pro Kubikmeter bei den ersten beiden Varianten bis zu 1100 kg CO₂-Äqv. in Form von im Holz gespeichertem Kohlenstoff in die Bilanz mit ein. Beim Furnierschichtholz beträgt dieser Wert knapp 1000 kg CO₂-Äqv.. Dargestellt werden diese in Abb. 5.4 durch die negativen Werte während den Lebenszyklusphasen A und D. In der Entsorgungsphase wird die gespeicherte Menge an Kohlenstoff (zwischen 770 kg CO₂-Äqv. und 890 kg CO₂-Äqv.) dem System in Form von Altholz wieder entzogen.

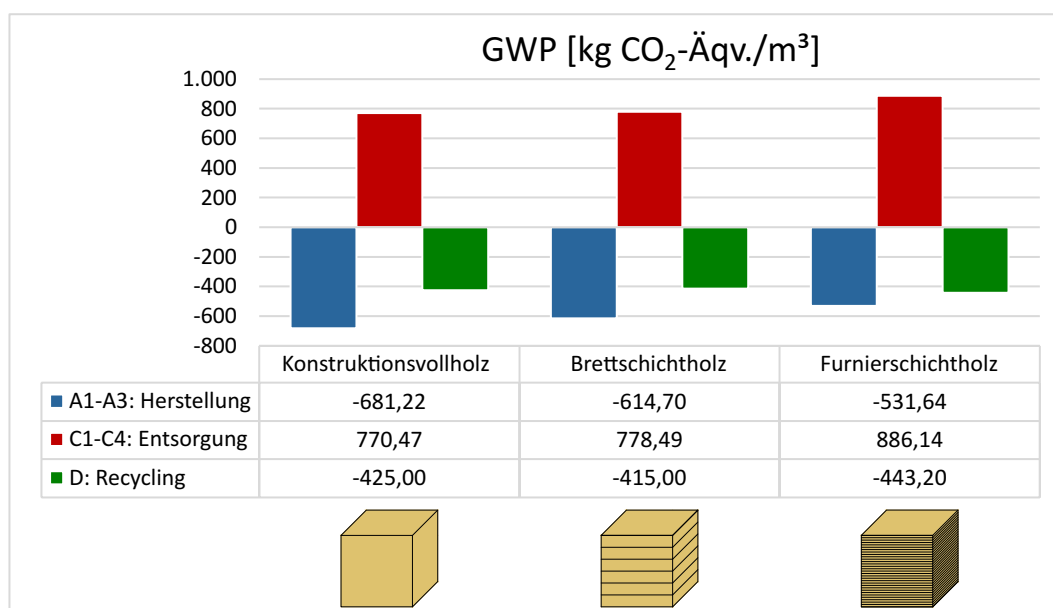


Abb. 5.4: Treibhauspotential pro m³ des jeweiligen Holzwerkstoffs

AP pro m³ Holzwerkstoff

In Abb. 5.5 sind die Umweltwirkungen der Holzwerkstoffe im Hinblick auf das Versauerungspotential dargestellt. Bei annähernd gleichen Gutschriften aller drei Werkstoffe in der Phase D liegen in der Herstellungsphase doch deutliche Unterschiede vor. Wie bei den restlichen Wirkungskategorien ist das Furnierschichtholz mit den schlechtesten Bilanzwerten behaftet. Aufgrund der niedrigen Werte während der Entsorgungsphase (C1–C4) wird auf die Darstellung in dieser Abbildung verzichtet.

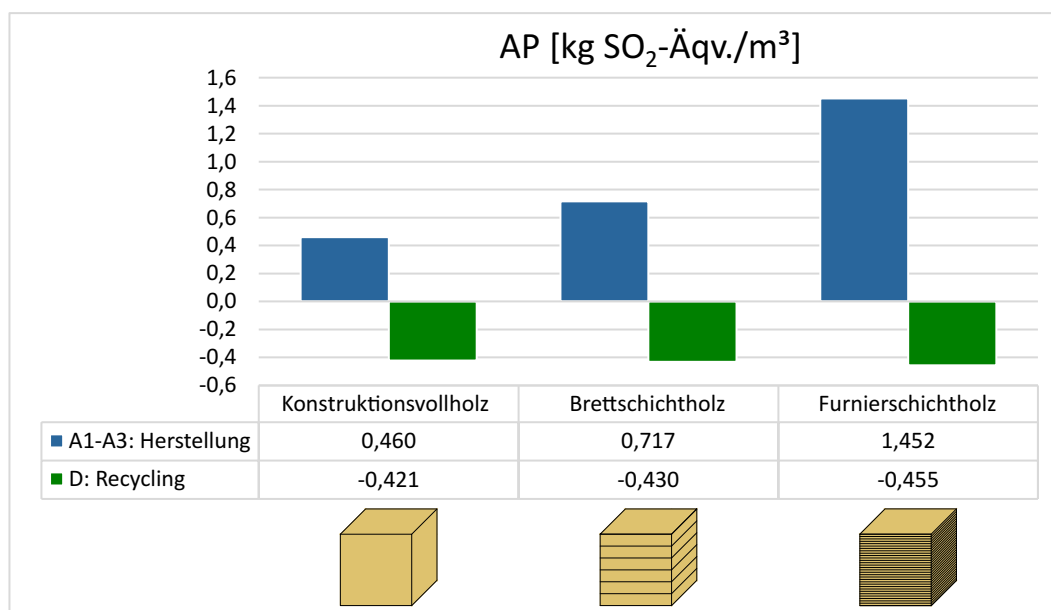


Abb. 5.5: Versauerungspotential pro m³ des jeweiligen Holzwerkstoffs

5.2.2 Energiebedarf und Wirkungskategorien der Betonwerkstoffe

In den folgenden Abschnitten werden der Primärenergiebedarf der verwendeten Betonwerkstoffe sowie mit dem Treibhauspotential und dem Versauerungspotential die wichtigsten Wirkungskategorien einer Ökobilanz gegenübergestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die unterschiedlichen Druckfestigkeitsklassen rein in der Herstellungsphase unterscheiden. Im Modul C, das den Rückbau, den Transport zur Betonaufbereitung und das Brechen des Betons beinhaltet, liefert ebenso wie das Modul D (Gutschriften für die Verwendung von Betonabbruch) dieselben Bilanzwerte bei den verschiedenen Betonarten.

Neben dem Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30, welcher bei der Ökobilanzierung der Brettstapel- und der Balken-Beton-Verbunddecke zum Einsatz kommt, werden die Umweltwirkungen des bei der LVL-Beton-Verbunddecke benötigten Beton C 50/60 dargestellt (jeweils für 1 m³).

Erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ Betonwerkstoff

Für die Herstellung eines Kubikmeters Beton C 25/30 werden 190 MJ an erneuerbarer Energie benötigt. Im Vergleich dazu liegt dieser Bedarf beim Beton C 50/60 mit 292 MJ um 54 % höher. Diese Bilanzwerte sind im jeweils ersten Balken in Abb. 5.6 ersichtlich.

Bei der Entsorgung fallen bei beiden Varianten 34,5 MJ/m³ an erneuerbarer Primärenergie an, wohingegen bei der Verwendung des Betonabbruchs Gutschriften von jeweils –94,1 MJ/m³ verzeichnet werden können.

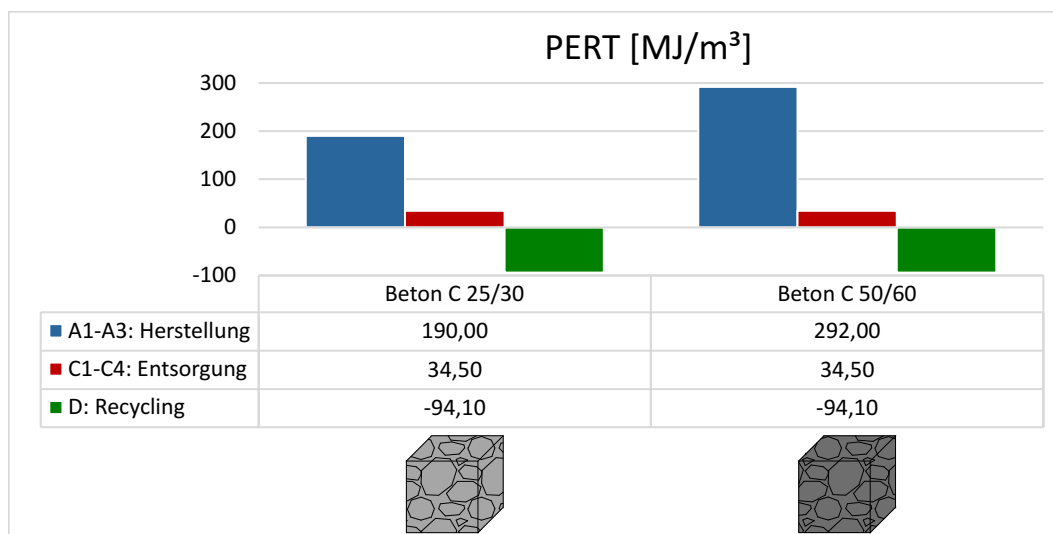


Abb. 5.6: Erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ des jeweiligen Betonwerkstoffs

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ Betonwerkstoff

Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der verwendeten Betonarten kann Abb. 5.7 entnommen werden. Für die Herstellung eines Kubikmeters Beton C 25/30 werden knapp 1000 MJ an nicht erneuerbarer Energie benötigt. Im Vergleich dazu liegt dieser Bedarf beim Beton C 50/60 mit 1510 MJ um 52 % höher. Diese Bilanzwerte sind im jeweils ersten Balken in Abb. 5.7 ersichtlich.

Bei der Entsorgung fallen bei beiden Varianten 284 MJ/m³ an nicht erneuerbarer Primärenergie an, wohingegen bei der Verwendung des Betonabbruchs Gutschriften von jeweils -279 MJ/m³ verzeichnet werden können.

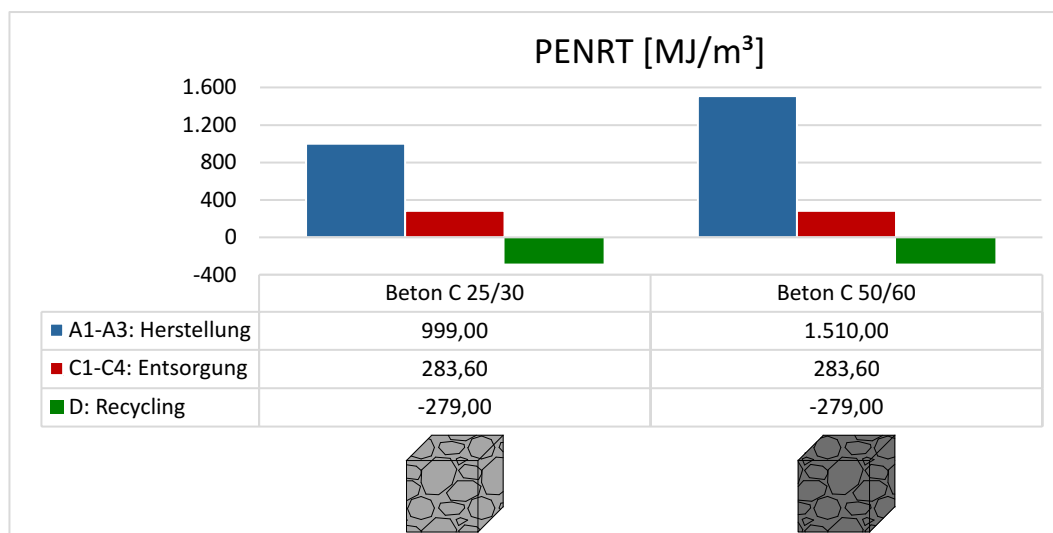


Abb. 5.7: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf pro m³ des jeweiligen Betonwerkstoffs

Treibhauspotential pro m³ Betonwerkstoff

Das Treibhauspotential (GWP) und das Versauerungspotential (AP) zählen nach Ströbele [44] zu den wichtigsten Wirkungskategorien der Ökobilanz und sind im Vergleich zum Eutrophierungspotential, dem Ozonabbaupotential und dem Ozonbildungspotential als prioritär einzustufen.

Während der Herstellung eines Kubikmeters Beton C 25/30 fallen 197 kg CO₂-Äqv. an, wohingegen dieser Wert bei Beton C 50/60 mit 300 kg CO₂-Äqv. um 52 % höher liegt. Hauptverantwortlich für die Treibhausgasemissionen in dieser Phase ist gemäß den vom Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) herausgegebenen Umweltproduktdeklarationen [45, 46] die Zementproduktion mit jeweils etwa 82,5 %. Der restliche Anteil an CO₂-Emissionen fällt bei der Produktion von Flugasche, der Gesteinskörnung sowie bei der Zusatzmittelherstellung und dem Verbrauch von Elektrizität und Heizung im Betonwerk an. In der Phase zwischen Rückbau und Abfallbeseitigung (Modul C) werden bei beiden Betonarten etwa 21 kg CO₂-Äqv. emittiert, wohingegen in der Recyclingphase (Modul D) Gutschriften in ähnlicher Höhe verzeichnet werden können.

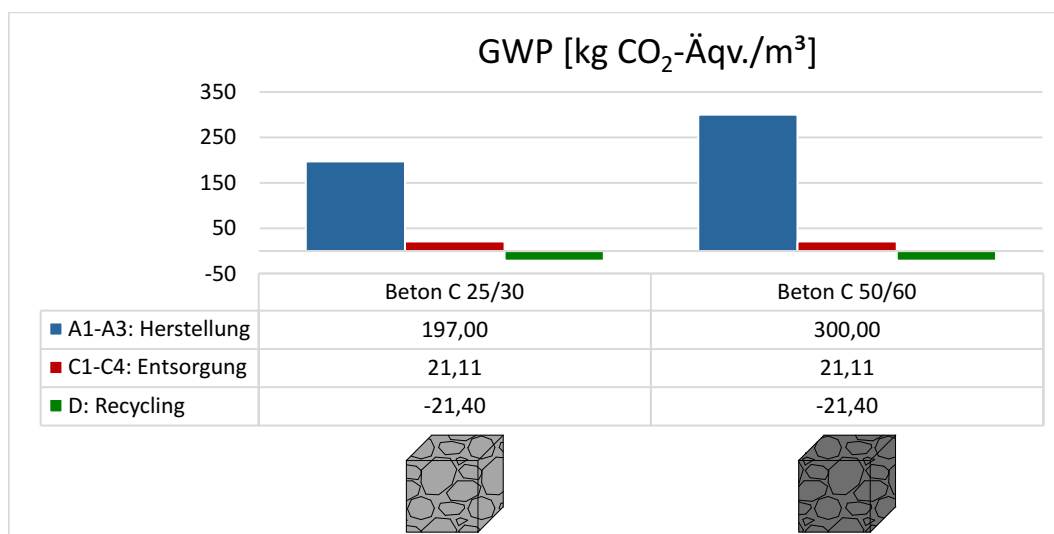


Abb. 5.8: Treibhauspotential pro m³ des jeweiligen Betonwerkstoffes

Versauerungspotential pro m³ Betonwerkstoff

In Abb. 5.9 sind die Umweltwirkungen der Betonwerkstoffe im Hinblick auf das Versauerungspotential dargestellt. Ähnlich wie beim Treibhauspotential und dem Primärenergiebedarf liegen die Bilanzwerte während der Herstellungsphase für einen Kubikmeter Beton der Druckfestigkeitsklasse C 50/60 in etwa um 45 % höher als bei der Referenzklasse.

5.2.3 Interpretation der Materialwahl

Da das Furnierschichtholz bei den Holzwerkstoffen und auch der Beton mit der Druckfestigkeitsklasse C 50/60 im Vergleich zu den anderen Materialien sowohl im Energiebedarf als auch bei den betrachteten Wirkungskategorien jeweils die schlechtesten Bilanzwerte liefern, ist davon auszugehen, dass die Ökobilanz der LVL-Beton-Verbundvariante am schlechtesten ausfällt. Diese Hypothese ist Teil der in den folgenden Abschnitten durchgeführten Untersuchungen.

5.3 Ressourcenermittlung und Ökobilanz der verwendeten Systeme

Dieser Abschnitt dient der Gegenüberstellung bzw. Ermittlung der Ressourcen der betrachteten Deckenvarianten und basiert auf den Ergebnissen der Dimensionierung gemäß Abschnitt 4.4 und 4.5. Anschließend kann die vergleichende Ökobilanzstudie durchgeführt werden. Um einen ganzheitlichen Überblick über die Ökobilanz zu erhalten, werden verschiedene im Hochbau übliche Spannweiten untersucht ($l_0 = 6 \text{ m}, 7 \text{ m}$ und 8 m). Als Referenzeinheit dient jeweils 1 m^2 der

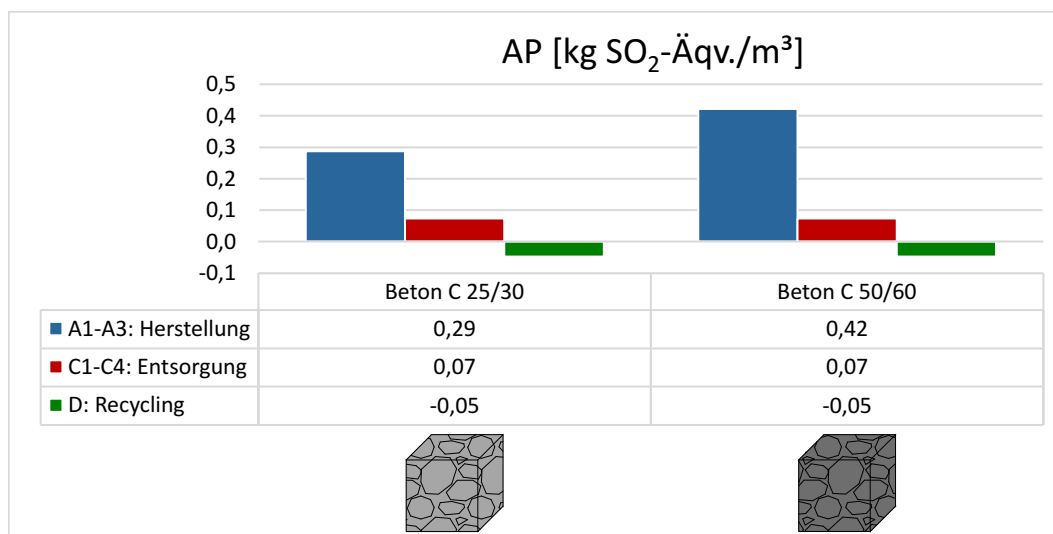


Abb. 5.9: Versauerungspotential pro m³ des jeweiligen Betonwerkstoffs

reinen Tragkonstruktion. Der Fußbodenaufbau wird in dieser Aufstellung nicht berücksichtigt. Die untersuchten Deckenkonstruktionen sind in Abb. 5.10 dargestellt.

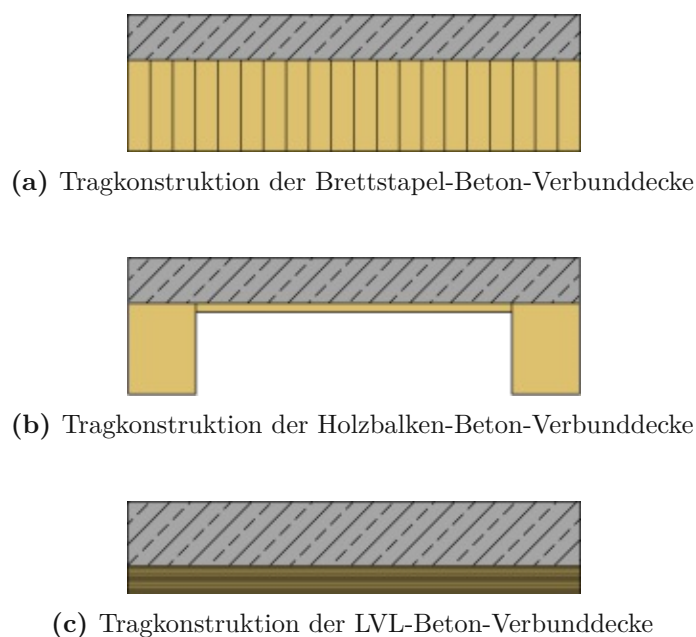


Abb. 5.10: Untersuchte Tragkonstruktionen als Basis der Ökobilanz

Das Ergebnis der Massenermittlung der verschiedenen Systeme wird in Abhängigkeit von der Spannweite in Abb. 5.11 dargestellt. Die Aufbauten werden in den folgenden Abschnitten noch genauer aufgelistet. Trotz ähnlicher Systemdicken ist in dieser Grafik klar ersichtlich, dass die Masse bei der LVL-Beton-Verbunddecke deutlich über jener der Brettstapel- und Balken-Beton-Verbunddecken liegt. Dies ist auf den höheren Betonanteil im Querschnitt zurückzuführen. Während die Betonplatte bei den ersten beiden Systemen jeweils eine Dicke zwischen 8 cm und 12 cm aufweist, ist beim Tragsystem der LVL-Beton-Verbunddecke je nach Spannweite eine Betonstärke zwischen 14 cm und 22 cm notwendig. Aufgrund des Trägerabstands liegt bei der

Holzbalken-Beton-Verbundsystem die geringste Masse vor. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Gesamtdicke des Systems größer ist als bei den anderen Systemen. Dies wird im Hochbau bereits in den ersten Planungsschritten berücksichtigt und kann ausschlaggebend für die Wahl der Deckenvariante sein.

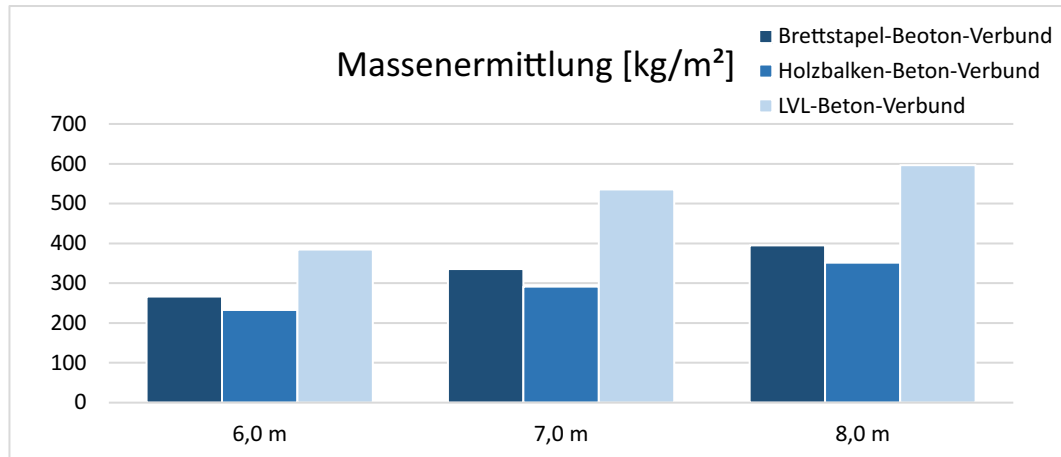


Abb. 5.11: Massenermittlung pro m^2 Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite

5.3.1 Systeme mit einer Spannweite von $l_0 = 6 \text{ m}$

5.3.1.1 Massenermittlung für $l_0 = 6 \text{ m}$

Die ermittelten Aufbauten für die Deckenkonstruktionen mit einer Spannweite von $l_0 = 6 \text{ m}$ können Tab. 5.2 bis 5.4 entnommen werden. Diese bilden die Basis für die anschließende ökobilanzielle Betrachtung. Ausgehend von einer Mindestbetondicke von 8 cm und der Betondruckfestigkeitsklasse C 25/30 resultiert aus der statischen Bemessung eine Dicke des Brettstapelholzes von 14 cm . Bei der Holzbalken-Beton-Verbunddecke ist zur Erfüllung der angegebenen Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise ein Balkenquerschnitt von 20 cm mal 18 cm notwendig. Die LVL-Beton-Verbunddecke besteht aus einer 14 cm dicken Betonplatte der Druckfestigkeitsklasse C 50/60 sowie einer 6 cm dicken Furnierschichtholzplatte. Zwischen Holz und Beton wird jeweils eine Dampfbremse angeordnet. Bei allen Varianten wird ein konstruktiver Mindestbewehrungsgrad von 2% angesetzt, was sich bei der Ressourcenermittlung mit den Faktoren $0,98$ bzw. $0,02$ widerspiegelt.

Tab. 5.2: Brettstapel-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 6 \text{ m}$

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m^3]	Volumen [m^3]	Masse [kg]
Beton C 25/30	0,08	0,98	2400,00	0,0784	188,16
Betonstahl	0,08	0,02	7856,00	0,000 16	12,57
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
Konstruktionsvollholz	0,14	1,00	468,62	0,14	65,61
Summe:					266,52

Tab. 5.3: Holzbalken-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 6$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 25/30	0,08	0,98	2400,00	0,0784	188,16
Betonstahl	0,08	0,02	7856,00	0,00016	12,57
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
Lattung	0,02	0,71	468,62	0,0142	6,67
Brettschichtholz	0,20x0,18	1,60	483,21	0,0576	27,83
Summe:					235,42

Tab. 5.4: LVL-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 6$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 50/60	0,14	0,98	2400,00	0,1372	329,28
Betonstahl	0,14	0,02	7856,00	0,0028	22,00
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
STEICO LVL	0,06	1,00	550,00	0,06	33,00
Summe:					384,46

5.3.1.2 Ökobilanz für $l_0 = 6$ m

Erneuerbarer Primärenergiebedarf für $l_0 = 6$ m

Die Werte für die erneuerbare Primärenergie (PERT) stammen vor allem aus dem stofflichen Ressourcenverbrauch sowie dem Einsatz von Wind- und Wasserkraft, Solarenergie, Biomasse oder Erdwärme während der Herstellungsphase der Deckensysteme (A1–A3). Während dieser Phase liegen die Bilanzwerte, welche vor allem durch den Holzanteil geprägt werden, je nach Deckenvariante in etwa zwischen 800 MJ/m² und 1400 MJ/m² (siehe Abb. 5.12).

Der Transport sowie der Einbau der Decke (A4–A5) haben nur sehr wenig Einfluss auf den Gesamtenergieeinsatz an erneuerbarer Primärenergie. Für die verwendeten Holzbaustoffe enthält das Modul A5 (Einbau ins Gebäude) jedoch lediglich Angaben zur Entsorgung der Produktverpackung. Auf den eigentlichen Einbau des Produkts wird in der Umweltproduktdeklaration kein Bezug genommen.

Für die untersuchten Tragkonstruktionen sind Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen während der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren üblicherweise nicht erforderlich, sodass während dieser Phase (B1–B7) keine Umweltlasten anfallen. Zudem werden weder Energie, noch Wasser verbraucht.

Durch den im Holz gebundenen Kohlenstoff können am Ende des Lebenswegs (C1–C4) bei den betrachteten Systemen durch die Annahme einer thermischen Verwertung hohe negative Bilanzwerte festgestellt werden. Der Holzanteil bei der Holzbalken-Beton-Verbundkonstruktion sowie der LVL-Verbunddecke liegt bei einer Spannweite von 6 m in einem ähnlich hohen Bereich, weshalb mit etwa -580 MJ/m² bis -550 MJ/m² auch ähnliche Bilanzwerte vorliegen. Bei der Brettstapel-Beton-Verbunddecke ist der Holzanteil etwa doppelt so hoch wie bei den anderen beiden Varianten, was sich auch im Bilanzwert von etwa -1120 MJ/m² niederschlägt. Der

Einfluss des Betonquerschnitts in dieser Phase kann aufgrund der niedrigen Werte annähernd vernachlässigt werden.

Da für die Herstellung von Beton hauptsächlich nicht erneuerbare Primärenergie verwendet wird, findet der mineralische Baustoff beim erneuerbaren Primärenergieeinsatz nur wenig Einklang. In Abb. 5.12 sind die Ergebnisse der Ermittlung des erneuerbaren Primärenergieeinsatzes der untersuchten Deckensysteme nach der jeweiligen Lebenszyklusphase dargestellt.

