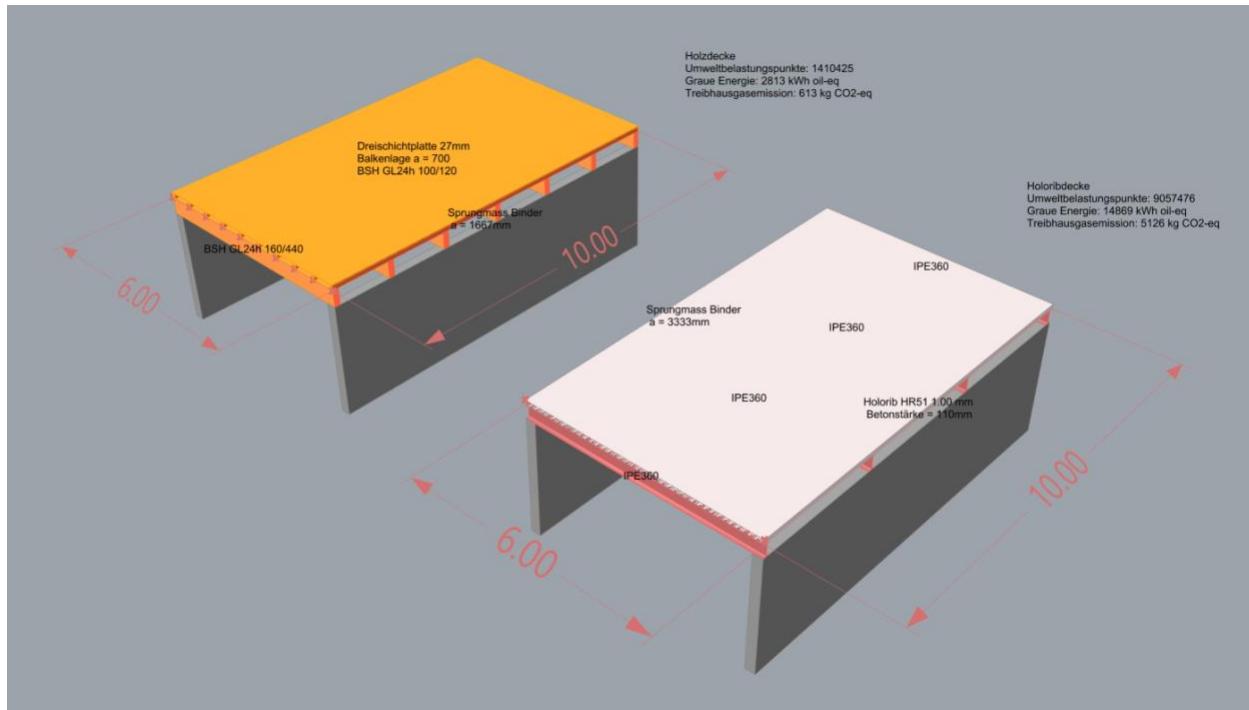


Vergleich parametrischer Deckensysteme

Analyse des statischen Verhaltens im Vergleich zur Ökobilanz



Eingereicht bei: Christian Rudin, Experte, ZPF Ingenieure
Marc Pancera, Examinator, Institut Digitales Bauen, FHNW

Vorgelegt von: Fabian Hug
Oristalstrasse 12
4410 Liestal
Tel. 078 693 65 92
E-Mail fabian.hug@students.fhnw.ch
hug.fabian@gmail.com

Liestal, 19. August 2022

I. Zusammenfassung

Variantenstudien und Dimensionierungen von Tragwerken dauern oft lange. Veränderungen von Parametern bewirken eine Wiederholung von Arbeiten, wie die Nachweisführung der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit, die Anpassung des Modells oder des Plans und die Erstellung der Ökobilanz.

Zurzeit werden diese Arbeiten meist von Hand und ohne Automationen durchgeführt. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Werkzeug zu entwickeln, welches diese Arbeiten parametrisch und automatisch durchführt. Dazu muss in einer ersten Phase der Ist-Prozess analysiert werden. Der Ist-Prozess ist träge und für die Findung der richtigen Profile müssen diverse Tabellen konsultiert werden. Erfahrungen in der Baustatik sind Voraussetzung für die Findung von passenden Querschnitten. Die Schwachstellen dieses Prozesses sollen durchleuchtet und Verbesserungen vorgeschlagen werden. Anhand dieser Schwachstellen soll mit Grasshopper ein Werkzeug erschaffen werden. Schlussendlich wird eine Anleitung erstellt, welche die Nutzung des Tools für alle Planenden ermöglicht.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Grasshopper-Werkzeug analysiert Holorib- und Holzbalkendecken. Es werden verschiedenste Varianten automatisch durchgerechnet. Die jeweils ökologischste Variante wird in Rhino abgebildet und als IFC-Datei exportiert. Alle Varianten werden zudem in Excel in Säulen- und Liniendiagrammen visualisiert. Das Werkzeug beschleunigt den Prozess des Variantenstudiums und der Dimensionierung signifikant. Die Entwicklungszeit von vier Wochen ist bei regem Einsetzen des Werkzeuges schnell amortisiert.

II. Vorwort

Die Idee von einer Bachelorarbeit im Bereich des digitalen Bauens kam im Verlauf meiner Anstellung als Bauingenieurpraktikant bei meinem ehemaligen Betrieb. Viele Arbeitsschritte musste ich dort immer und immer wiederholen. Ich fragte mich ständig, wieso nicht einige Abhandlungen automatisiert werden können. Aber auch im Rahmen meines Studiums stellte ich mir die Frage, wieso die ganze Welt von der Industrie 4.0, von künstlicher Intelligenz oder von selbstfahrenden Autos spricht, aber auf Baustellen weiter so gearbeitet wird, wie sie es schon im letzten Jahrtausend gemacht haben. Ein weiterer Megatrend ist der Ökologiegedanke, welcher sich immer mehr in den Köpfen der Menschen festsetzt. Und es fällt auf, dass auch hier die Baubranche eher dem Trend hinterherläuft, als sich als Vorreiter zu präsentieren.

Als ich dann auf die Homepage der ZPF Ingenieure AG stiess und sie die Fachgebiete Ökologie und Digitalisierung auflistete, war mir klar, dass ich mich mit diesem Büro in Kontakt setzen muss. Nach einigen interessanten Gesprächen haben wir ein geeignetes Thema gefunden, welches die beiden Fachgebiete Ökologie und Digitalisierung miteinander verbinden soll.

Ich danke Christian Rudin und Tobias Huber für die Möglichkeit, diese Arbeit in diesem Rahmen zu schreiben. Zudem danke ich Marc Pancera für die Übernahme des Betreuerpostens. Die Zusammenarbeit war professionell, zielführend und angenehm.

Liestal, 19. August 2022

III. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Ziel der Arbeit	1
1.3	Aufbau der Bachelorarbeit	1
2	Grundlagen.....	2
2.1	Deckensysteme.....	2
2.1.1	Stahl-Beton-Verbundbau	2
2.1.2	Holzdecke / Holz-Beton-Verbunddecke.....	2
2.1.3	Massivbaudecken.....	2
2.2	Ökobilanz in der Baubranche	2
2.3	Business Process Modeling Notation (BPMN).....	3
2.4	Parametrisches Design	4
3	Ist-Prozess	5
3.1	Blechverbunddecken	5
3.1.1	Einwirkungen.....	5
3.1.1.1	Eigenlasten und Auflasten	5
3.1.1.2	Nutzlast.....	6
3.1.2	Schnittkräfte.....	6
3.1.3	Dimensionierung	6
3.1.4	Ökobilanz Betonverbunddecke	7
3.2	Holzdecke / Holz-Beton-Verbunddecke	7
3.2.1	Holzbinder, Vollholzdecke Einfeld- und Zweifeldträger (System 1 & 2)	9
3.2.1.1	Einwirkungen	9
3.2.1.2	Schnittkräfte, Dimensionierung.....	9
3.2.1.3	Ökobilanz	9
3.2.2	Holzbinder, Balkenlage, Dreischichtplatte (System 3)	9
3.2.2.1	Einwirkungen	9
3.2.2.2	Schnittkräfte, Dimensionierung.....	10
3.2.2.3	Ökobilanz	10
3.2.3	Holzbinder, Holz-Beton-Verbunddecke (System 4)	10
3.2.3.1	Einwirkungen	10
3.2.3.2	Schnittkräfte, Dimensionierung.....	10
3.2.3.3	Ökobilanz	10
3.3	Ökobilanz	11
3.4	Flussdiagramm.....	14
4	Soll-Prozess	15
4.1	Blechverbunddecke	15

4.1.1	Eingabewerte und Voreinstellungen.....	15
4.1.2	Bestimmen Betonstärke Auswahl Stahlbinder.....	16
4.1.3	Darstellung als Modell.....	18
4.1.4	Export Ökobilanz	21
4.2	Holzdecke.....	22
4.2.1	Eingabewerte und Voreinstellungen.....	22
4.2.2	Dimensionierung Balkenlage.....	22
4.2.3	Dimensionierung Binder.....	23
4.2.4	Ökobilanz.....	23
4.2.5	Visualisierung	24
4.3	IFC Export.....	25
4.4	Visualisierung Ökobilanz.....	27
4.4.1	Vergleich ökologisch beste Varianten	27
4.4.2	Vergleich aller Kombinationen	28
4.5	Flussdiagramm.....	30
5	Diskussion und Fazit	31
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation	31
5.2	Begrenzung der Arbeit.....	32
5.3	Empfehlungen für weiterführende Arbeiten.....	33
6	Anhang	34
7	Literaturverzeichnis.....	35

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 System 1 Zweifeldträger Stützenweite 3m	5
Abbildung 2 System 2 Dreifeldträger Stützenweite 2m	5
Abbildung 3 Querschnitt Blechverbunddecke mit Längsbewehrung	7
Abbildung 4 System Zweifeldträger Stützenweite 3m.....	8
Abbildung 5 System Einfeldträger Stützenweite 6m	8
Abbildung 6 Holzbau Deckensystem 1	8
Abbildung 7 Holzbau Deckensystem 2	8
Abbildung 8 Holzbau Deckensystem 3	8
Abbildung 9 Holzbau Deckensystem 4	8
Abbildung 10 Graue Energie der verschiedenen Deckensystemen.....	12
Abbildung 11 Treibhausgasemissionen der verschiedenen Deckensystemen	13
Abbildung 12 Teil 1 Flussdiagramm Holoribblechdecke – Eingabeparameter	16
Abbildung 13 Teil 2 Flussdiagramm Holoribblechdecke Berechnung I_y und W_y	17
Abbildung 14 Ausschnitt Grasshopper – Ausgabe Python Skript	17
Abbildung 15 Ausschnitt Grasshopper – Findung passendes Profil IPE Reihe	18
Abbildung 16 Teil 3 Flussdiagramm Holoribdecke – Findung ökologischste Binder	18
Abbildung 17 Visualisierung Binder und Auflagerwände	19
Abbildung 18 Holoribblech HR51 Querschnitt (Montana Bausysteme AG, 2022)	19
Abbildung 19 Visualisierung Auflager, Träger und Holoribblech (grün)	20
Abbildung 20 Visualisierung komplettes Deckensystem Betonquader grün	21
Abbildung 21 Ordnerstruktur Ökobilanz.....	21
Abbildung 22 Flussdiagramm Holzdecke – Dimensionierung Binder und Balkenlage	23
Abbildung 23 Teil 2 Flussdiagramm Holzdecke – Berechnung Ökobilanzdaten	24
Abbildung 24 Visualisierung Holzdecke	25
Abbildung 25 Erstellung IFC Beam (buildingSMART, 2019)	26
Abbildung 26 Generierung IFCSlab Betondecke in Grasshopper mit GeomGymIFC	26
Abbildung 27 Erstellung IFC Beam Binderprofile	27
Abbildung 28 Vergleich UBP der beiden ökologisch besten Varianten	28
Abbildung 29 Liniendiagramm Vergleich UBP Holoribdecke.....	29
Abbildung 30 Liniendiagramm Vergleich UBP Holzdecke.....	29

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auflistung Symbole BPMN (Wright, 2022)	4
Tabelle 2 Biege widerstände Holoribbleche	6
Tabelle 3 Ausgewählte Träger für Blechverbunddecke	6
Tabelle 4 Zusammenstellung UBP Blechverbunddecke.....	7
Tabelle 5 Ökobilanz Vollholzdecke.....	9
Tabelle 6 Zusammenstellung Ökobilanz Balkenlagendecke	10
Tabelle 7 Ökobilanz Holz-Beton-Verbunddecke	11
Tabelle 8 Ökobilanz Vergleich absolute UBP Zahlen	11
Tabelle 9 Ökobilanz Vergleich Einwirkungen	12

VI. Abkürzungsverzeichnis

BIM	Building Information Modelling
BPMN	Business Process Modelling Notation (Geschäftsprozessmodell und -notation)
BVB	Blechverbunddecke
CSV	Comma-separated values
DFT	Dreifeldträger
DSP	Dreischichtplatte
EFT	Einfeldträger
IFC	Industry Foundation Classes
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
UBP	Umweltbelastungspunkte
ZFT	Zweifeldträger

VII. Normen

SIA 260	Grundlagen der Projektierung von Tragwerken
SIA 261	Einwirkungen auf Tragwerke
SIA 262	Betonbau
SIA 263	Stahlbau
SIA 264	Stahl-Beton-Verbundbau
SIA 265	Holzbau
SIA 2032	Graue Energie – Ökobilanz für die Erstellung von Gebäuden

1 Einleitung

In Zeiten, in denen in anderen Branchen vieles automatisiert wird, plant die Baubranche oft noch so, wie es die Generationen vor uns getan haben. Vielleicht hat sich das Werkzeug geändert. Der Stift und das Papier wurden durch die Maus und den Bildschirm ersetzt. Aber die Methode blieb die Gleiche. Das Gleiche gilt für ökologische Aspekte. Wo in anderen Fachgebieten die Ökologie schon lange eine Rolle spielt, verbaut die Baubranche weiterhin Beton und Stahl wie es die Menschen die letzten zwei Jahrhunderte getan haben.

Bestimmt gibt es Betriebe, welche auf die Ökologie achten oder achten müssen. Bestimmt gibt es Betriebe, welche fortschrittliche Technologien einsetzen. Es gibt aber sicherlich nur wenige Betriebe, welche beide Fachgebiete kombinieren. Und hier setzt diese Bachelorarbeit an.

1.1 Problemstellung

Meist gehen die Tragwerksplanung und die Ökobilanzierung nacheinander vonstatten. Das heisst, das Tragwerk wird erarbeitet und danach auf seine Ökologie untersucht, anstatt nach dem ökologischsten Tragwerk zu suchen. Meistens ist schon zu Beginn des Bauprojektes klar, aus welchem Baustoff das Gebäude gebaut wird. Kombiniert mit der fehlenden Automation in vielen Planungsbetrieben, dauert die manuelle Findung von ökologischen Bauelementen, in dieser Arbeit um die Findung von ökologischen Decken, sehr lange.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Bachelorthesis ist es, die Dimensionierung von Deckensystemen unter Beurteilung deren Ökobilanzen im Vergleich zur konventionellen Methode durch Nutzung parametrischer Methoden zeitlich zu reduzieren. Um dies zu erreichen, müssen folgende drei Forschungsfragen untersucht und beantwortet werden.

Fragestellung 1: Wie lange dauert der konventionelle Prozess (IST-Prozess)?

Für zwei Deckensysteme sollen entsprechende Bemessungen sowie eine Aussage zur Ökobilanz der gewählten Bauteile erstellt werden. Anhand eines Flussdiagramms, welches den konventionellen Prozess beschreibt, sollen die zeitlichen Aufwendungen dazu, sowie allfällige Wartezeiten (z.B. Reaktion Dritter) dokumentiert werden.

Fragestellung 2: Kann mit parametrischen Werkzeugen der Prozess beschleunigt werden?

Der konventionelle Prozess soll gezielt durch parametrische Hilfsmittel optimiert werden. Neben der Dokumentation der parametrischen Resultate, soll der neue Prozess (SOLL Prozess) ebenfalls anhand eines Flussdiagramms mit zeitlichen Verhältnissen dokumentiert werden.

Fragestellung 3: Kann das Vorgehen systematisiert und für Dritte nutzbar gemacht werden?

Für eine systematische Erstellung von Konzepten und Bemessungen für Deckentragsysteme soll eine Vorlage erstellt werden. Diese Vorlage soll eine Anleitung zum Vorgehen sowie Checklisten und Flussdiagramme beinhalten.

1.3 Aufbau der Bachelorarbeit

Nach einer Grundlagenbeschaffung wird der Ist-Zustand analysiert. Dies geschieht mit konventionellen Hilfsmitteln, vor allem mit Excel und Tabellen (C5, Holzbautabelle). Nach einer Analyse dieses Ist-Prozesse wird mit Grasshopper ein automatischer Arbeitsablauf entwickelt, welche die Findung von ökologischen Decken ermöglicht. Vorteil von Grasshopper ist primär, dass es mit vielen BIM-Softwares und Zeichnungsprogrammen kompatibel ist. Dies schränkt nicht ein und ermöglicht vielen, das

entwickelte Werkzeug zu nutzen. Zudem soll eine Anleitung die Nutzung vereinfachen. Diese wird mit dem Programm mitgeliefert. Alle Erkenntnisse werden in diesem Bericht dokumentiert.

2 Grundlagen

2.1 Deckensysteme

Es gibt im Hochbau unterschiedliche Deckensysteme, welche nachstehend vorgestellt werden. Die Stahl-Beton-Decke und die Holzdecke sind dabei die beiden zentralen Deckensysteme dieser Arbeit. Die Massivbaudecke wird nicht behandelt.

2.1.1 Stahl-Beton-Verbundbau

Beim Deckenbau im Stahl-Beton-Verbundbau werden nach SIA 264 zwei unterschiedliche Systeme behandelt. Auf der einen Seite die klassische Verbunddecke, welche aus Stahlträgern und einer Betondecke besteht. Der Beton ist dabei mit den Stahlträgern schubfest verbunden. Die Blechverbunddecke ist das zweite System. Sie ist ein "flächiges, horizontales Verbundbauteil, das vorwiegend auf Biegung beansprucht wird" (SIA 264, 2014). Das Profilblech dient beim Betonieren als Schalung, im Endzustand als Ersatz der Zugbewehrung. Zu beachten ist, dass das Profilblech und der Beton schubfest miteinander verbunden sind. Dies geschieht entweder mit Kopfbolzendübel bei den Auflagern, mit hinterschnittenen Blechprofilen oder mit mechanischer Verdübelung (Minnert & Wagenknecht, 2013). Die SIA 264, Art. 5.4.1.7., definiert die Verbundwirkung identisch (SIA 264, 2014).

2.1.2 Holzdecke / Holz-Beton-Verbunddecke

Reine Holzdecken oder Holz-Beton-Verbunddecken besitzen das gleiche Tragsystem wie Stahl-Beton-Verbunddecken. Die Auflasten werden über ein Platte, entweder einer Brettschichtholz- oder einer Betonplatte auf Unterzüge geleitet und von diesen nach aussen transportiert. Neben einem Flächentragwerk kann auch eine Balkenlage angeordnet werden. Nachteil der Balkenlage ist der Verlust von Höhe gegenüber einer Brettschichtholzplatte. Weiter müssen die Balken auf Kippen bemessen werden. Demgegenüber steht der geringe Materialbedarf. Nachfolgend ein kleines Rechenbeispiel, um dies zu illustrieren.

Sprungmass	0.7	m	
Spannweite	6.0	m	
NL Kat. B.	3.0	kN/m ²	
Auflast	3.0	kN/m ²	
Balken	160/400	Querschnitt 1m Breite	0.09 m ²
Voll-QS	1000/250	Querschnitt 1m Breite	0.25 m ²

Das Beispiel zeigt, dass das Einsetzen einer Balkenlage eine Einsparung von 64% des Holzvolumens bedeutet (Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, 2021). Vernachlässigt wird bei der Balkenlage die Einschalung mit Holz (Bsp. 27mm Dreischichtplatte). Im Rahmen dieser Bachelorthesis werden beide Varianten in die Berechnung einfließen. Spannend ist zu erfahren, ob sich der geringe Materialbedarf auf die Ökobilanz positiv auswirkt.

2.1.3 Massivbaudecken

Die Massivbaudecke ist wohl der weitverbreitetste Deckenbautyp. Dabei werden Stahlbetonplatten, welche auf alle vier Seiten Lasten abtragen, eingebaut. Bei grossen Spannweiten müssen Unterzüge die Lasten nach aussen tragen, da die statische Nutzhöhe der Stahlbetondecke zu gering ist. Das statische System ist also das Gleiche wie bei der reinen Holzdecke.

2.2 Ökobilanz in der Baubranche

Objektbezogene Ökobilanzen im Baubereich werden auch als Lebenszyklusanalyse von Gebäuden bezeichnet (engl. auch LCA – Life Cycle Assessment). In die Ökobilanz fliesst die ganze Lebensdauer des Gebäudes ein. Die Bauphase, die Nutzung, aber auch der Abriss und die Entsorgung werden

berücksichtigt. Die Ökobilanz liefert eine systematische und standardisierte Datengrundlage, um aus Deklarationen einzelner Bauprodukte die ökologische Bewertung eines Bauwerks zu erstellen (Baunetzwissen, 2022).

Ökobilanzdaten basieren auf Stoff- und Energieflüssen, welche bezüglich ihrer Umweltrelevanz bewertet werden. Jedes eingesetzte Material erhält gemäss seiner Gesamtumweltbelastung Umweltbelastungspunkte (UBP). Die KBOB definiert die Umweltbelastungspunkte wie folgt: "Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21) gemäss der Methode der ökologischen Knappheit quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm." (KBOB et al., 2016). Die Umweltbelastungspunkte setzen sich aus der Primärenergie, welche für die Erstellung des Materials aufgebracht wird, aus den Treibhausemissionen und aus dem biogenen Kohlenstoffgehalt zusammen. Die Primärenergie wiederum wird unterteilt in erneuerbare und nicht erneuerbare Energie. Für die Ökobilanz ist vor allem die nicht erneuerbare Energie, auch graue Energie genannt, interessant. Im Rahmen dieser Arbeit werden neben den Umweltbelastungspunkten auch die graue Energie und die Treibhausgasemissionen ausgewiesen. Die graue Energie wird in Öleinheiten ausgewiesen. Dabei beträgt etwa ein Liter Rohöl zehn kWh Energie. Die Treibhausgase werden alle normiert und mit CO₂ verglichen. Beispielsweise verursacht Methan 30-mal grössere Umweltschäden als Kohlenstoffdioxid. Der Ökofaktor (UBP) bemisst die Umweltbelastung einer Ressource im Verhältnis der heutigen Situation und den gesetzlichen Zielen (BAFU, 2021). Das Bundesamt für Umwelt (2021, S. 43) beschreibt die Ökofaktoren wie folgt: "Ein Ökofaktor wird aus drei Elementen hergeleitet: die Charakterisierung, die Normierung und die Gewichtung. Die Charakterisierung beziffert die relative Schädlichkeit gegenüber einer Vergleichssubstanz. Die Normierung bemisst, wie gross der Beitrag einer Umwelteinwirkung des Untersuchungsgegenstandes an die Gesamtmenge dieser Kategorie von Umwelteinwirkung in einer Region pro Jahr ist. Die Gewichtung bezieht sich auf das Verhältnis der aktuellen Menge einer Umwelteinwirkung zur umweltgesetzlich festgelegten tolerierten Zielmenge."

Hier einige Beispiele zur Einordnung von Umweltbelastungspunkte (Kägi, 2022). 1000 UBP entsprechen

- 2 km Autofahren
- 23 km Zugfahren
- 9 g Rindfleisch
- 0.7 l Bier
- 0.77 kg Stahlprofil

In Deutschland werden Baustoffe in drei Gruppen eingeteilt. Unterschieden werden die Umweltproduktdeklarationen in Typ I, Typ II und Typ III. Einflussfaktoren sind der Ressourcenverbrauch und die Emissionen bezogen auf den Treibhausgaseffekt, die Überdüngung oder die Versauerung der Gewässer (Baunetzwissen, 2022).

Damit die Resultate vergleichbar sind, müssen für das ganze Bauteil oder für das ganze Gebäude die Umweltbelastungspunkte berechnet werden. Einheiten wie UBP pro Kilogramm sind nicht brauchbar; so ist eine Decke aus Holz bedeutend leichter als die gleiche Decke im Stahl-Beton-Verbundbau. Verbindungsmittel, wie Kopfbolzdübel bei der Blechverbunddecke oder Holzschrauben fliessen nicht in die Ökobilanz ein. Der Detaillierungsgrad würde die Berechnungen für eine Vordimensionierung sprengen.

2.3 Business Process Modeling Notation (BPMN)

Die Business Process Modeling Notation (BPMN), auch Geschäftsprozessmodell und -notation genannt, ist ein offener Standard zur Darstellung von Geschäftsprozessen. Er gleicht einem Flussdiagramm und verwendet standardisierte Grafiken, um den Teilnehmenden Entscheidungen in einem Prozess und den Ablauf des Prozesses darzustellen.

Die BPMN verwendet eine Sammlung von Symbolen und Regeln für die Verbindung dieser Symbole zur Darstellung eines Geschäftsprozesses. Diese Diagramme werden als Geschäftsprozessmodelle bezeichnet und können zur Darstellung eines öffentlichen oder privaten Prozesses verwendet werden.

Die ursprüngliche Absicht von BPMN war es, die Kommunikationslücken zu schließen, die oft zwischen den verschiedenen Abteilungen einer Organisation oder eines Unternehmens bestehen (Wright, 2022). Jedes Symbol hat eine bestimmte Verwendung und Bedeutung im Diagramm. Diese Symbole stellen jeweils einen Schritt oder eine Aktivität im Prozess dar. Folgende Symbole gibt es.

	Symbol	Beschreibung
Ereignis		Zeigt eine Unterbrechung eines Ablaufes an. Ereignisse werden in Start-Ereignisse, Sofort-Ereignisse oder End-Ereignisse unterteilt.
Aktivität		Beschreibt eine einzelne Arbeit oder einen zusammengesetzten Prozess.
Zugang (Gateway)		Ein Verzweigungspunkt. Es kann sich um ausschließende Entscheidungen, einschließende Entscheidungen, verzweigende parallele Aktivitäten oder komplexe Gateways handeln.
Verbindungsobjekt		Verbinden Objekte im Flussdiagramm. Es gibt drei verschiedene Verbindungen. <ol style="list-style-type: none"> Sequenzflüsse. Zeigt eine Reihenfolge. Nur eine Quelle und ein Ziel Nachrichtenflüsse. Zeigt den Fluss einer Nachricht zwischen Teilnehmenden Assoziationen. Zeigt eine Verbindung zwischen einer Aktivität und einem Artefakt (klarstellende Informationen, die einem Diagramm hinzugefügt werden und den Ablauf nicht beeinflussen)
Pool		Eine Box, die eine separate Einheit darstellt, z. B. eine andere Abteilung oder ein Unternehmen.
Lane		Unterteilung einer Box, um interne Abteilungen darzustellen.