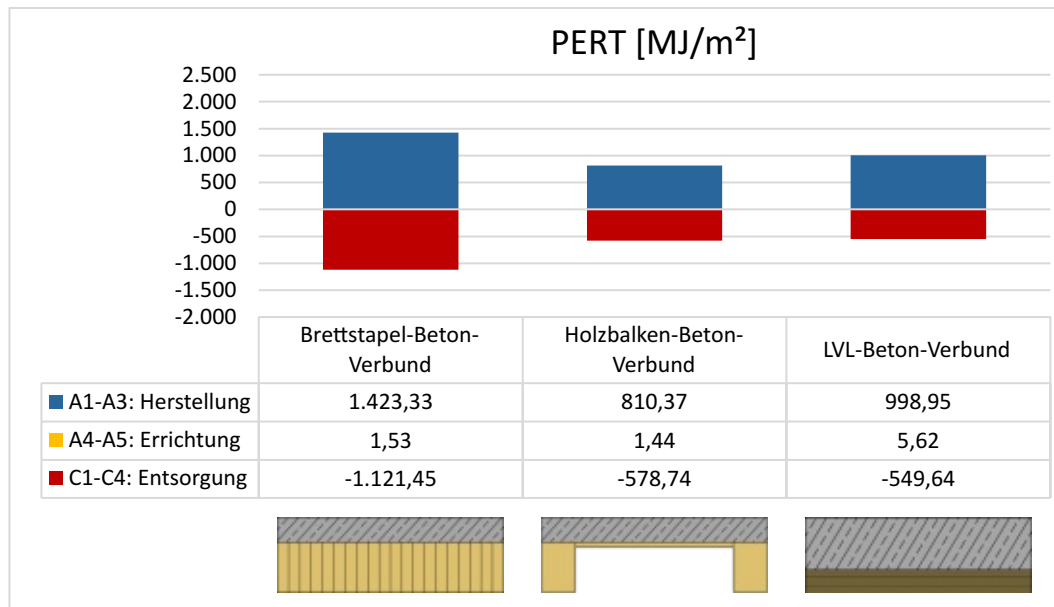


Abb. 5.12: Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 6$ m

In Abhängigkeit der betrachteten Szenarien ist der Gesamtbedarf an erneuerbarer Primärenergie der jeweiligen Konstruktionsvariante für eine Spannweite von $l_0 = 6$ m gemäß Abb. 5.13 dargestellt. Um den Einfluss des Recyclingpotentials (Lebenszyklusphase D) besser abschätzen zu können, werden die Summen in dieser Abbildung sowohl für das Szenario A–C als auch für das Szenario A–D (inkl. Berücksichtigung der Recycling- bzw. Entsorgungsanteile) veranschaulicht.

Durch den geringeren Wirkungsgrad der thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe im Biomassekraftwerk (Modul D) liegen im Szenario A–D deutlich höhere Bilanzwerte vor als im Szenario A–C. Aufgrund der ungenauen Angaben in den Umweltproduktdeklarationen zum Ende des Lebensweges sind die erhaltenen Werte jedoch kritisch zu bewerten.

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für $l_0 = 6$ m

Da für die Herstellung von Beton hauptsächlich nicht erneuerbare Primärenergie verwendet wird, wirkt sich der mineralische Baustoff an dieser Stelle deutlich mehr auf die Bilanzwerte aus als bei den erneuerbaren Energiewerten. In Abb. 5.14 sind die ermittelten Ergebnisse des nicht erneuerbaren Primärenergieeinsatzes der untersuchten Deckensysteme in Abhängigkeit der jeweiligen Lebenszyklusphase dargestellt.

Neben dem stofflichen Ressourcenverbrauch stammen die Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergieeinsatz während der Herstellungsphase (A1–A3) aus dem Verbrauch fossiler Energieträger und von Brennstoffen wie Erdöl, Erdgas und Kohle (siehe Abb. 5.14). Während dieser Phase werden bei den ersten beiden Varianten in etwa 340 MJ/m² an nicht erneuerbarer Energie benötigt. Knapp doppelt so hoch fällt dieser Wert bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion aus. Dies kann auf den höheren Betonanteil und den Bedarf an nicht erneuerbaren Energieträgern

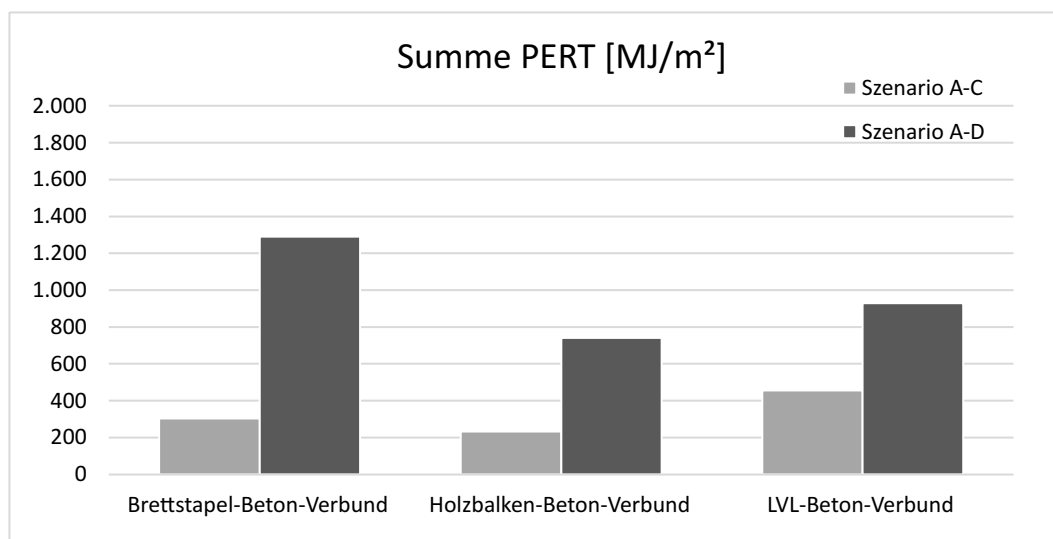


Abb. 5.13: Summe erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 6$ m

während der Herstellung des mineralischen Baustoffs (vor allem bei der Zementproduktion) sowie die aufwändigen Produktionsprozesse beim Werkstoff Furnierschichtholz zurückgeführt werden.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass trotz des Verhältnisses Beton zu Holz von ca. 2:3 bei den ersten beiden Varianten und eines angenommenen Bewehrungsgrads von nur 2 % etwa 25 % des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs während der Herstellungsphase auf den Bewehrungsstahl zurückzuführen sind.

Transport und Einbau der Decke (A4–A5) haben nur wenig Einfluss auf den Gesamtenergieeinsatz an nicht erneuerbarer Primärenergie. Am stärksten geprägt wird dieser Wert durch den Stahlbetonquerschnitt (Beton inklusive Bewehrung). Für die verwendeten Holzbaustoffe enthält das Modul A5 (Einbau ins Gebäude) lediglich Angaben zur Entsorgung der Produktverpackung. Auf den eigentlichen Einbau des Produkts wird in der Umweltproduktdeklaration kein Bezug genommen.

Für die untersuchten Tragkonstruktionen sind Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen während der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren üblicherweise nicht erforderlich, sodass während dieser Phase (B1–B7) keine Umweltlasten anfallen. Zudem werden weder Energie, noch Wasser verbraucht.

Im Gegensatz zum erneuerbaren Primärenergieeinsatz, bei dem am Ende des Lebenswegs (C1–C4) aufgrund der thermischen Verwertung des Holzwerkstoffs hohe ökobilanzielle Gutschriften verzeichnet werden können, scheinen bei den nicht erneuerbaren Energieeinsätzen in dieser Phase nur geringe Ökobilanzbeträge auf.

In Abhängigkeit der betrachteten Szenarien ist der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie der jeweiligen Konstruktionsvariante für eine Spannweite von $l_0 = 6$ m gemäß Abb. 5.15 dargestellt. Auch hier werden zur besseren Abschätzung des Recyclingpotentials die Summen sowohl für das Szenario A–C als auch für das Szenario A–D veranschaulicht. Das Modul D wird überwiegend von der Verwertung des Holzes im Biomassekraftwerk geprägt. In dieser Lebensphase werden Strom und Wärme erzeugt, womit vor allem fossile Energiequellen substituiert werden können. Zusätzlich fließen im Szenario A–D die in Tab. 5.1 angenommenen Recyclinganteile in die Berechnung ein.

Bei der Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion beträgt die Summe des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs im Szenario A–D -250 MJ/m², was vor allem auf die Gutschriften des Holzwerkstoffs zurückzuführen ist. Bei der Holzbalken-Beton-Verbunddecke liegen die Werte

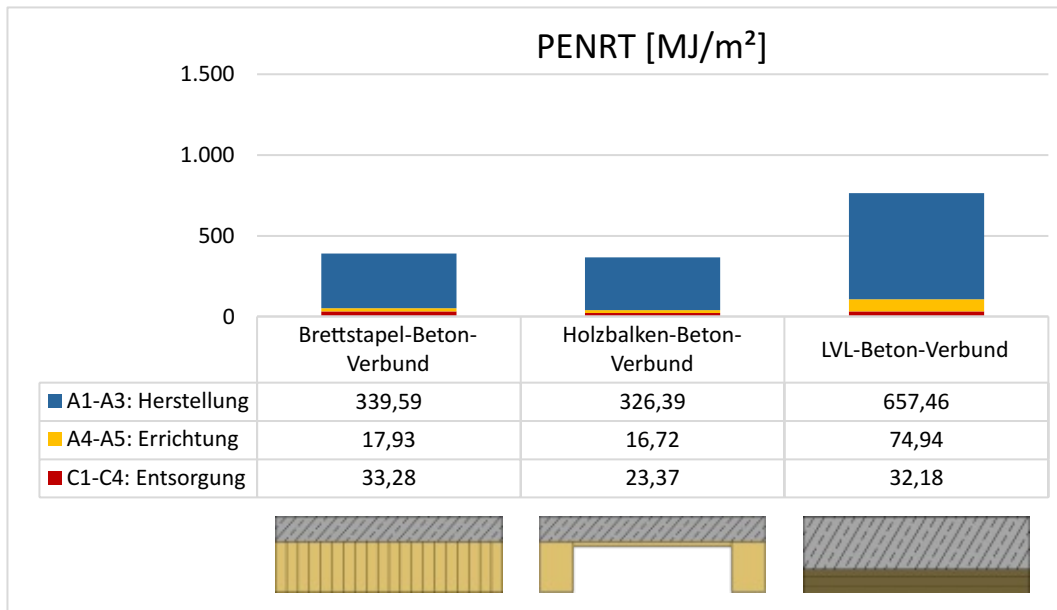


Abb. 5.14: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 6$ m

aufgrund des geringeren Holzanteils knapp im positiven Wertebereich. Angesichts des höheren Energiebedarfs während der Herstellungsphase und der vergleichsweise geringen Gutschrift im Modul D weist die Holz-Beton-Verbundvariante mit Furnierschichtholz einen nicht erneuerbaren Energiebedarf von 430 MJ/m² auf. Die Werte bei Berücksichtigung des gesondert ausgewiesenen Moduls D sind jedoch aufgrund der undurchsichtigen Angabe der Daten in den Umweltproduktdeklarationen kritisch zu hinterfragen.

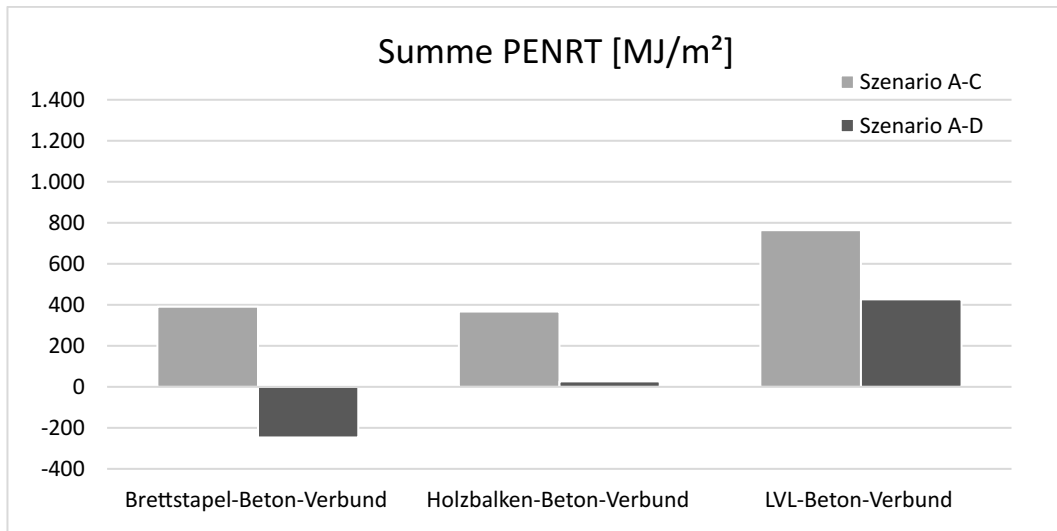


Abb. 5.15: Summe nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 6$ m

Gesamtsumme des Primärenergiebedarfs für $l_0 = 6$ m

Addiert man die Werte aus dem erneuerbaren (Abb. 5.13) und dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (Abb. 5.15), erhält man den Gesamtwert des Energiebedarfs, der im Laufe der angenommenen Lebenszyklusphase von 50 Jahren für jeweils 1 m^2 der Tragkonstruktion benötigt wird. Abb. 5.16 zeigt einen ähnlich hohen Gesamtenergiebedarf der ersten beiden Varianten im Szenario A–C auf (zwischen 600 MJ/m^2 und 690 MJ/m^2). Bei der Furnierschichtholzvariante wird mit 1200 MJ/m^2 deutlich mehr Energie benötigt. Diese Differenz lässt sich durch den größeren Betonquerschnitt und die energieaufwändigere Herstellung der Tragwerkelemente erklären.

Die Bilanzwerte für das Szenario A–D liegen dabei jeweils etwas über den Vergleichswerten des Szenarios A–C. Begründet werden kann dies durch den geringeren Wirkungsgrad der thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe im Biomassekraftwerk aus dem Modul D. Aufgrund der undurchsichtigen Herstellerangaben am Ende des Lebenszyklus sind diese Werte jedoch kritisch zu betrachten.

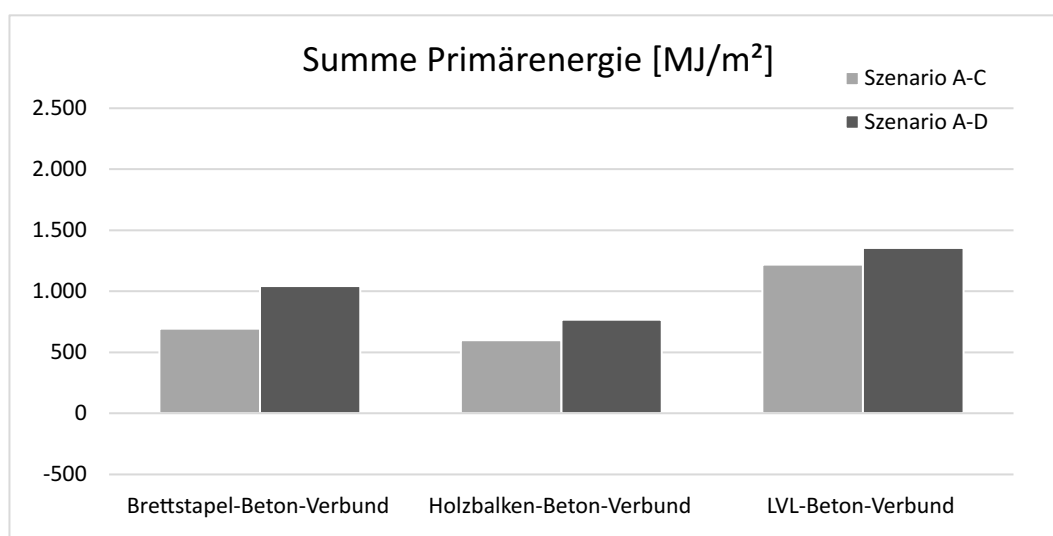


Abb. 5.16: Gesamtsumme Primärenergiebedarf (PE) in MJ je m^2 Konstruktionsfläche, $l_0 = 6$ m

Weitere Wirkungskategorien für $l_0 = 6$ m

In Tab. 5.5 und Abb. 5.17 werden neben dem Treibhauspotential (GWP), dem Ozonabbaupotential (ODP) und dem Photochemischen Ozonbildungspotential (POCP) auch das Versauerungspotential (AP) und das Eutrophierungspotential (EP) der jeweiligen Tragkonstruktion für das Szenario A–C gegenübergestellt. Dabei ist das Treibhauspotential von besonderer Bedeutung, da dies eine der wichtigsten Indikatoren für die Umweltwirkung eines Produkts darstellt und einen direkten Bezug zur globalen Erwärmung abbildet. Die in der Tabelle angeführten Ergebnisse beziehen sich dabei auf die Einheit Kilogramm des jeweiligen Äquivalents.

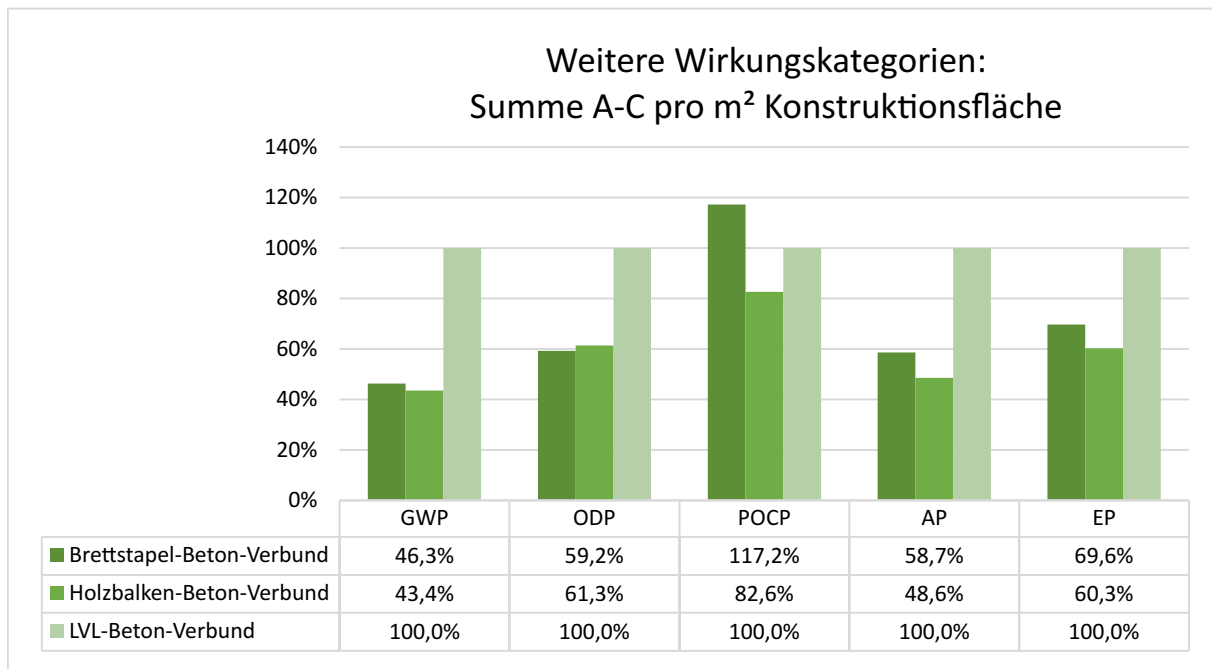
Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten und der verschiedenen Wertebereiche der Wirkungskategorien hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Kategorien für einen Vergleich der untersuchten Deckenvarianten in relativem Verhältnis zueinander darzustellen. Da die LVL-Beton-Verbundvariante bei den meisten Wirkungskategorien die größten Werte aufweist, wird dieses System als Referenzobjekt herangezogen. Von der Herstellungs- bis zur Entsorgungsphase haben sich bei einer Deckenspannweite von $l_0 = 6$ m die Werte gemäß Tab. 5.5 ergeben.

Unter Betrachtung des Szenarios A–C wird ersichtlich, dass bei den meisten Umweltkategorien die herkömmlichen Holz-Beton-Verbundvarianten (Brettstapel- und Holzbalkenkonstruktionen) deutlich umweltfreundlicher sind als die Decke mit Furnierschichtholz. Alleine beim Ozonbil-

Tab. 5.5: Summe A–C weiterer Wirkungskategorien, $l_0 = 6$ m

	GWP kg CO ₂ -Äqv. pro m ²	ODP kg R-11-Äqv. pro m ²	POCP kg C ₂ H ₄ -Äqv. pro m ²	AP kg SO ₂ -Äqv. pro m ²	EP kg PO ₄ -Äqv. pro m ²
Brettstapel-Verbund	38,3	0,71E-06	0,0151	0,101	0,0245
Holzbalken-Verbund	35,9	0,73E-06	0,0106	0,084	0,0212
LVL-Verbund	82,7	1,19E-06	0,0129	0,172	0,0352

dungspotential (POCP) liegt das Brettstapelholz voran, was auf etwas höhere Gutschriften der LVL-Beton-Verbunddecke während den Lebenszyklusphasen A4–A5 und C1–C4 zurückzuführen ist. Die Ergebnisse bei den anderen Umweltkategorien bewegen sich – jeweils in Relation zur LVL-Beton-Verbundvariante – in einem Bereich von 40–70 % (siehe Abb. 5.17).

Abb. 5.17: Summe A–C weiterer Wirkungskategorien in relativem Verhältnis, $l_0 = 6$ m

5.3.2 Systeme mit einer Spannweite von $l_0 = 7$ m

5.3.2.1 Massenermittlung für $l_0 = 7$ m

Die Aufbauten für die Deckenkonstruktionen mit einer Spannweite von $l_0 = 7$ m können Tab. 5.6 bis Tab. 5.8 entnommen werden. Diese bilden die Basis für die anschließende ökobilanzielle Betrachtung. Bei Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbundkonstruktion resultiert aus der Dimensionierung eine Erhöhung sowohl des Holz- als auch des Betonquerschnitts. In der Massenermittlung wirkt sich dies mit einem Zuwachs von etwa 25 % aus.

Während sich die Dicke der Betonplatte bei den beiden erstgenannten Konstruktionen von 8 cm auf 10 cm erhöht, steigt die Plattendicke bei der Ausführung mittels Furnierschichtholz um 6 cm auf eine Gesamtdicke von 20 cm. Im Vergleich zur Spannweite von $l_0 = 6$ m wirkt sich das mit einem Zuwachs von 39 % aus.

Tab. 5.6: Brettstapel-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 7$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 25/30	0,10	0,98	2400,00	0,098	235,20
Betonstahl	0,10	0,02	7856,00	0,002	15,71
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
Konstruktionsvollholz	0,18	1,00	468,62	0,18	84,35
Summe:					335,45

Tab. 5.7: Holzbalken-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 7$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 25/30	0,10	0,98	2400,00	0,098	235,20
Betonstahl	0,10	0,02	7856,00	0,0002	15,70
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
Lattung	0,02	0,68	468,62	0,0136	6,37
Brettschichtholz	0,24x0,20	1,60	483,21	0,0768	37,11
Summe:					294,58

Tab. 5.8: LVL-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 7$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 50/60	0,20	0,98	2400,00	0,196	470,40
Betonstahl	0,20	0,02	7856,00	0,004	31,42
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
STEICO LVL	0,06	1,00	550,00	0,06	33,00
Summe:					535,01

5.3.2.2 Ökobilanz für $l_0 = 7$ m

Erneuerbarer Primärenergiebedarf für $l_0 = 7$ m

Die Werte für die erneuerbare Primärenergie (PERT) stammen auch bei den Systemen mit einer Spannweite von $l_0 = 7$ m vor allem aus dem stofflichen Ressourcenverbrauch sowie dem Einsatz von Wind- und Wasserkraft, Solarenergie, Biomasse oder Erdwärme während der Herstellungsphase (A1–A3). Die Bilanzwerte in dieser Phase liegen in einer Höhe zwischen 1000 MJ/m² und 1800 MJ/m² (siehe Abb. 5.18). Im Vergleich zu den Deckensystemen mit einer Spannweite von $l_0 = 6$ m steigt der erneuerbare Primärenergiebedarf bei der Brettstapel-Beton-Verbunddecke – wie auch bei der Holzbalken-Beton-Verbunddecke – um etwa 25 % an und erhöht sich somit in ähnlichem Ausmaß wie die Masse. Alleine bei der LVL-Beton-Verbundvariante kann trotz Massenerhöhung kaum ein Zuwachs in diesem Bereich verzeichnet werden. Dies liegt an der

gleichbleibenden Dimension des Holzquerschnitts, der den Primärenergiebedarf am stärksten prägt.

Der Transport und der Einbau der Decke (A4–A5) haben ebenso nur sehr geringen Einfluss auf den Gesamtenergieeinsatz an erneuerbarer Primärenergie.

Für die untersuchten Tragkonstruktionen sind Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen während der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren üblicherweise nicht erforderlich, sodass während dieser Phase (B1–B7) keine Umweltlasten anfallen. Zudem werden weder Energie, noch Wasser verbraucht.

Während bei der Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbundkonstruktion in der Entsorgungsphase eine Steigerung der Gutschriften um etwa 27 % zu verzeichnen ist, bleibt diese bei der LVL-Beton-Verbundvariante mit etwa -550 MJ/m^2 aufgrund des gleichbleibenden Holzquerschnitts annähernd konstant.

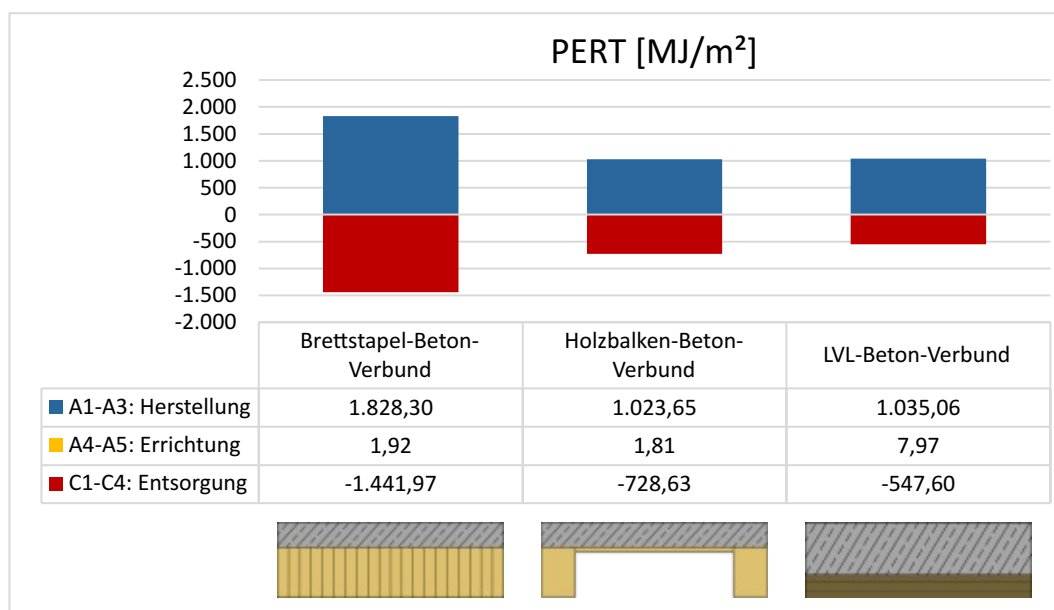


Abb. 5.18: Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) in MJ je m^2 Konstruktionsfläche, $l_0 = 7 \text{ m}$

In Abhängigkeit der betrachteten Szenarien ist der Gesamtbedarf an erneuerbarer Primärenergie der jeweiligen Konstruktionsvariante für eine Spannweite von $l_0 = 7 \text{ m}$ gemäß Abb. 5.19 dargestellt. Um den Einfluss des Recyclingpotentials (Lebenszyklusphase D) besser abschätzen zu können, werden die Summen in dieser Abbildung sowohl für das Szenario A–C als auch für das Szenario A–D (inkl. Berücksichtigung der Recycling- bzw. Entsorgungsanteile) veranschaulicht.