Tabelle 1 Auflistung Symbole BPMN (Wright, 2022)

Die BPMN wird für den Prozessbeschrieb des Ist-Prozesses und des Soll-Prozesses zur Findung des ökologischsten Deckensystems verwendet.

Alle in dieser Arbeit erstellten BPMN, werden mit dem Onlinewerkzeug von Camunda getätig. Camunda ist eine Firma aus Berlin. Sie haben sich als Ziel gesetzt, Unternehmen bei der Modellierung, Automatisierung und Verbesserung ihrer Prozesse zu helfen (Camunda, 2022).

2.4 Parametrisches Design

Unter parametrischem Design wird die Erzeugung von Geometrien unter Einhaltung von gewissen Parametern und von Beziehungen verstanden. Das heißt, Bauelemente werden nach algorithmischen Prozessen geformt. Bei dieser Methode bestimmen Parameter und Regeln das Verhältnis zwischen Entwurfsabsicht und Entwurfsreaktion. Der Begriff parametrisch bezieht sich auf die in die Algorithmen eingespeisten Eingabeparameter.

So werden Bauelemente mit Bedingungen miteinander verbunden. Bei Veränderungen von Objekten werden alle Elemente, welche mit diesem Element in Verbindung stehen, ebenfalls angepasst.

3 Ist-Prozess

Wie schon in Kapitel 2.1 erklärt, sind die Blechverbund- und die Holzdecke Bestandteil dieser Thesis. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird der Ist-Prozess für die beiden Deckensysteme beschrieben. Die Berechnungsschritte sind in einem Flussdiagramm im Anhang 1 dargestellt.

Um die Resultate vergleichen zu können, wird eine Decke berechnet mit den Massen zehn Meter auf sechs Meter. Einfachheitshalber wird angenommen, dass die Decke auf den Seiten weitergeht. So tragen alle Auflagerbalken die gleichen Kräfte ab.

3.1 Blechverbunddecken

Blechverbunddecken besitzen eine beschränkte Spannweite. Spannweiten zwischen zwei und drei Meter können von den meisten Blechen überspannt werden ohne im Bauzustand unterspriesst zu werden. Mit Spriessungen lassen sich bis sieben Meter überspannen. Die mögliche Nutzlast, welche aufgebracht werden kann, liegt dann aber nur zwischen 5 und 10 kN/m². Mit Superholoribblechen lassen sich grössere Felder überspannen, können aber bei gleichen Spannweiten weniger Nutzlast aufnehmen (Montana Bausysteme AG, 2016). Auch Krahwinkel & Kindmann, 2016, erwähnen eine übliche Spannweite von zwei bis sechs Metern. Somit wird für die Weiterarbeit eine Spannweite von zwei und drei Metern gewählt. Die beiden Systeme sind nachfolgend abgebildet.

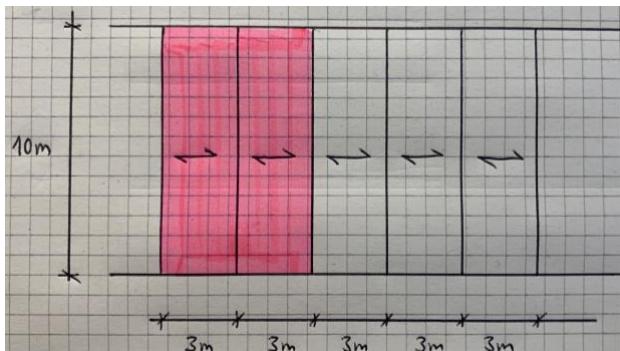


Abbildung 1 System 1 Zweifeldträger | Stützenweite 3m

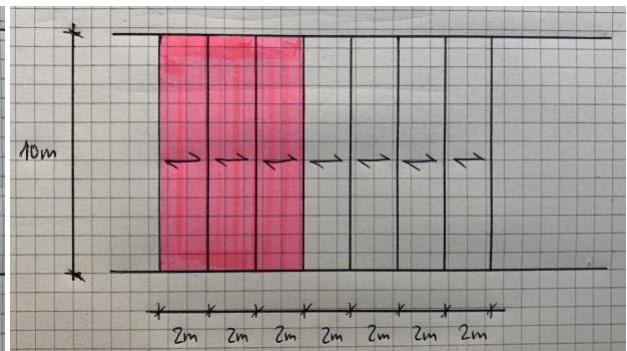


Abbildung 2 System 2 Dreifeldträger | Stützenweite 2m

Weiter konzentriert sich der Autor nur auf die Holoribbleche. Diese Bleche stellen die Verbundsicherung über den Flächenverbund in Verbindung mit mechanischen Verbundmittel, wie Kopfbolzendübel sicher. Demgegenüber nutzen Superholorib-Profile die Noppen auf dem Obergurt (Montana Bausysteme AG, 2022).

3.1.1 Einwirkungen

Bei den Einwirkungen wird Vieles von der SIA 261 vorgegeben. Mit den auftraggebenden Personen müssen nur die Nutzlast und die ständigen Auflasten diskutieren werden. Weitere Umwelteinflüsse sind für die Decken irrelevant, da sie von der Gebäudehülle aufgenommen und über die vertikalen Bauelemente in den Untergrund geleitet werden.

3.1.1.1 Eigenlasten und Auflasten

Beide Lastgruppen, die Eigenlast und die Auflasten sind als ständige Lasten zu behandeln. Im zu behandelten Fall ist primär die Betonlast massgebend. Laut Harald und Volz (2020) kann die Deckenstärke bei System eins mit 15 cm und bei System zwei mit 10 cm angenommen werden. Daraus ergibt sich eine Betonlast von 3.75 kN/m² und 2.50 kN/m². Die Raumgewichte des Betons sind sehr konservativ gerechnet. Im Prinzip müssten die Aussparungen durch das Trapezblech berücksichtigt werden. Die Flächenlast der Trapezbleche ist maximal 0.2 kN/m² (Montana Bausysteme AG, 2022). Ständige Auflasten wie Bodenüberzug, niedergehängte Decke und alle Installationen werden mit 2 kN/m² verrechnet.

3.1.1.2 Nutzlast

Die Nutzlast ist eine veränderliche Last und ist abhängig von der Gebäudenutzung. Die charakteristischen Werte der Nutzlasten sind in der SIA 261 (2020) in Tabelle 8 definiert. Blechverbunddecken werden mehrheitlich in Industriebetrieben oder Bürogebäuden verwendet. Aufgrund dessen wird die Nutzlast mit 5 kN/m² angenommen.

3.1.2 Schnittkräfte

Minnert & Wagenknecht (2013) unterscheiden bei Verbunddecken vier Versagensarten:

1. Biegeversagen im positiven Momentenbereich
2. Längsschubversagen in der Verbundfuge
3. Versagen des Betons infolge Querkrafteinwirkung
4. Biegeversagen im Stützbereich

Versagensart zwei wird nicht berücksichtigt. Der Autor geht von einer vollen Verdübelung und einer schubfesten Verbindung zwischen Blech und Beton aus. Somit wird nur die Biegebeanspruchung relevant. Die anderen Versagensarten werden mit der Betonbewehrung verhindert. Die Bewehrung ist aber nicht Teil einer Vordimensionierung.

Die Schnittkräfte werden einerseits mit dem Grenzzustand der Tragsicherheit und andererseits mit dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berechnet.

Die durchlaufende Platte wird als Einfeldträger gemäss SIA 264, 5.4.2.3 berechnet. Dies ist nur erlaubt, wenn über den Auflagern eine Mindestbewehrung angeordnet wird. Die Momente sind für einen Streifen von 150mm gerechnet. Die Berechnung der Schnittkräfte ist in Anhang 2 zu finden.

3.1.3 Dimensionierung

Die Holoribbleche gibt es mit einer Stärke von 0.75 mm, 0.88 mm und 1.00 mm. Die Biegewiderstände, bezogen auf 150 mm Breite und einem Beton der Klasse C25/30, sind wie folgt.

	Zweifeldträger	Dreifeldträger
Holorib HR 51/150 0.75	8.5 kNm	4.2 kNm
Holorib HR 51/150 0.88	7.8 kNm	4.5 kNm
Holorib HR 51/150 1.00	6.8 kNm	4.8 kNm

Tabelle 2 Biege widerstände Holoribbleche

Für beide Systeme reicht das Holoribblech HR51/600 0.75.

Noch einfacher ist die Bemessung von Blechen mit der Bemessungstabelle der Firma Montana. Vorteil dieser Tabellenwerte sind die gleichzeitigen Überprüfungen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit. Die Tabellenwerte geben die maximale charakteristische Nutzlast an. Neben dem Finden des geeigneten Trapezbleches kann auch gleich die Betonstärke eruiert werden. Ökologisch und wirtschaftlich sollen möglichst dicke Bleche und wenig Beton verwendet werden. Um wirtschaftlich zu sein, sollen nur Holorib- oder Superholoribbleche ohne benötigte Montageunterstützung eingesetzt werden (Montana Bausysteme AG, 2016).

Profilbleche sind hauptsächlich für Betondecken mit geringen Betonstärken oder mit kurzen Stützenweiten optimal. Spriessungen sind dann nicht notwendig. Das Stockwerk unterhalb ist schneller frei und so können Zeitgewinne erzielt werden. Bei grösseren Stützenweiten oder grösseren Auflasten sind Spriessungen notwendig. Dabei wird das Weiterarbeiten in den unteren Stockwerken behindert. Über die Betonplatte werden Kräfte auf die Binder abgetragen. Anhand dieser Lasten lassen sich die benötigten Träger dimensionieren. Die genauen Berechnungen sind in Anhang 2 abgelegt. Für die beiden Systeme kommen folgende Träger zum Einsatz.

	Zweifeldträger	Einfeldträger
Ausgewählter Träger	HEA 500 S235	IPE 500 S235

Tabelle 3 Ausgewählte Träger für Blechverbunddecke

3.1.4 Ökobilanz Betonverbunddecke

Verglichen wird der Zweifeldträger mit der Stützenweite von drei Metern mit dem Dreifeldträger mit der Stützenweite von zwei Metern. Der Grundriss der Systeme ist in Abbildung 1 und Abbildung 2 zu sehen. Die pink eingefärbte Fläche ist das zu betrachtende Feld. Die Binder verlaufen vertikal und sind zehn Meter lang.

Die Einwirkungen werden vereinfacht gleichmäßig auf die Binder verteilt.

Der Aufbau der Betonverbunddecke ist in Abbildung 3 dargestellt. Um Risse zu vermeiden und die Biegung über den Bindern aufzunehmen wird eine obere Bewehrung eingelegt. Vereinfacht für die Ökobilanz wird der Bewehrungsgehalt mit 0.5 % des Betonvolumens gewählt.

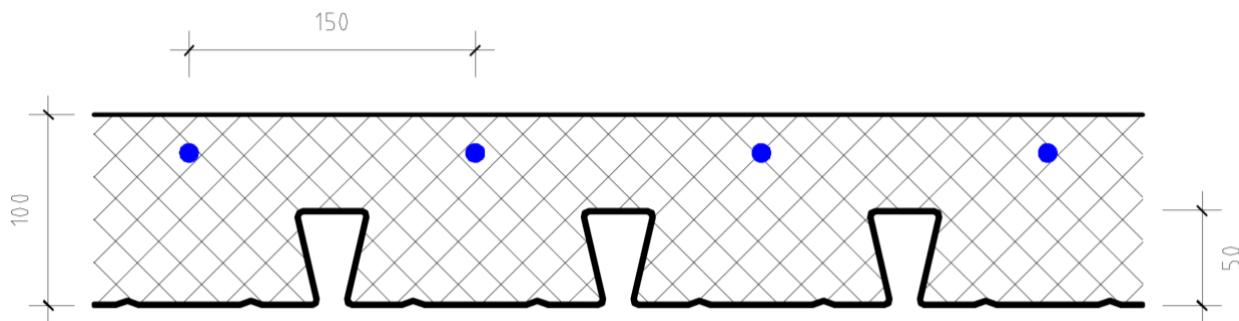


Abbildung 3 Querschnitt Blechverbunddecke mit Längsbewehrung

In der Tabelle 4 sind die Umweltbelastungspunkte der beiden Deckensysteme aufgelistet. Die Unterschiede liegen hauptsächlich auf die Einsparung von fünf Zentimetern Beton.

	Zweifeldträger	Dreifeldträger
UBP Beton ^{1,2}	3'187'800	2'125'200
UBP Bewehrung ^{3,4}	1'035'023	690'015
UBP Blech	3'509'820	3'509'820
UBP Binder	4'030'000	3'537'300
UBP gesamt	11'762'643	9'862'335

¹ Betonrohdichte 2300 kg/m³ (KBOB et al., 2016)

² 10m*6m*Betonstärke

³ 0.5% der Betonfläche

⁴ Armierungsstahl 7850 kg/m³ (KBOB et al., 2016)

Tabelle 4 Zusammenstellung UBP Blechverbunddecke

Die Ökobilanz zeigt, dass es sinnvoll ist, viele Stahlbinder von einer Länge von zehn Metern einzusetzen und dafür die Betondecke filigraner zu halten. Die ganze Herleitung der Ökobilanz ist in Anhang 3 einsehbar.

3.2 Holzdecke / Holz-Beton-Verbunddecke

Wie im Kapitel 2.1.2 erläutert, werden verschiedene Deckensystem im Holzbau oder im Holz-Beton-Verbundbau untersucht. Jedes Deckensystem besitzt verschiedene Baumaterialien und Kubaturen, welche unterschiedliche Lastfälle nach sich zieht.

Die beiden statischen Grundsysteme sind in Abbildung 4 und in Abbildung 5 dargestellt.

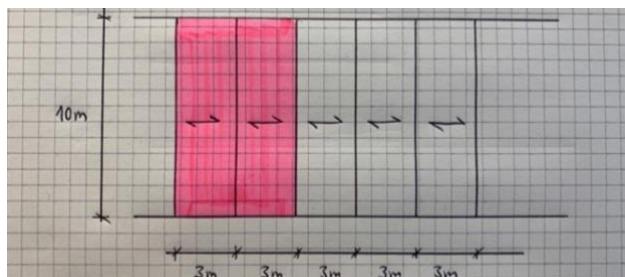


Abbildung 4 System Zweifeldträger | Stützenweite 3m

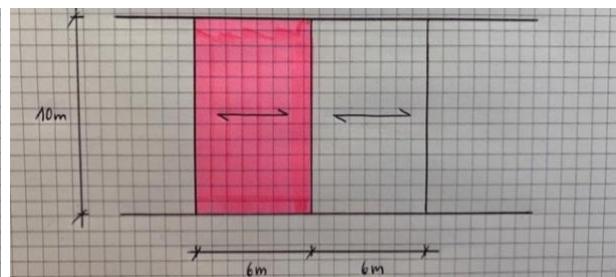


Abbildung 5 System Einfeldträger | Stützenweite 6m

Folgende Deckensysteme werden dabei untersucht:

1. Holzbinder, Vollquerschnittholz Zweifeldträger

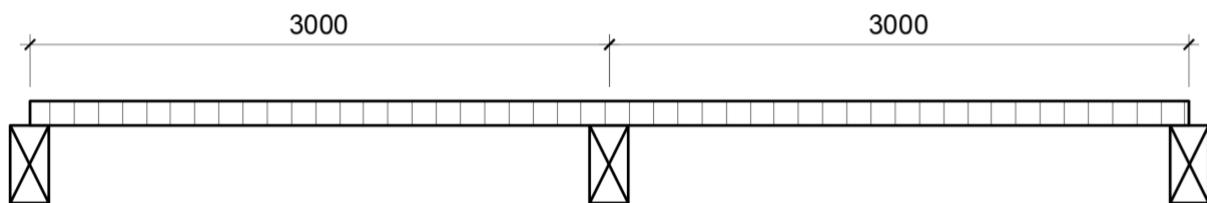


Abbildung 6 Holzbau Deckensystem 1

2. Holzbinder, Vollholzdecke Einfeldträger

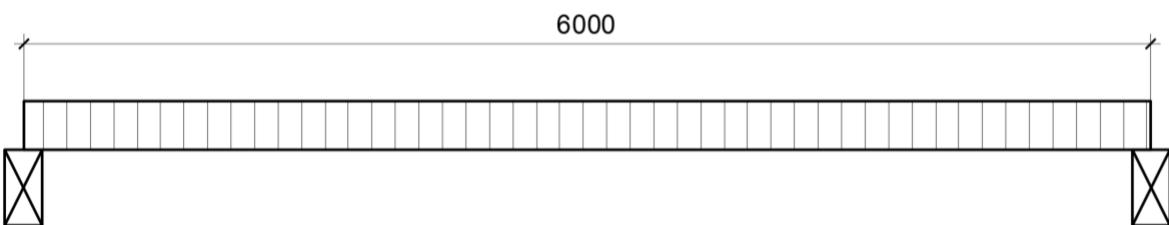


Abbildung 7 Holzbau Deckensystem 2

3. Holzbinder, Balkenlage, Dreischichtplatte

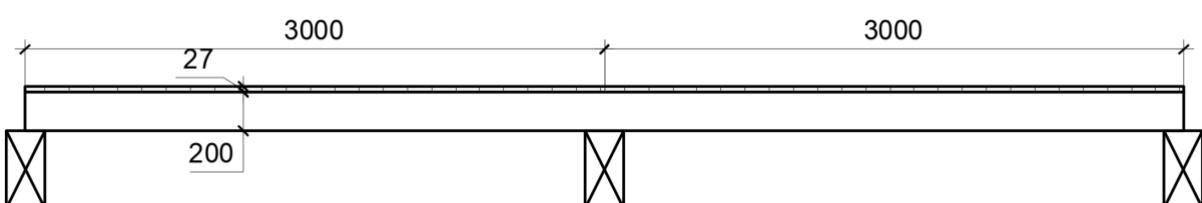


Abbildung 8 Holzbau Deckensystem 3

4. Holzbinder, Holz-Beton-Verbundbau

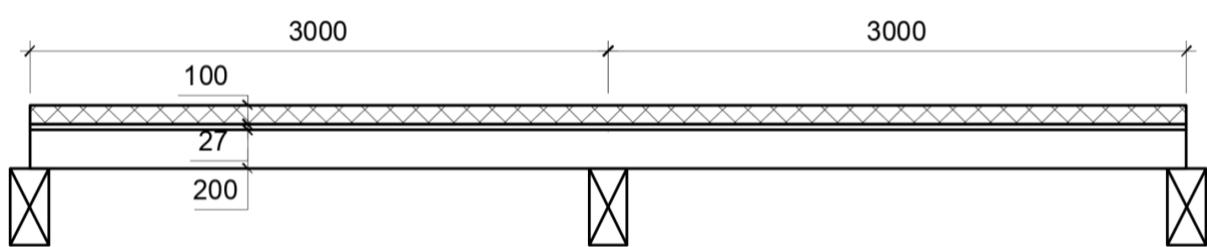


Abbildung 9 Holzbau Deckensystem 4

3.2.1 Holzbinder, Vollholzdecke Einfeld- und Zweifeldträger (System 1 & 2)

3.2.1.1 Einwirkungen

Nachstehend die ständigen, charakteristischen Einwirkungen. Als Abschätzung dient die Holzbautabelle (Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, 2021). Als Rohdichte des Holzes kommt 385 kg/m³ zum Einsatz.

Eigengewicht Einfeldträger	0.5 kN/m ²	(Voll-QS 1000/150)
Eigengewicht Zweifeldträger	1.0 kN/m ²	(Voll-QS 1000/240)
Ständige Auflasten	2.0 kN/m ²	(Überzug, Schallschutz, Brandschutz, Installationen)

Für die Nutzlast wird wiederum 5 kN/m² in Rechnung gestellt.

3.2.1.2 Schnittkräfte, Dimensionierung

Die Schnittkräfte werden auf dem Bemessungsniveau gerechnet. Wiederum wird für die Durchbiegung der seltene Lastfall angenommen. Weil das Holz positive wie auch negative Momente aufnehmen muss, ist nicht das maximale Feldmoment massgebend, sondern das absolute maximale Moment. Dies liegt über der mittleren Stütze. Darum wird die Nutzlast über jedem Feld angesetzt. Aufgrund des kleinen Elastizitätsmoduls gegenüber anderen Materialien, biegt sich Holz stärker durch. Dadurch ist für die Dimensionierung die Gebrauchstauglichkeit massgebend.

In beiden Fällen erfüllt der angenommene Querschnitt den Nachweis.

Aufgrund der Annahme, dass die Decke durchlaufend ist und die Binderabstände jeweils gleich sind, wirkt auf jeden Binder eine gleichmässige Streckenlast. Für den Zweifeldträger kommt ein BSH GL24h 220/920 und für den Einfeldträger ein BSH GL24h 220/1240 zum Einsatz. Vor allem die Dimensionen beim Einfeldträger sind beachtlich und vermutlich für die Praxis ungeeignet.

Die vollständigen Berechnungen sind in Anhang 4 abgelegt.

3.2.1.3 Ökobilanz

Anhand der Dimensionierung lassen sich die Umweltbelastungspunkte jeder Decke berechnen. In der Tabelle 5 ist die Ökobilanz dargestellt. Die komplette Berechnung ist in Anhang 5 ersichtlich. Die Zahlen zeigen, dass die Anordnung von mehr Bindern eine massive Reduktion der Umweltbelastungspunkte nach sich zieht. Zudem ist die Decke filigraner.

	Zweifeldträger	Einfeldträger
UBP Vollholzdecke	1'014'090	2'433'816
UBP Binder	684'173	461'073
UBP gesamt	1'698'263	2'894'889

Tabelle 5 Ökobilanz Vollholzdecke

3.2.2 Holzbinder, Balkenlage, Dreischichtplatte (System 3)

3.2.2.1 Einwirkungen

Die Einwirkungen werden folgendermassen angesetzt. Für die Vordimensionierung dient die Holzbautabelle (Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, 2021).

Eigengewicht Einfeldträger	0.2 kN/m ²	(BSH GL24h 160/200)
Eigengewicht Zweifeldträger	0.4 kN/m ²	(BSH GL24h 160/400)
Ständige Auflasten	2.0 kN/m ²	(Überzug, Schallschutz, Brandschutz, Installationen)

Für die Nutzlast wird wiederum 5 kN/m² in Rechnung gestellt.

3.2.2.2 Schnittkräfte, Dimensionierung

Es gilt das Gleiche wie im Kapitel 3.2.1.2. Als Sprungmass wird 0.7 m angenommen. Beim Einfeldträger erfüllt der gewählte Balken nicht die Nachweise. Es wird ein BSH GL24h 160/440 benötigt. Beim Einfeldträger reicht der angenommene Balken aus. Wie auch bei der Vollholzdecke besitzen die Binder beim Einfeldträger eine grosse Höhe von 1200 mm.

Die vollständigen Berechnungen sind in Anhang 6 abgelegt.

3.2.2.3 Ökobilanz

Die Ökobilanz ist im Anhang 7 zu finden. Die wichtigsten Zwischenresultate sind in Tabelle 6 ersichtlich. Die Dreischichtplatten sind bei beiden Systemen die Gleichen. Beim Zweifeldträger kommt ein Binder mehr zum Einsatz. Darum ist dieser Wert höher. Die Balkenlage ist beim Einfeldträger deutlich höher, was sich bei den Umweltbelastungspunkten zeigt.

	Zweifeldträger	Einfeldträger
UBP Balkenlage	466'481	1'024'231
UBP Dreischichtplatte	466'137	466'137
UBP Binder	684'173	446'200
UBP gesamt	1'616'791	1'936'568

Tabelle 6 Zusammenstellung Ökobilanz Balkenlagendecke

3.2.3 Holzbinder, Holz-Beton-Verbunddecke (System 4)

3.2.3.1 Einwirkungen

Die Einwirkungen werden folgendermassen angesetzt:

Eigengewicht Balkenlage	0.1 kN/m ²	(BSH GL24h 160/200, Sprungmass 2 m)
Eigengewicht Betondecke	2.5 kN/m ²	(C25/30, 100 mm Stärke)
Ständige Auflasten	2.0 kN/m ²	(Überzug, Schallschutz, Brandschutz, Installationen)

Für die Nutzlast wird wiederum 5 kN/m² in Rechnung gestellt.

3.2.3.2 Schnittkräfte, Dimensionierung

Die Schnittkräfte werden auf dem Bemessungsniveau gerechnet. Das statische System ist ein Zweifeldträger mit einer Stützenweite von drei Metern. Zwischen Balkenlage und Betonplatte kommt eine 27 mm Dreischichtplatte zum Einsatz, welche auch gleich als Schalung dient. Holzschrauben werden als Schubverbindung zwischen Holz und Beton verwendet. Eine Biegebewehrung ist nicht notwendig. Die Zugkräfte werden von der Balkenlage übernommen. Die in Kapitel 3.2.3.1 angenommenen Balken- und Betondimensionen erfüllen den Tragsicherheitsnachweis. Brettschichtholz GL24h 220/920 kommen als Binder zum Einsatz. Die komplette Berechnung ist in Anhang 8 abgelegt.

3.2.3.3 Ökobilanz

Die Herleitung der Ökobilanz ist in Anhang 9 ersichtlich. Die Resultate der einzelnen Elemente der Decke ist in Tabelle 7 zu sehen. Die Dreischichtplatte wird als verlorene Schalung gleich verwendet und bildet so die Untersicht des Betons. Die Bewehrung soll die Rissbildung verhindern. Zudem muss über dem mittleren Auflager wegen des negativen Momentes eine Biegebewehrung eingelegt werden. Für mehr als die Hälfte der Umweltbelastungspunkten ist der Beton verantwortlich.

		Bemerkung
UBP Balkenlage	162'254	
UBP Dreischichtplatte	359'591	27mm als Schalung
UBP Beton	2'125'200	
UBP Bewehrung	690'015	0.5% von Betonvolumen
UBP Binder	684'173	

UBP gesamt	4'021'234	
------------	-----------	--

Tabelle 7 Ökobilanz Holz-Beton-Verbunddecke

3.3 Ökobilanz

Die Ökobilanzen der einzelnen Decken sind in der Tabelle 8 zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass die Blechverbunddecken (BVD) gegenüber den Holzdecken die Umwelt mehr belasten. Dies liegt vor allem an den Deckenträgern und den Holoribblechen. Dies fällt auch bei der Begutachtung der KBOB Daten auf. Die UBP der Metallbaustoffe sind markant höher als die der Holzbaustoffe oder des Betons. Beton hat mit 154 UBP pro Kilogramm eine tiefe Belastung. Aufgrund des hohen Materialbedarfes fällt der Beton aber dennoch stark ins Gewicht. Wie viel die einzelnen Elemente die Ökobilanz der Verbunddecke belasten ist in Tabelle 8 aufgelistet. In Tabelle 9 ist ersichtlich, welches Bauelement die Ökobilanz am meisten beeinflusst (rot markiert). In der untersten Zeile sind die Deckensysteme mit der ökologisch besten Decke verglichen. Es ist beachtlich, dass die gleich grosse Decke als Holoribdecke sechs bis siebenmal mehr die Umwelt belastet, wie eine Holzdecke.