Durch den geringeren Wirkungsgrad der thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe im Biomassekraftwerk (Modul D) liegen im Szenario A–D deutlich höhere Bilanzwerte vor als im Szenario A–C. Aufgrund der ungenauen Angaben in den Umweltproduktdeklarationen zum Ende des Lebensweges sind die erhaltenen Werte jedoch kritisch zu bewerten.

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für $l_0 = 7 \text{ m}$

Da für die Herstellung von Beton hauptsächlich nicht erneuerbare Primärenergie verwendet wird, wirkt sich der mineralische Baustoff an dieser Stelle deutlich mehr auf die Bilanzwerte aus als bei den erneuerbaren Energiewerten. In Abb. 5.20 sind die Ergebnisse der Ermittlung des nicht erneuerbaren Primärenergieeinsatzes der untersuchten Deckensysteme in Abhängigkeit der jeweiligen Lebenszyklusphase dargestellt.

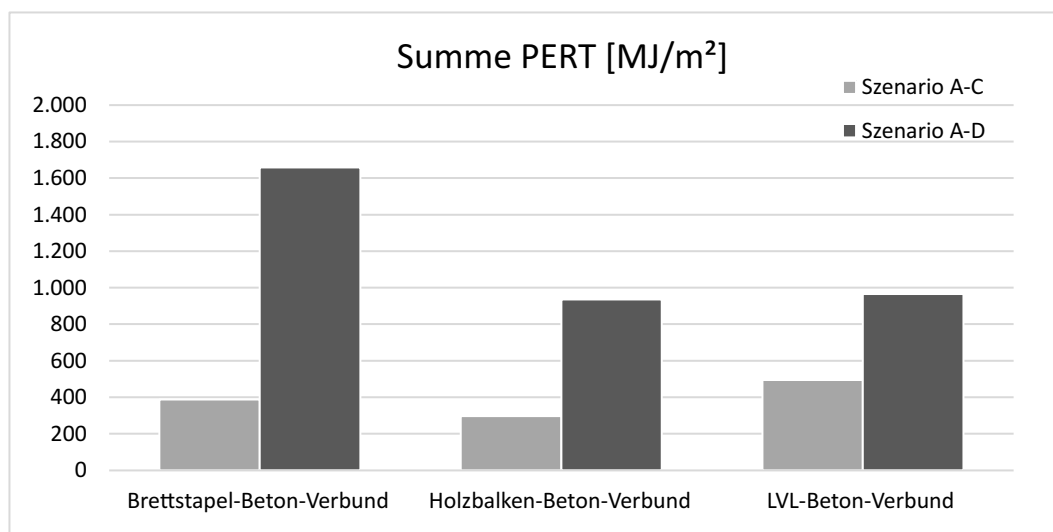


Abb. 5.19: Summe erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 7$ m

Während der Herstellungsphase beträgt der Zuwachs des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs – im Vergleich zu den Systemen mit einer Spannweite von $l_0 = 6$ m – bei allen drei Konstruktionsarten etwa 25 %. Bei den ersten beiden Varianten wird in etwa zwischen 430 MJ/m² und 410 MJ/m² an nicht erneuerbarer Energie benötigt. Knapp doppelt so hoch fällt dieser Wert bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion aus. Dies kann auf den höheren Betonanteil und den Bedarf an nicht erneuerbaren Energieträgern während der Herstellung des mineralischen Baustoffs (vor allem bei der Zementproduktion) zurückgeführt werden.

Transport und Einbau der Decke (A4–A5) haben nur wenig Einfluss auf den Gesamtenergieeinsatz an nicht erneuerbarer Primärenergie. Am stärksten geprägt wird dieser Wert durch den Stahlbetonquerschnitt (Beton inklusive Bewehrung), weshalb die LVL-Beton-Verbundkonstruktion in dieser Phase auch den größten Zuwachs verzeichnet. Für die verwendeten Holzbaustoffe enthält das Modul A5 (Einbau ins Gebäude) lediglich Angaben zur Entsorgung der Produktverpackung. Auf den eigentlichen Einbau des Produkts wird in der Umweltproduktdeklaration kein Bezug genommen.

Für die untersuchten Tragkonstruktionen sind Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen während der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren üblicherweise nicht erforderlich, sodass während dieser Phase (B1–B7) keine Umweltlasten anfallen. Zudem werden weder Energie, noch Wasser verbraucht.

Im Gegensatz zum erneuerbaren Primärenergieeinsatz, bei dem am Ende des Lebenswegs (C1–C4) hohe ökobilanzielle Gutschriften verzeichnet werden können, scheinen bei den nicht erneuerbaren Energieeinsätzen in dieser Phase nur geringe Ökobilanzbeträge auf.

In Abhängigkeit der betrachteten Szenarien ist der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie der jeweiligen Konstruktionsvariante für eine Spannweite von $l_0 = 7$ m gemäß Abb. 5.21 dargestellt. Auch hier werden zur besseren Abschätzung des Recyclingpotentials (Lebenszyklusphase D) die Summen sowohl für die Phasen A–C als auch für die Phasen A–D veranschaulicht. Das Modul D wird überwiegend von der Verwertung des Holzes im Biomassekraftwerk geprägt. In dieser Lebensphase werden Strom und Wärme erzeugt, womit vor allem fossile Energiequellen substituiert werden können. Zusätzlich fließen im Szenario A–D die in Tab. 5.1 angenommenen Recyclinganteile in die Berechnung ein.

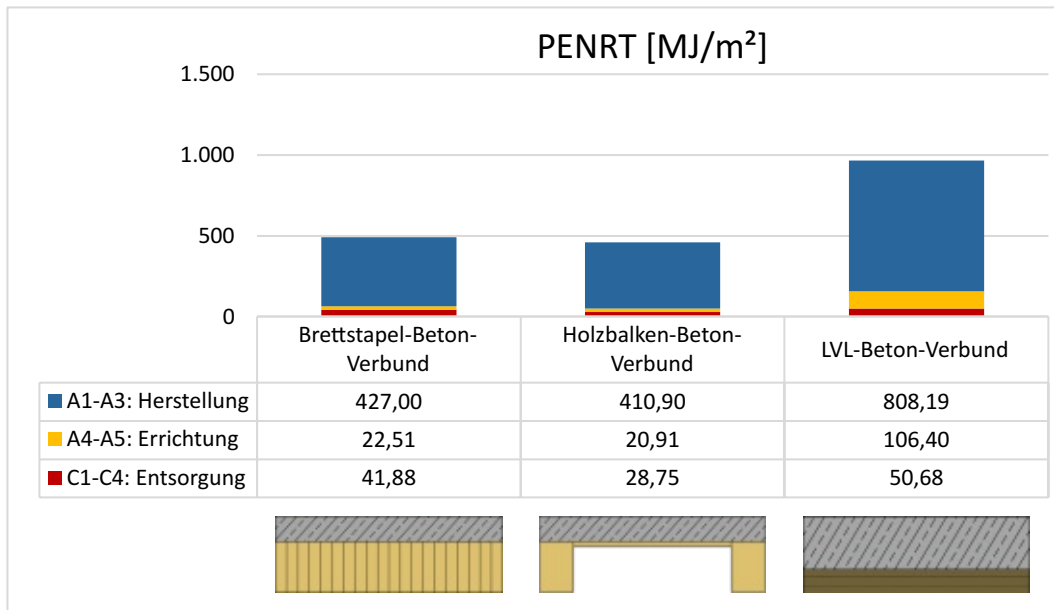


Abb. 5.20: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 7$ m

Bei der Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion beträgt die Summe des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs im Szenario A–D -330 MJ/m², was vor allem auf die Gutschriften des Holzwerkstoffs zurückzuführen ist. Bei der Holzbalken-Beton-Verbunddecke liegen die Werte aufgrund des geringeren Holzanteils knapp im positiven Wertebereich. Angesichts des höheren Energiebedarfs während der Herstellungsphase und der vergleichsweise geringen Gutschrift im Modul D weist die Holz-Beton-Verbundvariante mit Furnierschichtholz einen nicht erneuerbaren Energiebedarf von 600 MJ/m² auf. Die Werte bei Berücksichtigung des gesondert ausgewiesenen Moduls D sind jedoch aufgrund der undurchsichtigen Angabe der Daten in den Umweltproduktdeklarationen kritisch zu hinterfragen.

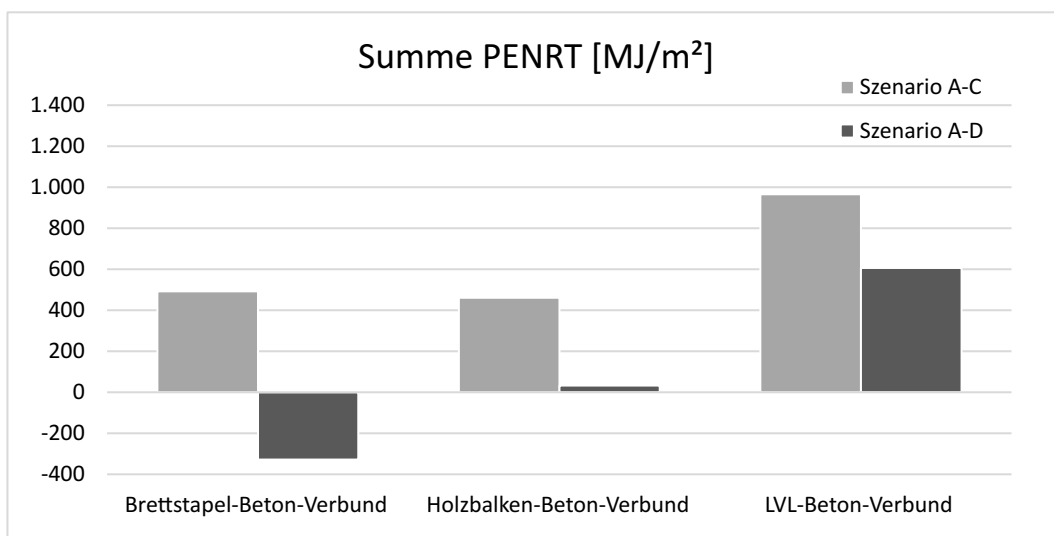


Abb. 5.21: Summe nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 7$ m

Gesamtsumme des Primärenergiebedarfs für $l_0 = 7$ m

Addiert man die Werte aus dem erneuerbaren (Abb. 5.19) sowie dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (Abb. 5.21), erhält man den Gesamtwert des Energiebedarfs, der im Laufe der angenommenen Lebenszyklusphase von 50 Jahren für jeweils 1 m^2 der Tragkonstruktion benötigt wird. Abb. 5.22 zeigt einen ähnlich hohen Gesamtenergiebedarf der ersten beiden Varianten in den Phasen A–C (zwischen 760 MJ/m^2 und 880 MJ/m^2). Bei der Furnierschichtholzvariante wird hingegen mit knapp 1500 MJ/m^2 deutlich mehr Energie benötigt. Diese Differenz lässt sich durch den größeren Betonquerschnitt und die energieaufwändigere Herstellung der Tragwerkselemente erklären.

Die Bilanzwerte für das Szenario A–D liegen dabei jeweils etwas über den Vergleichswerten des Szenarios A–C. Begründet werden kann dies durch den geringeren Wirkungsgrad der thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe im Biomassekraftwerk aus dem Modul D. Aufgrund der undurchsichtigen Herstellerangaben am Ende des Lebenszyklus sind diese Werte jedoch kritisch zu betrachten.

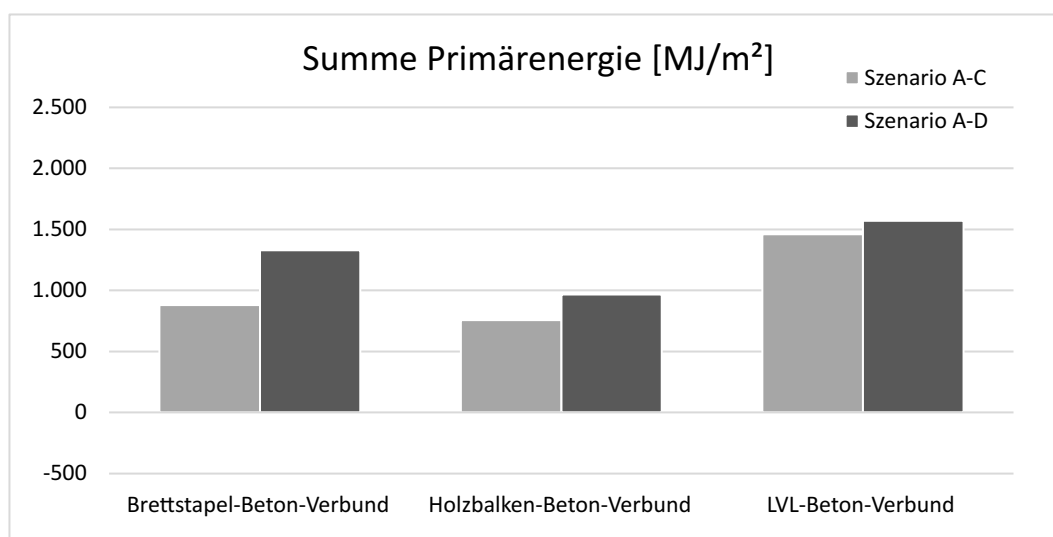


Abb. 5.22: Gesamtsumme Primärenergiebedarf (PE) in MJ je m^2 Konstruktionsfläche, $l_0 = 7$ m

Weitere Wirkungskategorien für $l_0 = 7$ m

Im Folgenden sind die Ergebnisse der weiteren Umweltindikatoren für eine Spannweite von $l_0 = 7$ m im Szenario A–C zusammengefasst. Von der Herstellungs- bis zur Entsorgungsphase haben sich die Werte gemäß Tab. 5.9 ergeben.

Tab. 5.9: Summe A–C weiterer Wirkungskategorien, $l_0 = 7$ m

	GWP kg CO ₂ -Äqv. pro m ²	ODP kg R-11-Äqv. pro m ²	POCP kg C ₂ H ₄ -Äqv. pro m ²	AP kg SO ₂ -Äqv. pro m ²	EP kg PO ₄ -Äqv. pro m ²
Brettstapel-Verbund	48,1	0,89E-06	0,0192	0,127	0,0311
Holzbalken-Verbund	45,1	0,92E-06	0,0134	0,105	0,0268
LVL-Verbund	108,0	1,71E-06	0,0140	0,206	0,0451

Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten und der verschiedenen Wertebereiche dieser Wirkungskategorien hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Kategorien für einen Vergleich der untersuchten

Deckenvarianten in relativem Verhältnis zueinander grafisch darzustellen. Unter Betrachtung des Szenarios A–C wird ersichtlich, dass bei den meisten Umweltkategorien – ebenso wie bei einer Spannweite von 6 m – die herkömmlichen Holz-Beton-Verbundvarianten (Brettstapel- und Holzbalkenkonstruktion) deutlich umweltfreundlicher sind als die Decke mit Furnierschichtholz. Alleine beim Ozonbildungspotential (POCP) liefert das Brettstapelholz die höchsten Bilanzwerte, was auf die Gutschriften der LVL-Beton-Verbunddecke während den Lebenszyklusphasen A4–A5 und C1–C4 zurückzuführen ist. Die Ergebnisse bei den anderen Umweltkategorien bewegen sich – jeweils in Relation zur LVL-Beton-Verbundvariante – in einem Bereich von 40–70 % (siehe Abb. 5.23).

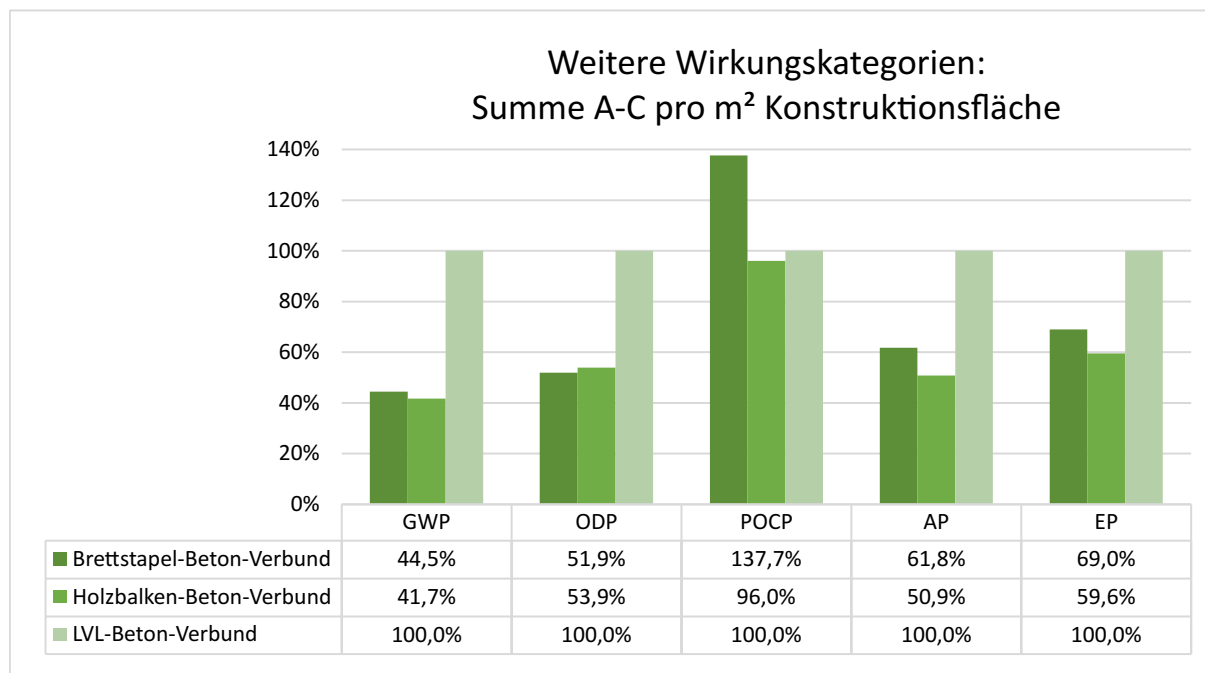


Abb. 5.23: Summe A–C weiterer Wirkungskategorien in relativem Verhältnis, $l_0 = 7$ m

5.3.3 Systeme mit einer Spannweite von $l_0 = 8$ m

5.3.3.1 Massenermittlung für $l_0 = 8$ m

Die Aufbauten für die Deckenkonstruktionen mit einer Spannweite von $l_0 = 8$ m können Tab. 5.10 bis Tab. 5.12 entnommen werden. Diese bilden die Basis für die anschließende ökobilanzielle Betrachtung. Bei allen drei Varianten resultiert aus der Dimensionierung eine Erhöhung des Betonquerschnitts um jeweils 2 cm sowie eine Vergrößerung des Holzquerschnitts. In der Masseermittlung wirkt sich dies bei den ersten beiden Systemen mit einem Zuwachs von etwa 20 % im Vergleich zur Spannweite von 7 m aus, wohingegen die gewählte LVL-Beton-Verbundkonstruktion um nur 10 % ihrer Masse steigt.

5.3.3.2 Ökobilanz für $l_0 = 8$ m

Erneuerbarer Primärenergiebedarf für $l_0 = 8$ m

Während der Herstellungsphase (A1–A3) liegt der Bedarf an erneuerbarer Primärenergie bei der Brettstapel-Beton-Verbunddecke bei etwa 2000 MJ/m², was auf den hohen Holzanteil zurückzuführen ist. Bei den anderen beiden Varianten liegt der Energiebedarf bei etwa 1350 MJ/m²

Tab. 5.10: Brettstapel-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 8$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 25/30	0,12	0,98	2400,00	0,118	282,24
Betonstahl	0,12	0,02	7856,00	0,0024	18,85
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
Konstruktionsvollholz	0,20	1,00	468,62	0,20	93,72
Summe:					395,00

Tab. 5.11: Holzbalken-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 8$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 25/30	0,12	0,98	2400,00	0,1176	282,24
Betonstahl	0,12	0,02	7856,00	0,0024	18,85
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
Lattung	0,02	0,62	468,62	0,0123	5,77
Brettschichtholz	0,28x0,24	1,60	483,21	0,1075	51,95
Summe:					359,01

Tab. 5.12: LVL-Beton-Verbunddecke, $l_0 = 8$ m

Material	Dicke [m]	Faktor [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse [kg]
Beton C 50/60	0,22	0,98	2400,00	0,2156	517,44
Betonstahl	0,22	0,02	7856,00	0,0044	34,57
Dampfbremse	0,0002	1,00	930,00	0,0002	0,19
STEICO LVL	0,08	1,00	550,00	0,08	44,00
Summe:					596,19

(siehe Abb. 5.24). Im Vergleich zu den Deckensystemen mit einer Spannweite von $l_0 = 7$ m steigt der erneuerbare Primärenergiebedarf bei der Brettstapel-Beton-Verbunddecke um etwa 10 %, wohingegen der Zuwachs bei der Holzbalkendecke der LVL-Decke bei etwa 30 % liegt.

Der Transport und der Einbau der Decke (A4–A5) haben nur sehr geringen Einfluss auf den Gesamtenergieeinsatz an erneuerbarer Primärenergie.

Für die untersuchten Tragkonstruktionen sind Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen während der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren üblicherweise nicht erforderlich, sodass während dieser Phase (B1–B7) keine Umweltlasten anfallen. Zudem werden weder Energie noch Wasser verbraucht.

In der Entsorgungsphase (C1–C4) sind bei allen Konstruktionsarten ähnliche Zuwächse zu verzeichnen wie während der Herstellungsphase. Die Bilanzwerte belaufen sich in diesem Abschnitt auf -1600 MJ/m² bis -730 MJ/m².

In Abhängigkeit der betrachteten Szenarien ist der Gesamtbedarf an erneuerbarer Primärenergie der jeweiligen Konstruktionsvariante für eine Spannweite von $l_0 = 8$ m gemäß Abb. 5.25 dargestellt.

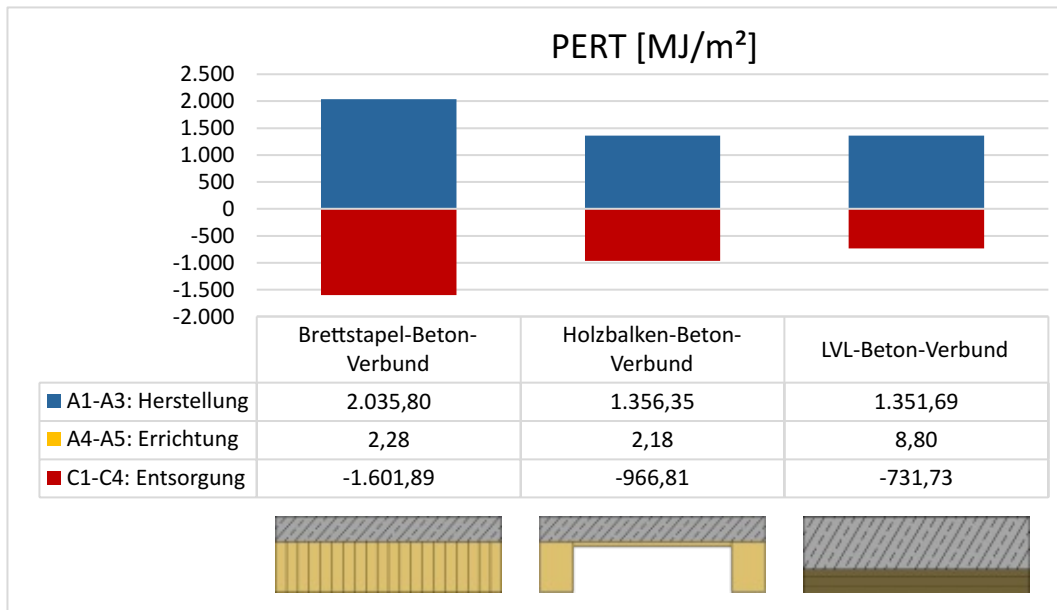


Abb. 5.24: Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 8$ m

Um den Einfluss des Recyclingpotentials (Lebenszyklusphase D) besser abschätzen zu können, werden die Summen in dieser Abbildung sowohl für das Szenario A–C als auch für das Szenario A–D (inkl. Berücksichtigung der Recycling- bzw. Entsorgungsanteile) veranschaulicht.

Durch den geringeren Wirkungsgrad der thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe im Biomassekraftwerk (Modul D) liegen im Szenario A–D deutlich höhere Bilanzwerte vor als im Szenario A–C. Aufgrund der ungenauen Angaben in den Umweltproduktdeklarationen zum Ende des Lebensweges sind die erhaltenen Werte jedoch kritisch zu bewerten.

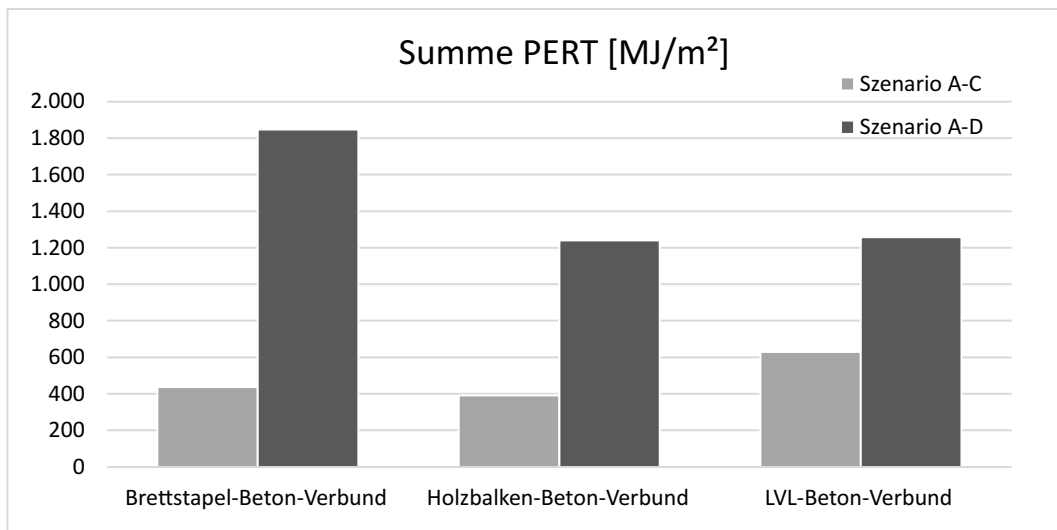


Abb. 5.25: Summe erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 8$ m

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für $l_0 = 8$ m

Der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie liegt während der Herstellungsphase nach Abb. 5.26 bei den ersten beiden Deckenvarianten zwischen 490 MJ/m^2 und 520 MJ/m^2 . Doppelt so hoch fällt dieser Wert bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion aus. Dies kann auf den höheren Betonanteil und den Bedarf an nicht erneuerbaren Energieträgern während der Herstellung des mineralischen Baustoffs (vor allem bei der Zementproduktion) zurückgeführt werden.

Transport und Einbau der Decke (A4–A5) haben nur wenig Einfluss auf den Gesamtenergieeinsatz an nicht erneuerbarer Primärenergie. Am stärksten geprägt wird dieser Wert durch den Stahlbetonquerschnitt (Beton inklusive Bewehrung), weshalb die LVL-Beton-Verbundkonstruktion in dieser Phase auch den höchsten Bilanzwert verzeichnet. Für die verwendeten Holzbaustoffe enthält das Modul A5 (Einbau ins Gebäude) lediglich Angaben zur Entsorgung der Produktverpackung. Auf den eigentlichen Einbau des Produkts wird in der Umweltproduktdeklaration kein Bezug genommen.

Für die untersuchten Tragkonstruktionen sind Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen während der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren üblicherweise nicht erforderlich, sodass während dieser Phase (B1–B7) keine Umweltlasten anfallen.

Im Gegensatz zum erneuerbaren Primärenergieeinsatz, bei dem am Ende des Lebenswegs (C1–C4) hohe ökobilanzielle Gutschriften verzeichnet werden können, scheinen bei den nicht erneuerbaren Energieeinsätzen in dieser Phase nur geringe Ökobilanzbeträge auf.

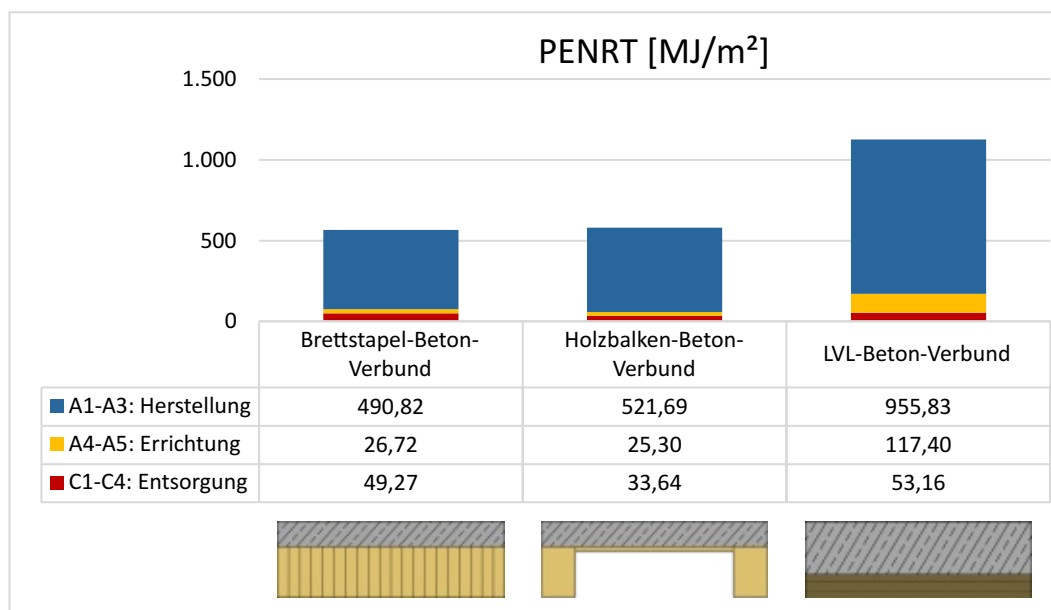


Abb. 5.26: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 8$ m

In Abb. 5.27 ist der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie der jeweiligen Konstruktionsvariante für eine Spannweite von $l_0 = 8$ m in Abhängigkeit des betrachteten Szenarios dargestellt – wiederum unterteilt in die Szenarien A–C und A–D.

Das Modul D wird überwiegend von der Verwertung des Holzes im Biomassekraftwerk geprägt. In dieser Lebensphase werden Strom und Wärme erzeugt, womit vor allem fossile Energiequellen substituiert werden können. Zusätzlich fließen im Szenario A–D die in Tab. 5.1 angenommenen Recyclinganteile in die Berechnung ein.

Bei der Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion beträgt die Summe des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs im Szenario A–D -350 MJ/m^2 , was vor allem auf die Gutschriften des

Holzwerkstoffs zurückzuführen ist. Bei der Holzbalken-Beton-Verbunddecke liegen die Werte aufgrund des geringeren Holzanteils knapp im positiven Wertebereich. Angesichts des höheren Energiebedarfs während der Herstellungsphase und der vergleichsweise geringen Gutschrift im Modul D weist die Holz-Beton-Verbundvariante mit Furnierschichtholz einen nicht erneuerbaren Energiebedarf von 660 MJ/m^2 auf. Die Werte bei Berücksichtigung des gesondert ausgewiesenen Moduls D sind jedoch aufgrund der undurchsichtigen Angabe der Daten in den Umweltproduktdeklarationen kritisch zu hinterfragen.

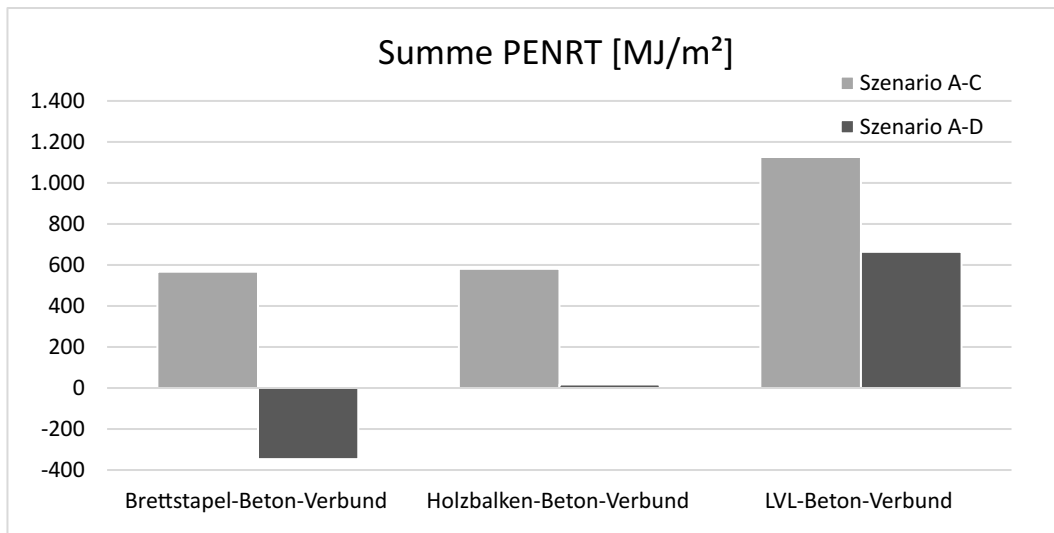


Abb. 5.27: Summe nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) in MJ je m^2 Konstruktionsfläche, $l_0 = 8 \text{ m}$

Gesamtsumme des Primärenergiebedarfs für $l_0 = 8 \text{ m}$

Addiert man die Werte aus dem erneuerbaren (Abb. 5.25) sowie dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (Abb. 5.27), erhält man den Gesamtwert des Energiebedarfs, der im Laufe der angenommenen Lebenszyklusphase von 50 Jahren für jeweils 1 m^2 der Tragkonstruktion benötigt wird. Abb. 5.28 zeigt einen ähnlich hohen Gesamtenergiebedarf der ersten beiden Varianten im Szenario A–C (etwa 1000 MJ/m^2). Bei der Furnierschichtholzvariante wird hingegen mit knapp 1800 MJ/m^2 deutlich mehr Energie benötigt. Diese Differenz lässt sich durch den größeren Betonquerschnitt und die energieaufwändigere Herstellung der Tragwerkelemente erklären.

Die Bilanzwerte für das Szenario A–D liegen dabei jeweils etwas über den Vergleichswerten des Szenarios A–C. Begründet werden kann dies durch den geringeren Wirkungsgrad der thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe im Biomassekraftwerk aus dem Modul D. Aufgrund der undurchsichtigen Herstellerangaben am Ende des Lebenszyklus sind diese Werte jedoch kritisch zu betrachten.

Weitere Wirkungskategorien für $l_0 = 8 \text{ m}$

Im Folgenden sind die Ergebnisse der weiteren Umweltindikatoren für eine Spannweite von $l_0 = 8 \text{ m}$ im Szenario A–C zusammengefasst. Von der Herstellungs- bis zur Entsorgungsphase haben sich die Werte gemäß Tab. 5.13 ergeben.

Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten und der verschiedenen Wertebereiche dieser Wirkungskategorien hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Kategorien für einen Vergleich der untersuchten Deckenvarianten in relativem Verhältnis zueinander grafisch darzustellen. Unter Betrachtung des Szenarios A–C wird ersichtlich, dass bei den meisten Umweltkategorien – ebenso wie bei den bisher untersuchten Spannweiten – die herkömmlichen Holz-Beton-Verbundvarianten (Brettstapel- und

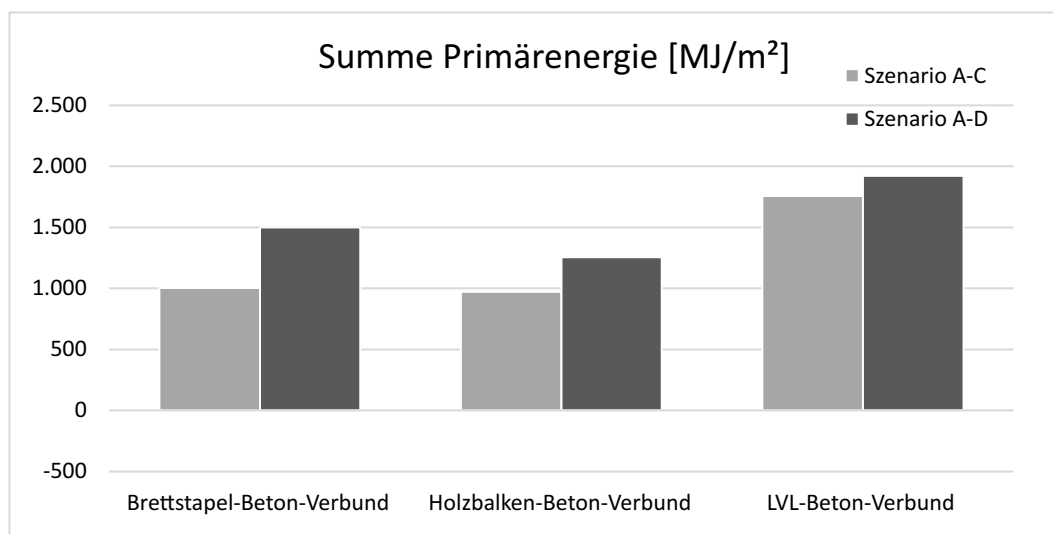


Abb. 5.28: Gesamtsumme Primärenergiebedarf (PE) in MJ je m² Konstruktionsfläche, $l_0 = 8$ m

Tab. 5.13: Summe A–C weiterer Wirkungskategorien, $l_0 = 8$ m

	GWP kg CO ₂ -Äqv. pro m ²	ODP kg R-11-Äqv. pro m ²	POCP kg C ₂ H ₄ -Äqv. pro m ²	AP kg SO ₂ -Äqv. pro m ²	EP kg PO ₄ -Äqv. pro m ²
Brettstapel-Verbund	56,0	1,06E-06	0,0216	0,144	0,0356
Holzbalken-Verbund	56,1	1,12E-06	0,0176	0,134	0,0344
LVL-Verbund	124,0	1,88E-06	0,0177	0,246	0,0523

Holzbalkenkonstruktion) deutlich umweltfreundlicher sind als die Decke mit Furnierschichtholz. Alleine beim Ozonbildungspotential (POCP) liefert das Brettstapelholz die höchsten Bilanzwerte, was auf die Gutschriften der LVL-Beton-Verbunddecke während den Lebenszyklusphasen A4–A5 und C1–C4 zurückzuführen ist. Die Ergebnisse bei den anderen Umweltkategorien bewegen sich – jeweils in Relation zur LVL-Beton-Verbundvariante – in einem Bereich von 40–70 % (siehe Abb. 5.29).

5.4 Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse

5.4.1 Energiebedarf und Wirkungskategorien

Im Folgenden sind die ökobilanziellen Ergebnisse der Vergleichsstudie in Abhängigkeit der Spannweite für jeweils eine Konstruktionsfläche von 1 m² dargestellt. Unter Berücksichtigung der Herstellungs- bis zur Entsorgungsphase (Szenario A–C) werden die drei Konstruktionsvarianten im Hinblick auf den Primärenergiebedarf und die untersuchten Wirkungskategorien gegenübergestellt. Somit können direkte Aussagen über Unterschiede in der Umweltwirkung sowie dem Verhalten bzw. dem Verlauf bei Erhöhung der Systemspannweite getätigt werden.

Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT)

Die Summen des erneuerbaren Energiebedarfs in Abhängigkeit der Spannweite für die Lebenszyklusphasen A–C sind in Abb. 5.30 dargestellt. Bei der Verbundkonstruktion mit Furnierschichtholz wird demnach am meisten Primärenergie aus erneuerbaren Quellen benötigt, was auf den höheren

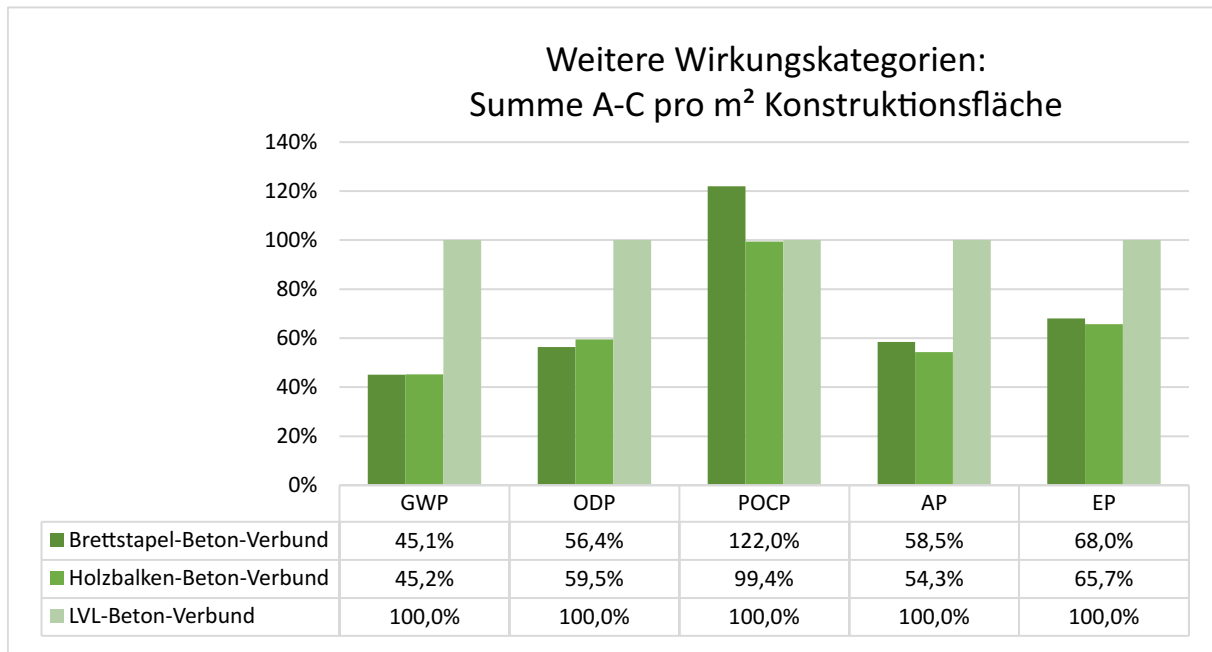


Abb. 5.29: Summe A–C weiterer Wirkungskategorien in relativem Verhältnis, $l_0 = 8$ m

Betonquerschnitt und die damit einhergehenden geringeren Gutschriften während der Lebenszyklusphase C zurückzuführen ist. Die Bilanzwerte in dieser Wirkungskategorie liegen in einem Bereich zwischen 450 MJ/m^2 und 630 MJ/m^2 – je nach Spannweite.

Der Bedarf an erneuerbarer Primärenergie liegt bei der Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion mit 300 MJ/m^2 bis 440 MJ/m^2 etwas über jenen der Verbundkonstruktion mit Holzbalken, was auf den höheren Holzanteil zurückzuführen ist. Die Bilanzwerte der Holzbalkenkonstruktion befinden sich in einem Bereich zwischen 230 MJ/m^2 und 390 MJ/m^2 .

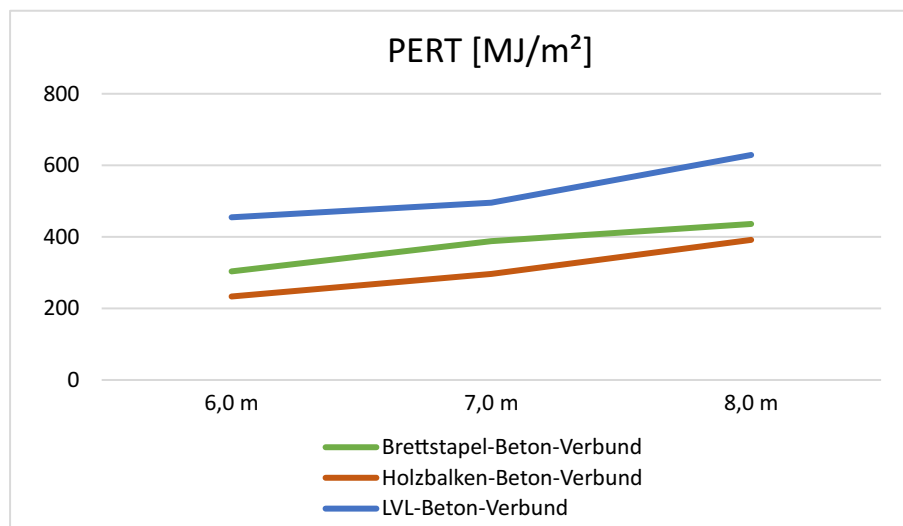


Abb. 5.30: Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) pro m² Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT)

Konnten beim erneuerbaren Primärenergieeinsatz zwischen der Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbundkonstruktion noch deutlichere Unterschiede festgestellt werden, liegen die Bilanzwerte dieser beiden Varianten beim nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf wesentlich näher beieinander. Besonders die Betonherstellung und die Produktion des Betonstahls haben starken Einfluss auf den Indikator, wodurch sich diese Korrelation durch die Bauteildimensionierung erklären lässt. In Abhängigkeit der Spannweite liegen die Werte dieser beiden Konstruktionsarten in einem Bereich zwischen 370 MJ/m^2 und 580 MJ/m^2 (siehe Abb. 5.31).

Mit einem Bedarf an nicht erneuerbaren Energiere Ressourcen von 770 MJ/m^2 bis 1130 MJ/m^2 liegen die Bilanzwerte der LVL-Beton-Verbundkonstruktion deutlich über jenen der Referenzobjekte. Diese Differenz lässt sich durch den größeren Betonquerschnitt und die energieaufwändigere Herstellung der Beton- und Furnierschichtholzelemente begründen.

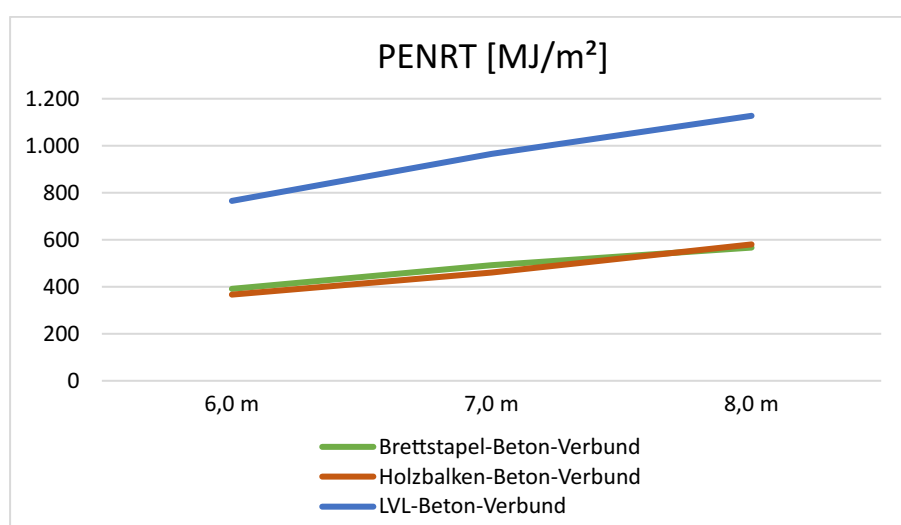


Abb. 5.31: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) pro m^2 Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Treibhauspotential (GWP)

In der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials kann gemäß Abb. 5.32 ein ähnliches Verhältnis wie beim PENRT festgestellt werden. Die Brettstapel- und Holzbalkenvarianten weisen je nach Spannweite Bilanzwerte zwischen $38 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$ und $56 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$ auf. Die Tragkonstruktion der Furnierschichtholzdecke wirkt sich mit Werten zwischen $80 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$ und $125 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$ je m^2 Konstruktionsfläche deutlich stärker auf die Klimaerwärmung aus. Die Herstellung des Betons sowie die Entsorgung des Furnierschichtholzes tragen dabei den größten Anteil in dieser Wirkungskategorie bei.

Durch die Bindung von CO_2 während des Wachstums von Holz ergeben sich in der Herstellungsphase der Holzwerkstoffe ökobilanzielle Gutschriften. Tragkonstruktionen mit einem höheren Betonanteil verursachen demnach ein deutlich höheres Treibhauspotential, da bei der Herstellung von Zement durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe relativ viel CO_2 verbraucht wird.

Ozonabbaupotential (ODP)

Die Wirkungskategorie des Ozonabbaupotentials wird vor allem durch die Herstellung des Betonstahls geprägt. Da bei der Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbundkonstruktion jeweils derselbe Betonquerschnitt – und somit auch derselbe Stahlanteil – gewählt wurde, befinden sich auch die Bilanzwerte in ähnlicher Höhe. Die Werte bei diesen beiden Konstruktionen bewegen

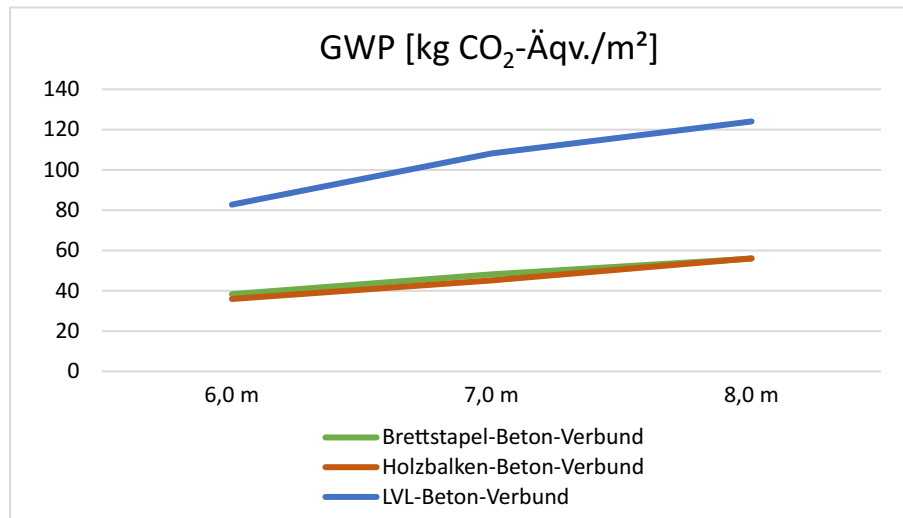


Abb. 5.32: Treibhauspotential (GWP) pro m² Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

sich in einem Bereich zwischen $0,7 \times 10^{-6}$ kg CFC-11-Äqv. und $1,1 \times 10^{-6}$ kg CFC-11-Äqv. je m² Konstruktionsfläche. Bei der LVL-Beton-Verbundvariante liegt ein höherer Betonanteil vor, was sich gemäß Abb. 5.33 auch in größeren Bilanzwerten in einer Höhe von $1,2 \times 10^{-6}$ kg CFC-11-Äqv. bis $1,9 \times 10^{-6}$ kg CFC-11-Äqv. widerspiegelt.

Bei der Deckenvariante mit Furnierschichtholz wird beim Sprung der Spannweite von $l_0 = 6$ m auf $l_0 = 7$ m rein der Betonquerschnitt größer dimensioniert, was sich auch in einer stärkeren Zunahme des Ozonabbaupotentials als beim Sprung von 7 m auf 8 m abzeichnet.

Bei der Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbundkonstruktion wird der Betonquerschnitt dagegen bei Erhöhung der Spannweite um jeweils 2 cm stärker dimensioniert, wodurch auch das Ozonabbaupotential linear ansteigt.

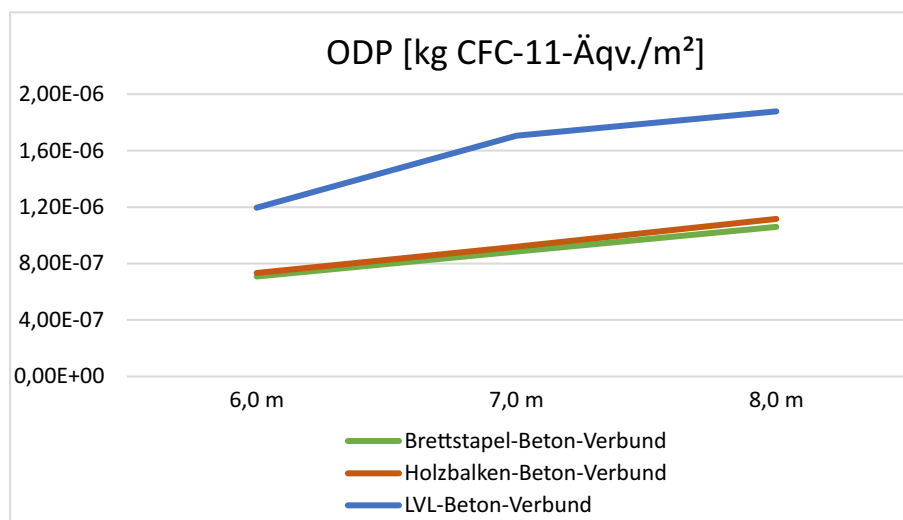


Abb. 5.33: Ozonabbaupotential (ODP) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP)

Für alle drei Konstruktionsarten wird die Wirkungskategorie des photochemischen Ozonbildungspotentials vorrangig durch die Herstellung des Holzbestandteils beeinflusst. Zuzufolge des größten Holzanteils sind die Bilanzwerte der Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion bei diesem Indikator am stärksten ausgeprägt (siehe Abb. 5.34).

Bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion und der Decke mit Holzbalkenunterkonstruktion liegt ein geringerer Holzanteil vor, was auch in den Bilanzwerten erkennbar ist.

Die Lebenszyklusphasen des Stahlbetonquerschnitts wirken sich nur geringfügig auf das Ergebnis des Ozonbildungspotentials aus.

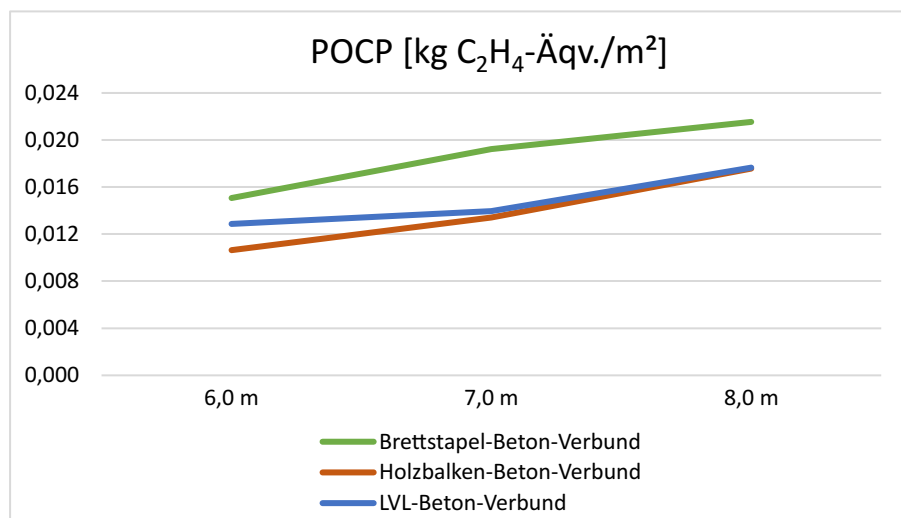


Abb. 5.34: Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP) pro m² Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A-C

Versauerungspotential (AP)

Deutlich größere Unterschiede im ökobilanziellen Vergleich zwischen den herkömmlichen Systemen (Brettstapel- und Holzbalkendecke) und der LVL-Beton-Verbunddecke sind im Versauerungspotential zu verzeichnen (siehe Abb. 5.35). Während die ersten beiden Varianten je nach Spannweite Werte im Bereich zwischen 0,08 kg SO₂-Äqv. und 0,14 kg SO₂-Äqv. je m² aufweisen, ergibt die ökologische Bilanzierung der LVL-Decke in Bezug auf das Versauerungspotential Werte zwischen 0,17 kg SO₂-Äqv. und 0,25 kg SO₂-Äqv. je m² Konstruktionsfläche. Dieser Unterschied resultiert vor allem aus der Herstellung des Betons und des Furnierschichtholzes.