	BVD ZFT 150mm Beton	BVD DFT 100mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton-Verbund
Binder	4'030'000	3'537'300	684'173	461'073	684'173	446'200	684'173
Holorib	3'509'820	3'509'820					
Beton	3'187'800	2'125'200					2'125'200
Armierung	1'035'023	690'015					690'015
Vollholz			1'014'090	2'433'816			
Balkenlage					466'481	1'024'231	162'254
DSP					466'137	466'137	359'591
UBP gesamt	11'762'643	9'862'335	1'698'263	2'894'889	1'616'791	1'936'568	4'021'234

Tabelle 8 Ökobilanz Vergleich absolute UBP Zahlen

	BvD DFT 100mm Beton	BvD DFT 260mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton-Verbund
Binder	34.3%	35.9%	40.3%	15.9%	42.3%	23.0%	17.0%
Holorib	29.8%	35.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Beton	27.1%	21.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	52.8%
Armierung	8.8%	7.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	17.2%
Vollholz	0.0%	0.0%	59.7%	84.1%	0.0%	0.0%	0.0%
Balkenlage	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.9%	52.9%	4.0%
DSP	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.8%	24.1%	8.9%
Vergleich zum niedrigsten	728%	610%	105%	179%	100%	120%	249%

Tabelle 9 Ökobilanz Vergleich Einwirkungen

Neben den Umweltbelastungspunkten sind auch die Teilbereiche, graue Energie und Treibhausgasemissionen von grossem Interesse. Die nachfolgenden beiden Grafiken zeigen diese beiden Bereiche.

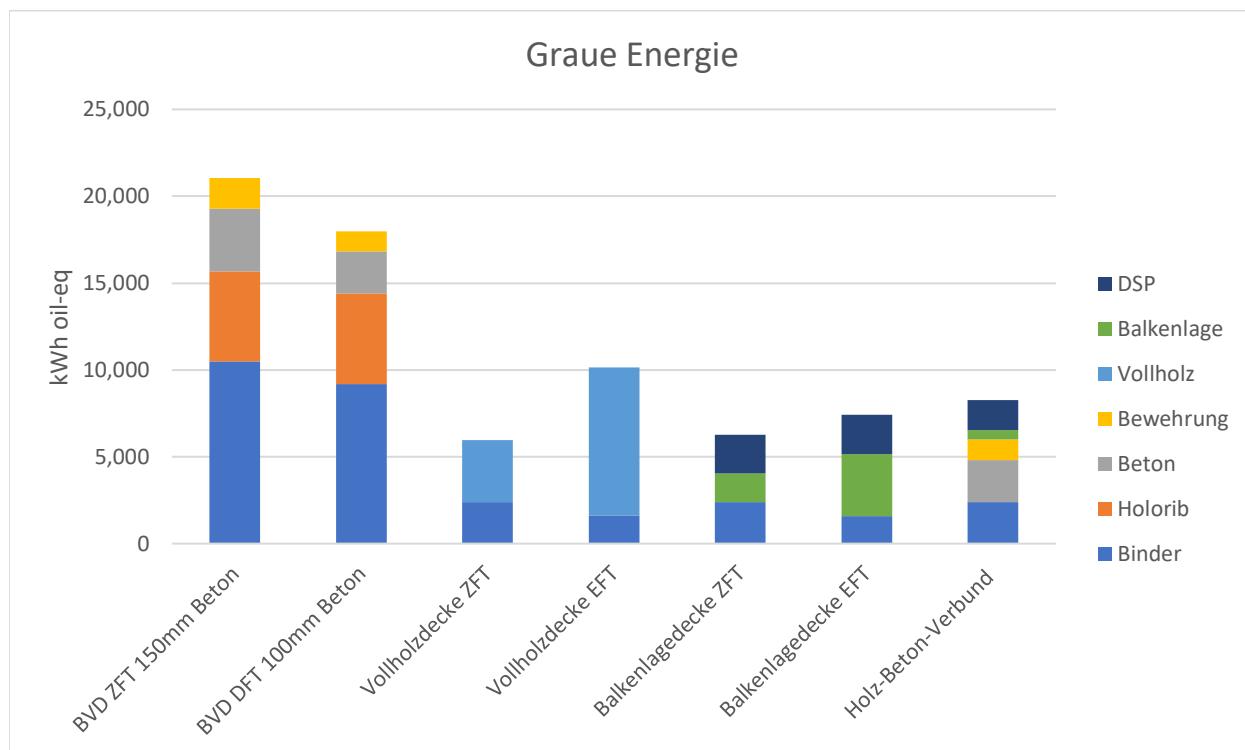


Abbildung 10 Graue Energie der verschiedenen Deckensystemen

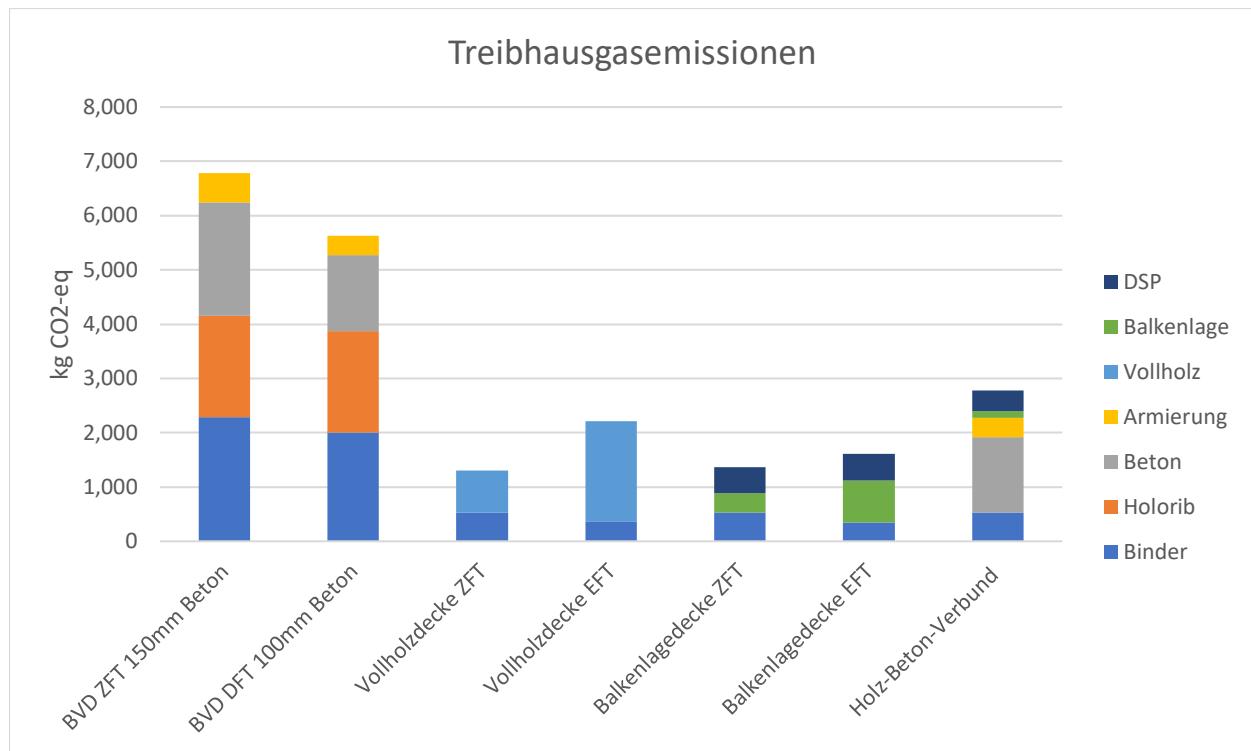


Abbildung 11 Treibhausgasemissionen der verschiedenen Deckensystemen

Auch bei der grauen Energie und den Treibhausgasemissionen schneidet die Stahl-Beton-Verbunddecke am schlechtesten ab. Interessant ist aber, dass die Vollholzdecke im Zweifeldträgersystem in beiden Kategorien besser abschneidet als die Balkenlagendecke. Bei der Balkenlagendecke beeinflusst vor allem die Dreischichtplatte das Resultat. Wieso die Balkenlagendecke insgesamt besser abschneidet, liegt wohl an dem geringeren Materialbedarf.

Durch Optimierungen der einzelnen Deckensystemen lässt sich die Umweltbelastung reduzieren. Aufgrund der sehr grossen Unterschiede zwischen Betondecken und Holzdecken spielt das auf dieses Beispiel aber keine grosse Rolle. Die Blechverbunddecke wird bei jeder Variante umweltschädlicher sein als die Holzdecken.

Was noch einen Unterschied ausmachen kann, ist die Berücksichtigung der fehlenden Elemente. Die nachstehenden Prozesse sind nicht in der Berechnung der Umweltbelastungspunkte enthalten (SIA 2032, 2020).

- Transport ab Fabrik
- Verarbeitung auf der Baustelle
- Evtl. notwendiger Unterhalt während der Nutzung

Vor allem der Transport kann die Ökobilanz stark prägen. Um dies zu illustrieren, nachstehend ein Beispiel mit Holz aus Polen. Behandelt wird die Vollholzdecke im Zweifeldträgersystem

- 3.9 t Holz aus Polen. Annahme polnisch-weissrussische Grenze
- Weg bis Basel 1600 km
- 214 UBP pro tkm für Lastwagen 32-40 t

→ Ergibt 1'335'360 UBP

Die 1.34 Mio. UBP sind fast gleichviele wie die eigentliche Ware. Darum ist es wichtig, sich beim Lieferanten über die Herkunft des Holzes zu erkundigen. Selbstverständlich zählt dies auch für die anderen Materialien.

Die komplette Zusammenstellung der Ökobilanz ist in Anhang 10 abgelegt.

3.4 Flussdiagramm

Der heutige Planungsprozess beginnt bei einer Person mit einem Wunsch nach einem neuen Gebäude. Mit einem Architekturbüro werden ein erster Entwurf oder mehrere Entwürfe erstellt. Die Wahl von Materialien und der Tragwerksentwurf ist noch nicht Teil dieses Arbeitsschrittes. Der Entscheid, welchen Entwurf weiterverfolgt wird, kann andauern. Die Entwürfe gehen zwischen Bauherrin und dem Architekten hin und her und immer wieder müssen Wünsche vom Auftraggebenden umgesetzt werden. Steht fest, welcher Entwurf weiterverfolgt wird, kann mit dem Vorprojekt begonnen werden. Ein Ingenieurbüro wird engagiert und hier beginnt die Arbeit, welche Thema dieser Thesis ist. Welches Tragsystem soll eingesetzt und welche Materialien sollen verbaut werden. Ziel dabei muss sein, ein möglichst ökologisches Gebäude zu bauen.

Für die Findung des ökologischsten Deckensystems bedarf es eines Variantenstudiums mit mehreren Deckensystemen und -materialien. Dieser Prozess ist Handarbeit und aufwändig. Für jedes Deckensystem braucht es eine Vordimensionierung und eine Ökobilanz. Sind alle Deckensysteme berechnet, können die Ökobilanzdaten miteinander verglichen werden. Weiter geht es mit der Optimierung der einzelnen Deckensysteme. Beispielsweise können folgende Parameter verändert werden:

- Binderabstand (Stahl- und Holzträger)
- Betonstärke
- Festigkeit Beton
- Superholorib statt Holorib
- Montageunterstützung beim Betonieren von Blechbetondecken
- Balkenlage enger oder weiter

Sind die Deckensysteme nach bestem Wissen optimiert, kann das Tragwerk und die Materialauswahl an das Architektenbüro und dem Auftraggebenden zurückgegeben werden. Aufgrund dessen, dass der Auftraggebende mit dem ersten Entwurf des Vorprojektes meist nicht zufrieden ist, kommt der Entwurf wieder über die Architekten zurück zum Ingenieur. Da es gewöhnlich nicht nur kleine Änderungen sind, sondern Geometrie-, Nutzung- oder Preisvorstellungsänderungen, kann das Ganze wieder von vorne beginnen.

Es sind viele Parameter und die Findung nach dem optimalen Deckensystem kann langwierig sein. Aufgrund der vielen Parameter handelt es sich um eine Optimierungsaufgabe. Bei einer Entscheidungsfindung gibt es einen Entscheidungsspielraum. Da dieser nicht unbegrenzt ist, gilt es Entscheidungsrestriktionen zu beachten, in dieser Arbeit oft Parameter genannt. Um unterschiedliche Entscheidungen bezüglich ihres Resultates zu vergleichen, muss eine spezifische Zielsetzung festgelegt werden (Papageorgiou et al., 2015). Papageorgiou et al. (2015) definieren die optimale Entscheidungsfindung wie folgt: "Unter Berücksichtigung der Entscheidungsrestriktionen und -auswirkungen, bestimmt diejenige Entscheidung, die die spezifizierte Zielsetzung am ehesten erfüllt."

Der Ist-Prozess kann somit gar nicht die optimale Lösung finden, ausser es werden Arbeitsstunden investiert, welche sehr kostspielig sind.

Der Ist-Prozess ist im Anhang 11 als Business Process Model and Notation (BPMN) abgelegt. Zum einen ist eine Gesamtübersicht über den gesamten Ablauf einer Projektierung eines Vorprojektes, auf der anderen Seite ist der Arbeitsablauf eines Ingenieurs detailliert abgelegt.

Dazu sind auch gleich die Wartezeiten der einzelnen Schritte angeschrieben. Vor allem das Hin- und Herschieben des Projektes zwischen Person, die den Bau in Auftrag gibt, Architekturbüro und dem Ingenieurbüro und die Plananpassungen kosten Zeit. Verglichen mit früher und dem Einsatz von BIM und anderen virtuellen Planungshilfen ist die Zeiteinbusse nicht mehr so gravierend. Trotzdem kann ein Tragwerk nicht so einfach verändert werden.

Interessant für Planende ist es, ein Werkzeug zu besitzen, welche verschiedene Deckensysteme automatisch nach Entscheidungsrestriktionen vergleicht und das Beste zurückgibt. Ziel muss es sein, das ökologischste Deckensystem zurückzubekommen, welches folgende Parameter berücksichtigt:

- Nutzlast, ständige Auflasten
- Geometrie der Decke
- UBP Baumaterialien

Die Entwicklung dieses Werkzeuges ist der zentrale Teil dieser Thesis. Wie die Umsetzung aussieht, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

4 Soll-Prozess

Der neue Prozess soll die Defizite des Ist-Prozesses verbessern. Gerade das iterative Finden von passenden Profilen oder Deckenaufbauten soll automatisiert werden. Das neue Werkzeug wird mit Grasshopper entwickelt. Grasshopper ist eine visuelle Programmiersprache, mit welcher viele Arbeitsschritte automatisiert werden können.

Das Werkzeug für das Finden des bestens Deckensystems wird unterteilt. Das Finden der optimalen Blechbetonverbunddecke und der Holzdecke wird einzeln behandelt. Danach können die Ökobilanzen miteinander verglichen werden.

Im Unterschied zum Ist-Prozess, soll die Anordnung der Binder, also der sekundären Tragschicht automatisch an die Geometrie des Rechteckes angepasst werden. Die Binder sollen dabei die kurze Seite des Rechteckes überspannen. Rechtwinklig dazu verläuft dann die eigentliche Decke, also die Blechverbund- und die Balkenlagendecke.

Der Berechnungsvorgang in Grasshopper wird in den nachstehenden Kapiteln beschrieben. Gleichzeitig hilft ein Flussdiagramm den Vorgang zu visualisieren. Es wird jeweils immer nur ein Ausschnitt des Diagrammes eingefügt. Das komplette Flussdiagramm ist im Anhang 12 abgelegt.

Die Grösse des Rechteckes ist 10 x 6 m. Anhand dieses Rechtecks wird der Workflow beschrieben.

Die Handhabung und die korrekte Bedienung des Werkzeuges sind in einer Anleitung beschrieben.

Dieses Dokument wird mit dem Werkzeug in einem ZIP-File abgeben. Zudem befindet sich die Anleitung im Anhang 13.

4.1 Blechverbunddecke

4.1.1 Eingabewerte und Voreinstellungen

Wie im Ist-Prozess müssen zu Beginn diverse Parameter abgeklärt und definiert werden. Diese müssen dann manuell eingegeben werden. Um folgende Parameter handelt es sich:

- Annahme Betonstärke für Eigengewicht
- Eigengewicht Blech (Annahme 0.2 kN/m²)
- Ständige Auflasten
- Nutzlast (Auswahl aus SIA 261 oder manuelle Eingabe)
- Stahlsorte Blech (üblicherweise 320 N/mm² oder 350 N/mm² (SIA 264, 2014))
- Stahlsorte Binder
- Betonsorte

Als mögliches Holoribblech kommt das HR 51/600 1.00 mm zum Einsatz (Montana Bausysteme AG, 2016). Die weiteren Holoribbleche mit der Stärke 0.75 mm und 0.88 mm werden vernachlässigt. Zu viele Arbeitsschritte hängen vom gewählten Profil ab, was die automatischen Berechnungen erschweren. Für die Ökobilanz spielt es kaum eine Rolle. So wird auf der einen Seite bei dickerem Blech Beton eingespart. Auf der anderen Seite wird aber auch mehr Blech verwendet. Diese beiden Werte heben sich gegenseitig auf. Zudem können mit dem 1 mm Blech grössere Felder überspannt werden. Die maximale Spannweite wird mit vier Metern begrenzt, die minimale Spannweite mit einem Meter. Weitere Überspannungen wären möglich. Die Betonplatte würde aber stark werden, was wiederum ein hohes Eigengewicht mit sich bringt. Weite Felder mit starker Betondecke besitzen eine schlechtere

Ökobilanz wie kurze Felder mit filigraner Betonplatte (siehe Kapitel 3.3).

Als Eingabe benötigt das Werkzeug eine rechtwinklige Fläche. Die Länge und die Breite können über einen Number-Slider definiert werden. Die Genauigkeit dabei beträgt einen Dezimeter. Jede Fläche besitzt in Rhino ein eigenes Koordinatensystem, die U- und V-Richtung in der Ebene sowie eine Normale. Damit die Binder auch immer die kurze Seite überspannen muss die U- und V-Richtung kontrolliert und falls nötig transformiert werden.

Alle Berechnungen erfolgen in den Einheiten Millimeter und Newton. Die Eingabewerte werden zu Beginn auf diese Einheiten umgerechnet. Einzig für die Findung der Stahlquerschnitte müssen die Werte auf Zentimeter umgewandelt werden, da Karamba3D mit dieser Einheit arbeitet. Karamba3D ist eine Erweiterung von Grasshopper. Es ist ein interaktives, parametrisches Finite-Elemente-Programm. Es ermöglicht die Analyse von 3-dimensionalen Stab- und Schalentragwerken unter beliebigen Lasten (Preisinger, 2022). Mit allen Eingabewerten können die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit bestimmt werden. Dieser Schritt ist nachstehend abgebildet.

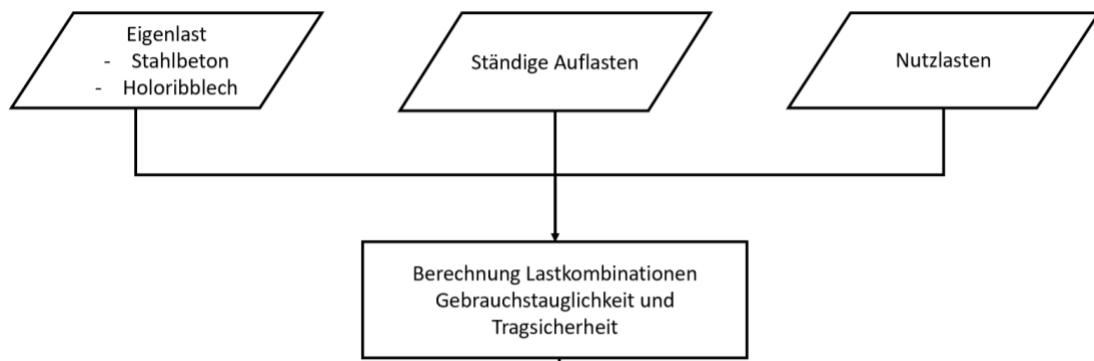


Abbildung 12 Teil 1 Flussdiagramm Holoribblechdecke – Eingabeparameter

4.1.2 Bestimmen Betonstärke | Auswahl Stahlbinder

Analog des Ist-Prozesses wird auch im Soll-Prozess von oben nach unten gearbeitet. Das heisst, in einem ersten Schritt wird die Betonstärke und damit auch die Druckhöhe definiert. Dafür müssen die Sprungmasse der Binder bestimmt werden. Diese errechnen sich mit der Teilung der längeren Rechteckseite durch ganzzahlige Quotienten. Das Sprungmass muss dabei grösser als einen Meter und kleiner als vier Meter sein. Zudem darf die Spannweite nicht grösser als das 26-fache der Druckhöhe sein (SIA 264, 2014). Für jedes Sprungmass muss die Betonstärke bestimmt werden. Die SIA Norm 264 stellt für die Betondecke zwei Bedingungen. Erstens muss die Gesamtbetonstärke grösser als 90 mm sein und zweitens muss die Betonhöhe über der Rippe mindestens 50mm betragen. Aufgrund der eher kurzen Spannweiten ist die zweite Bedingung relevant. Die erste Bedingung ist mit der zweiten sowieso erfüllt, da die Blechhöhe 51 mm ist. Die Zugzone des Holoribbleches HR51 1.00 mm liegt bei 10 mm ab Unterkante Blech. Die Betonstärke wird auf 10 mm aufgerundet.

Mit dieser errechneten Betonstärke sind die Grenzzustände der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit neu bestimmbar.

Mit diesen neuen Grenzzuständen kann für jedes Sprungmass das erforderliche Flächenträgheitsmoment I_y und das plastische Widerstandsmoment $W_{y,pl}$ bestimmt werden. Die Bestimmung erfolgt im Einfeldträgersystem. Die SIA erlaubt dies, wenn über den Auflagern eine ausreichend grosse Bewehrung verlegt wird (SIA 264, 2014). Die Bestimmung vom Flächenträgheitsmoment erfolgt mit dem häufigsten Lastfall. Für die Errechnung der beiden Werte kommen folgende Formeln zum Einsatz.

Erforderliches Flächenträgheitsmoment:

$$I_y = \frac{5}{384} * \frac{q_{SLS} * l^4}{E * w_{max}}$$

Erforderliches plastische Widerstandsmoment:

$$W_{y,pl} = \frac{q_{USL} * l^2 * \gamma_M}{8 * f_y}$$

Liegen die erforderlichen Momente über dem des HEM 1000 Trägers, wird kein Moment ausgegeben. Die Spannweite mit diesem Sprungmass kann mit den herkömmlichen Profilen nicht überspannt werden. Es müssten andere Träger, wie ein Waben- oder ein Fachwerkträger, zum Einsatz kommen. Auf diese Bindertypen wird hier nicht weiter eingegangen. Die Abbildung 13 zeigt den Ablauf bis zu diesem Zeitpunkt. Die Findung der beiden Momente wie auch die Anzahl Binder und die Sprungmasse erfolgt mit Hilfe eines Python Skriptes. Das Skript gibt mehrere Listen aus. Es sind dies je eine Liste mit den erforderlichen Flächenträgheitsmomenten, den erforderlichen statischen Momenten, die Sprungmasse der Binder, die Anzahl Binder und die jeweilige Betonhöhe. Der Grasshopperausschnitt der Ausgabe und aller für die Berechnung notwendigen Eingaben ist in Abbildung 14 zu sehen.

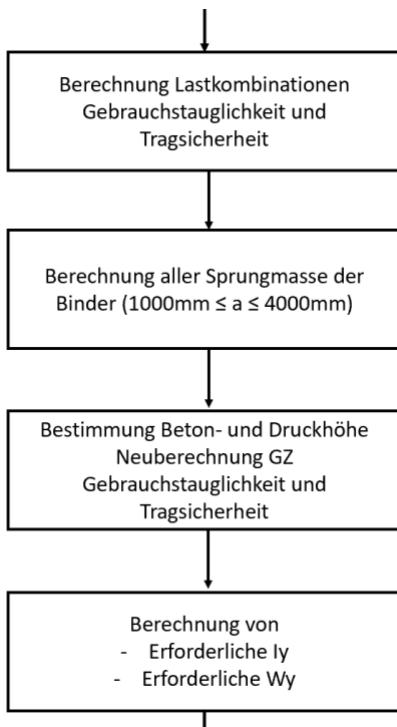


Abbildung 13 Teil 2 Flussdiagramm
Holoribbledecke Berechnung I_y und W_y

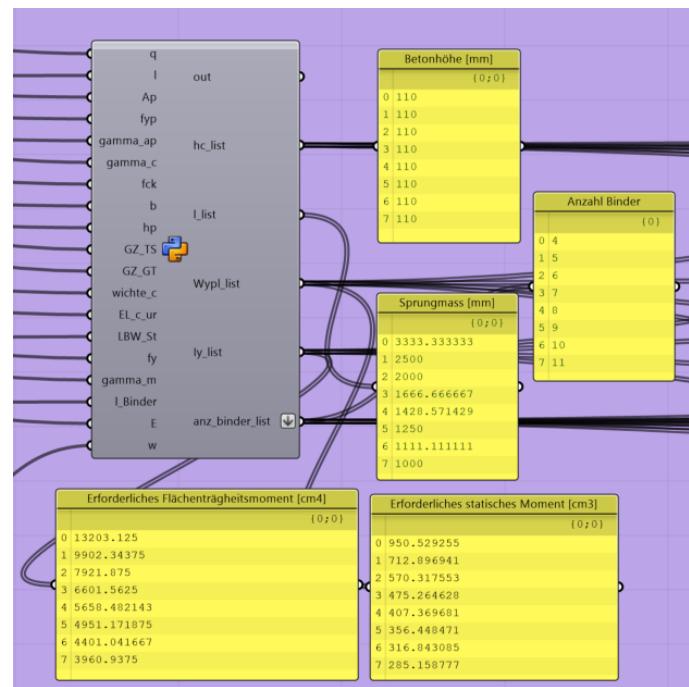


Abbildung 14 Ausschnitt Grasshopper – Ausgabe Python Skript

Die Flächenträgheitsmomente und die Widerstandsmomente werden nun mit allen Momenten der IPE-, HEA-, HEB- und der HEM-Reihe verglichen. Das Profil der jeweiligen Reihe mit dem ähnlichsten Moment wird ausgewählt. Ist das Moment des ausgewählten Profils kleiner als das erforderliche wird eine Profilgröße grösser ausgewählt. Pro Sprungmass werden somit zwei Profile selektiert; eines das die Gebrauchstauglichkeit und eines das die Tragsicherheit erfüllt. Das Profil mit der grösseren Abmessung erfüllt dabei beide Nachweise und wird zur Weiterverarbeitung weitergegeben. Die Umsetzung in Grasshopper ist für die IPE-Reihe in Abbildung 15 zu sehen. Für die anderen drei Profilfamilien erfolgt das Vorgehen analog der IPE Reihe.