Eutrophierungspotential (EP)

Das Eutrophierungspotential wird bei der Brettstapel- und Holzbalkendecke vorrangig von der Herstellung des Holzwerkstoffs und des Betonwerkstoffs geprägt. Die Bilanzwerte dieser beiden Systeme liegen zwischen 0,021 kg PO₄-Äqv. und 0,036 kg PO₄-Äqv. je m² Konstruktionsfläche und sind in Abb. 5.36 dargestellt.

Bei der LVL-Konstruktion gewinnt in dieser Wirkungskategorie die Herstellungsphase der mineralischen Bestandteile mehr an Bedeutung. Durch den größer dimensionierten Betonquerschnitt lassen sich hier Werte zwischen 0,035 kg PO₄-Äqv. und 0,052 kg PO₄-Äqv. erkennen.

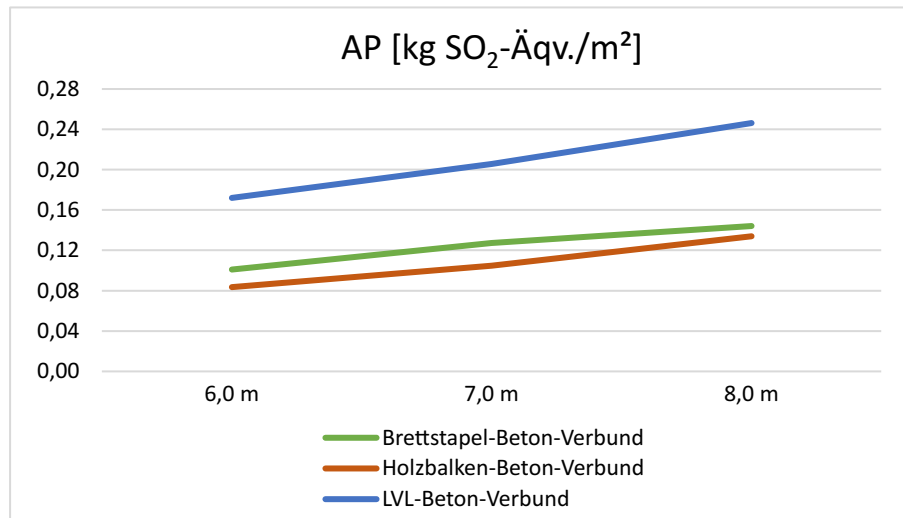


Abb. 5.35: Versauerungspotential (AP) pro m² Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

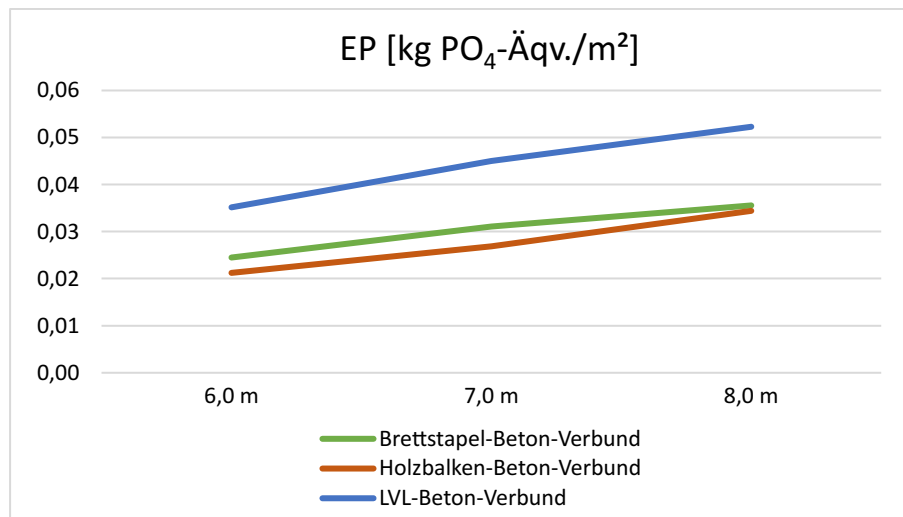


Abb. 5.36: Eutrophierungspotential (EP) pro m² Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

5.4.2 Berechnung der OI₃-Kennwerte

Unter Einbeziehung des in Abschnitt 4.4.3 definierten Fußbodenaufbaus für die Holz-Beton-Verbunddecken werden im Folgenden der OI₃_{KON} und der ΔOI₃_{BS} der verschiedenen Konstruktionsarten berechnet und grafisch dargestellt. Anhand des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PENRT), des Treibhauspotentials (GWP) und des Versauerungspotentials (AP) werden dabei die ökologischen Qualitäten der Systeme in der Herstellungsphase (A1–A3) verglichen. Vor allem durch den ΔOI₃_{BS}-Index, der eine Konstruktion auf Ebene der einzelnen Baustoffschichten betrachtet, ist eine ökologische Bewertung und Optimierung auf den ersten Blick möglich. Die Berechnungsmethode dieser Kennwerte wurde bereits in Abschnitt 3.2.7 vorgestellt.

Mit dem punktebasierten OI₃_{KON}-Index wird die ökologische Qualität der einzelnen Holz-Beton-Verbunddecken durch die Bewertung auf einer Skala (üblicherweise zwischen 0 und 100) dargestellt. Mittels einer Farbskala und der Einteilung in neun jeweils gleich große Qualitätsklassen

(A++ bis G) können die Konstruktionsarten im Hinblick auf ihre ökologische Wirkung eingestuft werden [29]. Je geringer die Punkteanzahl einer Konstruktion, desto höher kann ihre ökologische Qualität eingestuft werden.

In Abb. 5.37 sind die Ergebnisse des $OI3_{KON}$ -Kennwerts der einzelnen HBV-Konstruktionen dargestellt. Während die Brettstapel- und die Holzbalken-Beton-Verbunddecke für alle drei betrachteten Spannweiten eine Punkteanzahl unter 10 erreichen und somit eine Qualitätsklasse A++ bzw. A+ aufweisen, kann mit der LVL-Verbundvariante bei $OI3_{KON}$ -Punkten zwischen 30 und 50 nur eine Klasse zwischen A (bei $l_0 = 6$ m) und C (bei $l_0 = 8$ m) erreicht werden.

Besonders auffällig ist die negative Punkteanzahl, die sich bei der Brettstapel-Beton-Verbunddecke bei geringer Spannweite ergibt. Diese kann insbesondere auf die Holzwerkstoffe zurückgeführt werden, die durch das Speichern von CO_2 in der Produktionsphase hohe Gutschriften in der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials aufweisen.

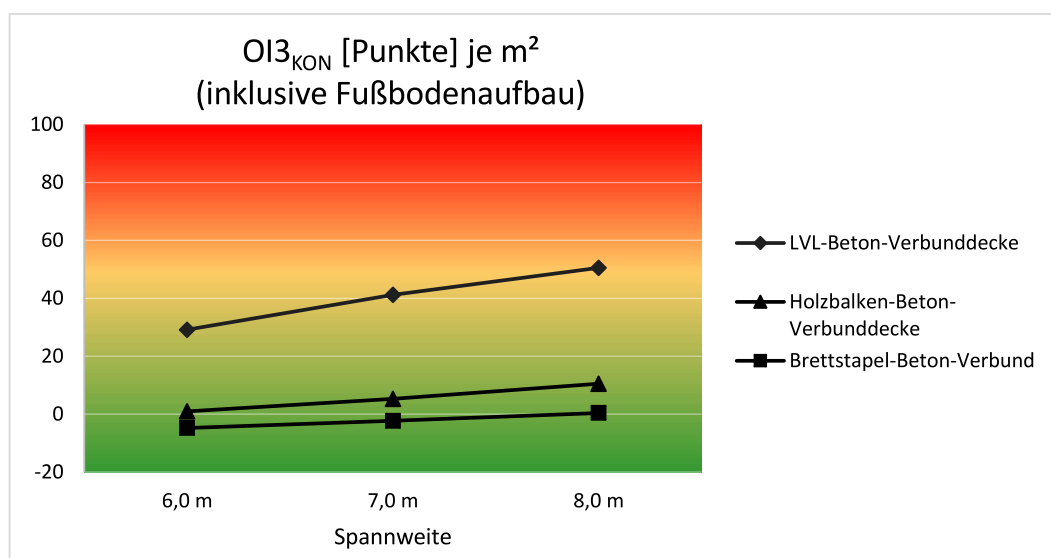


Abb. 5.37: Vergleich des Ökoindex $OI3_{KON}$ pro m^2 Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite

Als zweiter ökologischer Qualitätsparameter wird der $\Delta OI3_{BS}$ der einzelnen Baustoffschichten berechnet. Dieser gibt an, um wie viele Punkte der $OI3_{KON}$ sinken bzw. steigen würde, wenn man die betrachtete Schicht aus der Konstruktion entfernt. Somit lässt sich herausfinden, welchen ökologischen Einfluss die einzelnen Ebenen aufweisen und wo die größten Optimierungsmöglichkeiten liegen.

Abb. 5.38 vergleicht die einzelnen HBV-Konstruktionsarten miteinander und zeigt, welche Eigenschaften der Fußbodenaufbau hinsichtlich der ökologischen Qualitäten aufweist. Der $\Delta OI3_{BS}$ -Wert für den Aufbau beträgt 20,22 Punkte und wird für alle Deckenvarianten und Spannweiten gleich ausgebildet. Etwa 43 % davon fallen bei der Herstellung des Zementestrichs an, wodurch bei Anpassung dieser Schicht auch eine Verbesserung der Ökobilanz zu erwarten ist. Bei den anderen Materialien sind aufgrund der schallschutztechnischen Anforderungen an die Trittschalldämmung (Mineralwolle) sowie der Wahl eines ohnehin nachwachsenden Rohstoffs für den Bodenbelag (Massivparkett) kaum mehr Optimierungsmöglichkeiten gegeben.

Bei den herkömmlichen Deckenvarianten mit Brettstapel- und Holzbalkenunterkonstruktion in Kombination mit Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30 ist im Fußbodenaufbau das größte Optimierungspotential enthalten. Aufgrund des hohen Holzanteils und des geringen Betonquerschnitts verzeichnen die herkömmlichen Deckenvarianten mit Brettstapel- und Holz-

balkenunterkonstruktion in Kombination mit Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30 auf Konstruktionsebene nur ein geringes Vermögen zur ökobilanziellen Optimierung. Vielmehr ist ersichtlich, dass das größte Verbesserungspotential im Fußbodenaufbau steckt – z. B. durch einen Aufbau in trockener Bauweise.

Bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion sind etwa 40 % der $\Delta\text{OI}_{\text{BS}}$ -Punkte auf die Herstellung des Betonquerschnitts zurückzuführen. Um die Ökobilanz dieser Systemvariante zu verbessern, liegt eine Optimierung hin zu einem größeren Holzquerschnitt nahe, um den Betonanteil so gering wie möglich zu gestalten. Dies sollte stets im Abstimmung mit der statischen Berechnung erfolgen.

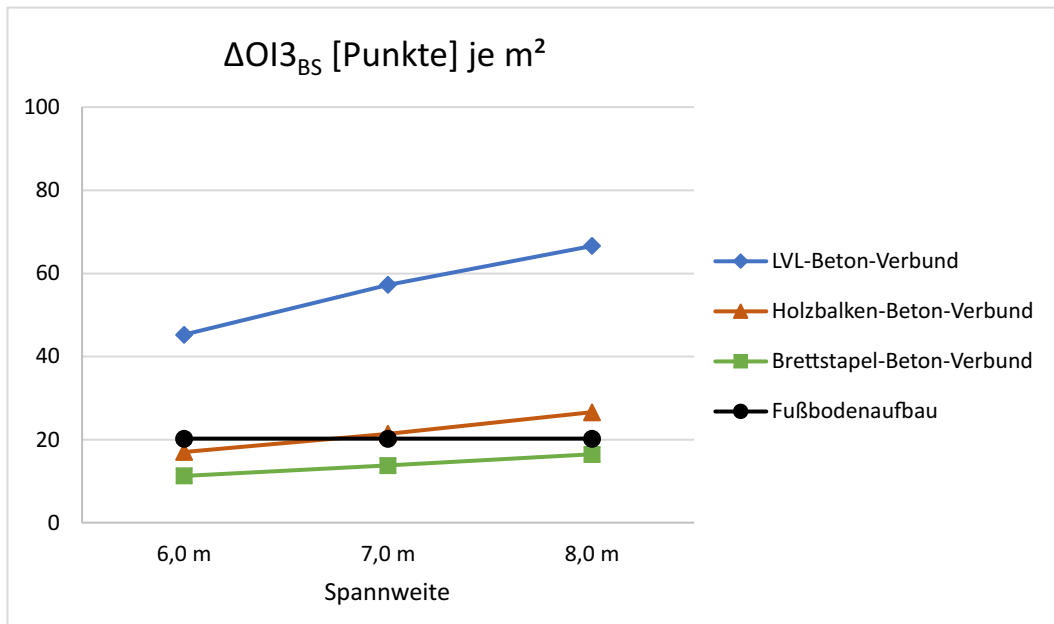


Abb. 5.38: Vergleich des Ökoindeks $\Delta\text{OI}_{\text{BS}}$ pro m^2 Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite

5.4.3 Kritische Bewertung der Ergebnisse

Auch wenn die Ausarbeitung der Lebenszyklusanalyse der unterschiedlichen HBV-Konstruktionen bisher interessante Erkenntnisse über die ökologischen Qualitäten geliefert hat, so sind dennoch einige kritisch zu betrachtende Punkte aufgetreten, die bei der Darstellung der Umweltwirkungen eines Produkts stets berücksichtigt und dokumentiert werden müssen.

Oftmals sind die umweltbezogenen Daten von Produkten nur eingeschränkt verfügbar oder gar nicht öffentlich gemacht. In diesem Fall sind Annahmen zu treffen, die das gewählte Szenario so gut wie möglich repräsentieren. Als konkretes Beispiel kann die – aufgrund des Fehlens von Daten über den gesamten Lebensweg – notwendige Substitution des Baustoffs Brettstapelholz durch Konstruktionsvollholz angegeben werden. Teilweise sind für Produkte überhaupt keine Werte im Sinne einer Umweltproduktdeklaration vorhanden, wodurch ebenfalls die Wahl eines anderen Materials notwendig wird (z. B. Nadelfurnier anstelle von Buchenfurnierschichtholz).

Des Weiteren konnte eine starke Varianz der Bilanzwerte in Abhängigkeit der gewählten Baustoffe festgestellt werden. Je nach Herkunft der Daten (ÖKOBAUDAT, baubook oder Umweltproduktdeklarationen anderer Hersteller) sind große Unterschiede zu verzeichnen – sowohl in Bezug auf den Primärenergiebedarf als auch auf die Umweltwirkungen. Davon betroffen sind neben den Holz- und Betonwerkstoffen auch der verwendete Bewehrungsstahl. So sind bei

sich vermeintlich stark ähnelnden Produkten (z. B. Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30) doch große herstellerepezifische Abweichungen erfasst worden. Weil die ÖKOBAUDAT sehr viele verschiedene Produkte beinhaltet und sich durch eine hohe Vollständigkeit im Hinblick auf die Lebenszyklusphasen auszeichnet, wird in dieser Arbeit primär auf diese Datenbank zurückgegriffen.

Ein Augenmerk sollte auch auf die in den Umweltproduktdeklarationen getroffenen Annahmen gelegt werden. Insbesondere die Wahl bzw. der Ansatz des Transportweges und des Transportmittels vom Werk zur Baustelle kann sich bedeutend auf die Ökobilanzergebnisse auswirken. So wird in der später verwendeten EPD für Brettsperrholz eine durchschnittliche Transportdistanz von 880 km angenommen, wohingegen bei den meisten anderen Holzwerkstoffen gar keine Angaben gemacht werden. Ist die Transportphase (A4) aufgrund der weiten durchschnittlichen Transportwege des KLH-Werkstoffs im Schnitt an etwa 20 % des gesamten Impacts verantwortlich, spielt dieser Abschnitt bei den anderen Baustoffen kaum eine Rolle bei der Bewertung der ökologischen Qualitäten. Im Sinne der Verwendung möglichst regionaler Werkstoffe wird bei fehlenden Angaben zur durchschnittlichen Transportdistanz ein LKW-Transport von 30 km angesetzt. Um die Vergleichbarkeit der Produkte zu optimieren, werden die Herstellerangaben zum Kreuzlagenholz beim Modul A4 ebenfalls auf einen Transportweg von 30 km heruntergebrochen.

Des Weiteren ist bei der Auswahl der Umweltproduktdeklarationen (bzw. der Datenbank) auf die Unterschiede im Hinblick auf die berücksichtigten Lebenszyklusphasen zu achten. Während in manchen Datensätzen rein die Herstellungsphase in die Berechnung einfließt, wurde in dieser Arbeit der Fokus auf die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus der Produkte gelegt. Bei lückenhaften Produktdeklarationen ist deshalb auf eine ausreichende Dokumentation oder das Treffen von möglichst repräsentativen Annahmen zurückzugreifen. Die ÖKOBAUDAT liefert ein hohes Maß an Vollständigkeit im Hinblick auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen. Aus diesem Grund wird primär auf diese Datenbank zurückgegriffen. Mit dem Ziel der Schaffung einer möglichst konsequenten Basis werden diese Datensätze um einige externe Umweltproduktdeklarationen ergänzt. Dies betrifft neben dem Baustoff Betonstahl, bei dem die Werte aus der Datenbank der Bau EPD GmbH [1] stammen, vor allem die Holzwerkstoffe, deren Deklarationen einer Plattform des IBU [16] entnommen wurden.

Teilweise ist auch bei großer Vollständigkeit der Datensätze eine kritische Hinterfragung notwendig, da in den Umweltproduktdeklarationen verschiedener Hersteller oft unterschiedliche Szenarien entwickelt bzw. verfolgt werden. So ist bei den betrachteten Holzwerkstoffen eine Problematik in Bezug auf die Gutschriften des im Holz gespeicherten Kohlenstoffs aufgetreten. Während bei manchen Holzprodukten eine vollständige thermische Verwertung bereits im Modul C (Entsorgungsphase) berücksichtigt wird, gehen andere Hersteller von einer Verwertung im Biomassekraftwerk aus und weisen die Gutschriften dem Modul D zu. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit versucht, sich ähnelnde Werkstoffe aus derselben Datenbank zu entnehmen, um eine möglichst gleichmäßige Grundlage für die Ermittlung der Ökobilanz zu schaffen.

5.5 Vergleich der HBV-Konstruktionen mit Stahlbeton- und Massivholzdecken

Um den Energieverbrauch und die Umweltwirkung der betrachteten Holz-Beton-Verbunddecken besser einschätzen zu können, erscheint es als sinnvoll, diese mit verschiedenen Konstruktionsvarianten in Massivbauweise zu vergleichen. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle die Ökobilanz sowohl für eine reine Stahlbetondecke, als auch für eine Massivholzdecke aus Brettsperrholz ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Brettsperrholzvariante nur eine maximale Spannweite von 7 m erreicht werden kann. Des Weiteren ist aus bauphysikalischen Gründen

bei der Holzdecke ein veränderter Fußbodenaufbau (mit Schüttung) anzuordnen und in die Bilanzierung mit einzubeziehen (siehe Abb. 5.39).

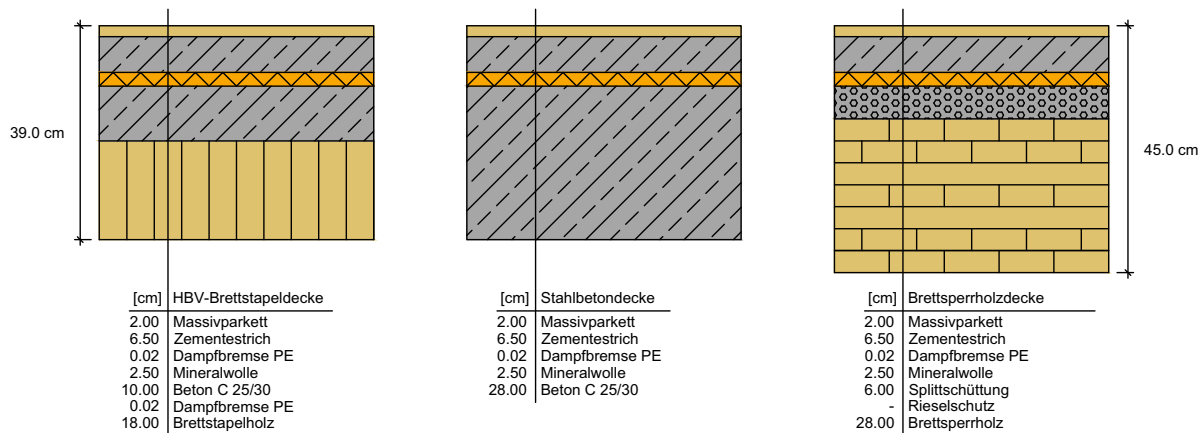


Abb. 5.39: Vergleich der Deckenaufbauten als Beispiel für eine Spannweite von $l_0 = 7$ m

Die folgende ökobilanzielle Gegenüberstellung bezieht sich jeweils auf eine Konstruktionsfläche von 1 m^2 und umfasst die Lebenszyklusphasen A–C. Neben dem Primärenergiebedarf werden auch die wichtigsten Wirkungskategorien verglichen.

In den nächsten Abschnitten werden die getroffenen Annahmen bei der Ermittlung der Aufbauart und -höhe der unterschiedlichen Systemvarianten erläutert.

5.5.1 Statische Vordimensionierung

5.5.1.1 Dimensionierung der Stahlbetondecke

Ausgehend vom Iterationsverfahren für den vereinfachten Nachweis zur Begrenzung der Verformung nach ÖNORM EN 1992-1-1 [33] stellen Prietz und Richtsteig [37] eine neue Methode zur direkten Ermittlung der erforderlichen statischen Höhe von Stahlbetondecken vor. Basierend auf Parameterstudien, welche die Stützweite, die Lagerung des Systems, die Druckfestigkeitsklasse des Betons, die Nutzlast und den Kombinationsbeiwert ψ miteinbeziehen, schlagen die Autoren eine Berechnung der statischen Nutzhöhe gemäß Gleichung (5.1) vor.

$$d_{\text{erf}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{(l_0)^a}{n} \cdot \beta_c \quad (5.1)$$

Neben einer Annahme der Formelparameter zu $n = 44$ und $a = 1,2$ wird die Berechnung des Korrekturfaktors für die Betonfestigkeit (β_c) wie folgt empfohlen:

$$\beta_c = \left(\frac{30}{f_{\text{ck}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.2)$$

Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Lagerungsbedingungen ($K = 1,0$) sowie der Annahme der Betondruckfestigkeitsklasse C 25/30 lässt sich Gleichung (5.1) folgendermaßen vereinfachen:

$$d_{\text{erf}} = \frac{(l_0)^{1,2}}{44} \cdot 1,063 \quad (5.3)$$

Nach Ergänzung der statischen Nutzhöhe um den Randabstand der Bewehrung in Höhe von 3 cm ergeben sich in Abhängigkeit der Spannweite die Konstruktionsdicken in Tab. 5.14.

Tab. 5.14: Ergebnisse zur Vordimensionierung der Konstruktionshöhen von Stahlbetondecken

Spannweite	d_{erf}	$c_v + \phi/2$	h_{gew}
$l_0 = 6 \text{ m}$	0,21 m	0,03 m	0,24 m
$l_0 = 7 \text{ m}$	0,25 m	0,03 m	0,28 m
$l_0 = 8 \text{ m}$	0,29 m	0,03 m	0,32 m

5.5.1.2 Dimensionierung der Massivholzdecke

Einen weiteren Vergleichswert liefert die KLH-Brettsperrholzdecke, bestehend aus senkrecht miteinander verklebten Nadelholz Brettern. Zur Vordimensionierung dieser Massivholzdecke wird auf die Herstellerangaben der KLH Massivholz GmbH [18] zurückgegriffen. Diese beruhen auf dem Nachweisverfahren gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [34] bzw. ÖNORM B 1995-1-1 [30] und sind daher ideal geeignet für einen Vergleich mit den in Abschnitt 4.4 bemessenen Holz-Beton-Verbundquerschnitten.

Unter Berücksichtigung der höheren ständigen Auflast aufgrund der aus bauphysikalischen Gründen notwendigen Splittschüttung ergeben sich bei dieser Deckenvariante die Plattenstärken in Tab. 5.15.

Tab. 5.15: Ergebnisse zur Vordimensionierung der Konstruktionshöhen von Stahlbetondecken

Spannweite	Ständige Auflast	Kategorie	Nutzlast	Plattenstärke
$l_0 = 6 \text{ m}$	2,7 kN/m ²	A	2,8 kN/m ²	7s 220 DL
$l_0 = 7 \text{ m}$	2,7 kN/m ²	A	2,8 kN/m ²	7ss 280 DL
$l_0 = 8 \text{ m}$	–	–	–	–

Für diese Massivholzkonstruktion ist eine maximale Spannweite von $l_0 = 7 \text{ m}$ zu erreichen.

5.5.2 Ökobilanzieller Vergleich

Im Folgenden sind die ökobilanziellen Ergebnisse der drei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen sowie der Stahlbeton- und Brettsperrholzvariante in Abhängigkeit der Spannweite für jeweils eine Deckenfläche von 1 m² dargestellt. Berücksichtigt wird zudem der in Abschnitt 4.4.3 genannte Fußbodenaufbau sowie bei der Massivholzdecke die aus bauphysikalischen Gründen notwendige Splittschüttung.

Unter Betrachtung der Lebenszyklusphasen A–C werden neben dem Primärenergiebedarf auch die untersuchten Wirkungskategorien gegenübergestellt. Aufgrund der undurchsichtigen Herstellerangaben zum Ende des Lebenszyklus (Modul D) wird die Darstellung des Vergleichs bis zur Entsorgungsphase gewählt. Unter Annahme einer vollständigen Entsorgung können direkte Aussagen über Unterschiede in der Umweltwirkung und dem Verhalten bzw. dem Verlauf bei Erhöhung der Systemspannweite getätigt werden.

Anschließend folgt analog zu Abschnitt 5.4.2 eine Berechnung der OI3-Kennwerte in Bezug auf die Herstellungsphase (A1–A3) aller Konstruktionsvarianten.

5.5.2.1 Getroffene Annahmen

Im Folgenden werden die wesentlichen Annahmen und materialspezifische Gesichtspunkte dokumentiert, unter denen die vergleichende Ökobilanz der betrachteten Bauteile durchgeführt wird. Ziel dieser Annahmen ist die Schaffung einer repräsentativen Vergleichsbasis für die Berechnung der Ökobilanz.

- **Systemgrenzen:** Um einen möglichst realistischen Vergleich zu erzielen, werden bei der Gegenüberstellung mit der Brettspertholz- und der Stahlbetondecke dieselben Systemgrenzen abgesteckt wie bei den HBV-Konstruktionen. Unter Voraussetzung eines Betrachtungszeitraums von 50 Jahren stehen dabei die Lebenszyklusphasen A–C im Fokus der Berechnungen.
- **Massivparkett:** Beim Fußbodenbelag wird der Datensatz der ÖKOBAUDAT als Grundlage verwendet. Dieser bildet einen Durchschnittswert gängiger Parkettböden mit einer Dicke zwischen 8–40 mm ab. Vereinfacht wird eine Lebensdauer des Bodenbelags von 25 Jahren angenommen, was im Hinblick auf den gesamten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren auch in der Ökobilanz während der Nutzungsphase (B1–B7) zu berücksichtigen ist.
- **Estrich:** Aufgrund des Fehlens von Daten während des gesamten Lebenszyklus für den Estrich wird für die Ökobilanz des Fußbodenaufbaus auf einen Zementestrich nach einer Umweltproduktdeklaration gemäß dem Institut Bauen und Umwelt e.v. (IBU) [16] zurückgegriffen. Die Lebensdauer des Estrichs wird mit 50 Jahren angenommen.
- **Trittschalldämmung:** In der Dämmebene wird aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung auf einen Steinwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich (96 kg/m^3) gemäß dem Institut Bauen und Umwelt e.v. (IBU) zurückgegriffen.
- **Splittschüttung:** Aufgrund des Fehlens von Daten zu diesem Baustoff wird für eine möglichst realistische Darstellung auf einen getrockneten Kies 2/32 aus der ÖKOBAUDAT zurückgegriffen.
- **Stahlbetondecke:** Das tragende Element stellt bei dieser Deckenkonstruktion ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30 gemäß ÖKOBAUDAT dar. Um die einzelnen Konstruktionsvarianten bestmöglich miteinander zu vergleichen, wird auch hier ein Bewehrungsgrad von 2 % vorausgesetzt.
- **Brettspertholzdecke:** Die Tragkonstruktion bei dieser Deckenvariante besteht aus Massivholzplatten der KLH Massivholz GmbH. Dabei werden Ebenen aus Nadelholzbretter jeweils in einem Winkel von 90° miteinander verklebt, wodurch ein tragendes Plattenelement – auch Brettspertholz genannt – entsteht. Die Umweltproduktdeklaration zu diesem Werkstoff wird der Datenbank des IBU [16] entnommen. Im Gegensatz zur EPD des Herstellers sind hier im Modul C die Gutschriften aus der thermischen Verwertung berücksichtigt, womit eine Übereinstimmung mit den Annahmen der restlichen Holzwerkstoffe gegeben ist.
- **Transportwege:** Nicht bei jedem Baustoff sind die Transportwege vom Werk bis zur Baustelle in den ökobilanziellen Daten inkludiert. Sind keine Angaben in den Umweltproduktdeklarationen gemacht, wird eine mittlere Distanz von 30 km angenommen. Als Transportmittel wird ein LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 20–26 t gemäß ÖKOBAUDAT gewählt. Sind für einen Baustoff rein Angaben zum Einbau (A5) vorhanden, wird dieser Transportprozess zusätzlich addiert.

5.5.3 Energiebedarf und Wirkungskategorien im Vergleich

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 5.4 ermittelten Ergebnissen sind in den Abbildungen des folgenden Abschnitts bei der Betrachtung des Primärenergiebedarfs und der Wirkungskategorien auch die Fußbodenaufbauten inkludiert – mit einer angenommenen Lebensdauer des Massivparkettbodens von 25 Jahren. Die Implementierung herkömmlicher Massivdecken aus Holz und Beton soll eine Einschätzung der ökologischen Qualitäten im Vergleich zu den bisher betrachteten Holz-Beton-Verbundkonstruktionen ermöglichen.

Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT)

Bei der Gegenüberstellung der Brettsperrholzdecke mit den Holz-Beton-Verbundvarianten fällt zuerst auf, dass diese annähernd den selben Bedarf an erneuerbarer Primärenergie aufweist wie die LVL-Beton-Verbunddecke (siehe Abb. 5.40). Bei beiden Varianten stellen die Herstellung des Holzwerkstoffs und die Gutschriften aus dem Modul C die maßgebenden Einflussparameter dar. Während die anderen beiden HBV-Konstruktionen eher im mittleren Wertebereich aufzufinden sind, wird im Laufe des Lebenszyklus bei der Stahlbetondecke am wenigsten erneuerbare Energie benötigt, da bei der Zementherstellung vermehrt nicht erneuerbare Energieressourcen verwendet werden.

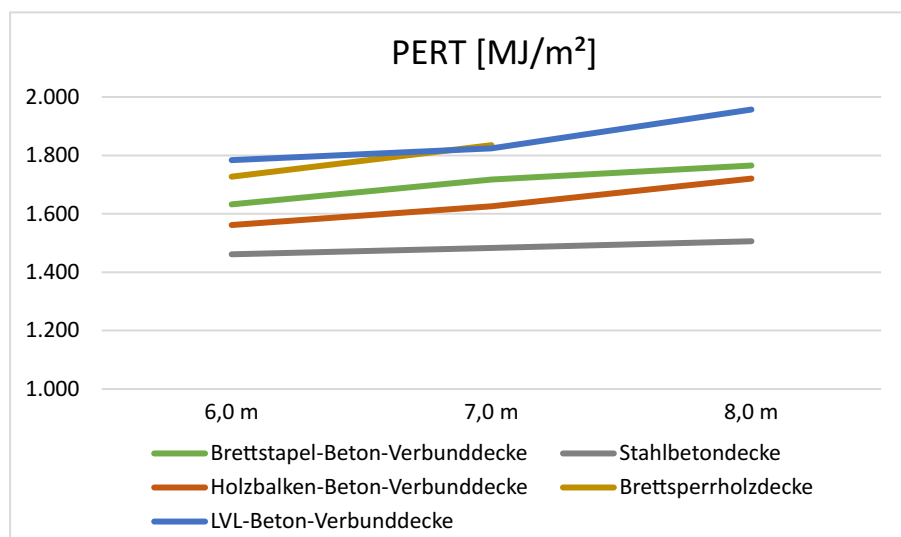


Abb. 5.40: Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PERT) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT)

Bei der Herstellung eines Kubikmeters Beton ist der Bedarf an nicht erneuerbarer Energie in etwa fünfmal so hoch wie der erneuerbare Primärenergiebedarf. Dies ist vor allem auf den Zementherstellungsprozess zurückzuführen. Daher weisen die LVL-Beton-Verbunddecke und die Stahlbetondecke in Anbetracht des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs die höchsten Bilanzwerte aller Deckenvarianten auf (siehe Abb. 5.41). Obwohl die Stahlbetonkonstruktion den größeren Betonquerschnitt vorweist, wirken sich die energieaufwändigen Prozesse bei der Herstellung eines Betons einer höheren Druckfestigkeitsklasse doch stärker auf die Bilanzergebnisse aus. Zusätzlich wird bei der Furnierschichtholzkonstruktion im Herstellungsprozess des Holzwerkstoffs viel an nicht erneuerbarer Energie verbraucht.

Die Werte der Massivholzdecke sind stark mit jenen der Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbunddecke vergleichbar.

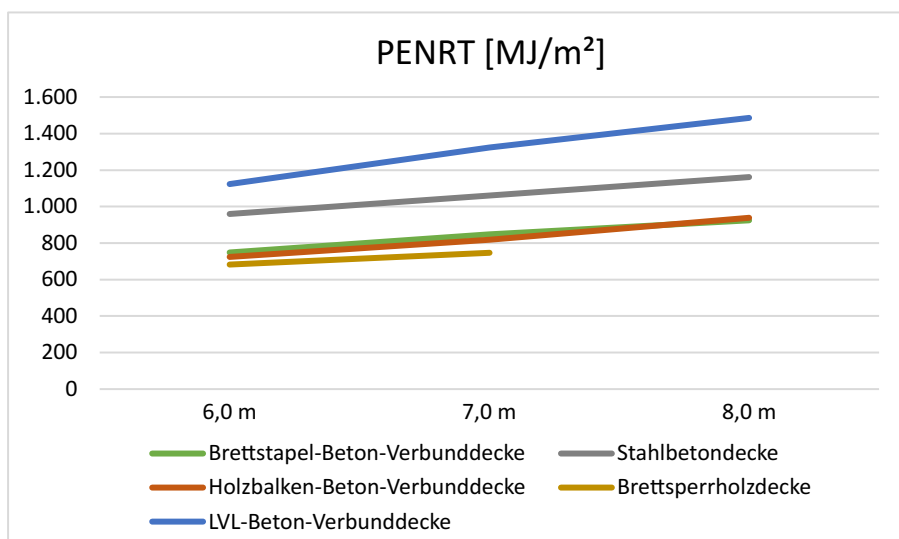


Abb. 5.41: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Treibhauspotential (GWP)

Über alle Spannweiten hinweg werden im Laufe der betrachteten Lebenszyklusphasen bei der LVL-Beton-Verbunddecke die meisten Treibhausgase produziert, dicht gefolgt von der Stahlbetondecke. Bei der Brettsperrholdecke liegen die Bilanzwerte im Bereich der herkömmlichen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, wie in Abb. 5.42 dargestellt.

Durch die Bindung von CO₂ während des Wachstums von Holz fließen in der Herstellungsphase der Holzwerkstoffe große ökobilanzielle Gutschriften in das System ein. Letztlich wird die gespeicherterte Menge an Kohlenstoff bei der Verwertung in Form von Altholz wieder entzogen. Die Tragkonstruktionen mit einem höheren Betonanteil verursachen auch ein deutlich höheres Treibhauspotential, was auf die Zementherstellung zurückzuführen ist.

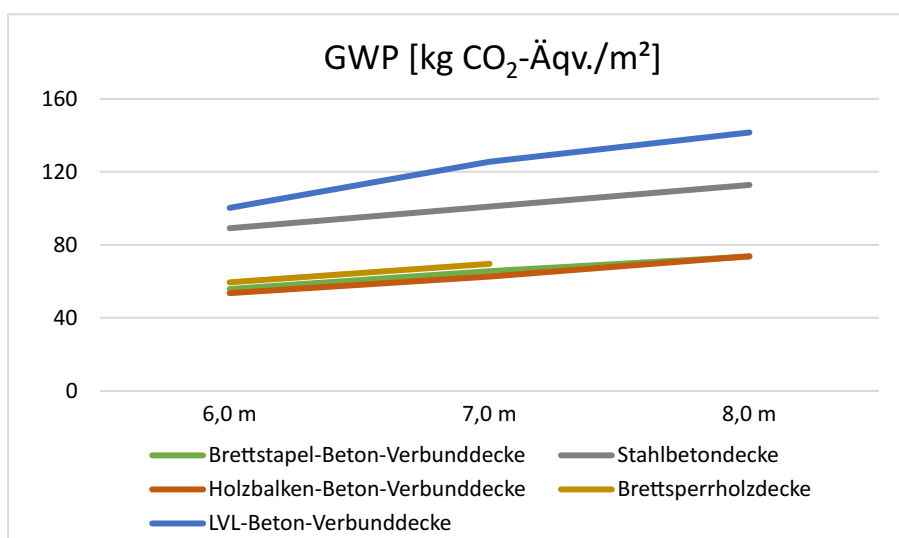


Abb. 5.42: Treibhauspotential (GWP) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Ozonabbaupotential (ODP)

Während die Bilanzwerte bei der Brettsperrholzdecke in dieser Wirkungskategorie sehr gering ausfallen, weist die Stahlbetonkonstruktion im Vergleich zu den Referenzobjekten die höchsten Werte auf. Das Ozonabbaupotential wird vor allem durch die Produktion des Betonstahls während der Herstellungsphase (A1–A3) beeinflusst, weshalb sich auch ein direkter Zusammenhang zwischen den Ergebnissen dieser Kategorie und dem verbauten Betonanteil feststellen lässt. Die niedrigen Bilanzwerte bei der Brettsperrholzdecke stammen vor allem aus der Herstellungsphase des Holzwerkstoffs. Die anderen Baustoffe haben nur einen sehr geringen Anteil an den Bilanzergebnissen.

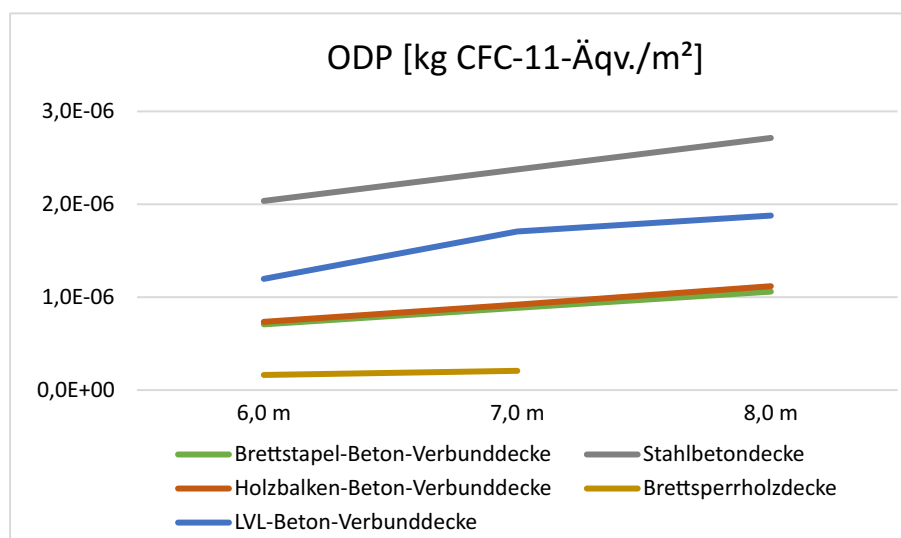


Abb. 5.43: Ozonabbaupotential (ODP) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP)

In der Wirkungskategorie POCP liegen die Bilanzwerte der Brettsperrholzdecke über jenen der Referenzkonstruktionen. Das Photochemische Ozonbildungspotential wird dabei vor allem durch den Holzbedarf bei der Produktion der Massivholzplatten beeinflusst. Aus diesem Grund sind bei der Deckenkonstruktion aus Stahlbeton auch die niedrigsten Bilanzwerte zu verzeichnen. Durch den zusammengesetzten Querschnitt sind die Holz-Beton-Verbundkonstruktionen im mittleren Wertebereich aufzufinden. Auch hier ist ein direkter Zusammenhang zwischen dem höheren Holzanteil der Brettstapeldecke und den Bilanzergebnissen erkennbar.

Versauerungspotential (AP)

Beim Versauerungspotential, das ebenfalls durch den Holzbedarf bei der Produktion am stärksten geprägt wird, liegen die Bilanzwerte der Massivholzdecke über jenen der Referenzbeispiele (siehe Abb. 5.45). Die Trocknung des Holzes bzw. die Bereitstellung der hierfür benötigten Wärme und die Nutzung von Kraftstoffen im Forst haben dabei großen Einfluss im Herstellungsprozess. Zusätzlich wirken sich der Stromverbrauch und die Wärmeerzeugung im Modul A3 wesentlich auf das Versauerungspotential der Brettsperrholzdecke aus.

Die Bilanzwerte der Stahlbetondecke sind mit jenen der herkömmlichen Holz-Beton-Verbundvarianten zu vergleichen.

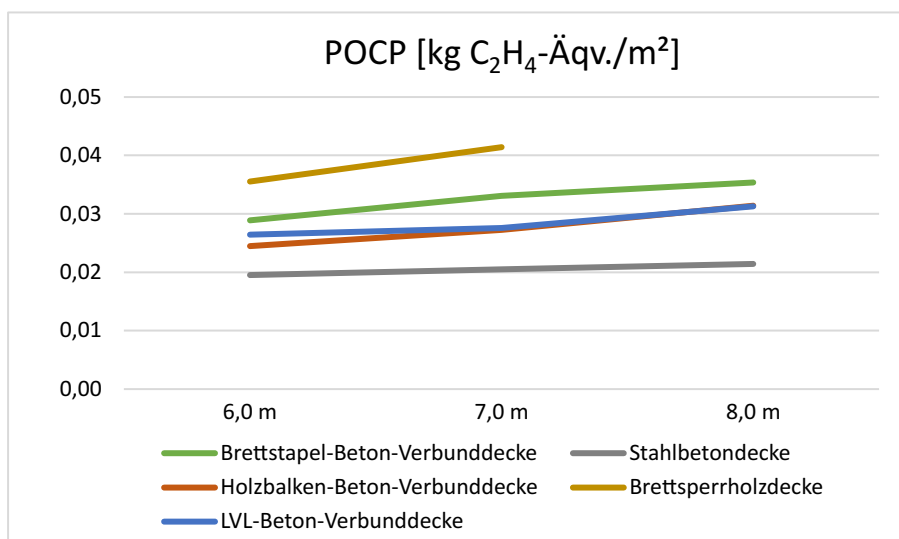


Abb. 5.44: Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

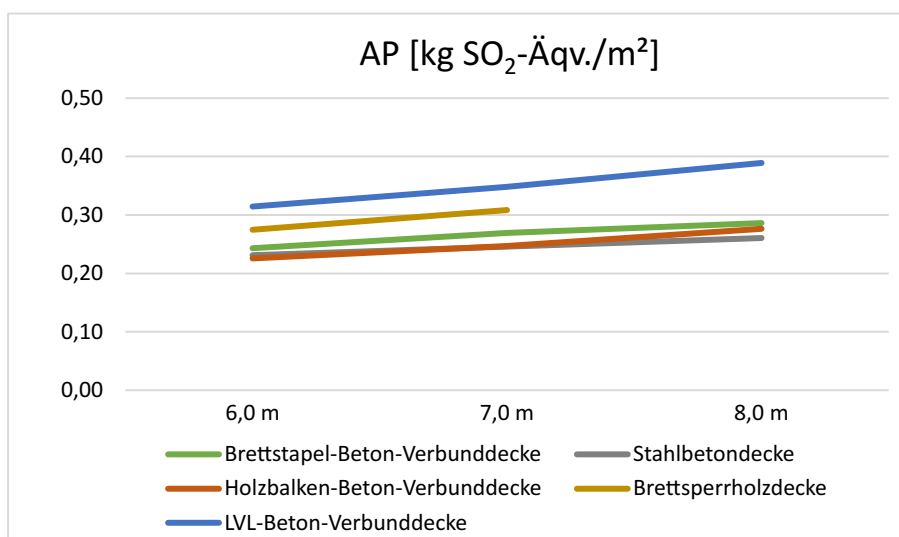


Abb. 5.45: Versauerungspotential (AP) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

Eutrophierungspotential (EP)

Das Eutrophierungspotential wird bei der Massivholzdecke vorrangig von der Herstellung des Holzwerkstoffs beeinflusst. Dabei spielen die Bereitstellung des Holzrohstoffs und der Klebstoffe während der Lebenszyklusphase A1 eine entscheidende Rolle. Im Modul A3 tragen zusätzlich der Stromverbrauch und die Wärmeerzeugung einen wesentlichen Beitrag zur Bildung der Bilanzwerte bei.

Die Ergebnisse der Brettspertholzdecke sind mit jenen der Stahlbetondecke zu vergleichen, bei der sich der Bilanzwert vor allem durch die Herstellung des Stahlbetonquerschnitts ergibt.

Abermals sind bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion aufgrund der Herstellung des Betons sowie des Furnierschichtholzes die höchsten Werte zu verzeichnen. Die Bilanzwerte der herkömmlichen HBV-Decken liegen etwas unter jenen der Massivkonstruktionen.

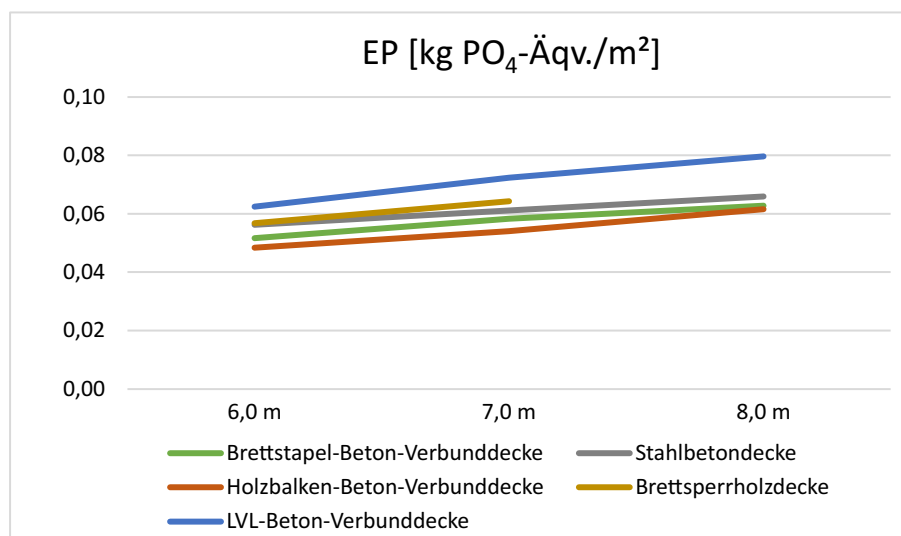


Abb. 5.46: Eutrophierungspotential (EP) pro m² Deckenkonstruktion (inkl. Fußbodenaufbau) in Abhängigkeit der Spannweite, Szenario A–C

5.5.4 Vergleich der OI₃-Kennwerte

Analog zu Abschnitt 5.4.2 wird im Folgenden – unter Einbeziehung des jeweiligen Fußbodenaufbaus – der OI₃_{KON}-Index der verschiedenen Konstruktionsarten berechnet und grafisch dargestellt.

Anhand des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PENRT), des Treibhauspotentials (GWP) und des Versauerungspotentials (AP) werden dabei die ökologischen Qualitäten der Systeme in der Herstellungsphase (A1–A3) verglichen. Die Berechnungsmethode dieses Kennwerts wurde in Abschnitt 3.2.7 vorgestellt.

In Abb. 5.47 sind die Ergebnisse zu den Berechnungen der OI₃_{KON}-Kennwerte der Brettsperrholz- und der Stahlbetondecke im Vergleich zu den bereits betrachteten HBV-Konstruktionen dargestellt. Die Stahlbetondecke erreicht dabei eine Punkteanzahl zwischen 20 und 32 und liegt mit den angenommenen Materialien etwas unter der LVL-Beton-Verbundkonstruktion.

Die bereits seit Jahrzehnten zum Einsatz kommenden Brettstapel- und Holzbalken-Beton-Verbunddecken stellen gemäß Abb. 5.47 also eine überaus ökologische Alternative zu den mineralischen Massivkonstruktionen dar. Auffallend ist jedoch die negative Punkteanzahl, die sich bei diesen beiden Varianten vor allem bei geringer Spannweite ergibt. Diese kann insbesondere auf die verwendeten Holzwerkstoffe zurückgeführt werden, die durch das Speichern von CO₂ in der Produktionsphase hohe Gutschriften in der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials aufweisen. Dieser Effekt tritt aufgrund des höheren Holzanteils verstärkt auch bei der Brettsperrholzdecke auf. Je nach Spannweite liegen die ermittelten OI₃_{KON}-Kennwerte bei etwa -10 Punkten.

Zudem konnten bei den einzelnen Produkten in Abhängigkeit des Herstellers starke Differenzen bei den Angaben zum Versauerungspotential erfasst werden, was die Ergebnisse des OI₃_{KON}-Index maßgebend beeinflusst. Aus diesem Grund sind die erhaltenen Daten im Einzelfall stets einer kritischen Prüfung zu unterziehen.

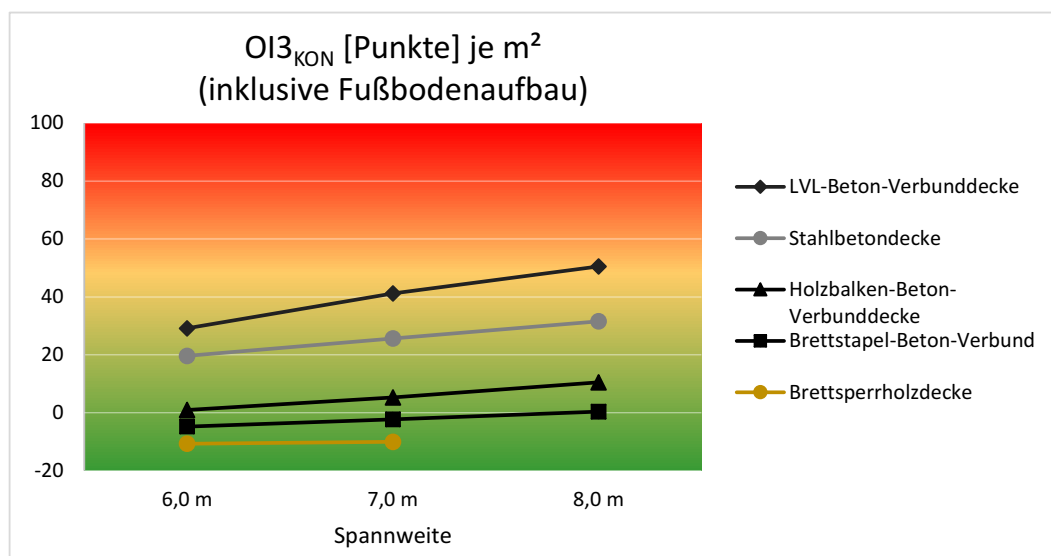


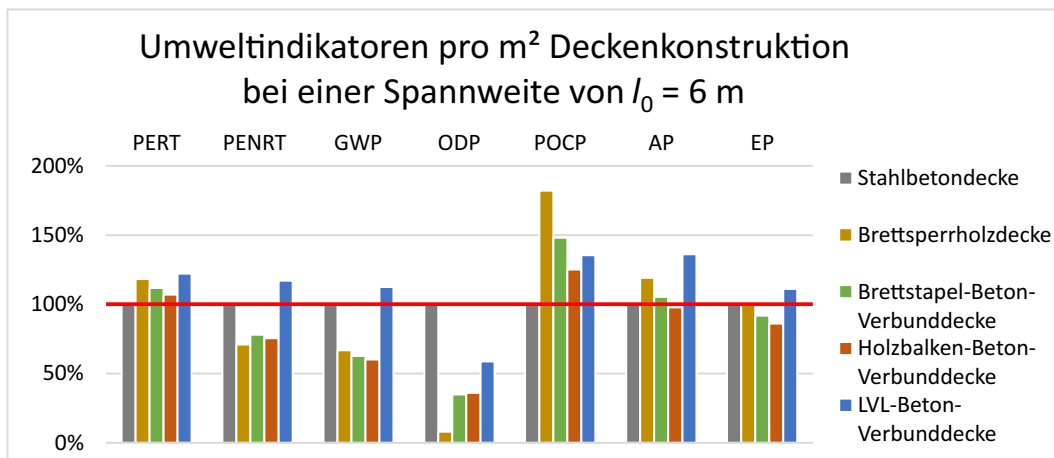
Abb. 5.47: Vergleich des Ökoindex $OI_{3,KON}$ pro m^2 Konstruktionsfläche in Abhängigkeit der Spannweite

5.5.5 Zusammenfassung des ökobilanziellen Vergleichs

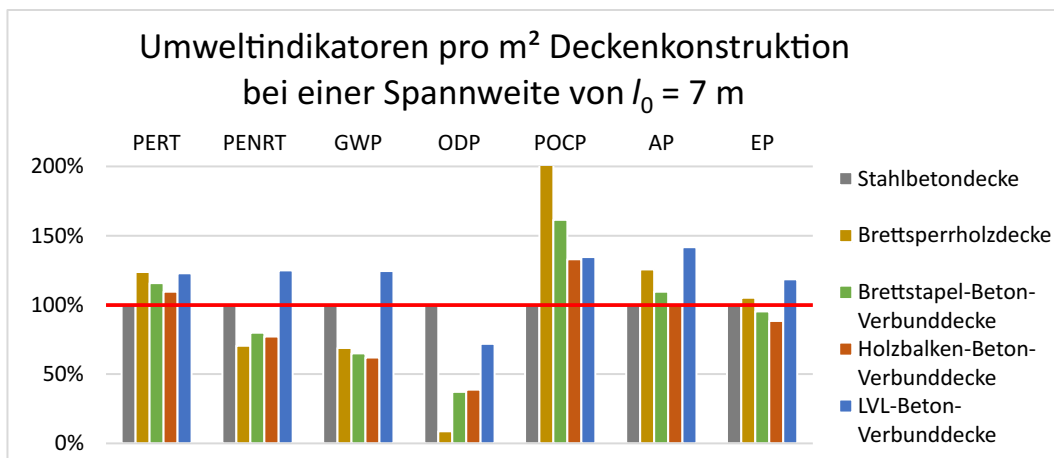
Zum Abschluss des ökobilanziellen Vergleichs der Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit den Massivholz- und Stahlbetondecken werden alle Umweltindikatoren über die Lebenszyklusphasen A–C in Abhängigkeit der Spannweite gegenübergestellt. Im Gegensatz zu Abschnitt 5.5.4, in dem ausschließlich der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf, das Treibhauspotential und das Versauerungspotential während der Herstellungsphase einer Bewertung zugeführt wurden, zielen die folgenden Abbildungen auf eine ganzheitliche Betrachtung ab.