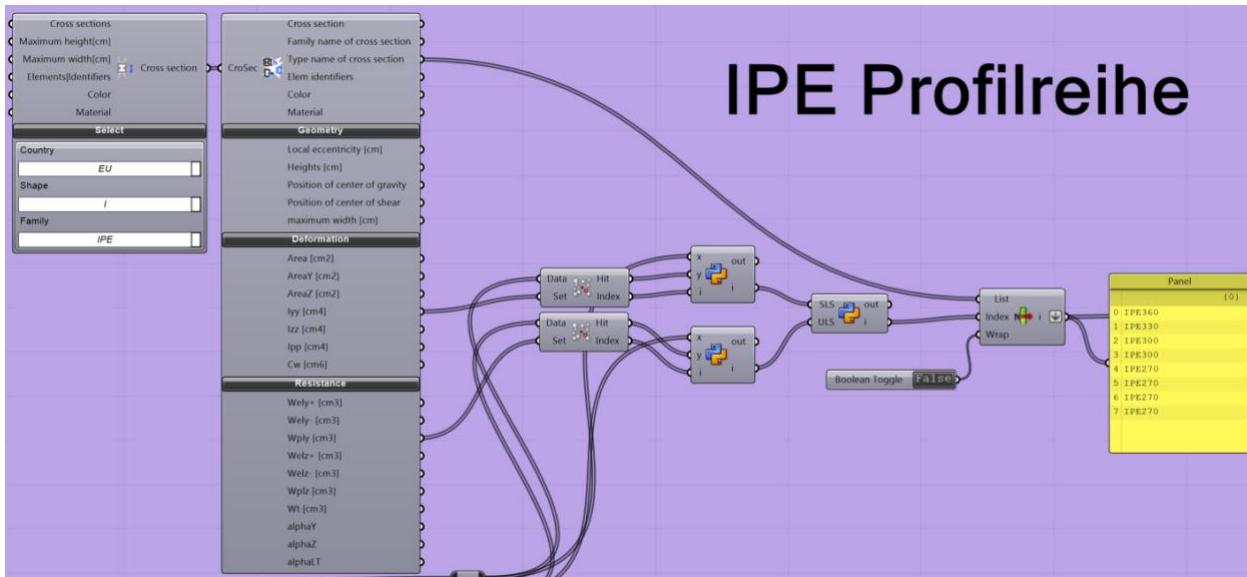


Abbildung 15 Ausschnitt Grasshopper – Findung passendes Profil IPE Reihe

Für alle möglichen Kombinationen werden nun die Stahlvolumen ausgezogen. Diese wiederum werden mit den Umweltbelastungspunkten pro Kilogramm, der grauen Energie in kWh Erdöläquivalent und der Treibhausgasemissionen in kg CO₂ äquivalent der KBOB Liste multipliziert. Alle Resultate werden als CSV-Datei für die Visualisierung der Ökobilanz in Excel exportiert. Das Stahlprofil mit der niedrigsten Umweltbelastung in UBP wird in Rhino visualisiert.

Der komplette Vorgang, von der Berechnung der erforderlichen Momente, über die Findung der passenden Profile bis zum Vergleich der passendsten Profile und der Auswahl der besten Lösung ist nachstehend im dritten Teil des Flussdiagrammes zu sehen.

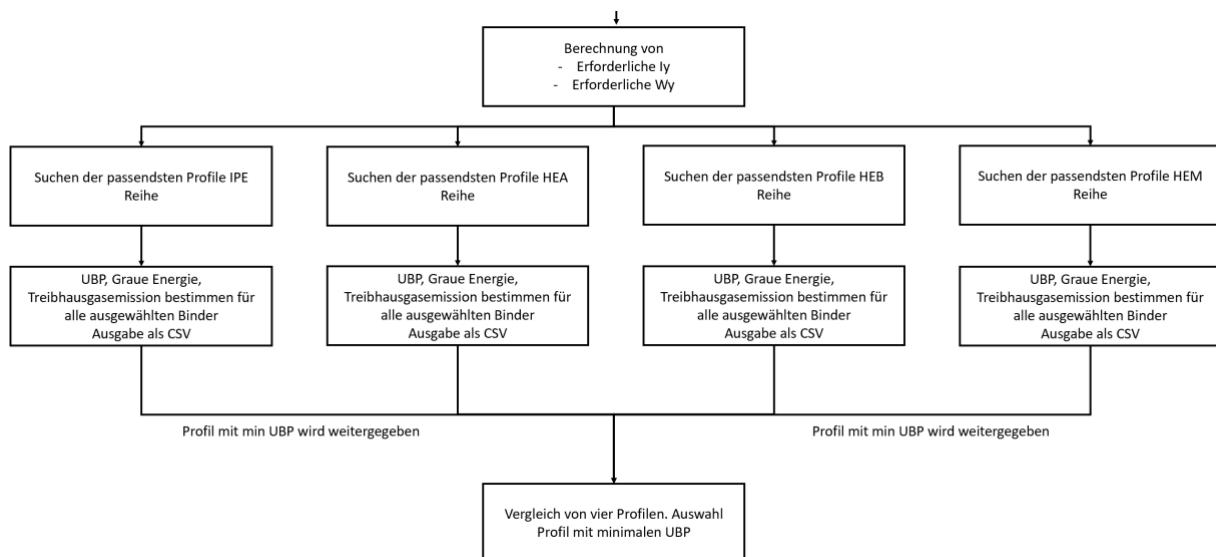


Abbildung 16 Teil 3 Flussdiagramm Holoribdecke – Findung ökologischste Binder

Dadurch, dass die Betonhöhe immer gleich ist und bei allen Systemen das gleiche Holoribblech zum Einsatz kommen, sind für die Ökobilanz rein die Stahlbinder von Bedeutung. Selbstverständlich würde sich die Betonstärke bei grösseren Spannweiten verändern. Dann müssten aber Spriesse beim Betonieren zum Einsatz kommen. Einige Vorteile der Holoribblechdecke gehen so verloren. Darum ist die Spannweite begrenzt.

4.1.3 Darstellung als Modell

Die ökologisch beste Variante wird automatisch in Rhino visualisiert. Die Stahlquerschnitte aller üblichen Stahlquerschnitte der IPE-, HEA-, HEB- und HEM-Reihe sind dem Grasshopperfile hinterlegt. Die

Geometrie des Querschnittes wird an die Anfangspunkte der Binder verschoben und dann in die Richtung des Trägers ausgerichtet. Zudem muss der Querschnitt um die halbe Höhe nach unten versetzt werden, da die Eingabefläche die Oberkante der Träger definiert. Schlussendlich wird die Fläche extrudiert, also entlang der Trägerachse gezogen.

Als zweiter Schritt werden die fiktiven Auflager dargestellt. Sie sind nicht Teil der Aufgabe und sind darum auch nicht korrekt dimensioniert. Die Auflager werden als Wände mit der Höhe von 3 m und einer Breite von 0.25 m dargestellt. Die Stahlträger und die Auflager sind in nachstehender Abbildung dargestellt. Das schwarze Raster, welches über den Träger liegt, ist dabei die Eingabefläche.

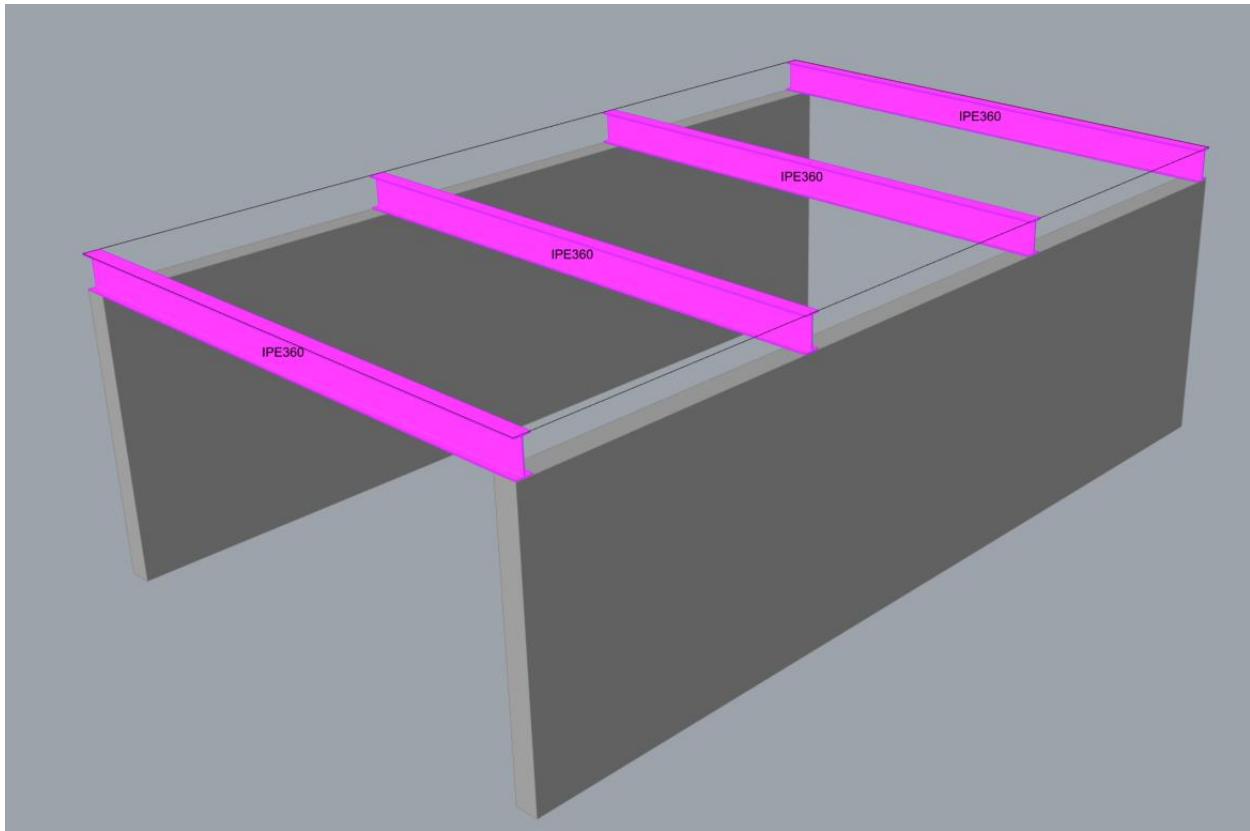


Abbildung 17 Visualisierung Binder und Auflagerwände

Der dritte wie auch der vierte Schritt, also die Darstellung der Holoribbleche und der Betondecke erfolgt identisch. Beide überspannen die lange Seite des Eingaberechtecks. Das heisst die Holoribbleche müssen auf einer der kurzen Seite angeordnet werden. Welche der beiden spielt keine Rolle. Der Holoribblechquerschnitt wird mittels DWG Import in Rhino eingelesen und dann mit dem Geometrieparameterwerkzeug in Grasshopper importiert. Die CAD Datei ist auf der Internetseite der Firma Montana erhältlich. Der Querschnitt ist in Abbildung 18 zu sehen.

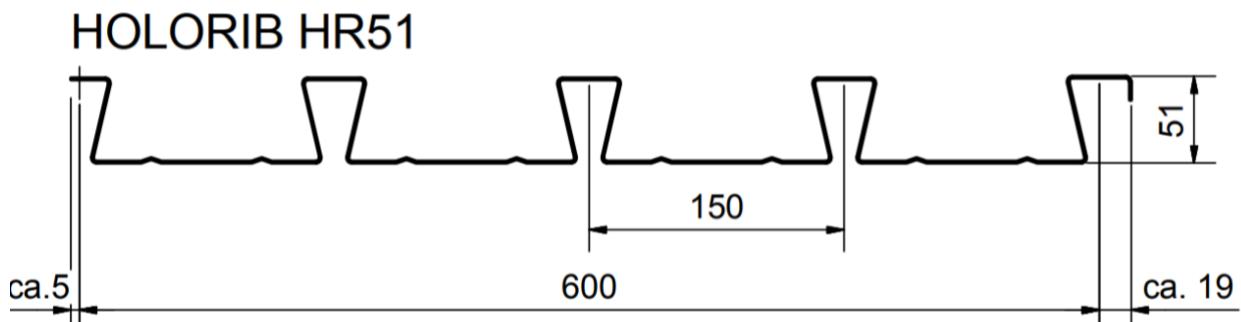


Abbildung 18 Holoribblech HR51 Querschnitt (Montana Bausysteme AG, 2022)

Das Blech ist 624 mm breit. Das Sprungmass, also das Mass, nach welchem sich beim Verlegen die Geometrie wiederholt, beträgt 600 mm. Die Überstände links und rechts dienen zur Verbindung von nebeneinanderliegenden Blechen.

Das Blech wird nach dem Import in Grasshopper auf die kurze Seite des Eingaberechteckes verschoben und an diese Kante ausgerichtet. Der Querschnitt wird alle 600 mm auf der Kante dupliziert. Das letzte Blech ist meistens zu lang und muss am Ende der Kante geschnitten werden. Die Querschnittsfächen aller Bleche werden mit der Länge der Bleche multipliziert. Dies ergibt das Volumen, welches für die Ökobilanz benötigt wird. Sind alle Bleche angeordnet, können die einzelnen Geometrien bis zur gegenüberliegenden Seite extrudiert werden. Es entstehen wie beim Extrudieren der Stahlträger Volumenkörper. Das Resultat ist nachstehend zu sehen.

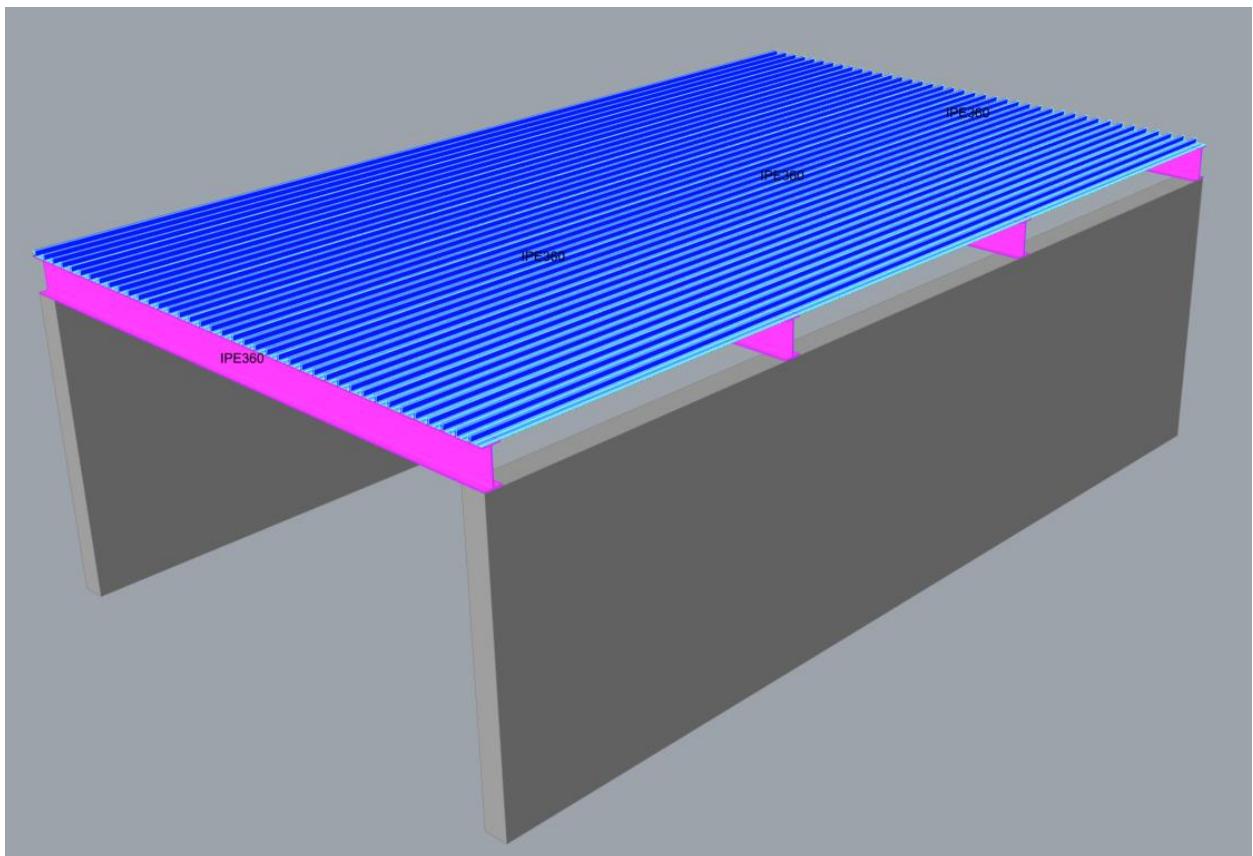


Abbildung 19 Visualisierung Auflager, Träger und Holoribblech (grün)

Der letzte Schritt ist die Darstellung der Betonplatte. Für die Betonplatte sind die Holoribbleche die Schalung und somit ist die Oberkante der Holoribbleche die Unterkante des Betons. Die Visualisierung der Deckenkonstruktion ist in Abbildung 20 zu sehen. Der Beton ist dabei grau markiert.

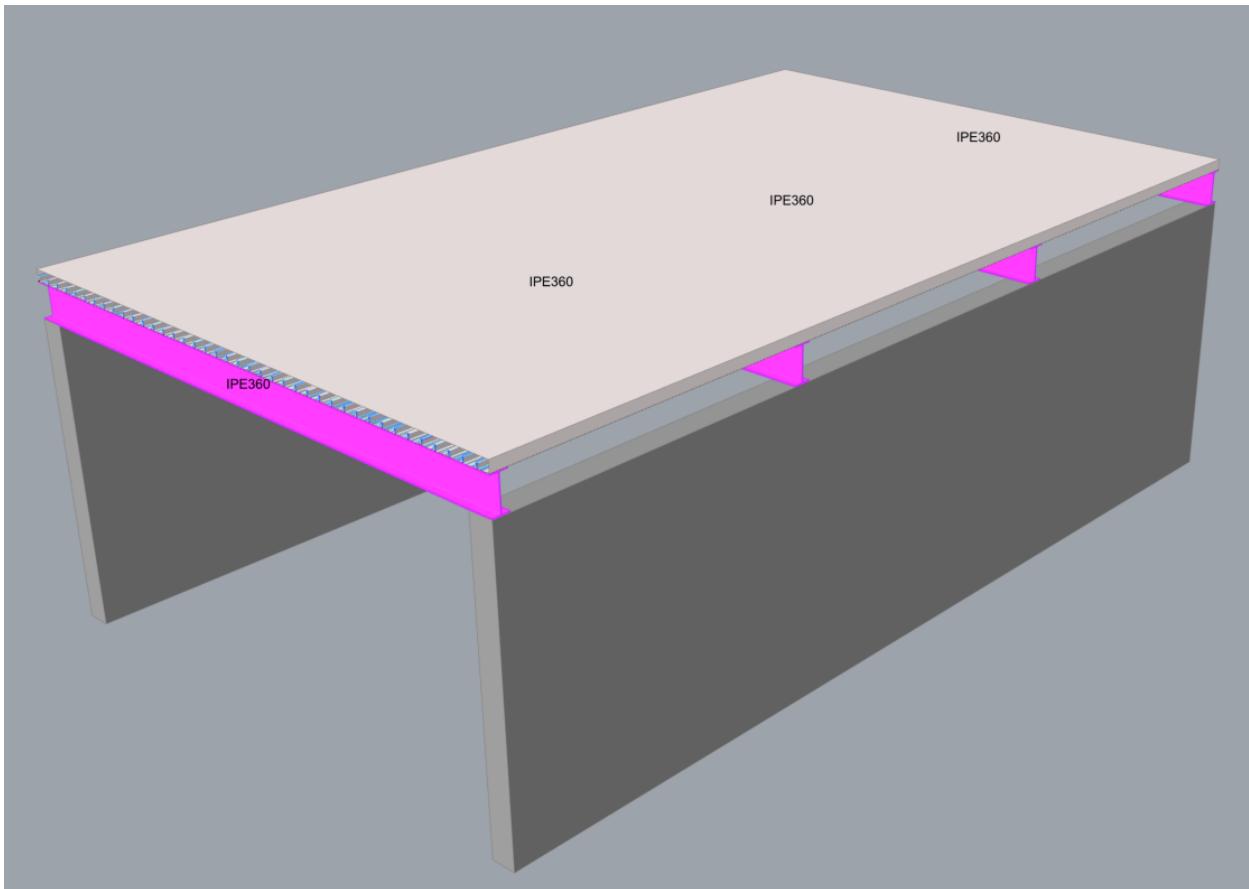


Abbildung 20 Visualisierung komplettes Deckensystem / Betonquader grün

Als Standardvisualisierung ist die ökologischste in Grasshopper eingestellt. Mit einer Dropdown-Liste kann auch ein anderes System visualisiert werden. Es stehen alle möglichen Kombinationen aus 4.1.2 zur Auswahl.

4.1.4 Export Ökobilanz

Der Export der Ökobilanzdaten aller möglichen Kombinationen ist bereits in Kapitel 4.1.2 angedeutet. Dabei werden für alle Bauteile einzeln die Umweltschutzbpunkte, die graue Energie und die Treibhausgase pro Kombination in eine CSV Datei geschrieben. Der Dateiname ist Holoribdecke.csv. Zusätzlich wird noch die visualisierte Variante in ein separates CSV geschrieben. Normalerweise ist dies die ökologisch beste Variante. Wird aber mit Hilfe der Dropdown-Liste eine andere ausgewählt, so wird diese exportiert. Der Name der Datei bleibt aber gleich (Holoribdecke best.csv). Alle CSV-Dateien werden dabei in den Ordner Oekobilanz gespeichert. Diese Datei liegt im selben Ordner wie die Grasshopperdatei. Wie der Ordner auszuschauen hat, ist in Abbildung 21 zu sehen.

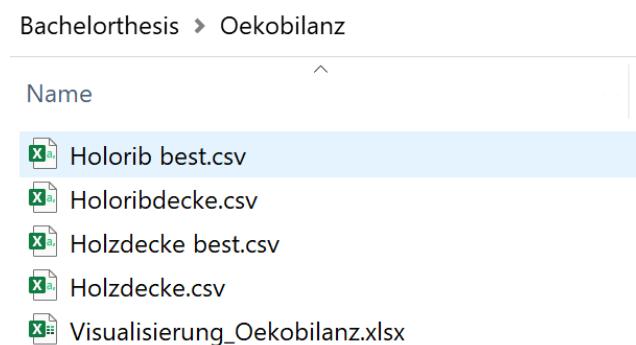


Abbildung 21 Ordnerstruktur Ökobilanz

4.2 Holzdecke

Die Implementierung des Werkzeuges zur Generierung der Holzdecke geschieht im gleichen Grasshopperfile wie die Holoribdecke. Ebenso bleibt die Geometrie der Deckenumrandung gleich. Die Holzdecke ist gegenüber der Holoribdecke parallel um die Breite der Decke in Y-Richtung verschoben. Wie im Kapitel 4.1 begleitet ein Flussdiagramm den Text. Das ganze Flussdiagramm ist in Anhang 12 abgelegt.

4.2.1 Eingabewerte und Voreinstellungen

Wie bereits erwähnt, ist die Geometrie der Deckenumrandung gleich wie bei der Holoribblechdecke. Ebenfalls gleich sind die Lastannahmen. Das eingesetzte Holz, sowohl für die Binder als auch für die Balkenlage ist ein Brettschichtholz GL24h. Das GL24h ist das Holz mit der üblichen Festigkeitsklasse (Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, 2021). Will man trotzdem ein anderes Holz auswählen, kann dies in einer Dropdown-Liste so gewählt werden.

Das Eigengewicht der Balkenlage wird mit 0.3 kN/m^2 und das der Binder mit 0.3 kN/m^2 angenommen. Für alle möglichen Binderabstände kommen drei Sprungmasse der Balkenlage in Frage: 500 mm, 600 mm und 700 mm. Diese drei Masse sind auch laut der Holzbautabelle die üblichen. Als mögliche Querschnitte kommen alle in Frage, welche in der Holzbautabelle 2021 auf Seite 36 und 37 tabelliert sind. Grössere Querschnitte mit einer Breite bis 280 mm und einer Höhe bis 2400 mm sind möglich, werden aber im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Der grösstmögliche Querschnitt ist demnach ein GL24h 220/1120 (Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, 2021).

Über die Balkenlage kommt eine Dreischichtplatte zu liegen. Die Stärke der Dreischichtplatte ist zu Beginn auswählbar. Die eingestellte Standardplatte ist 27 mm stark. Diese reicht für die Angaben diese Vorzeigeobjektes aus. Erforderlich bei einer Gesamtauflast auf d-Niveau von 10.2 kN/m^2 und einem Sprungmass von 700 mm sind knapp 22 mm.

Mit den Eingaben lassen sich die Einwirkungen auf die Balkenlage und auf die Binder auf Bemessungsniveau berechnen. Für beide Einwirkungen gibt es je einen Grenzzustand der Tragsicherheit und einen für die Gebrauchstauglichkeit im häufigen Lastfall.

4.2.2 Dimensionierung Balkenlage

Als Erstes müssen die Binderabstände berechnet werden. Die Binderabstände ergeben sich durch Teilung der langen Seite des Rechteckes durch eine ganze Zahl. Dabei werden alle Quotienten, welche kleiner-gleich 6000 mm und grösser-gleich 2000 mm weitergeben. In diesem Beispiel ergeben sich die Sprungmasse 5000 mm, 3333 mm, 2500 mm und 2000 mm. Die Berechnung der Spannweiten erfolgt mit einem Python Skript.

Mit Hilfe der in Kapitel 4.2.1 berechneten Einwirkungen, den Binderabständen und den Sprungmassen der Balkenlage lassen sich die erforderlichen Flächenträgheits- und der Widerstandsmomente der Balkenlage berechnen. Die Berechnung erfolgt mit den Formeln aus Kapitel 4.1.2. Der Autor nimmt an, dass die Balkenlage über zwei Felder montiert werden. Dadurch erfolgt die Berechnung des Flächenträgheitsmomentes im Zweifeldträgersystem. Die Durchbiegungen sind bedeutend kleiner als die, in einem Einfeldträgersystem. Der Durchbiegungsfaktor ist bei den Eingaben veränderbar. Dies dann, wenn die Balkenlage pro Feld montiert wird.

Es gibt pro Binderabstand und für jedes Sprungmass der Balkenlage eine mögliche Lösung. In diesem Beispiel sind es zwölf verschiedene Lösungen (4 Binderabstände à 3 Sprungmasse).