Aufgrund der stark variierenden Einheiten und Größenordnungen der verschiedenen Indikatoren, werden die Ökobilanzergebnisse in einem relativen Verhältnis zueinander ausgewiesen (siehe Abb. 5.48). Da es sich bei der Stahlbetondecke um die am weitesten verbreitete Deckenkonstruktion handelt, werden die Werte in Relation zu dieser Systemvariante dargestellt. Als Anhaltspunkt dient die in rot dargestellte Hilfslinie bei 100 %, die jeweils den Bilanzwert der mineralischen Massivdecke repräsentiert.

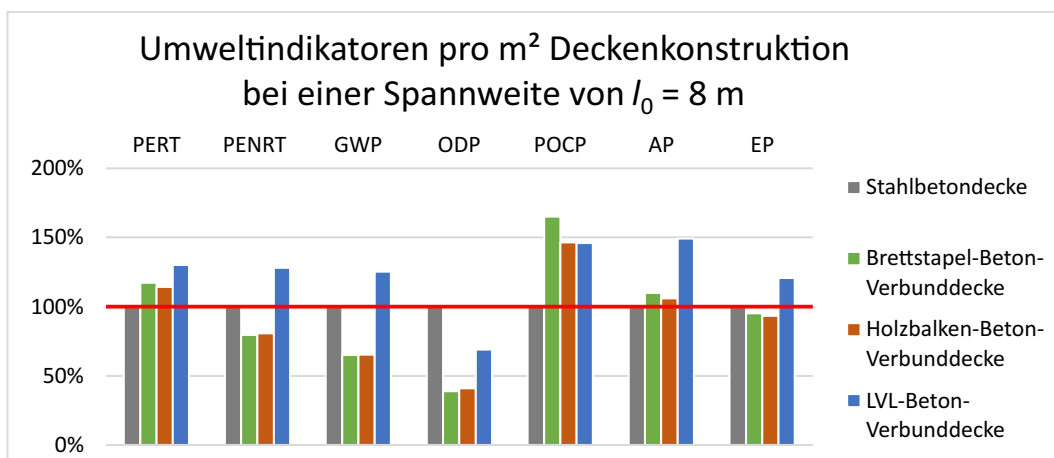
Die Brettstapel- und Holzbalken-Beton-Verbunddecken zeichnen sich gemäß Abb. 5.48 im Vergleich zur Stahlbetondecke über alle Spannweiten hinweg vor allem durch die hohen ökologischen Qualitäten in den Umweltkategorien PENRT, GWP, ODP sowie EP aus. Bei den anderen Kategorien liegen die Werte dieser HBV-Konstruktionen über den Referenzwerten, bei zunehmender Spannweite steigt dieses Verhältnis sogar noch weiter an. Dabei sticht besonders das photochemische Ozonbildungspotential heraus, das primär von der Rohstoffbereitstellung sowie dem Produktionsprozess der Holzwerkstoffe geprägt wird. Die Möglichkeiten zur Optimierung sind demnach stark eingeschränkt. Die Brettsperrholzdecke weist in dieser Wirkungskategorie sogar noch höhere Bilanzwerte als die herkömmlichen HBV-Konstruktionen auf. Da die Brettsperrholzkonstruktion auch in den Umweltkategorien PERT, GWP, AP sowie EP im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten relativ hohe Werte aufweist, wird bei zunehmender Spannweite eine Ausführung mittels herkömmlicher Holz-Beton-Verbundkonstruktion empfohlen. Zudem ist in der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials beispielsweise klar erkennbar, dass eine reine Fokussierung auf den Einsatz nachwachsender Rohstoffe nicht immer die beste Lösung liefert. Vielmehr erweist sich die intelligente Kombination zweier verschiedener Werkstoffe in ökologischer Hinsicht als durchaus wertvoll.



(a) Umweltindikatoren in Relation zur Stahlbetondecke bei einer Spannweite von $l_0 = 6$ m



(b) Umweltindikatoren in Relation zur Stahlbetondecke bei einer Spannweite von $l_0 = 7$ m



(c) Umweltindikatoren in Relation zur Stahlbetondecke bei einer Spannweite von $l_0 = 8$ m

Abb. 5.48: Gegenüberstellung der Umweltindikatoren

Trotz eines gewissen Holzanteils können anhand dieser Gegenüberstellung bei der LVL-Beton-Verbundkonstruktion keine wesentlichen ökologischen Vorteile festgestellt werden. Dies kann unter anderem auf die aufwändigen Produktionsprozesse der Tragwerkskomponenten während der Herstellungsphase zurückgeführt werden. Da es sich bei dieser Deckenvariante jedoch um ein relativ neuartiges System handelt, kann in Zukunft noch von einer Optimierung in ökologischer Hinsicht ausgegangen werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Durch das immer größer werdende Interesse an der nachhaltigen Planung von Bauwerken und dem ressourcenschonenden Einsatz von Baustoffen wird in dieser Arbeit der Fokus auf die Erstellung einer vergleichenden Ökobilanzierung verschiedener Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, die als Geschossdecken im urbanen Raum zum Einsatz kommen, gelegt. Nach einem einleitenden Kapitel, in dem theoretische Grundlagen zum Klimawandel des 20. und 21. Jahrhunderts – und der Einfluss des globalen Gebäudesektors auf diesen – beschrieben werden, wird in Kapitel 3 mit der Ökobilanzierung das wichtigste Instrument zur Darstellung der ökologischen Qualitäten eines Bauwerks bzw. eines Bauteils vorgestellt.

Zur Schaffung einer einheitlichen Basis im Hinblick auf einen ressourceneffizienten Materialeinsatz der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten wird in Kapitel 4 die Bauteildimensionierung unter Berücksichtigung der geometrischen und statischen Anforderungen beschrieben. Ein spezieller Fokus wird dabei auf die Unterschiede in den Berechnungsmethoden der jeweiligen Konstruktionen gelegt. Neben dem Tragfähigkeitsnachweis hat sich vor allem der Gebrauchstauglichkeitsnachweis als maßgebender Dimensionierungsparameter für alle Deckensysteme herausgestellt.

Basierend auf den Ergebnisse der statischen Berechnung kann somit die Grundlage für einen ökobilanziellen Vergleich bei variierender Spannweite geschaffen werden. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Bauteile werden mit Hilfe geeigneter Datenbanken neben dem erneuerbaren sowie dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf das Treibhauspotential, das Ozonabbaupotential, das Photochemische Ozonbildungspotential, das Versauerungspotential sowie das Eutrophierungspotential gegenübergestellt. Durch eine Zuordnung der jeweiligen Umweltwirkungen in die Herstellungs-, Bau-, Nutzungs- und Entsorgungsphase können die Ergebnisse anhand eingangs definierter Annahmen verglichen und im Hinblick auf mögliche Optimierungsmaßnahmen analysiert werden.

Mit der Berechnung der OI3-Kennwerte, welche sich im Speziellen auf die Herstellungsphase der Deckensysteme beziehen, wird ein weiterer Bewertungsmaßstab zur Einschätzung der ökologischen Eigenschaften eingeführt. Die Systemgrenzen, unter der die Ökobilanz durchgeführt wurde, sind in Tab. 6.1 zusammengefasst.

Die Analyse des Vergleichs der Holz-Beton-Verbundkonstruktionen hat eine positive Entwicklung der Ökobilanzwerte bei vermehrter Verwendung des Werkstoffs Holz deutlich gemacht. Vor allem bei den Brettstapel- und der Holzbalken-Beton-Verbundvarianten, die jeweils nur die Mindestbetonmenge gemäß statischer Dimensionierung aufweisen, lassen sich positive ökologische Qualitäten feststellen. Durch den hohen Holzanteil zeichnet sich die Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion über alle Spannweiten – insbesondere beim nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf und dem Treibhauspotential – durch positive Bilanzwerte aus. Da diese Wirkungskategorien auch regelmäßig im Mittelpunkt der Nachhaltigkeitsdiskussionen stehen, wird ein Einsatz dieser Variante im modernen Holzbau als durchaus sinnvoll erachtet.

Aufgrund der höheren Masse, bedingt durch die Kombination eines größeren Betonquerschnitts mit dem hochwertigen Holzwerkstoff Furnierschichtholz, sind bei den Bilanzwerten des LVL-

Tab. 6.1: Systemgrenzen der Ökobilanzierung

Systemgrenzen	
Gebäudestandort:	1040 Wien
Transportdistanz:	30 km
Betrachtungszeitraum:	50 Jahre
Bezugsgröße:	1 m ²
Betrachtete Module:	A–C bzw. A–C2 und D
Datenbank:	ÖKOBAUDAT
Datum:	April 2021

Beton-Verbundsystems deutliche Unterschiede zu vermerken, die bei steigender Spannweite noch weiter zunehmen. Da es sich bei diesem System um eine relativ neuartige Verbundvariante handelt, die bislang primär im Hinblick auf das Tragverhalten untersucht wurde, sollte der Fokus zukünftiger Forschungen auf der Optimierung in ökologischer Hinsicht liegen. Nichtsdestotrotz kann dieses Deckensystem durch einen hohen Vorfertigungsgrad im Werk und die Forcierung der Verwendung regionaler Ausgangsmaterialien baubetriebliche Vorteile generieren. Auch aufgrund der herausstechenden Materialkennwerte und den damit verbundenen Gestaltungsmöglichkeiten wird dieses Bauteil künftig verstärkt zum Einsatz kommen.

Bei Betrachtung der Brettsper Holzdecke ist in statischer Hinsicht die Grenze bei einer maximalen Spannweite von 7 m erreicht. In Anbetracht der erhaltenen Ergebnisse aus der Gegenüberstellung der Umweltwirkungen und dem vergleichsweise hohen Aufbau wird die Verwendung der reinen Massivholzdecke aus ökologischer Sicht im Speziellen für geringere Spannweiten empfohlen. Besonders im Vergleich zu den herkömmlichen mineralischen Massivdecken stellt diese Variante eine ökologisch sinnvolle Alternative dar.

Eine Implementierung der mineralischen Massivdecke aus Stahlbeton in das vorgestellte Bewertungssystem zeigt die ökologischen Schwächen dieser Konstruktionsvariante auf – vor allem in den Wirkungskategorien des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs sowie beim Treibhauspotential. Aus diesem Grund wird aus ökologischer Sicht und in Anbetracht der definierten Randbedingungen eine Ausführung mit der Brettstapel- oder die Holzbalken-Beton-Verbundvariante empfohlen. Trotzdem sollten bei der Konstruktionswahl im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung zusätzlich die ökonomischen sowie soziokulturellen Aspekte in die Bewertung miteinfließen.

In weiterer Folge wäre es sinnvoll, das in dieser Arbeit entwickelte Bewertungssystem um weitere Spannweiten sowie zusätzliche Konstruktionsvarianten zu ergänzen. Bei den HBV-Konstruktionen würde sich dabei eine Ausführungsart im Holz-Leichtbeton-Verbundsystem anbieten. Auch wäre die Implementierung der ökonomischen Aspekte geeignet, um eine umfassende Hilfestellung für Fachplaner und Architekten in den ersten Planungsphase zu ermöglichen.

Kapitel 7

Literatur

- [1] Bau EPD GmbH, Hrsg. *Alle EPDs*. URL: <http://www.bau-epd.at/de/alle-epds/> (Zugriff: 09.04.2021).
- [2] BM des Innern, für Bau und Heimat (BMI). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. 2019. URL: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Leitfaden_2019/BBSR_LFNB_D_190125.pdf (Zugriff: 01.03.2020).
- [3] L. Boccadoro. *Timber-concrete composite slabs made of beech laminated veneer lumber with notched connection*. Dissertation. Zürich: Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2016.
- [4] L. Boccadoro und A. Frangi. „Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken aus Buche“. In: *Bautechnik* 92(11) (2015), S. 783–789.
- [5] L. Boccadoro, S. Zweidler, R. Steiger und A. Frangi. „Bending tests on timber-concrete composite members made of beech laminated veneer lumber with notched connection“. In: *Engineering Structures* 132 (2017), S. 14–28.
- [6] L. Boccadoro, S. Zweidler, R. Steiger und A. Frangi. „Calculation model to assess the structural behavior of LVL-concrete composite members with ductile notched connection“. In: *Engineering Structures* 153 (2017), S. 106–117.
- [7] *DIN EN 14080: Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2013*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Sep. 2013.
- [8] *DIN EN 15804:2020: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., März 2020.
- [9] *DIN EN 15978:2012: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Okt. 2012.
- [10] *DIN EN 1995-1-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Aug. 2013.
- [11] *DIN EN ISO 14040:2009: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Nov. 2009.
- [12] *DIN EN ISO 14044:2018: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 2018.

- [13] D. Dobler. „Entwicklung einer praxisorientierten Bemessungshilfe für Holz-Beton-Verbunddecken auf Basis realisierter Objekte“. Diplomarbeit. Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, 2014.
- [14] S. El khouli, V. John und M. Zeumer. *Nachhaltig konstruieren. Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren*. 1. Auflage. München: Detail Green Books, 2014.
- [15] H. Gangoly, P. Holzer und P. Maydl. *Ziegel im Hochbau. Theorie und Praxis*. 2. Auflage. Berlin, Basel: Birkhäuser, 2018.
- [16] Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). *Veröffentlichte EPDs*. URL: <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/> (Zugriff: 08.03.2021).
- [17] IPCC, 2014: *Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)*. [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.
- [18] KLH Massivholz GmbH. *Vorbemessungstabellen*. 2020. URL: <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/07/klh-vorbemessungstabellen.pdf> (Zugriff: 10.02.2021).
- [19] J. Kolb. *Holzbau mit System*. 3. Auflage. Berlin, Basel: Birkhäuser, 2014.
- [20] H. König, N. Kohler, J. Kreißig und T. Lützkendorf. *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung – Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge*. Detail Green Books, 2009.
- [21] K. Kudla. „Kerven als Verbindungsmittel für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken“. Dissertation. Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, 2017.
- [22] U. Kuhlmann, J. Schänzlin und B. Michelfelder. „Berechnung von Holz-Beton-Verbunddecken“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 99(4) (2004), S. 262–271.
- [23] *Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude*. Version 4. IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. Wien, 2018.
- [24] B. Michelfelder. „Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken“. Dissertation. Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, 2006.
- [25] C. Möltner. *Life Cycle Assessment als Werkzeug zur Entwicklung Umweltgerechter Produkte: Strategien zur Implementierung von Ecodesign*. Reihe Nachhaltigkeit. Diplomica Verlag, 2009.
- [26] J. L. Moro. *Baukonstruktion – vom Prinzip zum Detail: Band 2 Konzeption*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2019.
- [27] J. L. Moro. *Baukonstruktion – vom Prinzip zum Detail: Band 3 Umsetzung*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2019.
- [28] NOAA National Centers for Environmental Information. *State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2018*. Jan. 2019. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201813> (Zugriff: 10.02.2020).
- [29] *Oekoindex Bauteilbewertung. Leitfaden zur ökologischen Bewertung von Bauteilkonstruktionen mittels Oekoindex*. Version 1.4. Energieinstitut Vorarlberg. Dornbirn, 2017.
- [30] *ÖNORM B 1995-1-1:2019 06 01: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau – Konsolidierte Version mit nationalen Festlegungen, nationalen Erläuterungen und nationalen Ergänzungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1*. Wien: Austrian Standards, Juni 2019.

- [31] ÖNORM EN 1990-1-1:2013 03 15: *Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards, März 2013.
- [32] ÖNORM EN 1991-1-1:2011 09 01: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards, Sep. 2011.
- [33] ÖNORM EN 1992-1-1:2015 02 15: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards, Feb. 2015.
- [34] ÖNORM EN 1995-1-1:2019 06 01: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards, Juni 2019.
- [35] Patrick Chalmers. *Klimawandel: Was er für das Bauen bedeutet, und was der Bausektor darüber wissen muss*. 2014. URL: <https://www.cisl.cam.ac.uk/business-action/low-carbon-transformation/ipcc-climate-science-business-briefings/translations/pdfs/german/buildings-briefing-print-de.pdf> (Zugriff: 17.02.2013).
- [36] A. Pech, M. Aichholzer, M. Doubek, B. Höfferl, K. Hollinsky, A. Passer, M. Teibinger und R. Woschitz. *Holz im Hochbau. Theorie und Praxis*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser, 2016.
- [37] F. Prietz und U. Richtsteig. „Vereinfachung der Regeln zur Beschränkung der Verformungen nach EC2“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110(4) (2015), S. 275–280.
- [38] W. Rug. „Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“. In: *17. Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT 2010 – Neues aus dem Holzbau* (2010).
- [39] J. Schänzlin. „Eurocode 5:2022 – Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken“. In: *Karlsruher Tage 2018 – Holzbau: Forschung für die Praxis*. Hrsg. von R. Görlacher und C. Sandhaas. 2018, S. 85–103.
- [40] J. Schänzlin. „Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken“. Dissertation. Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2003.
- [41] F. Schönborn, M. Flach und J. Feix. „Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für Schubkerven im Holz-Beton-Verbundbau“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106(6) (2011), S. 385–393.
- [42] *SIA 262: Betonbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Jan. 2003.
- [43] Statista Research Department. *Weltweiter CO2-Ausstoß in den Jahren 1960 bis 2018*. 2019. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/#statisticContainer> (Zugriff: 05.02.2020).
- [44] B. Ströbele. „Grenzen des Carbon Footprint für die Bewertung des ökologischen Bauens“. In: *Bauphysik* 35.5 (2013), S. 338–345.
- [45] *Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30*. InformationsZentrum Beton GmbH. Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2018.
- [46] *Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C 50/60*. InformationsZentrum Beton GmbH. Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2018.
- [47] Umweltbundesamt. *Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen*. 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#obergrenze-fur-die-treibhausgas-konzentration> (Zugriff: 30.11.2020).

- [48] Umweltbundesamt. *Die Treibhausgase*. 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (Zugriff: 02.12.2020).
- [49] Umweltbundesamt. *Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase)*. 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-fluorierter-treibhausgase-f-gase#entwicklung-in-deutschland-seit-1990> (Zugriff: 05.02.2020).
- [50] Umweltbundesamt. *Klima und Traibhauseffekt*. 2014. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#grundlagen> (Zugriff: 30.01.2020).
- [51] Umweltbundesamt. *Lachgas und Methan*. 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan> (Zugriff: 07.02.2020).
- [52] Umweltbundesamt. *Methan-Emissionen*. 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/methan-emissionen> (Zugriff: 05.02.2020).
- [53] Umweltbundesamt GmbH. *Klimaschutzbericht 2020*. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0702.pdf> (Zugriff: 30.11.2020).
- [54] United Nations Environment Programme (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi.
- [55] S. Winter, H. Kreuzinger und P. Mestek. *Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 15. Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [56] Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten. *Z-9.1-838: Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke*. 2013.

Ergänzende Inhalte

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30

5. LCA: Ergebnisse

Die Wirkungsabschätzungsergebnisse stellen nur relative Aussagen dar. Sie machen keine Aussagen über Endpunkte der Wirkungskategorien, Überschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitsmargen oder über Risiken. Für die Berechnung wurden CML Faktoren der Version Oktober 2012 verwendet.

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium								Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs Rückgewinnungs oder Recyclingpotenzial	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	X	X	X	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	X	X	X	MND	X	

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1 m³ Konstruktionsbeton C 25/30

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ Äq.]	197,00	3,90	1,08	10,00	3,10	12,00	6,01	21,40
ODP	[kg CFC11 Äq.]	5,36E 8	7,67E 13	4,71E 12	0,00E+0	6,09E 13	2,37E 12	1,31E 11	1,32E 10
AP	[kg SO ₂ Äq.]	2,87E 1	9,93E 3	1,60E 3	0,00E+0	3,00E 2	3,21E 2	1,13E 2	4,73E 2
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ Äq.]	5,35E 2	2,35E 3	2,57E 4	0,00E+0	6,53E 3	7,65E 3	2,17E 3	8,86E 3
POCP	[kg Ethen Äq.]	2,30E 2	3,35E 3	1,11E 4	0,00E+0	3,18E 3	1,11E 2	9,74E 4	2,79E 3
ADPE	[kg Sb Äq.]	6,43E 4	4,13E 7	5,36E 7	0,00E+0	3,28E 7	1,28E 6	1,97E 6	8,60E 6
ADPF	[MJ]	900,00	52,50	10,50	0,00	41,70	163,00	68,40	227,00

Legende: GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potential für die Verknappung von abiotischen Ressourcen nicht fossile Ressourcen (ADP Stoffe); ADPF = Potential für die Verknappung abiotischer Ressourcen fossile Brennstoffe (ADP fossile Energieträger)

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1 m³ Konstruktionsbeton C 25/30

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D
PERE	[MJ]	190,00	3,50	5,89	0,00	2,80	11,00	20,70	94,10
PERM	[MJ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PERT	[MJ]	190,00	3,50	5,89	0,00	2,80	11,00	20,70	94,10
PENRE	[MJ]	999,00	52,70	13,66	0,00	41,90	163,00	78,70	279,00
PENRM	[MJ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PENRT	[MJ]	999,00	52,70	13,66	0,00	41,90	163,00	78,70	279,00
SM	[kg]	23,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2400,00
RSF	[MJ]	183,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NRSF	[MJ]	348,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FW	[m ³]	0,80	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28

Legende: PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Beton der Druckfestigkeitsklasse C 50/60

5. LCA: Ergebnisse

Die Wirkungsabschätzungsergebnisse stellen nur relative Aussagen dar. Sie machen keine Aussagen über Endpunkte der Wirkungskategorien, Überschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitsmargen oder über Risiken. Für die Berechnung wurden CML Faktoren der Version Oktober 2012 verwendet.

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rostoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	X	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	X	X	X	MND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1 m³ Konstruktionsbeton C 50/60

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ Äq.]	300,00	28,80	1,08	10,00	3,10	12,00	6,01	21,40
ODP	[kg CFC11 Äq.]	8,40E 8	5,68E 12	4,71E 12	0,00E+0	6,09E 13	2,37E 12	1,31E 11	1,32E 10
AP	[kg SO ₂ Äq.]	4,22E 1	7,15E 2	1,60E 3	0,00E+0	3,00E 2	3,21E 2	1,13E 2	4,73E 2
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ Äq.]	8,37E 2	1,69E 2	2,57E 4	0,00E+0	6,53E 3	7,65E 3	2,17E 3	8,86E 3
POCP	[kg Ethen Äq.]	3,79E 2	2,38E 2	1,11E 4	0,00E+0	3,18E 3	1,11E 2	9,74E 4	2,79E 3
ADPE	[kg Sb Äq.]	1,07E 3	3,07E 6	5,36E 7	0,00E+0	3,28E 7	1,28E 6	1,97E 6	8,60E 6
ADPF	[MJ]	1360,00	389,70	10,50	0,00	41,70	163,00	68,40	227,00

Legende	GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potential für die Verknappung von abiotischen Ressourcen nicht fossile Ressourcen (ADP Stoffe); ADPF = Potential für die Verknappung abiotischer Ressourcen fossile Brennstoffe (ADP fossile Energieträger)
---------	--

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1 m³ Konstruktionsbeton C 50/60

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D
PERE	[MJ]	292,00	26,20	5,89	0,00	2,80	11,00	20,70	94,10
PERM	[MJ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PERT	[MJ]	292,00	26,20	5,89	0,00	2,80	11,00	20,70	94,10
PENRE	[MJ]	1510,00	391,40	13,66	0,00	41,90	163,00	78,70	279,00
PENRM	[MJ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PENRT	[MJ]	1510,00	391,40	13,66	0,00	41,90	163,00	78,70	279,00
SM	[kg]	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2400,00
RSF	[MJ]	287,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NRSF	[MJ]	546,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FW	[m ³]	0,88	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28

Legende	PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen
---------	--

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Konstruktionsvollholz

5. LCA: Ergebnisse

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs, Rückgewinnung oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	X	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	X	X	MND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1 m³ KVH®

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ Äq.]	7,28E+2	6,48E+0	4,03E+1	5,83E+0	4,70E 1	7,70E+2	4,25E+2
ODP	[kg CFC11 Äq.]	1,13E 7	6,34E 9	8,31E 8	5,70E 12	9,40E 10	1,75E 11	9,01E 10
AP	[kg SO ₂ Äq.]	2,23E 1	2,75E 2	2,09E 1	5,07E 4	2,02E 3	6,90E 3	4,21E 1
EP	[kg (PO ₄) ³ Äq.]	5,15E 2	6,58E 3	4,42E 2	1,08E 4	4,68E 4	1,10E 3	6,24E 2
POCP	[kg Ethen Äq.]	4,58E 2	4,47E 3	5,10E 2	4,33E 5	1,79E 4	4,78E 4	4,26E 2
ADPE	[kg Sb Äq.]	5,47E 4	4,19E 7	1,05E 4	6,73E 8	1,00E 8	2,34E 6	1,23E 4
ADPF	[MJ]	4,35E+2	8,87E+1	4,68E+2	9,95E 1	6,61E+0	4,52E+1	5,34E+3

Legende: GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotential für troposphärisches Ozon; ADPE = Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen; ADPF = Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1 m³ KVH®

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
PERE	[MJ]	6,31E+2	3,19E+0	1,14E+3	4,11E+1	8,79E 3	2,54E+1	1,33E+3
PERM	[MJ]	8,06E+3	0,00E+0	4,09E+1	4,09E+1	0,00E+0	8,06E+3	0,00E+0
PERT	[MJ]	8,69E+3	3,19E+0	1,18E+3	1,99E 1	8,79E 3	8,03E+3	1,33E+3
PENRE	[MJ]	4,85E+2	8,95E+1	5,75E+2	2,61E+1	6,67E+0	5,88E+1	6,15E+3
PENRM	[MJ]	4,58E+0	0,00E+0	2,50E+1	2,50E+1	0,00E+0	4,58E+0	0,00E+0
PENRT	[MJ]	4,90E+2	8,95E+1	6,00E+2	1,10E+0	6,67E+0	5,43E+1	6,15E+3
SM	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
RSF	[MJ]	6,32E+1	0,00E+0	1,24E+2	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	7,87E+3
NRSF	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	4,58E+0
FW	[m³]	6,20E 1	1,03E 3	3,09E 1	1,22E 4	3,76E 5	1,49E 2	7,70E 1

Legende: PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Brettschichtholz

5. LCA: Ergebnisse

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium			Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze	
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	X	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	X	X	MND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m³ BS-Holz

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ -Äq.]	-7,15E+2	3,21E+1	6,82E+1	4,52E+0	4,85E-1	7,78E+2	-4,15E+2
ODP	[kg CFC11-Äq.]	7,14E-7	5,49E-8	1,18E-7	4,31E-12	9,69E-10	1,75E-11	-9,27E-10
AP	[kg SO ₂ -Äq.]	2,37E-1	1,32E-1	3,48E-1	3,91E-4	2,08E-3	6,90E-3	-4,30E-1
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ -Äq.]	6,59E-2	2,91E-2	7,41E-2	8,23E-5	4,82E-4	1,10E-3	-6,42E-2
POCP	[kg Ethen-Äq.]	4,02E-2	9,83E-3	7,38E-2	3,33E-5	1,85E-4	4,78E-4	-4,38E-2
ADPE	[kg Sb-Äq.]	5,53E-4	2,22E-6	1,65E-4	5,31E-8	1,03E-8	2,34E-6	-1,26E-4
ADPF	[MJ]	8,32E+2	4,38E+2	7,66E+2	7,61E-1	6,82E+0	4,52E+1	-5,52E+3

Legende: GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen; ADPF = Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1m³ BS-Holz