Die Widerstandsmomente werden einzeln mit allen Widerstandsmomenten der möglichen Balken verglichen. Das Balkenprofil mit dem ähnlichsten Moment wird ausgewählt. Dabei muss das erforderliche Moment kleiner sein als das Vorhandene. Stimmt diese Bedingung nicht, muss eine Profilgrösse grösser gewählt werden.

Jedes Profil muss danach auf seine Gebrauchstauglichkeit geprüft werden. Erfüllt das Profil die Gebrauchstauglichkeit nicht, muss die Höhe um 40 mm erhöht werden. Kann die Höhe nicht mehr erhöht werden, da sie für diese Breite bereits maximal ist, muss die Breite um 20 mm erhöht werden. Dies geschieht so lange, bis das Profil auch die Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Im nächsten Kapitel ist das Beschriebene bildlich in einem Flussdiagramm abgebildet (Abbildung 22).

4.2.3 Dimensionierung Binder

Die Bestimmung der Binderdimensionen geschieht gleich dem der Balkenlage und erfolgt parallel. Über die erforderlichen Flächenträgheitsmomente werden Profile ausgewählt. Diese wiederum müssen einer Gebrauchstauglichkeitsprüfung unterzogen werden. Ist diese Prüfung nicht erfüllt muss das Profil zuerst in der Höhe dann allenfalls in der Breite erhöht werden. Dies geschieht so lange, bis beide Nachweise erfüllt sind. Übersteigt die Binderhöhe 1120 mm oder die in der Eingabe definierte Maximalhöhe, so gibt das Werkzeug keine Lösung zurück. Pro Binderabstand sollte ein Profil rauskommen. In diesem Beispiel sind dies vier Profile. Bei grossen Spannweiten ist es aber auch möglich, dass nur für sehr kleine Sprungmasse eine Lösung gefunden wird.

Der ganze Arbeitsablauf bis zu diesem Punkt ist nachstehend im Flussdiagramm visualisiert.

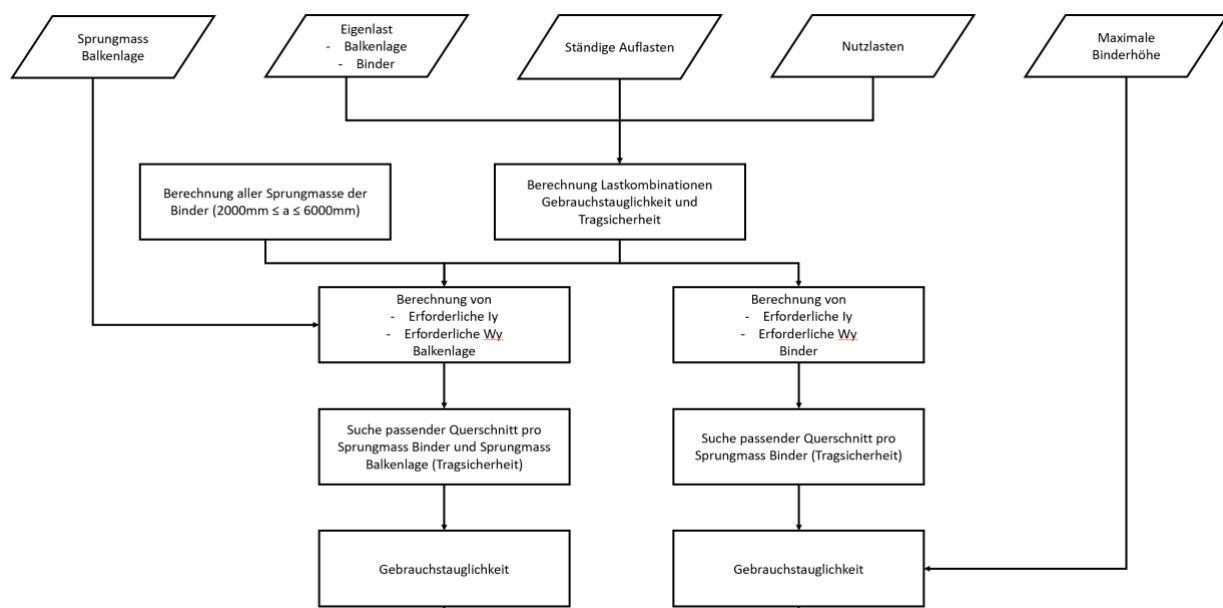


Abbildung 22 Flussdiagramm Holzdecke – Dimensionierung Binder und Balkenlage

4.2.4 Ökobilanz

Alle Balkendimensionen der beiden vorhergehenden Kapitel müssen nun mit der Anzahl Balken und deren Länge multipliziert werden. Als Resultat kommt das jeweilige Volumen heraus. Diese multipliziert mit dem Gewicht pro Kubikmeter ergibt das Gesamtgewicht der Decke. Die Decke mit dem geringsten Gewicht ist auch die Decke, welche die Umwelt am wenigsten belastet. Dies darum, da alles aus dem gleichen Material besteht. Diese Decke wird für die Visualisierung weitergegeben. Dies bedeutet nicht, dass diese Decke auch die kostengünstigste ist oder am wenigsten Aufwand bei der Montage verursacht.

Alle errechneten Massen müssen mit den Umweltbelastungspunkten, der grauen Energie und der Treibhausgasemission pro Kilogramm von Brettschichtholz multipliziert werden. Die Ökobilanz muss ebenfalls für die Dreischichtplatte berechnet werden. Alle Daten werden schlussendlich in einer CSV-Datei gebündelt und exportiert. Die Visualisierung der einzelnen Werte geschieht in Excel. Diese Teilaufgabe ist in Kapitel 4.4 beschrieben.

Der in diesem Kapitel beschriebene Vorgang ist in Abbildung 23 dargestellt.

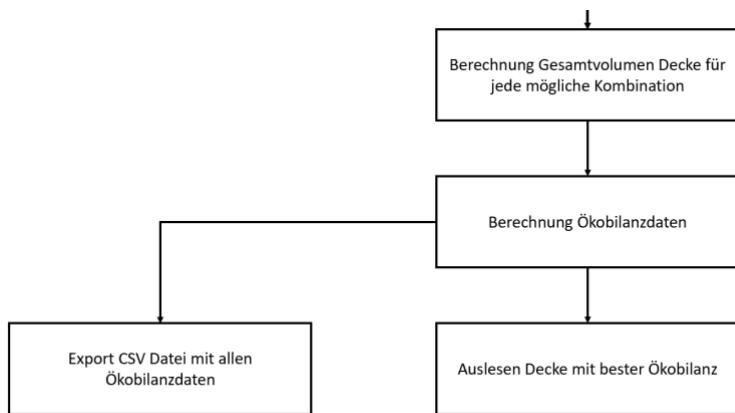


Abbildung 23 Teil 2 Flussdiagramm Holzdecke – Berechnung Ökobilanzdaten

Neben der ökologisch besten Decke werden auch alle Ökobilanzdaten aller Kombinationen aus Sprungmass Balkenlage und Binderabstand exportiert. Wie bei der Holoribdecke kann auch manuell eine andere Decke als die ökologisch beste ausgewählt werden. Geschieht dies, wird in die CSV-Datei Holzdecke best.csv die Auserwählte gespeichert und nicht die ökologisch Beste. Wie die Ordnerstruktur auszuschauen hat, kann in Abbildung 21 nachgeschaut werden.

4.2.5 Visualisierung

Die Decke mit der besten Ökobilanz wird in Rhino in einem ersten Schritt visualisiert. Im hier behandelten Beispiel ist dies die Decke mit folgenden Eckdaten:

- 27 mm Dreischichtplatte
- Balkenlage mit BSH GL24h 100/120, $a = 700$ mm
- Binder mit BSH GL24h 160/440, $a = 1667$ mm

Mit den Massen der Balken können Vierecke gebildet werden. Diese müssen an die Anfangsposition verschoben, danach ausgerichtet und extrudiert werden. Das Sprungmass wird so angepasst, dass eine saubere Einteilung der Balken möglich ist. Ziel dabei ist, dass am Anfang und am Ende ein Balken liegt. Würde die Balkeneinteilung nach angenommenen Sprungmass erfolgen, würde meistens am Ende keiner oder ein angeschnittener Balken zu liegen kommen.

Die Aussenbinder werden ebenfalls um die halbe Breite nach innen verschoben. So liegt die Aussenkante der Binder auf der Aussenkante des Rechteckes.

Die Auflager, wieder in Form einer Wand, erfolgt gleich wie bei der Holoribdecke. Der Vorgang ist in 4.1.3 beschrieben. Über der Balkenlage kommt die ausgewählte Dreischichtplatte zu liegen.

Schlussendlich werden die wichtigsten Angaben im Modell beschriftet. Dies ist vor allem bei Präsentationen hilfreich, so kann in Echtzeit das Modell einem breiten Publikum präsentiert werden. Die Visualisierung der Holzdecke ist in nachstehender Abbildung zu sehen.

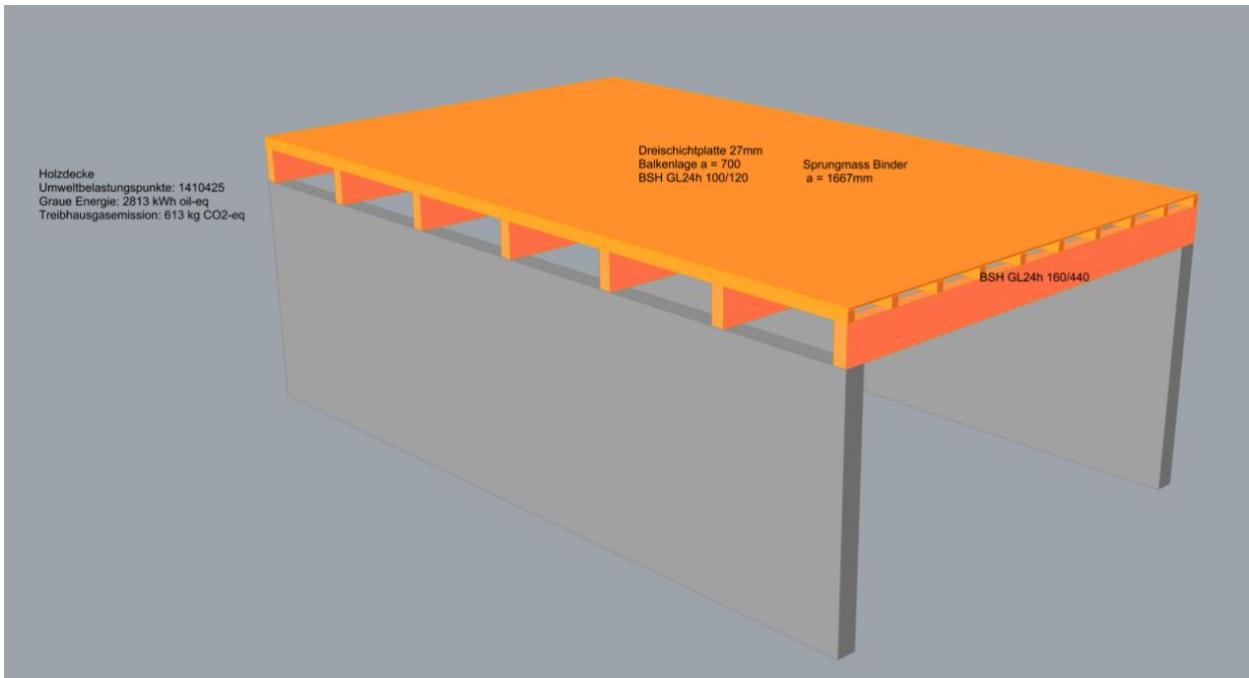


Abbildung 24 Visualisierung Holzdecke

4.3 IFC Export

Der IFC Export erfolgt über die Erweiterung GeometryGymIFC. GeometryGym ist ein Unternehmen aus Australien, welches sich auf die Entwicklung von Software in Form von Plugins in den Bereichen Open BIM und IFC spezialisiert hat. Das in dieser Arbeit verwendete Programm ist kostenpflichtig. Für Hochschulen ist es jedoch kostenlos (Mirtschin, 2022).

Um die visualisierten Elemente aus den vorhergehenden Kapiteln zu exportieren, bedarf es einer Generierung von IFC Elementen in Grasshopper. Zu Beginn muss ein IFC Projekt definiert werden. Das IFC Projekt beschreibt die Informationen des Bauvorhabens als Ganzes. Zudem muss ein Baufeld (IFC-Site) und ein Bauobjekt (IFC Building) festgelegt werden. Es werden beide Decken in ein IFC geschrieben. Das IFCProject, das IFC Site und das IFC Building gelten somit für beide Decken.

Für jedes Bauteil wird ein IFC Material generiert. Die Angabe von Materialien ist ein zentrales Element eines BIM Modells. Nur wenn alle Elemente ein Materialattribut besitzen, ist eine automatische Mengenermittlung möglich. Neben der semantischen Beschreibung muss ein Objekt auch eine geometrische Repräsentation besitzen. Die Semantik und die Geometrie wird in einem IFC-Datenmodell stricke getrennt. So kann ein beschriebenes Objekt mehrfach in einem Projekt vorkommen (Borrman et al., 2021).

Bei der Holoribdecke werden die Stahlbinder und die Betondecke exportiert. Die Holoribbleche werden vernachlässigt. Die Generierung der Stahlträger ist in Abbildung 25 beschrieben. Der Name des Profils, welches in Rhino dargestellt ist, wird mit dem IFCProfileDef verbunden. Die Stahlprofilquerschnitte sind hinterlegt. Es generiert somit automatisch den geometrischen Querschnitt. Das Material wird ebenfalls automatisch generiert. Welcher Stahl verwendet wird, gibt der Benutzende zu Beginn mit der Wahl der Stahlsorte an. Die beiden Entitäten dienen als Attribut für das IFCMaterialProfile. Diese Entität wiederum ist ein Attribut für die Erstellung des BeamType, also der Definition des Bindertypes. Bis hierher sind es alles beschreibende Entitäten. Erst mit der Generierung des IFCBeamStandardCase wird die Geometrie erstellt. Der Querschnitt wird auf der Achse des Stahlträgers angeordnet. Es entsteht ein Volumenkörper. Zudem muss die Entität des IFCBuilding angefügt werden. Die Umsetzung in Grasshopper kann in Abbildung 27 betrachtet werden.

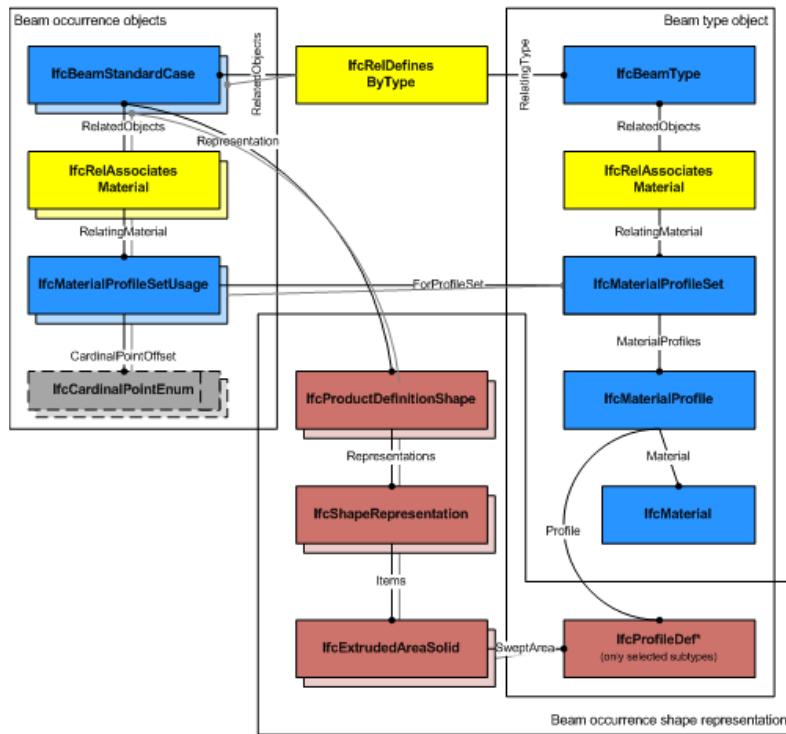


Abbildung 25 Erstellung IFC Beam (buildingSMART, 2019)

Die Erstellung der Betonplatte geschieht ähnlich. Zu Beginn wird das Material bestimmt und ein IFC MaterialLayer angelegt. Der Name des Materials ist die Bezeichnung des eingesetzten Betons. Dieser wird vom Benutzer oder der Benutzerin zu Beginn bei der Eingabe der Parameter bestimmt. Beim IFCMaterialLayer wird zudem die Betondicke definiert. Über die Entität IFCSlabType wird dann die Entität IFCSlab erstellt, was die komplette Definition, geometrisch und semantisch, darstellt. Die Betondecke wird dabei als Quader definiert. Der ganze Vorgang in Grasshopper ist nachstehend abgebildet.



Abbildung 26 Generierung IFCSlab Betondecke in Grasshopper mit GeomGymIFC

Die Erstellung der IFC Elemente der Holzdecke geschieht ähnlich wie bei der Holoribdecke. Die beiden Balkenlagen, die Binder und die Balken, werden wie die Stahlbinder exportiert. Nur, dass die Profildefinition ein rechteckiges Profil ist. Wie das umgesetzte in Grasshopper ausschaut, ist in Abbildung 27 zu sehen.

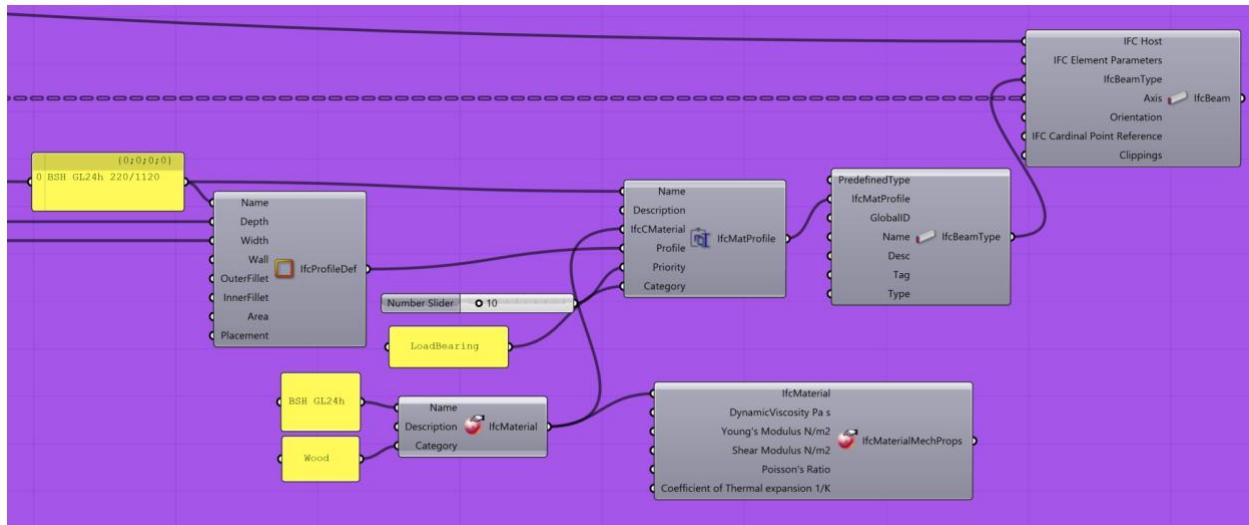


Abbildung 27 Erstellung IFC Beam Binderprofile

Das Werkzeug generiert jeweils das Modell, welches in Rhino visualisiert ist. Das Schreiben einer IFC Datei muss manuell vorgenommen werden. Es kann gewählt werden, welchen IFC Standard exportiert werden soll. Es wird empfohlen, den IFC 4x1 zu wählen. Dieser ist auch als Standard eingestellt.

4.4 Visualisierung Ökobilanz

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, werden die Ökobilanzdaten in CSV-Dateien in den Ordner Ökobilanz geschrieben. Die Visualisierungen geschehen in einem Excel-dokument, das Visualisierung_Oekobilanz.xlsx. Diese Datei befindet sich ebenfalls in diesem Ordner. Für das werden die CSV-Dateien automatisch in Excel importiert. Mit Hilfe des Power Query könne die Daten so aufbereitet werden, damit Visualisierungen möglich sind. Es werden dabei zwei Dinge gegenübergestellt. Zum einen werden die beiden Varianten, welche in Rhino visualisiert werden, miteinander verglichen. Dies sind hauptsächlich die ökologisch besten Varianten. Zum anderen werden alle Kombinationen aus Sprungmasse Binder, Sprungmasse Balkenlage und Stahlprofilfamilie miteinander verglichen.

4.4.1 Vergleich ökologisch beste Varianten

Die beiden Varianten werden mit drei verschiedenen gestapelten Säulendiagrammen dargestellt. Die Umweltbelastungspunkte, die graue Energie und die Treibhausgasemissionen werden gegenübergestellt. Die Höhe der gestapelten Säule zeigt den gesamten Wert. Die einzelnen Felder in der Säule repräsentieren die einzelnen Baustoffe. Zum einen kann so die gesamte Ökobilanz direkt miteinander verglichen werden, zum anderen ist ersichtlich, welches Bauelement die Ökobilanz am meisten beeinflusst.

Die Säulen sind beschriftet mit allen wichtigen Eigenschaften der Decke. Diese Information wird ebenfalls direkt aus Grasshopper ins CSV geschrieben.

Wie bereits bei den Ökobilanzen beim Ist-Prozess ist klar zu sehen, dass vor allem das Holoribblech der grösste Umweltsünder ist. Dies ist nicht verwunderlich, besitzt doch ein Kilogramm Holoribblech 5'270 UBP. Das ist mehr als das 34-fache wie ein Kilogramm Beton.

Der Vergleich der ökologisch besten Variante der Holz- und der Holoribdecke bezogen auf die UBP ist nachfolgend abgebildet. Die anderen beiden Vergleiche, die der grauen Energie und die der Treibhausgasemissionen, sind im Anhang 14 zu finden.

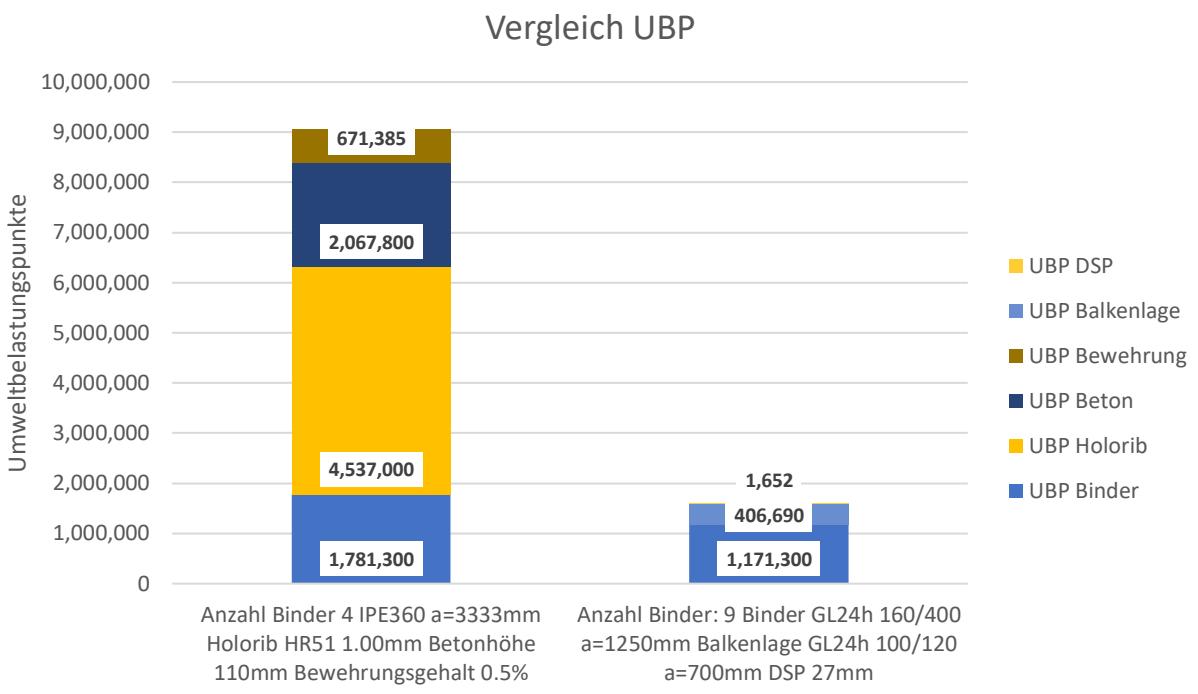


Abbildung 28 Vergleich UBP der beiden ökologisch besten Varianten

4.4.2 Vergleich aller Kombinationen

Beim Vergleich aller Kombinationen muss in Excel mit der Hilfe vom Power Query die Gesamtbelaistung von UBP, grauer Energie und Treibhausgasemissionen berechnet werden. Die Werte werden in sechs verschiedenen Liniendiagrammen visualisiert. Es handelt sich um folgende Diagramme

- UBP Holoribdecke
- Graue Energie Holoribdecke
- Treibhausgasemission Holoribdecke
- UBP Holzdecke
- Graue Energie Holzdecke
- Treibhausgasemission Holzdecke

In jedem Diagramm sind mehrere Linien zu sehen. Bei der Holoribdecke zeigt eine Farbe jeweils eine Profilfamilie, also IPE, HEA, HEB oder HEM. Bei der Holzdecke zeigen die Linien die drei unterschiedlichen Sprungmasse der Balkenlage.

Die Resultate der Holoribdecke sind minder interessant, da sie mit der Anzahl Binder praktisch linear ansteigen. Das liegt daran, dass die Betondecke immer gleich dick ist. Damit die Betondecke ebenfalls variiert, müssten längere Felder überspannt werden. Bis sechs Meter schränken die Vorgaben der SIA so ein, dass die Betondecke eine Mindestdicke erreichen muss. Genauereres ist in Kapitel 4.1.2 beschrieben. Interessanter sind die Visualisierungen der Holzdecke. So sind wenig Binder, dafür stärkere Balkenlage oder viele Binder und filigranere Balkenlage nicht optimal. Am ökologischsten ist eine Decke mit sieben Binder und einem Sprungmass in der Balkenlage von 700 mm.

In den beiden nachstehenden Abbildungen sind die Visualisierungen der UBP aller möglichen Kombinationen der Holoribdecke und der Holzdecke zu sehen.

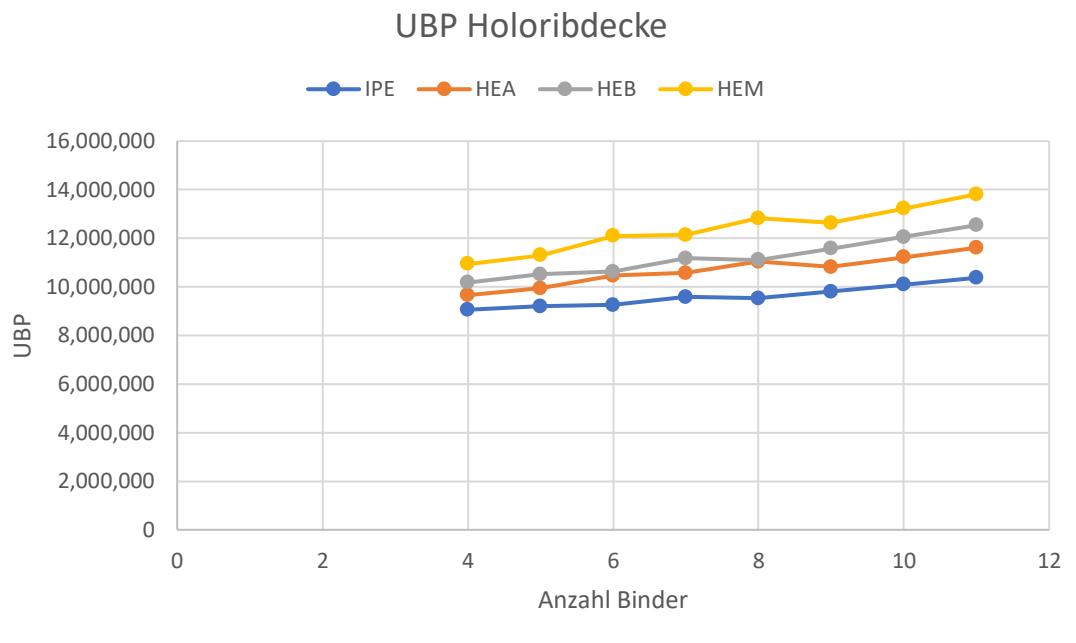


Abbildung 29 Liniendiagramm Vergleich UBP Holoribdecke

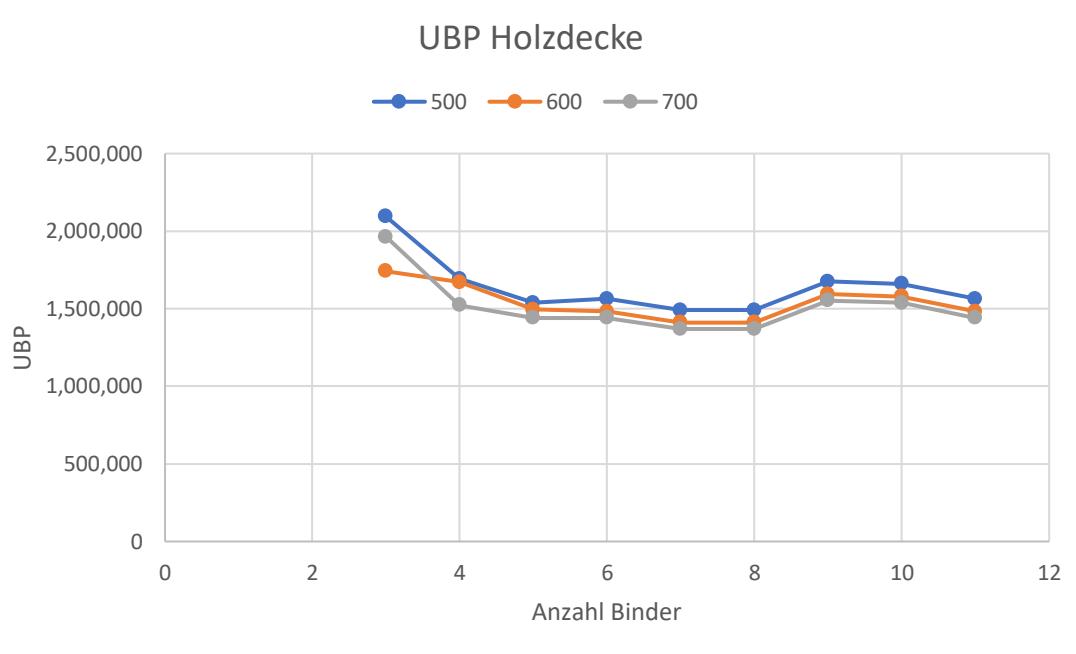


Abbildung 30 Liniendiagramm Vergleich UBP Holzdecke

4.5 Flussdiagramm

Im Unterschied zum Ist-Prozess fällt das iterative Arbeiten weg. Das heisst, mit dem Grasshopper-Werkzeug werden alle möglichen Kombinationen berechnet und ausgegeben. Der rege Austausch von möglichen Deckensystemen zwischen den Architekten und den Ingenieuren fällt gänzlich weg. Die Findung des optimalen Deckensystems kann direkt in einer Sitzung, an welcher alle Projektbeteiligten sind, geschehen. Denkbar ist auch, dass der Architekt oder die Architektin das Programm verwendet. So muss in einer ersten Phase kein Ingenieur oder keine Ingenieurin anwesend sein. Die Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise werden bekanntlich automatisch geführt. So benötigt der Benutzende kein Baustatikwissen.

Ein grosser Vorteil der computerbasierten Findung von Systemen ist die automatische Berechnung vieler Varianten gleichzeitig. Eine Handrechnung wird nicht zu den optimalen Lösungen führen.

Der grösste Zeitbedarf beim Soll-Bedarf benötigt das Finden und das Definieren der Eingabeparameter. Dies benötigt gleich viel Zeit wie beim Ist-Prozess. Beim Benutzen des Programmes wird kaum Zeit in Anspruch genommen. Will der Auftraggebende die ökologischste Decke, entweder als Holz- oder als Holoribdecke, ist die Berechnung nach einigen Minute erledigt. Das Öffnen von Grasshopper benötigt hier die meiste Zeit. Das entwickelte Werkzeug zeigt gleich nach den Justierungen der Eingabeparameter die ökologisch besten Varianten an. Wird ein Variantenstudium durchgeführt mit dem jeweiligen Betrachten der Diagramme in Excel, kann sich der Vorgang in die Länge ziehen. Dennoch braucht der Soll-Prozess signifikant weniger Zeit als der Ist-Prozess.

Der Soll-Prozess ist im Anhang 15 als Business Process Model and Notation (BPMN) abgelegt. Die Länge des Flussdiagrammes ist dabei gleich wie beim Ist-Prozess. So ist auch visuell die markant kürzere Bearbeitungszeit erkennbar.

5 Diskussion und Fazit

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Der Ist-Prozess zeigt klar auf, dass die Findung von ökologischen Deckensystemen mit schnellen Handrechnungen nicht zu der optimalen Lösung führen kann. Der Zeitaufwand, um alle möglichen Kombinationen zu berechnen und danach zu vergleichen, wird von niemandem bezahlt. Mit grosser Berufserfahrung ist einem schon bekannt, was in etwa die beste Lösung ist. Aber auch dann besitzt das Resultat keine 100% Sicherheit.

Im normalen Ist-Zustand wird der Ingenieur oder die Ingenieurin nach einer ersten Besprechung mit den auftraggebenden Personen zurück ins Büro gehen und dort ein Variantenstudium durchführen. Welches Ausmass dieses Variantenstudium besitzt, ist projektbezogen. Müssen aber zwei bis drei verschiedene Deckensysteme miteinander verglichen werden, dauert dies einige Stunden. Neben dem Tragwerksentwurf muss auch die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen werden. Und es muss für jedes Deckensystem eine Ökobilanz erstellt werden. Zudem ist im besten Fall auch gleich eine IFC-Datei der besten Varianten an das Architekturbüro zurückzugeben. Alle diese Arbeiten dauern mindestens zehn Stunden. Normalerweise gibt es danach von Seiten der auftraggebenden Personen Änderungswünsche. So müssen die Varianten angepasst, die Nachweise geführt und die Ökobilanz neu erstellt werden. Bis dann das optimale Tragwerk gefunden ist, dauert es einige Zeit. Was aber bereits im Ist-Zustand bekannt ist, ist die Tatsache, dass Holzdecken in jeder Hinsicht ökologischer sind als Holoribdecken. Beton, Stahl und Profile aus Blech, besitzen sehr hohe Umweltbelastungspunkte pro Kilogramm im Gegensatz zu Brettschichtholz. Das Faktum, dass Holz dann auch noch 18-mal leichter als Stahl und 6-mal leichter als Beton pro Kubikmeter ist, macht es dem Stahl und dem Beton nicht einfacher, ökologischer zu sein als Holz. Zudem ist Holz im Gegensatz zu Stahl ein heimischer Baustoff, ebenso Beton. Stahl wird sehr wohl in der Schweiz produziert. Der Rohstoff für den Stahl muss aber importiert werden. Der Transport vom Herstellungsort zur Baustelle wird in einer Ökobilanz vernachlässigt. Darum ist es wichtig, lokale Güter einzusetzen. Dies gibt dem Holz weitere Pluspunkte.

All die Nachteile, welche die Handrechnung mit sich bringt, beseitigt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Grasshopper-Werkzeug. Das Werkzeug dient der automatischen Findung von ökologischen Decken. Ohne Statikkenntnissen und ohne grosses Computerwissen lassen sich Deckensysteme generieren, welche die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Mit Hilfe der erstellten Anleitung, welche im Anhang 13 abgelegt ist, lassen sich einfach Deckensysteme erstellen und als IFC exportieren.

Die Zeiteinsparungen mit der Nutzung der Grasshopperanwendung betragen pro untersuchtes Projekt mindestens fünf Stunden. Ist die auftraggebende Person nicht zufrieden und es muss an den Entwürfen gearbeitet werden, sind die Einsparungen um ein Vielfaches höher. Die Entwicklungszeit für das Werkzeug dauerte etwa vier Wochen. Wird das Tool einige Male verwendet, ist die Entwicklungszeit schnell amortisiert.

Neben der automatischen Erzeugung ist vor allem der Ökologiegedanke von grosser Bedeutung. Seit Jahrzehnten wird in der Baubranche Beton und Stahl verbaut, ohne dabei gross auf die Optimierung von Tragwerken zu schauen. Die Vorteile der beiden Baustoffe und vor allem die günstige Beschaffung machte eine Optimierung oder eine Verwendung von anderen Baustoffen meist gar nicht notwendig. Der Aufwand für die Optimierung zahlte sich gar nicht aus. Das neue Werkzeug soll allen Planenden helfen, schnell eine ökologische Decke zu finden, ohne dabei in verschiedenen Tabellen nach Profilen zu suchen. Ohne dabei von Hand verschiedene Varianten in einem Statikprogramm zu rechnen. Ohne dabei die SIA Normen zu konsultieren. Einfach das Programm öffnen, die mit den auftraggebenden Personen besprochenen Lasten eingeben und rechnen lassen.

Der Zeitgewinn ist signifikant und weniger Arbeit bedeutet auch geringere Kosten. Das ist vor allem für die Entwurfsphase, in welcher nicht immer alle Kosten verrechnet werden können, entscheidend. In dieser Phase sind Automationen sehr interessant. So können Büros, welche Arbeitsschritte automatisieren, kostengünstiger entwerfen und sind gegenüber anderen Planungsbetrieben konkurrenzfähiger. Besonders die automatische Erstellung von IFC-Dateien bringen einen grossen

Vorteil. So sind gerade Elemente schon modelliert und Konstrukteure oder Zeichnerinnen haben weniger Aufwand. Gleichzeitig wird so auch eine Fehlerquelle eliminiert.

Es ist denkbar, dass der Ingenieur direkt an einer Besprechung mit der Architektin und mit den auftraggebenden Personen die Berechnungen vornimmt und gleich die Resultate präsentiert. So können Änderungswünsche sofort umgesetzt und vorgestellt werden. Die Sitzungen werden so zielführender und die Ergebnisse brauchbarer. Der Ingenieur oder die Ingenieurin muss nicht zurück ins Büro die Varianten durchrechnen und dann an einer nächsten Sitzung vorstellen. Der Planungsprozess wird so straff gehalten und dadurch für den Kunden auch günstiger.

In der Realität spielen neben der Tragsicherheit und der Ökobilanz noch andere Parameter eine Rolle. Vor allem die Deckenstärke ist praktisch immer ein wichtiges Kriterium. Sind die Decken sehr dick, verliert auf der anderen Seite die Raumhöhe an Grösse.

Die Holzdecken, dabei vor allem die Binder, besitzen einen deutlich grössere Gesamtstärke als die Holoribdecke mit der gleichen Geometrie. Vor allem bei grossen Überspannungen sind die Holzbinder sehr hoch. Die Gesamthöhe der Decke beträgt schnell über einen Meter. Die gleiche Holoribdecke misst bei einer Überspannung von zehn Metern 40 cm weniger Höhe als die Holzdecke. Bei einem fünfstöckigen Haus macht dieser Unterschied zwei Meter aus; so viel wie fast ein ganzes Stockwerk. Da die Geschossgröße in vielen Reglementen festgeschrieben ist, müssten die Behörden die Gesetze anpassen. Bauherren, welche ökologisch bauen wollen, sollten nicht bestraft werden.

5.2 Begrenzung der Arbeit

Das Werkzeug bildet im Moment nur einen kleinen Teil von Deckensystemen ab. Interessant wäre, wenn weitere Deckensysteme implementiert werden. Angedacht sind vor allem die Stahlbetondecke, mit oder ohne Unterzüge, Stahlbetondecken im Verbund, Vollholzdecken oder Holzbetonverbunddecken. Auch die Erweiterung von Bindersystemen, wie Fachwerkträger oder Wabenträger ist wünschenswert. Besitzt die Decke eine zu grosse Spannweite, kommt bei dem Werkzeug im Moment kein Resultat zurück. Es gibt aber in der Praxis diverse Fälle, wo eine grosse Spannweite gewünscht wird. Diese Bedürfnisse von Architektinnen oder Bauherren müssen befriedigt werden.

Da der Einsatz des Grasshopperwerkzeuges in der Vordimensionierungsphase geschieht, reichen die statischen Berechnungen aus. Soll das Tool in der Projektierungs- oder Ausführungsphase ebenfalls zum Einsatz kommen, müssen weitere Nachweise geführt oder weitere Regeln befolgt werden. Die Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind im Rahmen dieser Arbeit jeweils für jedes Bauelement geführt. Das heisst, eine Auflageresenkung oder eine Gesamtdurchbiegung wird vernachlässigt. Weiter müssen die Träger auch auf die Querkraft geprüft werden. Bei den Stahlbindern muss zudem das Beulen nachgewiesen werden, so sind doch Verbundträger beulgefährdet (Hirt et al., 2006). Ebenfalls müssten die Verbindungsmittel bestimmt werden.

5.3 Empfehlungen für weiterführende Arbeiten

Wie im vorhergehenden Kapitel erläutert, gibt es noch diverse Limitationen der aktuellen Arbeit. Soll das Tool weiter für die Vordimensionierung dienen ist es zu empfehlen weitere Deckensysteme zu implementieren. Holz wird wohl in den allermeisten Fällen die ökologischste Deckenvariante bleiben. Der Baustoff ist bei der zu überspannenden Weite aber limitiert. Darum ist der Vergleich der Ökobilanz mit der Blechbetondecke und weiteren Deckensystemen bei langen Binderweiten interessant. Ebenfalls empfehlenswert ist die Berücksichtigung von weiteren Parametern. Möglich sind beispielsweise

- Limitieren der Gesamtdeckenstärken
- Einführen der Gebrauchstauglichkeitsprüfung von Holoribblechen bei längeren Spannweiten
- 0.75 mm und 0.88 mm Holoribbleche und Superholoribbleche in Berechnung einfließen lassen
- Stahlbinder im Verbund rechnen
- Bestes Sprungmass der Balkenlage mit Solver finden
- Balkenlage mit Vollholzdecke erweitern

Die Implementierung weiterer Deckensysteme und Parameter kann in einer ähnlichen Arbeit geschehen.

6 Anhang

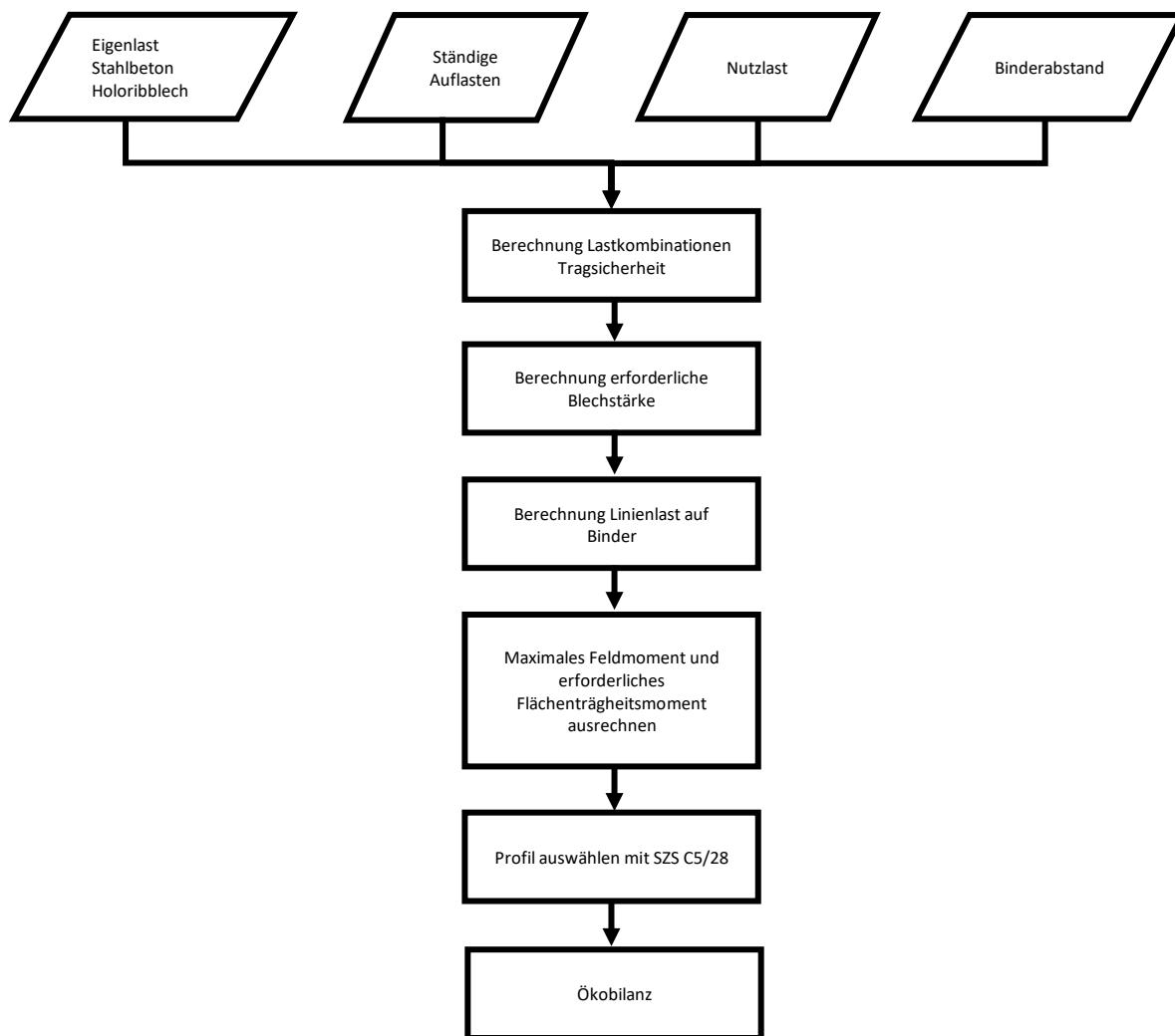
- Anhang 1 Berechnungsvorgang Flussdiagramm Ist-Prozess
- Anhang 2 Berechnung Ist-Prozess Holoribdecke
- Anhang 3 Ökobilanz Holoribdecke
- Anhang 4 Berechnung Ist-Prozess Vollholzdecke
- Anhang 5 Ökobilanz Vollholzdecke
- Anhang 6 Berechnung Ist-Prozess Balkenlagendecke
- Anhang 7 Ökobilanz Balkenlagendecke
- Anhang 8 Berechnung Ist-Prozess Holz-Beton-Verbundbau
- Anhang 9 Ökobilanz Holz-Beton-Verbundbau
- Anhang 10 Ökobilanz Zusammenstellung
- Anhang 11 Flussdiagramm BPMN Ist-Prozess
- Anhang 12 Flussdiagramm Grasshopper
- Anhang 13 Anleitung Grasshopperanwendung
- Anhang 14 Visualisierung Ökobilanz Soll-Prozess
- Anhang 15 Flussdiagramm BPMN Soll-Prozess
- Anhang 16 Redlichkeitserklärung für Einzelarbeiten

7 Literaturverzeichnis

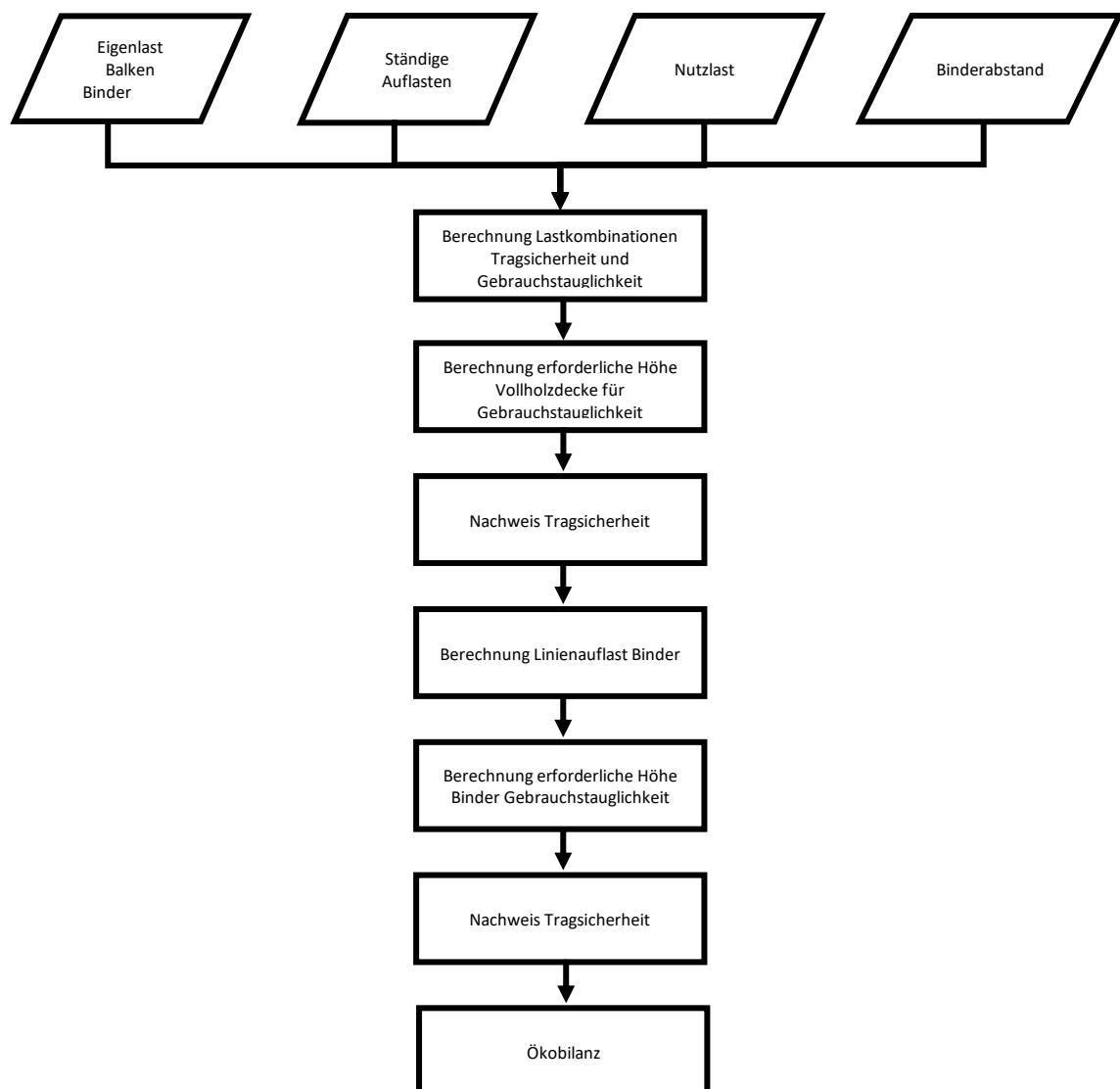
- BAFU (Ed.). (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2121.* 260.
- Baunetzwissen. (2022). *Ökobilanz | Nachhaltig Bauen | Baustoffe/-teile | Baunetz_Wissen.* <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/baustoffe--teile/oekobilanz-725527> [Stand: August 16, 2022]
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (Eds.). (2021). *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis.* Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4>
- buildingSMART. (2019). *IfcBeamStandardCase.* https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_3/RC1/HTML/schema/ifcsharedbldgelements/lexical/ifcbeamstandardcase.htm [Stand: August 16, 2022]
- Camunda. (2022). *Automate any Process, Anywhere.* Camunda. <https://camunda.com/de/about/> [Stand: August 16, 2022]
- Harald, B. Prof. Dr.-Ing., & Volz, H. Prof. Dipl.-Ing. (2020). Tragwerksentwurf und Vorbemessung. In *Schneider Bautabellen für Ingenieure* (24. Auflage). Reguvis Fachmedien GmbH.
- Hirt, M. A., Bez, R., & Nussbaumer, A. (2006). *Stahlbau—Grundbegriffe und Bemessungsverfahren.*
- Kägi, T. (2022). *Die Bedeutung von 1000 UBP (Umweltbelastungspunkte).* Carbotech. <https://carbotech.ch/projekte/bedeutung-von-1000-ubp-umweltbelastungspunkte/> [Stand: August 16, 2022]
- KBOB, ecobau, & IPB. (2016). *Empfehlung—Ökobilanzdaten im Baubereich.*
- Krahwinkel, M., & Kindmann, R. (2016). *Stahl- und Verbundkonstruktionen.* Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05118-1>
- Lignum – Holzwirtschaft Schweiz. (2021). *Holzbautabellen—Handbuch für die Bemessung.*
- Minnert, J., & Wagenknecht, G. (2013). *Verbundbau-Praxis: Berechnung und Konstruktion nach Eurocode 4* (2., vollst. überarb. Aufl). Beuth.
- Mirtschin, J. (2022). *GeometryGym.* GeometryGym. <https://geometrygym.wordpress.com/> [Stand: August 16, 2022]
- Montana Bausysteme AG. (2016). *HOLORIB®/SUPERHOLORIB®. STATIK. STATIQUE. STATIC. STATICS.*
- Montana Bausysteme AG. (2022). *HOLORIB®/SUPERHOLORIB® Verbundprofile aus Stahl – Schalung, Armierung und Brandschutz.*
- Papageorgiou, M., Leibold, M., & Buss, M. (2015). *Optimierung.* Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46936-1>
- Preisinger, C. (2022). *Karamba3D – parametric engineering.* <https://www.karamba3d.com/> [Stand: August 16, 2022]
- SIA 261. (2020). *Einwirkungen auf Tragwerke.*
- SIA 264. (2014). *Stahl-Beton-Verbundbau.*
- SIA 2032. (2020). *SIA 2032—Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden.*
- Wright, G. (2022). *Business Process Modeling Notation (BPMN).* <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/Business-Process-Modeling-Notation> [Stand: August 16, 2022]