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
PERE	[MJ]	6,11E+2	2,47E+1	2,11E+3	2,99E+1	9,06E-3	2,54E+1	-1,36E+3
PERM	[MJ]	8,13E+3	0,00E+0	2,98E+1	-2,98E+1	0,00E+0	-8,13E+3	0,00E+0
PERT	[MJ]	8,75E+3	2,47E+1	2,14E+3	1,53E-1	9,06E-3	-8,11E+3	-1,36E+3
PENRE	[MJ]	8,26E+2	4,68E+2	9,25E+2	2,36E+1	6,88E+0	5,88E+1	-6,28E+3
PENRM	[MJ]	1,05E+2	0,00E+0	2,28E+1	-2,28E+1	0,00E+0	-1,05E+2	0,00E+0
PENRT	[MJ]	9,31E+2	4,68E+2	9,47E+2	8,45E-1	6,88E+0	-4,58E+1	-6,28E+3
SM	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
RSF	[MJ]	4,39E+1	0,00E+0	4,13E+1	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	8,05E+3
NRSF	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	1,05E+2
FW	[m ³]	6,01E-1	1,08E-2	4,76E-1	9,32E-5	3,88E-5	1,49E-2	-7,95E-1

Legende: PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Furnierschichtholz

5. LCA: Ergebnisse

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	X	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	X	X	MND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1 m³ STEICO LVL

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ -Äq.]	-8,29E+2	1,38E+1	2,84E+2	1,86E+1	6,40E-1	8,86E+2	-4,43E+2
ODP	[kg CFC11-Äq.]	2,53E-8	2,95E-13	1,87E-8	2,80E-13	1,77E-14	6,58E-12	-4,12E-10
AP	[kg SO ₂ -Äq.]	1,33E-1	5,58E-2	1,26E+0	2,94E-3	2,70E-3	6,81E-3	-4,55E-1
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ -Äq.]	2,49E-2	1,43E-2	1,57E-1	4,44E-4	6,93E-4	1,11E-3	-7,15E-2
POCP	[kg Ethen-Äq.]	2,17E-2	-2,37E-2	1,70E-1	1,33E-4	-1,12E-3	4,52E-4	-4,04E-2
ADPE	[kg Sb-Äq.]	9,78E-6	1,38E-6	3,68E-5	6,06E-7	5,31E-8	3,05E-6	-1,87E-4
ADPF	[MJ]	1,53E+3	1,83E+2	2,98E+3	4,81E+0	8,80E+0	4,33E+1	-6,38E+3

Legende: GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potential für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - nicht fossile Ressourcen (ADP - Stoffe); ADPF = Potential für die Verknappung abiotischer Ressourcen - fossile Brennstoffe (ADP - fossile Energieträger)

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1 m³ STEICO LVL

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
PERE	[MJ]	3,23E+1	1,21E+1	5,79E+3	1,29E+2	4,87E-1	2,71E+1	-1,67E+3
PERM	[MJ]	9,27E+3	0,00E+0	1,28E+2	-1,28E+2	0,00E+0	-9,27E+3	0,00E+0
PERT	[MJ]	9,30E+3	1,21E+1	5,92E+3	9,50E-1	4,87E-1	-9,24E+3	-1,67E+3
PENRE	[MJ]	1,30E+3	1,83E+2	3,05E+3	9,60E+1	8,83E+0	5,78E+1	-7,16E+3
PENRM	[MJ]	2,51E+2	0,00E+0	9,06E+1	-9,06E+1	0,00E+0	-2,51E+2	0,00E+0
PENRT	[MJ]	1,55E+3	1,83E+2	3,14E+3	5,39E+0	8,83E+0	-1,93E+2	-7,16E+3
SM	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
RSF	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	9,27E+3
NRSF	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	2,51E+2
FW	[m ³]	8,03E-1	1,48E-2	2,53E+0	4,46E-2	8,98E-4	1,72E-2	1,15E+0

Legende: PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Brettsperholz

5. LCA: Ergebnisse

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	X	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	X	X	MND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1 m³ BSP

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ -Äq.]	-6,99E+2	7,56E+0	9,70E+1	1,76E+0	4,72E-1	7,58E+2	-4,04E+2
ODP	[kg CFC11-Äq.]	6,52E-7	2,78E-9	7,64E-8	1,16E-12	9,42E-10	1,75E-11	-9,03E-10
AP	[kg SO ₂ -Äq.]	2,31E-1	3,16E-2	2,85E-1	1,09E-4	2,02E-3	6,90E-3	-4,18E-1
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ -Äq.]	6,05E-2	7,73E-3	5,58E-2	2,43E-5	4,69E-4	1,10E-3	-6,25E-2
POCP	[kg Ethen-Äq.]	4,79E-2	-9,85E-3	5,99E-2	1,14E-5	1,80E-4	4,78E-4	-4,26E-2
ADPE	[kg Sb-Äq.]	5,11E-4	7,14E-7	1,28E-4	1,26E-8	1,00E-8	2,34E-6	-1,22E-4
ADPF	[MJ]	7,99E+2	1,02E+2	1,02E+3	1,96E-1	6,63E+0	4,52E+1	-5,37E+3

Legende: GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen; ADPF = Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1 m³ BSP

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
PERE	[MJ]	5,20E+2	6,08E+0	1,25E+3	4,00E-2	8,81E-3	2,54E+1	-1,33E+3
PERM	[MJ]	7,92E+3	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	-7,92E+3	0,00E+0
PERT	[MJ]	8,44E+3	6,08E+0	1,25E+3	4,00E-2	8,81E-3	-7,90E+3	-1,33E+3
PENRE	[MJ]	7,83E+2	1,03E+2	1,27E+3	2,47E+1	6,69E+0	5,88E+1	-6,11E+3
PENRM	[MJ]	9,93E+1	0,00E+0	2,45E+1	-2,45E+1	0,00E+0	-9,93E+1	0,00E+0
PENRT	[MJ]	8,82E+2	1,03E+2	1,29E+3	2,17E-1	6,69E+0	-4,05E+1	-6,11E+3
SM	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
RSF	[MJ]	6,39E+1	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	7,86E+3
NRSF	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	9,93E+1
FW	[m ³]	6,36E-1	1,10E-3	4,05E-1	2,46E-5	3,77E-5	1,49E-2	-7,74E-1

Legende: PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht-erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ OUTPUT-FLÜSSE UND ABFALLKATEGORIEN: 1 m³ BSP

Parameter	Einheit	A1	A2	A3	A5	C2	C3	D
HWD	[kg]	5,06E-2	0,00E+0	6,57E-3	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
NHWD	[kg]	1,02E-2	0,00E+0	1,67E-3	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
RWD	[kg]	2,73E-2	2,79E-4	9,90E-2	8,56E-6	1,18E-5	5,41E-3	-2,81E-1
CRU	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
MFR	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
MER	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	4,70E+2	0,00E+0
EEE	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	3,26E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
EET	[MJ]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	7,87E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0

Legende: HWD = Gefährlicher Abfall zur Deponie; NHWD = Entsorgter nicht gefährlicher Abfall; RWD = Entsorgter radioaktiver Abfall; CRU = Komponenten für die Wiederverwendung; MFR = Stoffe zum Recycling; MER = Stoffe für die Energierückgewinnung; EEE = Exportierte Energie elektrisch; EET = Exportierte Energie thermisch

Ausschnitt aus der Umweltproduktdeklaration zu Bewehrungsstahl

5 LCA: Ergebnisse

Tabelle 16: Ergebnisse der Ökobilanz Umweltauswirkungen

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B7	C1	C2	C3	C4	D ¹
GWP-Prozess	kg CO ₂ äquiv	4,42E+2	4,01E+1	1,22E+1	0,00E+0	7,72E-01	8,05E+0	5,74E-01	0,00E+0	0,00E+0
GWP C-Gehalt ²	kg CO ₂ äquiv	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
GWP Summe	kg CO ₂ äquiv	4,42E+2	4,01E+1	1,22E+1	0,00E+0	7,72E-01	8,05E+0	5,74E-01	0,00E+0	0,00E+0
ODP	kg CFC-11 äquiv	4,21E-05	7,30E-06	1,92E-06	0,00E+0	7,65E-07	1,49E-06	1,04E-07	0,00E+0	0,00E+0
AP	kg SO ₂ äquiv	3,00E-02	9,95E-04	4,12E-04	0,00E+0	2,47E-05	1,90E-04	6,16E-06	0,00E+0	0,00E+0
EP	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	2,95E-01	1,29E-02	6,70E-03	0,00E+0	9,11E-04	2,46E-03	9,39E-04	0,00E+0	0,00E+0
POCP	kg C ₂ H ₄ äquiv	6,16E-02	6,17E-03	1,83E-03	0,00E+0	4,01E-04	1,23E-03	1,15E-04	0,00E+0	0,00E+0
ADPE	kg Sb äquiv	1,09E-03	2,37E-04	5,24E-05	0,00E+0	1,10E-06	4,81E-05	3,83E-07	0,00E+0	0,00E+0
ADPF	MJ H _u	5,56E+3	6,04E+2	1,76E+2	0,00E+0	5,97E+1	1,22E+2	8,33E+0	0,00E+0	0,00E+0
Legende	GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen; ADPF = Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe									

Tabelle 17: Ergebnisse der Ökobilanz Ressourceneinsatz

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B7	C1	C2	C3	C4	D
PERE	MJ H _u	2,01E+03	1,11E+01	3,83E+01	0,00E+00	2,35E-01	1,32E+0	4,95E-02	0,00E+0	0,00E+0
PERM	MJ H _u	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
PERT	MJ H _u	2,01E+03	1,11E+01	3,83E+01	0,00E+00	2,35E-01	1,32E+0	4,95E-02	0,00E+0	0,00E+0
PENRE	MJ H _u	6,57E+03	6,16E+02	1,95E+02	0,00E+00	6,01E+1	1,24E+2	8,41E+0	0,00E+0	0,00E+0
PENRM	MJ H _u	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
PENRT	MJ H _u	6,57E+03	6,16E+02	1,95E+02	0,00E+00	6,01E+1	1,24E+2	8,41E+0	0,00E+0	0,00E+0
SM	kg	1,12E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
RSF	MJ H _u	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
NRSF	MJ H _u	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
FW	m ³	INA*	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA
Legende	PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen									

* INA: Indicator Not Assessed: ecoinvent-Datensätze lassen keine vollständige Erfassung der Wasserflüsse zu

¹ Die deklarierten Ergebnisse in Modul D resultieren nicht aus der Berechnung der Nettoflüsse, sondern gemäß den Ausnahmeregelungen in PKR Teil-A.

² Für das globale Erwärmungspotenzial (GWP) werden die Resultate unterteilt in "GWP-Prozess", "GWP C-Gehalt" und "GWP Summe" angegeben. GWP-Prozess beinhaltet alle CO₂-äquivalenten Emissionen, die in den berücksichtigten Lebensphasen des Produktes entstehen. Das "GWP C-Gehalt" beschreibt den in nachwachsenden Produkten gespeicherten Kohlenstoff (biogenes CO₂). Die "GWP Summe" resultiert aus der Summe von "GWP-Prozess" und "GWP C-Gehalt".

Ausschnitt aus den Vordimensionierungstabellen der KLH-Massivholzplatten

VORBEMESSUNGSTABELLEN

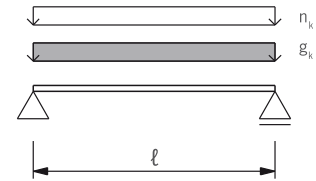
04 KLH® ALS DECKE - EINFELDTRÄGER

4.1 SCHWINGUNGSNACHWEIS FÜR ERHÖHTE ANFORDERUNGEN (NASSESTRICH)

nach ETA-06/0138

ÖNORM EN 1995-1-1:2019 und ÖNORM B 1995-1-1:2019

ÖNORM EN 1995-1-2:2011 und ÖNORM B 1995-1-2:2011



Mindestplattenstärken für die angegebenen Spannweiten

Ständige Auflast	Nutzlast		SPANNWEITE EINFELDTRÄGER l						
	$g_{2,k}$ [kN/m ²]	n_k Kategorie [kN/m ²]	3,00 m	4,00 m	5,00 m	6,00 m	7,00 m		
1,00	A	1,50	5s 120 DL	5s 140 DL	5s 170 DL	7s 220 DL	7s 240 DL		
		2,00							
		2,80							
	B	3,00		5s 140 DL	7s 260 DL				
		3,50							
		4,00							
	C	5,00							
		A		1,50	5s 120 DL	5s 140 DL	5s 170 DL	7s 220 DL	7s 240 DL
				2,00					
2,80									
B	3,00	5s 140 DL	7s 240 DL	7ss 260 DL					
	3,50								
	4,00								
C	5,00								
	A	1,50	5s 120 DL	5s 140 DL		5s 180 DL	7s 220 DL	7s 240 DL	
		2,00							
2,80									
B	3,00	5s 140 DL		7s 240 DL	7ss 280 DL				
	3,50								
	4,00								
C	5,00								
	A	1,50		5s 120 DL	5s 140 DL	5s 200 DL	7s 220 DL	7s 240 DL	
		2,00							
2,80									
B	3,00	5s 140 DL	7s 240 DL		7ss 280 DL				
	3,50								
	4,00								
C	5,00								
	A	1,50	5s 120 DL		5s 150 DL	5s 200 DL	7s 220 DL	7ss 280 DL	
		2,00							
2,80									
B	3,00	5s 140 DL		7s 240 DL	7ss 280 DL				
	3,50								
	4,00								
C	5,00								

R 60

R 90

R 120

Ausschnitt aus der Ermittlung der Ökobilanz am Beispiel einer Brettstapel-Beton-Verbunddecke mit einer Spannweite von $l_0 = 7 \text{ m}$

Brettstapel-Beton-Verbunddecke; $l_0 = 7,0 \text{ m}$										Daten aus den Umweltproduktdeklarationen je deklarierte Einheit										Umweltwirkungen je m^2						
AS-AS-Produktion		Quelle	Dicke [m]	Breite	Faktor	Dichte [kg/m³]	Volumen [m³]	Masse [kg]	Gliederungs- bzw. Deklarationsnummer	PERT [MJ/EH]	PENIT [MJ/EH]	GWP [kg CO₂-Aeq./EH]	ODP [kg R-11-Aeq./EH]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./EH]	AP [kg SO₂-Aeq./EH]	EP [kg PO₄-Aeq./EH]	PERT [MJ/m²]	PENIT [MJ/m²]	GWP [kg CO₂-Aeq./m²]	ODP [kg R-11-Aeq./m²]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./m²]	AP [kg SO₂-Aeq./m²]	EP [kg PO₄-Aeq./m²]			
Messspannrett	m²	Okobaudat	0,0176	1	1	665,34	0,0176	11,71	3.3.02	7,57E+02	9,00E+01	-1,26E+01	9,65E+13	4,81E-03	4,53E-02	1,94E-02	7,57E+02	9,00E+01	-1,26E+01	9,65E+13	4,81E-03	4,53E-02	1,94E-02	1,04E-02		
Zementestrich	kg	Okobaudat	0,065	1	1	1500	0,065	97,50	1.6.03	1,44E+01	1,01E+00	1,62E-01	3,32E-14	2,51E-05	2,12E-04	3,21E-05	1,40E+01	8,69E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,13E-03		
Dampfbremse PE (0,2 mm)	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	6.6.02	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04	1,25E-04		
Mineralfülle (mittlere Rohdichte)	m³	Okobaudat	0,025	1	1	96	0,025	2,40	2.1.03	1,76E+02	1,14E+03	1,22E+02	1,56E-10	2,89E-02	5,85E-01	6,52E-02	4,39E+00	2,84E+01	3,04E+00	3,90E-12	7,23E-04	1,46E-02	1,63E-03	1,63E-03		
Beton C 25/30	m³	Okobaudat	0,1	1	0,98	2400	0,098	235,20	1.6.01	1,90E+02	9,99E+02	1,97E+02	5,36E-08	2,30E-02	2,87E-01	5,35E-02	1,88E+01	9,79E+01	1,93E+01	5,25E-09	2,35E-03	2,81E-02	5,24E-03	5,24E-03		
Betonstahl	t	Bau-EPD-Marienhitze	0,1	1	0,02	7856	0,0020	15,71	00001158	2,01E+03	6,57E+03	4,42E+02	4,21E-05	6,10E-02	3,00E-02	2,93E-01	5,10E+03	1,03E+02	6,94E+00	6,81E-07	9,68E-04	4,71E-04	4,04E-03	4,04E-03		
Dampfbremse PE (0,2 mm)	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	6.6.02	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04	1,25E-04		
Konstruktionsvollhalt	m³	IBU EPD	0,18	1	1	468,62	0,180	84,35	EPD-SHK-20180036-IBG1-DE	9,87E+03	1,18E+03	-6,81E+02	2,02E-07	9,23E-02	4,60E-01	1,02E-01	1,78E+03	1,21E+02	-1,23E+02	3,64E-08	1,56E-02	8,27E-02	1,84E-02	1,84E-02		
447.25										Summe AA-A3										2,60E+03	6,58E+02	-8,94E+01	7,03E-07	2,58E-02	2,02E-01	4,36E-02
AA-AS-Transport/Einbau		Quelle	Dicke [m]	Breite	Faktor	Dichte [kg/m³]	Volumen [m³]	Masse [kg]	Gliederungs- bzw. Deklarationsnummer	Distanz [km]	PERT [MJ/EH]	PENIT [MJ/EH]	GWP [kg CO₂-Aeq./EH]	ODP [kg R-11-Aeq./EH]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./EH]	AP [kg SO₂-Aeq./EH]	EP [kg PO₄-Aeq./EH]	PERT [MJ/m²]	PENIT [MJ/m²]	GWP [kg CO₂-Aeq./m²]	ODP [kg R-11-Aeq./m²]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./m²]	AP [kg SO₂-Aeq./m²]	EP [kg PO₄-Aeq./m²]		
Messspannrett - Transport	m²	Okobaudat	0,0176	1	1	665,34	0,0176	11,71	LKW-9.3.01	30	7,22E-02	1,21E+00	8,97E-02	4,12E-17	-7,35E-05	2,19E-04	5,23E-05	2,54E-02	4,24E-01	1,35E-02	1,45E-17	-2,58E-05	7,68E-05	1,84E-05		
Messspannrett - Einbau	m²	Okobaudat	0,0176	1	1	665,34	0,0176	11,71	3.3.02	-	-1,96E-01	3,27E-02	1,27E-01	5,36E-17	1,64E-06	2,86E-05	5,84E-06	-1,96E-01	3,27E-02	1,27E-01	5,36E-17	1,64E-06	2,86E-05	5,84E-06		
Zementestrich	kg	Okobaudat	0,065	1	1	1500	0,065	97,50	1.6.03	-	8,57E-03	1,17E-01	1,02E-02	3,93E-16	-1,08E-07	7,04E-06	1,60E-06	8,36E-01	1,34E+01	3,81E-04	3,81E-14	-1,05E-05	6,89E-04	1,56E-04		
Dampfbremse PE (0,2 mm) - Transport	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	LKW-9.3.01	30	7,22E-02	1,21E+00	8,97E-02	4,12E-17	-7,35E-05	2,19E-04	5,23E-05	4,03E-04	6,74E-03	3,00E-04	2,30E-19	-4,10E-07	1,22E-06	2,92E-07		
Dampfbremse PE (0,2 mm) - Einbau	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	96	0,002	2,40	2.1.03	-	5,30E+00	5,29E+01	1,22E+01	3,29E-12	6,30E-04	1,45E-02	1,94E-03	1,33E-01	1,33E+01	3,04E-01	8,23E-14	1,50E-05	3,63E-04	4,84E-05		
Beton C 25/30	m³	Okobaudat	0,1	1	0,98	2400	0,098	235,20	1.6.01	-	9,39E+00	6,64E+01	4,98E+00	5,48E-12	-3,24E-03	1,15E-02	2,61E-03	9,20E-01	6,50E+00	4,88E-01	5,37E-13	-3,17E-04	1,13E-03	2,55E-04		
Betonstahl	t	Bau-EPD-Marienhitze	0,1	1	0,02	7856	0,002	15,71	00001158	-	4,94E+01	8,11E+02	5,23E+02	8,00E-03	1,41E-03	1,96E-02	1,96E-02	7,76E-01	1,27E+01	8,22E-01	1,45E-07	1,26E-04	2,21E-05	3,08E-04		
Dampfbremse PE (0,2 mm) - Transport	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	LKW-9.3.01	30	7,22E-02	1,21E+00	8,97E-02	4,12E-17	-7,35E-05	2,19E-04	5,23E-05	4,03E-04	6,74E-03	3,00E-04	2,30E-19	-4,10E-07	1,22E-06	2,92E-07		
Dampfbremse PE (0,2 mm) - Einbau	m²	Okobaudat	0,18	1	1	468,62	0,18	84,35	LKW-9.3.01	30	7,22E-02	1,21E+00	8,97E-02	4,12E-17	-7,35E-05	2,19E-04	5,23E-05	1,83E-01	1,06E+00	2,27E-01	1,04E-16	-1,88E-04	5,53E-04	1,32E-04		
Konstruktionsvollhalt - Einbau	m³	IBU EPD	0,18	1	1	468,62	0,18	84,35	EPD-SHK-20180036-IBG1-DE	-	1,09E-01	1,10E+00	5,83E+00	5,70E-12	4,33E-05	5,07E-04	1,08E-04	3,58E-02	1,98E-01	1,05E+00	1,03E-12	7,73E-06	9,13E-05	1,94E-05		
447.25										Summe AA-AS										2,71E+00	3,57E+01	4,04E+00	1,45E-07	-3,90E-04	2,96E-03	9,44E-04
B1-B7-Nutzung/Ersatz		Quelle	Dicke [m]	Breite	Faktor	Dichte [kg/m³]	Volumen [m³]	Masse [kg]	Gliederungs- bzw. Deklarationsnummer	Austausch- häufigkeit	PERT [MJ/EH]	PENIT [MJ/EH]	GWP [kg CO₂-Aeq./EH]	ODP [kg R-11-Aeq./EH]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./EH]	AP [kg SO₂-Aeq./EH]	EP [kg PO₄-Aeq./EH]	PERT [MJ/m²]	PENIT [MJ/m²]	GWP [kg CO₂-Aeq./m²]	ODP [kg R-11-Aeq./m²]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./m²]	AP [kg SO₂-Aeq./m²]	EP [kg PO₄-Aeq./m²]		
Messspannrett	m²	Okobaudat	0,0176	1	1	665,34	0,0176	11,71	3.3.02	1	7,57E+02	9,00E+01	-1,26E+01	9,65E+13	4,81E-03	4,53E-02	1,94E-02	7,57E+02	9,00E+01	-1,26E+01	9,65E+13	4,81E-03	4,53E-02	1,94E-02		
Zementestrich	kg	Okobaudat	0,065	1	1	1500	0,065	97,50	1.6.03	0	1,44E+01	1,01E+00	1,62E-01	3,32E-14	2,51E-05	2,12E-04	3,21E-05	1,40E+01	8,69E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00		
Dampfbremse PE (0,2 mm)	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	6.6.02	0	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04		
Mineralfülle (mittlere Rohdichte)	m³	Okobaudat	0,025	1	1	96	0,025	2,40	2.1.03	0	1,76E+02	1,14E+03	1,22E+02	1,56E-10	2,89E-02	5,85E-01	6,52E-02	4,39E+00	2,84E+01	3,04E+00	3,90E-12	7,23E-04	1,46E-02	1,63E-03		
Beton C 25/30	m³	Okobaudat	0,1	1	0,98	2400	0,098	235,20	1.6.01	0	1,90E+02	9,99E+02	1,97E+02	5,36E-08	2,30E-02	2,87E-01	5,35E-02	1,88E+01	9,79E+01	1,93E+01	5,25E-09	2,35E-03	2,81E-02	5,24E-03		
Betonstahl	t	Bau-EPD-Marienhitze	0,1	1	0,02	7856	0,002	15,71	00001158	0	2,01E+03	6,57E+03	4,42E+02	4,21E-05	6,10E-02	3,00E-02	2,93E-01	5,10E+03	1,03E+02	6,94E+00	6,81E-07	9,68E-04	4,71E-04	4,04E-03		
Dampfbremse PE (0,2 mm)	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	6.6.02	0	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04	9,24E+01	1,36E+01	3,99E-01	3,83E-15	2,95E-04	5,20E-03	1,22E-04		
Konstruktionsvollhalt	m³	IBU EPD	0,18	1	1	468,62	0,18	84,35	EPD-SHK-20180036-IBG1-DE	0	9,87E+03	1,18E+03	-6,81E+02	2,02E-07	9,23E-02	4,60E-01	1,02E-01	1,78E+03	1,21E+02	-1,23E+02	3,64E-08	1,56E-02	8,27E-02	1,84E-02		
447.25										Summe B1-B7										7,57E+02	9,00E+01	-1,26E+01	9,65E+13	4,81E-03	4,53E-02	1,94E-02
C1-C4-Entsorgung		Quelle	Dicke [m]	Breite	Faktor	Dichte [kg/m³]	Volumen [m³]	Masse [kg]	Gliederungs- bzw. Deklarationsnummer	ERT [MJ/EH]	PENIT [MJ/EH]	GWP [kg CO₂-Aeq./EH]	ODP [kg R-11-Aeq./EH]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./EH]	AP [kg SO₂-Aeq./EH]	EP [kg PO₄-Aeq./EH]	ERT [MJ/m²]	PENIT [MJ/m²]	GWP [kg CO₂-Aeq./m²]	ODP [kg R-11-Aeq./m²]	POCP [kg C₁₄H₃-Aeq./m²]	AP [kg SO₂-Aeq./m²]	EP [kg PO₄-Aeq./m²]			
Messspannrett	m²	Okobaudat	0,0176	1	1	665,34	0,0176	11,71	3.3.02	C2-C3	-2,08E+02	1,12E+00	1,99E+01	3,10E-15	-1,49E-05	1,56E-04	3,17E-05	-2,08E+02	1,12E+00	1,99E+01	3,10E-15	-1,49E-05	1,56E-04	3,17E-05		
Zementestrich	kg	Okobaudat	0,065	1	1	1500	0,065	97,50	1.6.03	nur C4	2,78E-02	2,22E-01	1,66E-02	3,89E-15	7,62E-06	9,80E-05	1,35E-05	2,69E-00	2,16E+01	1,62E+00	3,60E-13	7,63E-04	9,56E-03	1,32E-03		
Dampfbremse PE (0,2 mm)	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930	0,0002	0,19	6.6.02	C1-C3	1,89E-02	9,04E-02	5,56E-01	1,07E-16	3,68E-06	5,03E-05	1,13E-05	1,89E-02	9,04E-02	5,56E-01	1,07E-16	3,68E-06	5,03E-05	1,13E-05		
Mineralfülle (mittlere Rohdichte)	m³	Okobaudat	0,025	1	1	96	0,025	2,40	2.1.03	0	2,75E+00	2,47E+01	1,84E+00	3,30E-13	6,09E-04	9,29E-03	1,31E-03	6,88E-02	6,19E-01	4,60E-02	8,95E-15	1,74E-05	2,22E-04	3,38E-05		
Beton C 25/30	m³	Okobaudat	0,1	1	0,98	2400	0,098	235,20	1.6.01	C1-C3	3,45E+01	2,84E+02	2,13E+01	1,61E-11	-6,95E-03	7,84E-02	1,64E-02	3,38E+00	2,78E+01	2,07E+00	1,58E-12	-6,61E-04	7,18E-03	1,60E-03		
Betonstahl	t	Bau-EPD-Marienhitze	0,1	1	0,02	7856	0,002	15,71	00001158	0	1,60E+00	1,93E+02	9,40E+00	2,36E-06	1,75E-03	2,21E-04	4,31E-03	2,52E-02	3,02E+00	1,48E-01	3,71E-08	2,74E-05	3,47E-06	6,77E-05		
Dampfbremse PE (0,2 mm)	m²	Okobaudat	0,0002	1	1	930																				