Anhang 1

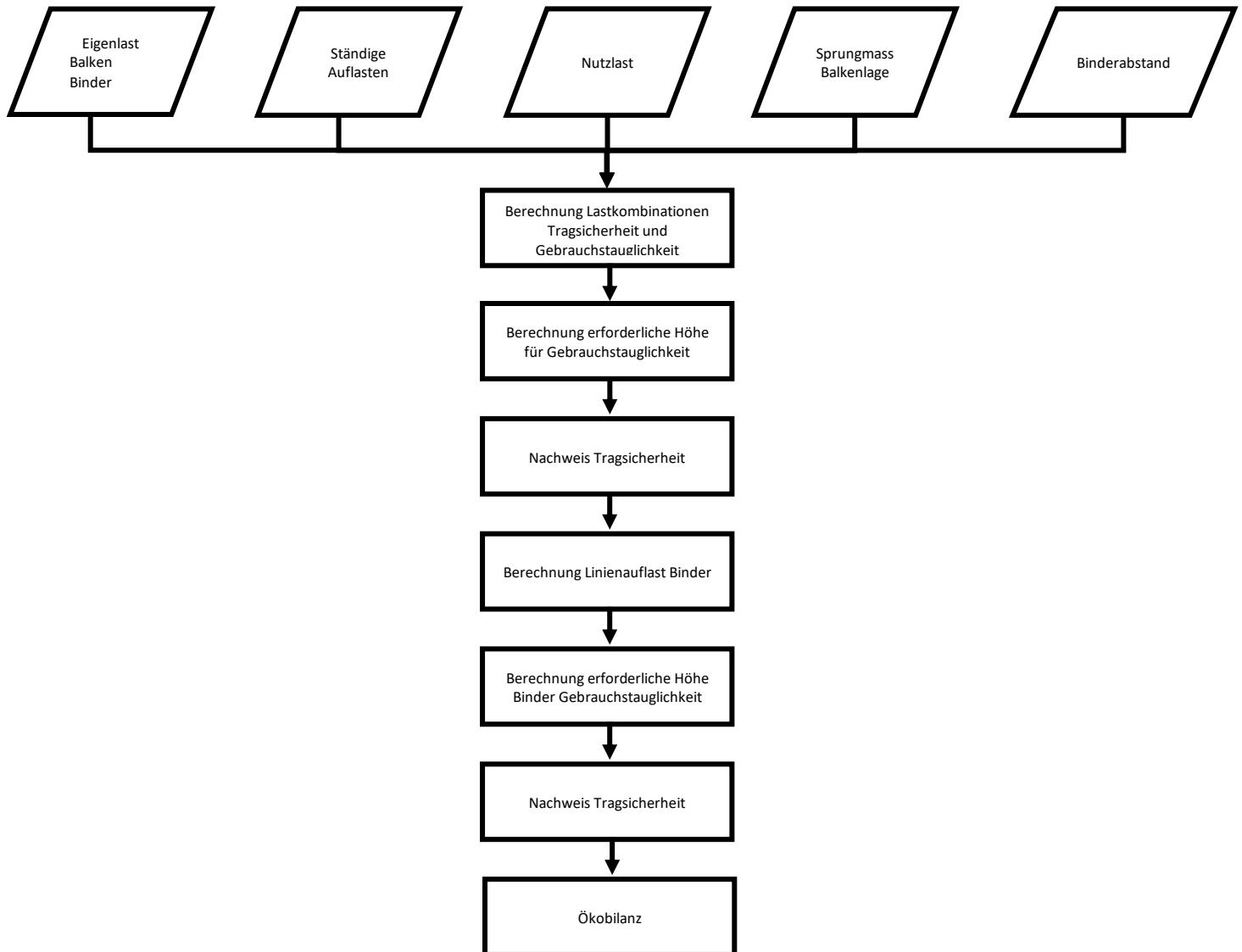
Holoribdecke



Brettschichtholzdecke



Balkenlagenholzdecke



Anhang 2

Holoribblechdecke

Länge Decke 6.0 m
Breite Decke 10.0 m

Angabe Holoribblech		Angabe Beton C25/30	
Länge Blech b=1m	1885.000 mm	Dichte Beton mit Bewehrung	25.0 kN/m ³
Länge Blech b=0.15m	282.75 mm	γ_c	1.50
Dichte Blech	7850.0 kg/m ³	f_{ck}	20.0 N/mm ²
Dichte Blech	78.5 kN/m ³		
γ_{ap}	1.05		
f_{yp} (SE 320 G)	320.0 N/mm ²		
Massgebende Breite	0.15 m		Betonhöhe von 150mm ausreichend
Höhe Profil	51.00 mm		
Elastizitätsmodul	210000.0 N/mm ²		
Flächenträgheitsmoment ly 1.00mm	1.00	96369.4 mm ⁴	Betondruckhöhe 1.00mm
Flächenträgheitsmoment ly 1.00mm	0.88	85112.6 mm ⁴	Betondruckhöhe 0.88mm
Flächenträgheitsmoment ly 0.75mm	0.75	73164.0 mm ⁴	Betondruckhöhe 0.75mm

25.0 kN/m³
1.50
20.0 N/mm²

			Zweifeldträger		Dreifeldträger
Flächenträgheitsmoment ly 1.00mm	1.00	96369.4 mm ⁴	50.69 mm	$M_{pl,Rd}$	8.54 kNm
Flächenträgheitsmoment ly 1.00mm	0.88	85112.6 mm ⁴	44.61 mm	$M_{pl,Rd}$	7.75 kNm
Flächenträgheitsmoment ly 0.75mm	0.75	73164.0 mm ⁴	38.02 mm	$M_{pl,Rd}$	6.82 kNm

Einwirkungen		
	Zweifeldträger	Dreifeldträger
Spannweite	3 m	2 m
Betondicke	0.15 m	0.1 m
Eigenlast Beton/Bewehrung	3.75 kN/m ²	2.50 kN/m ²
Ständige Auflasten	2.00 kN/m ²	2.00 kN/m ²
Eigenlast Blech max	0.2 kN/m ²	0.2 kN/m ²
Nutzlast	5.0 kN/m ²	5.0 kN/m ²
GZ Tragsicherheit ULS	15.5 kN/m ²	13.8 kN/m ²
GZ Gebrauchstauglichkeit SLS selten	11.0 kN/m ²	9.7 kN/m ²
Max Durchbiegung (l/500)	6.0 mm	4.0 mm

Erforderliche Betonhöhe / Blech Tragsicherheit		
Max Feldmoment	2.6 kNm	1.0 kNm
Gewähltes Profil	0.75 mm	0.75 mm

Gebrauchstauglichkeit

L/dp 20 20

--> Da beide Werte unter 26 ist, entfällt der Nachweis

Berechnung Binder

	Zweifeldträger	Dreifeldträger
Linienlast auf Binder ULS	46.60 kN/m	27.69 kN/m
Linienlast auf Binder SLS selten	32.85 kN/m	19.40 kN/m

Tragsicherheitsnachweis/Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Maximales Moment	582.47 kNm	346.13 kNm
W_{max}	20.00 mm	20.00 mm
Erforderliches Flächenträgheitsmoment x10 ⁶	1018 mm ⁴	601 mm ⁴

Ausgewähltes Profil	HEA 500 S235	IPE 500 S235
---------------------	--------------	--------------

Anhang 3

Ökobilanz Holoribdecke

	Zweifeldträger	Dreifeldträger
Betonvolumen pro m ²	0.15 m ³	0.10 m ³
Gewicht pro Meter ¹	345 kg	230 kg
Gesamtgewicht Beton ²	20'700 kg	13'800 kg
UBP pro kg	154	154
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	0.175	0.175
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.101	0.101
UBP Beton	3'187'800	2'125'200
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	3'623	2'415
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	2'091	1'394

Bewehrungsvolumen ³	0.0450 m ³	0.0300 m ³
Gesamtgewicht ⁴	353.3 kg	235.5 kg
UBP pro kg	2'930	2'930
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	4.94	4.94
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	1.52	1.52
UBP Bewehrung	1'035'023	690'015
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	1'745	1'163
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	537	358

Gewicht pro m ² Blech	11.1 kg	11.1 kg
Gesamtgewicht Blech	666 kg	666 kg
UBP pro kg	5'270	5'270
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	7.80	7.80
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	2.80	2.80
UBP Blech	3'509'820	3'509'820
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	5'195	5'195
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	1'865	1'865

UBP gesamt	7'732'643	6'325'035
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	10'562	8'773
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	4'492	3'617

¹Betonrohdichte 2300 kg/m³ (KBOB et al., 2016)

²10m*6m*Betonstärke*5%

³0.5% der Betonfläche

⁴Armierungsstahl 7850 kg/m³ (KBOB et al., 2016)

Binderberechnung Zweifeldträger

	Zweifeldträger	Dreifeldträger
Ausgewähltes Profil	HEA 500 S235	IPE 500 S235
Gewicht pro Meter	155 kg/m	90.7 kg/m
Anzahl Binder	2	3
Gesamtgewicht	3100 kg	2721 kg
UBP pro kg	1'300	1'300
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	3.38	3.38
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	0.74	0.74
UBP gesamt	4'030'000	3'537'300
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	10'478	9'197
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	2'288	2'008

UBP gesamt	11'762'643	9'862'335
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	21'040	17'970
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	6'780	5'625

Anhang 4

Vollholzdecke

Länge Decke	6.0 m
Breite Decke	10.0 m

Angaben Holz GL24 h BSH	
Elastizitätsmodul	11'500 N/mm ²
Balkenbreite	1000 mm

Annahmen Binder	
Länge	10000 mm
Breite	220 mm
Max Durchbiegung	20 mm

	3 m Balkenabstand	6 m Balkenabstand
Eigenlast	2.5 kN/m ²	3.0 kN/m ²
Nutzlast	5.0 kN/m ²	5.0 kN/m ²

	3 m Balkenabstand	6 m Balkenabstand
GZ Tragsicherheit ULS	10.9 kN/m	11.6 kN/m
GZ Gebrauchstauglichkeit SLS selten	7.5 kN/m	8.0
Max Durchbiegung	6.0 mm	12.0 mm
Max Moment (vereinfacht)	12234375.0 N/mm	51975000.0 N/mm
Max Moment (vereinfacht)	12.2 kN/m	52.0 kN/m

Erforderliche Balkenhöhe für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

$h_{\text{erforderlich}}$ [mm]	82.9 mm	227.3 mm
Gewählt h [mm]	100.0 mm	240.0 mm

Nachweis Tragsicherheit

Statische Moment W	1666666.7	9600000.0 mm ³
Spannung σ_{ma}	7.3 N/mm ²	5.4 N/mm ²
Erlaubte Spannung	16.0 N/mm ²	16.0 N/mm ²
Nachweis	Nachweis erfüllt	Nachweis erfüllt

Berechnung Binder

Eigengewicht Binder (Annahme)	0.8 kN/m	1.0 kN/m
Linienlast auf Binder SLS	23.3 kN/m	49.0 kN/m
Linienlast auf Binder ULS	33.7 kN/m	70.7 kN/m

Erforderliche Balkenhöhe für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

$h_{\text{erforderlich}}$ [mm]	895.6 mm	1148.3 mm
Gewählt h [mm]	920.0 mm	1240.0 mm

Nachweis Tragsicherheit

Max Moment	420712331.2 Nmm	883636729.0 Nmm
Statische Moment W	31034666.7 mm ³	56378666.7 mm ³
Spannung σ_{ma}	13.6 N/mm ²	15.7 N/mm ²
Erlaubte Spannung	16.0 N/mm ²	16.0 N/mm ²
Nachweis	Nachweis erfüllt	Nachweis erfüllt

Anhang 5

Ökobilanz Vollholzdecke

	Zweifeldträger	Einfeldträger
Holzstärke Vollholzdecke	0.1 m	0.2 m
Rohdichte BSH GL24h	385 kg/m ³	385 kg/m ³
Fläche	60 m ²	60 m ²
Gesamtgewicht Vollholzdecke	2'310 kg	5'544 kg
UBP pro kg	439	439
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	1.54	1.54
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.336	0.336
UBP Vollholzdecke	1'014'090	2'433'816
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	3'557	8'538
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	776	1'863

	Zweifeldträger	Einfeldträger
Höhe Binder	0.92 m	1.24 m
Breite Binder	0.22 m	0.22 m
Länge Binder	10 m	10 m
Volumen Binder	2.02 m ³	2.73 m ³
Anzahl Binder	2	1
Rohdichte BSH GL24h	385 kg/m ³	385 kg/m ³
Gesamtgewicht Binder	1'558 kg	1'050 kg
UBP pro kg	439	439
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	1.54	1.54
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.336	0.336
UBP Binder	684'173	461'073
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	2'400	1'617
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	524	353

UBP gesamt	1'698'263	2'894'889
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	5'957	10'155
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	1'300	2'216

Anhang 6

Balkenlagendecke

Länge Decke	6.0 m
Breite Decke	10.0 m

Angaben Holz GL24 h BSH

Elastizitätsmodul	11'500 N/mm ²
Balkenbreite	160 mm
Sprungmass	0.7 mm

Annahmen Binder

Länge	10000 mm
Breite	220 mm
Max Durchbiegung	20 mm

	3 m Balkenabstand	6 m Balkenabstand
Eigenlast	2.2 kN/m ²	2.4 kN/m ²
Nutzlast	5.0 kN/m ²	5.0 kN/m ²

	3 m Balkenabstand	6 m Balkenabstand
GZ Tragsicherheit ULS	10.5 kN/m	10.7 kN/m
GZ Gebrauchstauglichkeit SLS selten	7.2 kN/m	7.4
Max Durchbiegung	6.0 mm	12.0 mm
Max Moment (vereinfacht)	11778750.0 Nmm	48330000.0 Nmm
Max Moment (vereinfacht)	11.8 kNm	48.3 kNm

Erforderliche Balkenhöhe für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

$h_{\text{erforderlich}}$ [mm]	150.7 mm	407.9 mm
Gewählt h [mm]	200.0 mm	440.0 mm

Nachweis Tragsicherheit

Statische Moment W	1066666.7 mm ³	5162666.7 mm ³
Spannung σ_{ma}	11.0 N/mm ²	9.4 N/mm ²
Erlaubte Spannung	16.0 N/mm ²	16.0 N/mm ²
Nachweis	Nachweis erfüllt	Nachweis erfüllt

Berechnung Binder

Eigengewicht Binder (Annahme)	0.7 kN/m	1.0 kN/m
Linienlast auf Binder SLS	22.3 kN/m	45.4 kN/m
Linienlast auf Binder ULS	32.4 kN/m	65.8 kN/m

Erforderliche Balkenhöhe für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

$h_{\text{erforderlich}}$ [mm]	883.5 mm	1119.2 mm
Gewählt h [mm]	920.0 mm	1200.0 mm

Nachweis Tragsicherheit

Max Moment	404963969.0 Nmm	822325866.8 Nmm
Statische Moment W	31034666.7 mm ³	52800000.0 mm ³
Spannung σ_{ma}	13.0 N/mm ²	15.6 N/mm ²
Erlaubte Spannung	16.0 N/mm ²	16.0 N/mm ²
Nachweis	Nachweis erfüllt	Nachweis erfüllt

Anhang 7

Ökobilanz Balkenlagendecke

	Zweifeldträger	Einfeldträger
Volumen Balkenlage pro m ²	0.046 m ³	0.101 m
Rohdichte BSH GL24h	385 kg/m ³	385 kg/m ³
Fläche	60 m ²	60 m ²
Gesamtgewicht Vollholzdecke	1'063 kg	2'333 kg
UBP pro kg	439	439
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	1.54	1.54
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.336	0.336
UBP Balkenlage	466'481	1'024'231
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	1'636	3'593
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	357	784

Dreischichtplatte	0.035 m	0.035 m
Volumen	2.1 m ³	2.1 m ³
Rohdichte 3Schichtplatte	490 kg/m ³	490 kg/m ³
Gesamtgewicht 3-Schicht-Pl.	1'029 kg	1'029 kg
UBP pro kg	453	453
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	2.18	2.18
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.471	0.471
UBP Dreischichtplatte	466'137	466'137
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	2'243	2'243
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	485	485

	Zweifeldträger	Einfeldträger
Höhe Binder	0.92 m	1.20 m
Breite Binder	0.22 m	0.22 m
Länge Binder	10 m	10 m
Volumen Binder	2.02 m ³	2.64 m ³
Anzahl Binder	2	1
Rohdichte BSH GL24h	385 kg/m ³	385 kg/m ³
Gesamtgewicht Binder	1'558 kg	1'016 kg
UBP pro kg	439	439
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	1.54	1.54
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.336	0.336
UBP Binder	684'173	446'200
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	2'400	1'565
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	524	342

UBP gesamt	1'616'791	1'936'568
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	6'280	7'401
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	1'365	1'610

Anhang 8

Berechnung Holz-Beton-Verbundbau

Annahmen

	Angaben Beton	Angaben Holz	Berechnen Verbundquerschnitt
h	0.1 m	h ₁ 100 mm	d 27 mm
Achsmass Balken	2 m	b _{eff} 1128 mm	h _{Strich} 177 mm
Rohdichte Beton	25 kN/m ³	A ₁ 112800 mm ²	s 200 mm
Balken		A ₂ 200 mm ²	s' 100 mm
h	0.2 m	E _{Beton} 32000 N/mm ²	d _{Schraube} 10 mm
b	0.16 m	E _{Holz} 11500 N/mm ²	K _{ser,0} 4009 N/mm
Balkenlänge	3 m	a ₁ 10.58 mm	γ 0.01
E _{Holz}	11500 N/mm ²	a ₂ 166.42 mm	
b _{eff,i}	0.484 m	I _y 9.40E+07 mm ⁴	
Rohdichte BSH	3.8 kN/m ³	I _{y,ef} 2.67E+08 mm ⁴	
Annahmen Binder			
Länge	10000 mm	Spannung im Betonquerschnitt	Spannung im Holzquerschnitt
Breite	220 mm		Beanspruchung der Verbindungsmitte
Max Durchbiegung	20 mm	S _{m,1,d} 6.43 N/mm ²	F _{Ed} 19.34 N
Binderabstand	3000 mm	S _{f,c,1,d} 0.01 N/mm ²	

Eigenlast Beton	2.5 kN/m ²
Eigenlast Balken	0.1 kN/m ²
Nutzlast	5.0 kN/m ²
GZ Tragsicherheit ULS	11.0 kN/m
GZ Gebrauchstauglichkeit SLS selten	7.6 kN/m
Max Durchbiegung	6.0 mm
Max Moment (vereinfacht)	12326152.5 Nmm
Max Moment (vereinfacht)	12.3 kNm
Max V _{Ed}	16.4 kN

Erforderliche Balkenhöhe für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

h _{erforderlich} [mm]	153.2 mm
Gewählt h [mm]	200.0 mm

Nachweis Tragsicherheit

Statische Moment W	1066666.7 mm ³
Spannung σ _{ma}	11.6 N/mm ²
Erlaubte Spannung	16.0 N/mm ²
Nachweis	Nachweis erfüllt

Berechnung Binder

Binderabstand	3.0 m
Eigengewicht Binder (Annahme)	0.8 kN/m
Linienlast auf Binder SLS	23.4 N/mm
Linienlast auf Binder ULS	33.9 N/mm

Erforderliche Balkenhöhe für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

h _{erforderlich} [mm]	897.9 mm
Gewählt h [mm]	920.0 mm

Nachweis Tragsicherheit

Max Moment	423771579.7 Nmm
Statische Moment W	31034666.7 mm ³
Spannung σ _{ma}	13.7 N/mm ²
Erlaubte Spannung	16.0 N/mm ²
Nachweis	Nachweis erfüllt

Anhang 9

Ökobilanz Holzbetonverbund

Volumen Balkenlage pro m ²	0.016 m ³
Rohdichte BSH GL24h	385 kg/m ³
Fläche	60 m ²
Gesamtgewicht Vollholzdecke	370 kg
UBP pro kg	439
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	1.54
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.336
UBP Balkenlage	162'254
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	569
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	124

Dreischichtplatte	0.027 m
Volumen	1.6 m ³
Rohdichte 3Schichtplatte	490 kg/m ³
Gesamtgewicht 3-Schicht-Pl.	794 kg
UBP pro kg	453
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	2.18
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.471
UBP Dreischichtplatte	359'591
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	1'730
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	374

Betonstärke	0.10 m
Volumen	6.0 m ³
Rohdichte Beton	2'300 kg/m ³
Gesamtgewicht Beton	13'800 kg
UBP pro kg	154
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	0.175
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.101
UBP Beton	2'125'200
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	2'415
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	1'394

Bewehrungsvolumen	0.030 m ³
Rohdichte Bewehrung	7'850 kg/m ³
Gesamtgewicht	235.5 kg
UBP pro kg	2'930
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	4.94
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	1.52
UBP Bewehrung	690'015
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	1'163
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	358

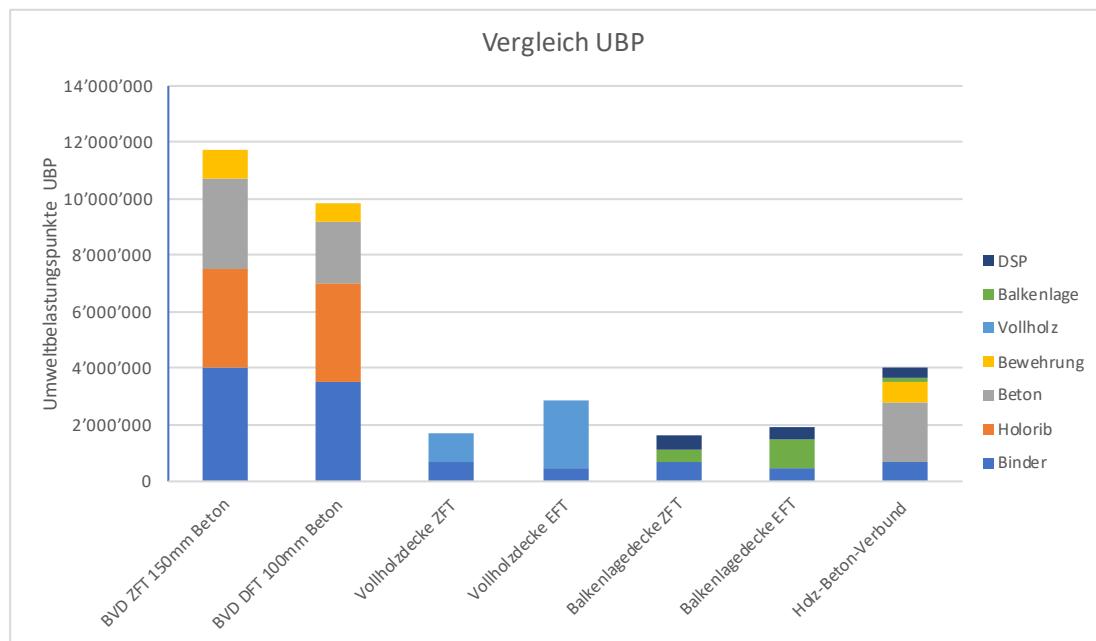
Zweifeldträger	
Höhe Binder	0.92 m
Breite Binder	0.22 m
Länge Binder	10 m
Volumen Binder	2.02 m ³
Anzahl Binder	2
Rohdichte BSH GL24h	385 kg/m ³
Gesamtgewicht Binder	1'558 kg
UBP pro kg	439
Graue Energie kWh oil-eq pro kg	1.54
Treibhausgasemission kg CO ₂ -eq pro kg	0.336
UBP Binder	684'173
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	2'400
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	524

UBP gesamt	4'021'234
Graue Energie gesamt kWh oil-eq	8'278
Treibhausgasemission gesamt kg CO ₂ -eq	2'773

Anhang 10

	BVD ZFT 150mm Beton	BVD DFT 100mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton- Verbund
Binder	4'030'000	3'537'300	684'173	461'073	684'173	446'200	684'173
Holorib	3'509'820	3'509'820					
Beton	3'187'800	2'125'200					2'125'200
Armierung	1'035'023	690'015					690'015
Vollholz			1'014'090	2'433'816			
Balkenlage					466'481	1'024'231	162'254
DSP					466'137	466'137	359'591
UBP gesamt	11'762'643	9'862'335	1'698'263	2'894'889	1'616'791	1'936'568	4'021'234

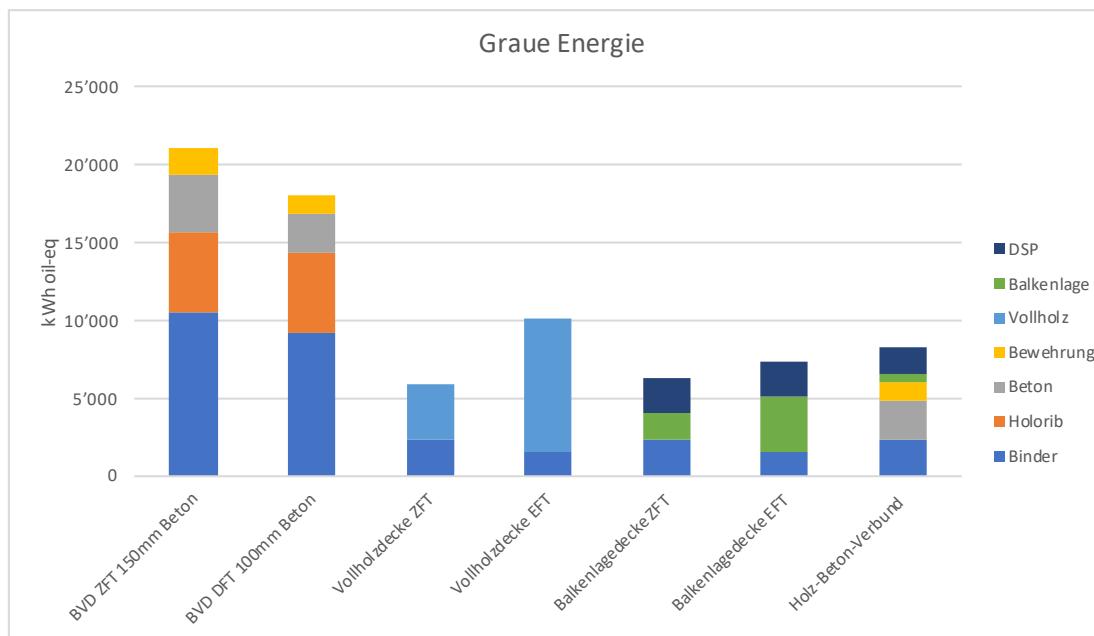
	BVD DFT 100mm Beton	BVD DFT 260mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton-Verbund
Binder	34.3%	35.9%	40.3%	15.9%	42.3%	23.0%	17.0%
Holorib	29.8%	35.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Beton	27.1%	21.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	52.8%
Armierung	8.8%	7.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	17.2%
Vollholz	0.0%	0.0%	59.7%	84.1%	0.0%	0.0%	0.0%
Balkenlage	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.9%	52.9%	4.0%
DSP	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.8%	24.1%	8.9%
UBP gesamt	728%	610%	105%	179%	100%	120%	249%



Graue Energie (kWh oil-eq)

	BVD ZFT 150mm Beton	BVD DFT 100mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton- Verbund
Binder	10'478	9'197	2'400	1'617	2'400	1'565	2'400
Holorib	5'195	5'195					
Beton	3'623	2'415					2'415
Armierung	1'745	1'163					1'163
Vollholz			3'557	8'538			
Balkenlage					1'636	3'593	569
DSP					2'243	2'243	1'730
UBP gesamt	21'040	17'970	5'957	10'155	6'280	7'401	8'278

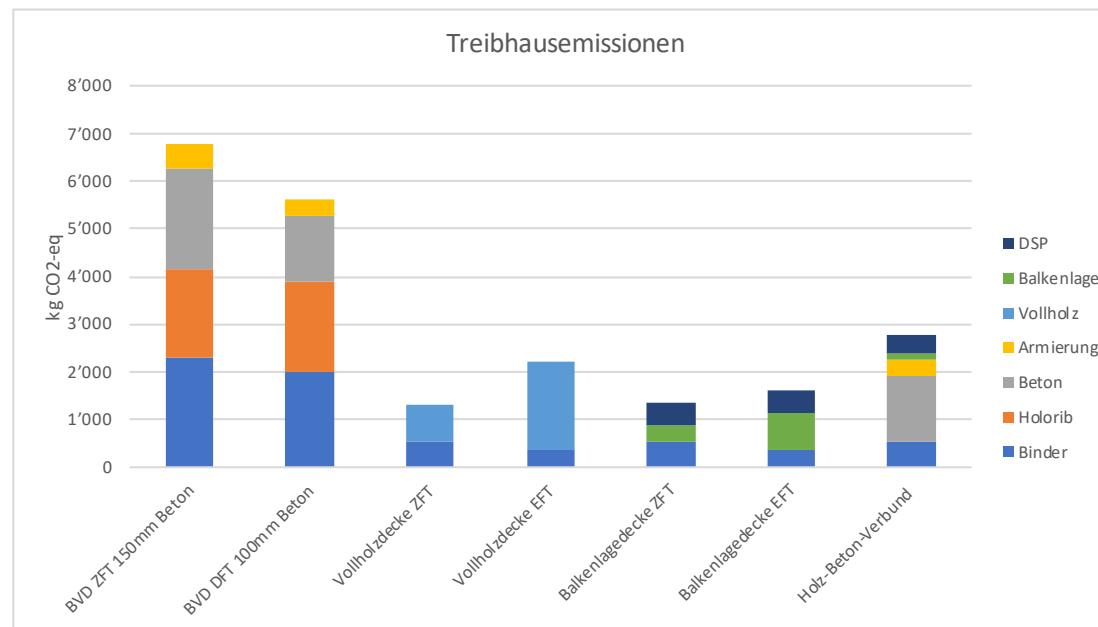
	BVD DFT 100mm Beton	BVD DFT 260mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton-Verbund
Binder	49.8%	51.2%	40.3%	15.9%	38.2%	21.1%	29.0%
Holorib	24.7%	28.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Beton	17.2%	13.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	29.2%
Armierung	8.3%	6.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	14.1%
Vollholz	0.0%	0.0%	59.7%	84.1%	0.0%	0.0%	0.0%
Balkenlage	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	26.1%	48.5%	6.9%
DSP	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	35.7%	30.3%	20.9%
Graue Energie	353%	302%	100%	170%	105%	124%	139%



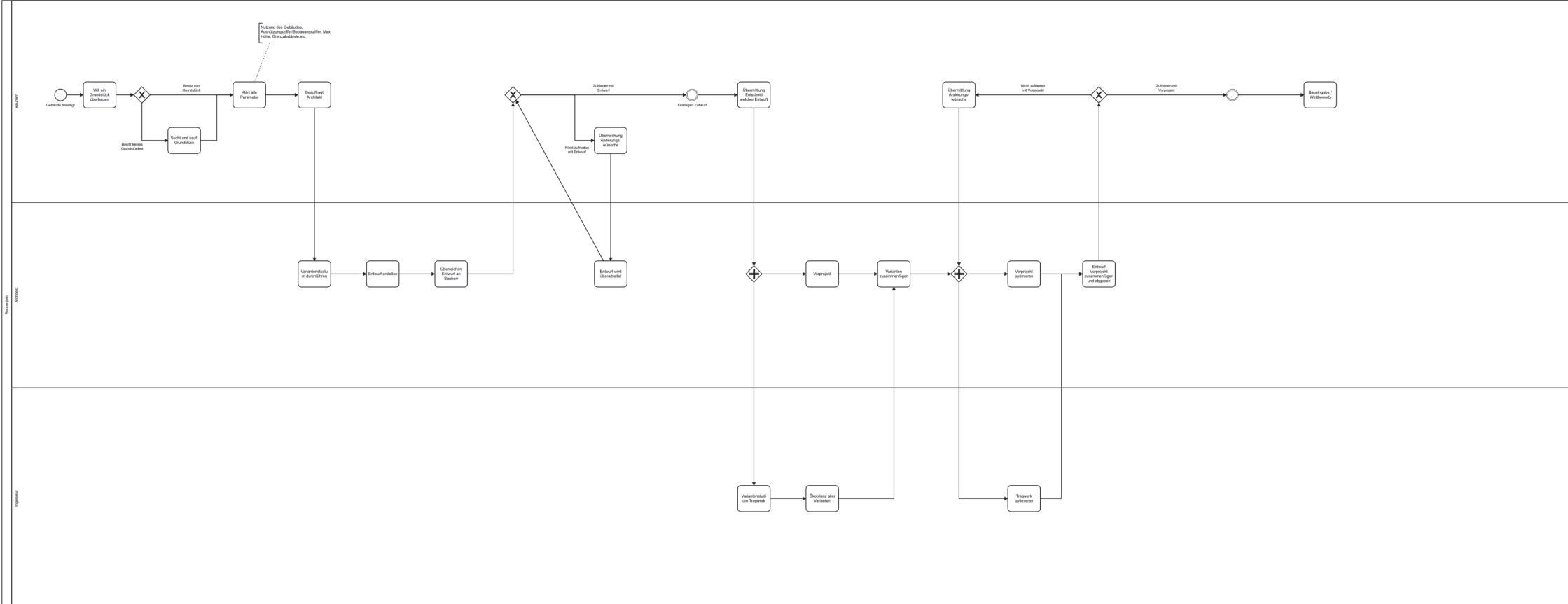
Treibhausgase (kg CO₂-eq)

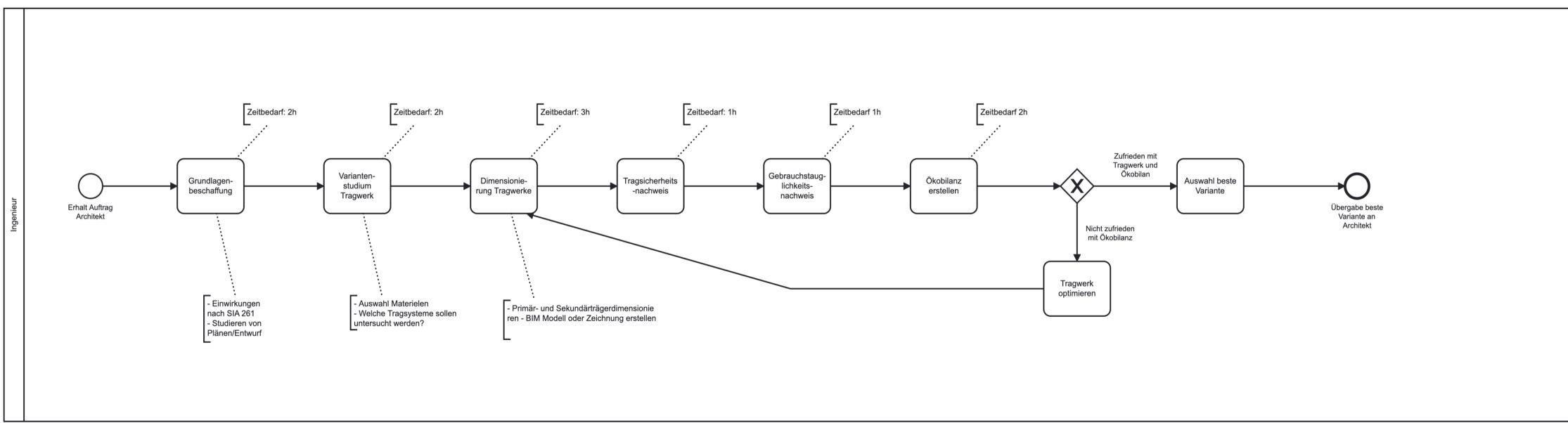
	BVD ZFT 150mm Beton	BVD DFT 100mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton- Verbund
Binder	2'288	2'008	524	353	524	342	524
Holorib	1'865	1'865					
Beton	2'091	1'394					1'394
Armierung	537	358					358
Vollholz			776	1'863			
Balkenlage					357	784	124
DSP					485	485	374
UBP gesamt	6'780	5'625	1'300	2'216	1'365	1'610	2'773

	BVD DFT 100mm Beton	BVD DFT 260mm Beton	Vollholzdecke ZFT	Vollholzdecke EFT	Balkenlagedecke ZFT	Balkenlagedecke EFT	Holz-Beton-Verbund
Binder	33.7%	35.7%	40.3%	15.9%	38.4%	21.2%	18.9%
Holorib	27.5%	33.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Beton	30.8%	24.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	50.3%
Armierung	7.9%	6.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.9%
Vollholz	0.0%	0.0%	59.7%	84.1%	0.0%	0.0%	0.0%
Balkenlage	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	26.1%	48.7%	4.5%
DSP	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	35.5%	30.1%	13.5%
UBP gesamt	522%	433%	100%	170%	105%	124%	213%



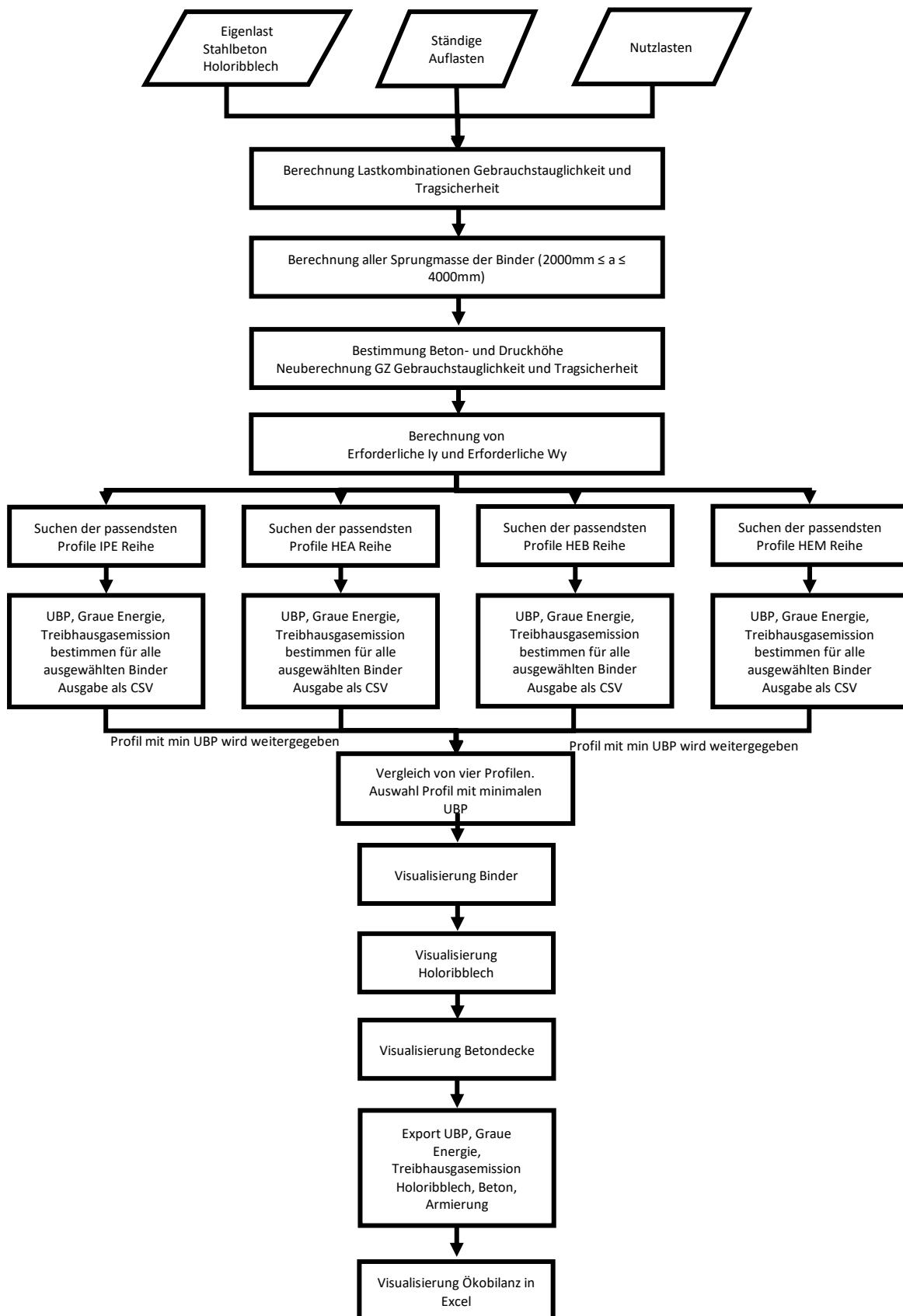
Anhang 11



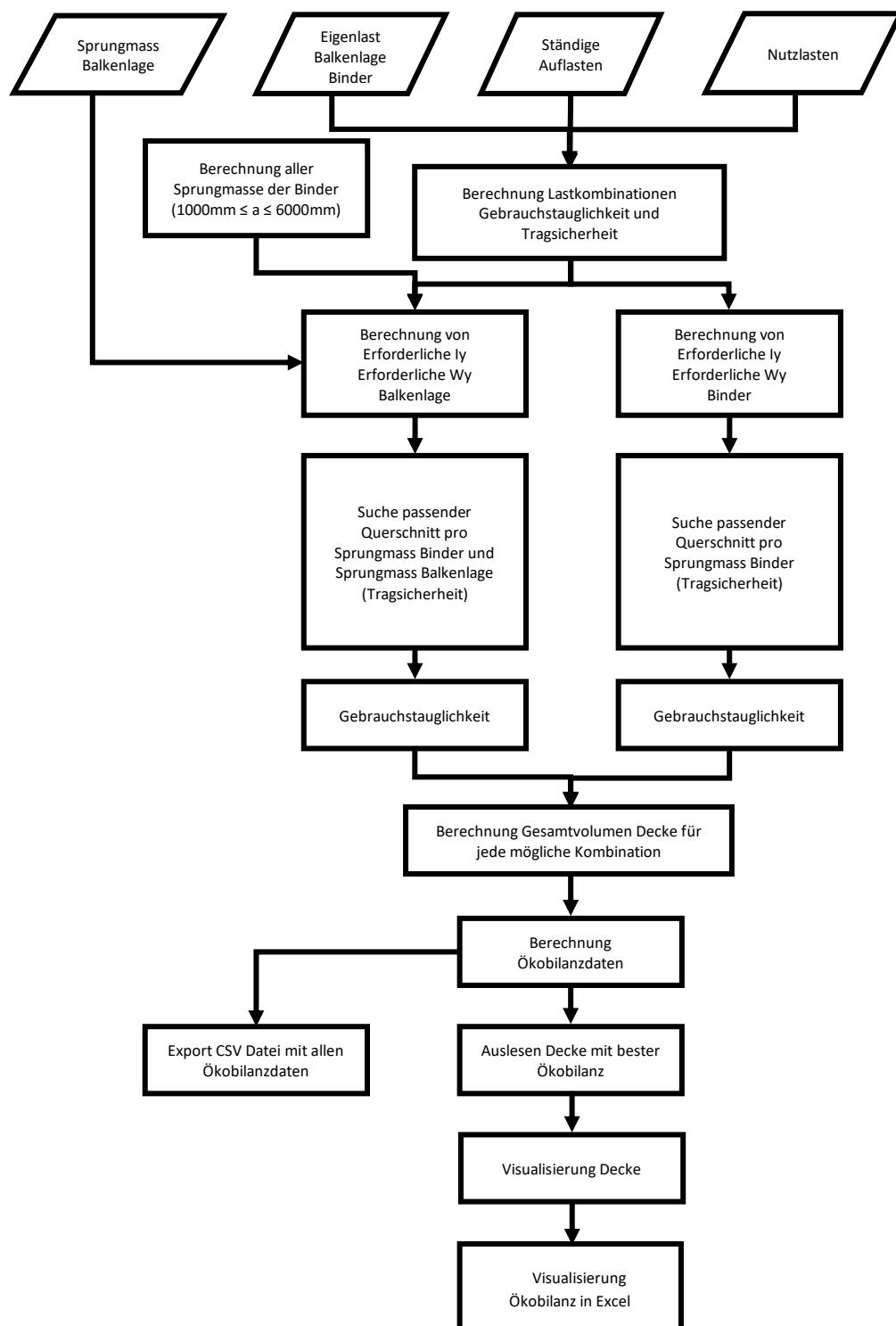


Anhang 12

Holoribdecke



Holzdecke

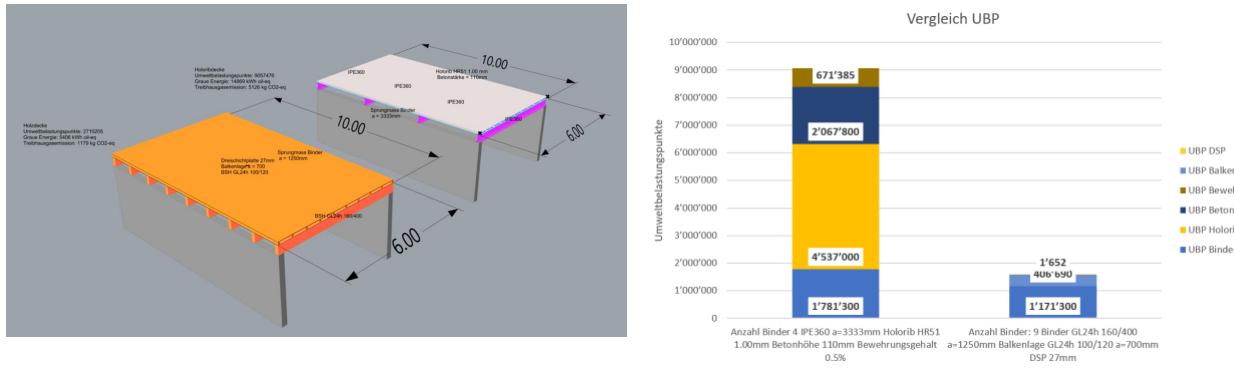


Anhang 13

Vergleich parametrischer Deckensysteme

Analyse des statischenen Verhaltens im Vergleich zur Ökobilanz

Anleitung Rhino/Grasshopperanwendung



Entwickelt von:
Fabian Hug
Oristalstrasse 12
4410 Liestal
Tel. 078 693 65 92
E-Mail hug.fabian@gmail.com

Liestal, 19.08.2022

1 Einführung

Die folgende Anleitung soll allen Nutzenden dienen, welche die Grasshopperanwendung für die Findung von ökologischen Deckensystemen verwenden. Das Werkzeug soll zu Beginn von Bauprojekten, also noch in der Entwurfs- oder Vorprojektphase, dienen, die richtigen Materialien in Bezug auf die Ökobilanz auszuwählen. Wird bereits am Anfang eines Projektes auf die Ökologie geachtet, können bessere Ökobilanzen erreicht werden, als wenn erst bei der Ausführungsplanung die Materialien nach den Ökowerten ausgewählt werden.

Das Programm ist im Betriebssystem Windows entwickelt und die Anleitung ist demnach auch für Windowsnutzende. Nicht alle Plugins in Grasshopper funktionieren auf Applegeräten. Daher ist die Windowsnutzung empfehlenswert.

2 Vorbereitung

Um das Werkzeug benutzen zu können müssen einige Vorbereitungsarbeiten getroffen werden. Auf der einen Seite müssen die Computerprogramme installiert sein, auf der anderen Seite müssen die projektspezifischen Parameter mit den Auftraggebenden und den Architekten definiert werden.

2.1 Technische Vorbereitungen

Damit das Werkzeug ausgeführt werden kann, bedarf es einiger Softwarepakete und Erweiterungen. Nachstehend aufgelistet alle notwendigen Programme:

1. Rhinoceros 6 oder 7
2. Grasshopper mit folgenden Plugins
 - Pufferfish
 - Karamba3D
 - Pancake
 - LunchBox
 - GeomGymIFC
 - Human
3. Microsoft Excel

Pufferfish, Pancake, Human und LunchBox sind in der ZIP Datei, in welcher auch das Grasshopperfile abgelegt ist. Zudem beinhaltet die ZIP Datei einen Ordner mit dem Namen «Oekobilanz». Das Zip-File muss entzipt und an einem beliebigen Ort auf dem Computer gespeichert werden. Die Plugins müssen folgendermassen installiert werden.

1. Rhino starten, Grasshopper öffnen
2. Ordner, wo alle Plugins gespeichert werden müssen, öffnen (Abbildung 1)

File, Special Folders, Components Folder

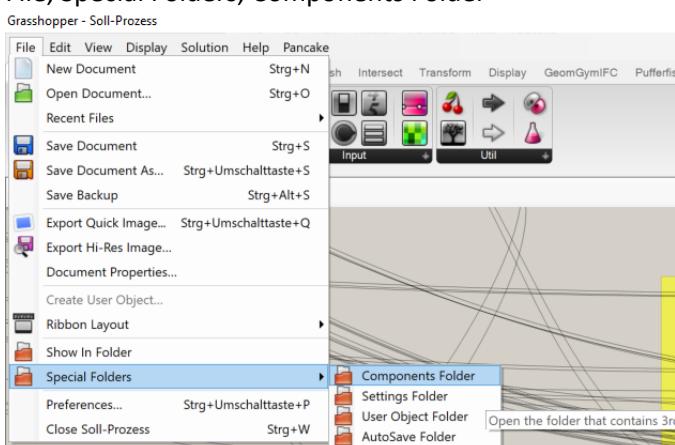


Abbildung 1 Aufrufen Ordner für Speichern von Plugins

3. Pufferfish3-0.gha, Pancake.gha, human.gha und LunchBox.gha in Ordner kopieren
4. Kontrollieren, ob Datei von Windows gesperrt wird (Abbildung 2)
 - o Rechtsklick auf jede *.gha Datei, Eigenschaften
 - o Allgemein, Sicherheit
 - o Haken bei «Zulassen» setzen

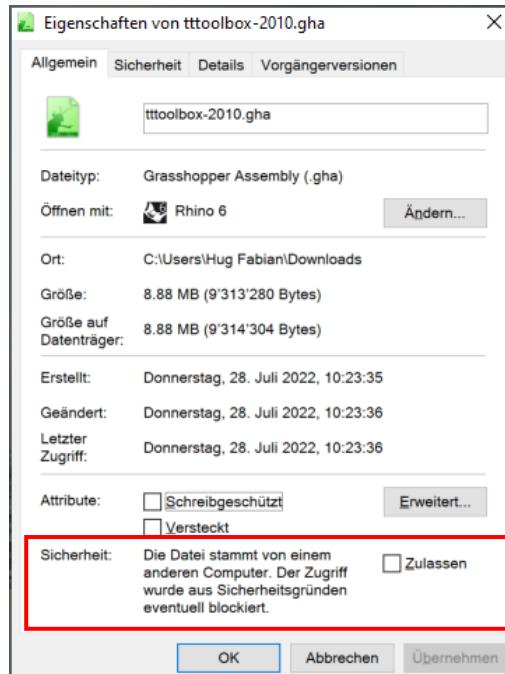


Abbildung 2 Eigenschaftenfenster *.gha Datei

5. Alle *.gha Dateien von Ordner in Grasshopperfenster ziehen
6. Die Plugins sollten in der Menuleiste sichtbar sein (roter Rahmen)

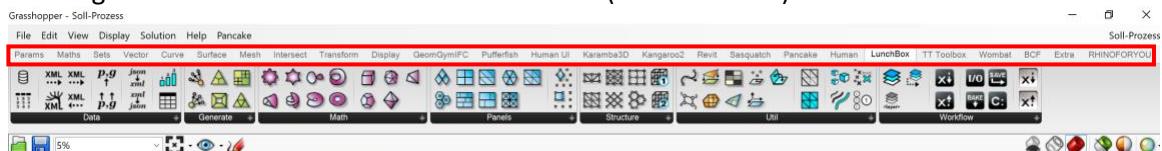


Abbildung 3 Menuleiste Grasshopper

Das GeomGymIFC muss derart installiert werden.

1. In der Rhino-Befehlszeile folgendes eingeben
 - o In Rhino 6: Testpackagemanager
 - o In Rhino 7: Packagemanager
2. Paket-Manager öffnet sich
3. ggRhinoIFC suchen, Button «Herunterladen und installieren» drücken

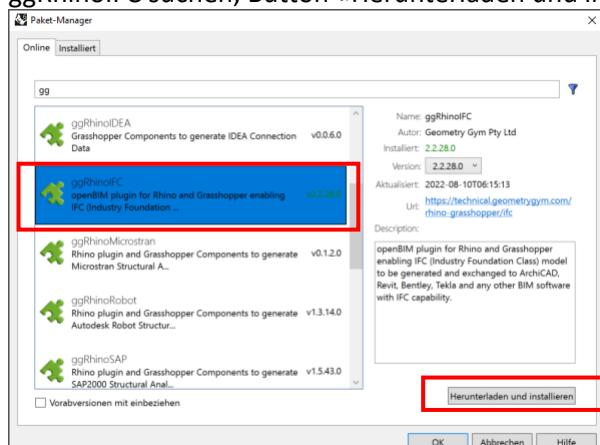


Abbildung 4 Paket-Manger Rhino

4. ggZZLicenseRequest in Rhino-Befehlszeile eingeben

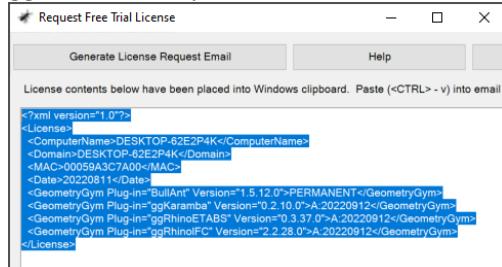


Abbildung 5 Anfragefenster für Lizenz ggRhinoIFC

5. Text (blau markiert in Abbildung 5) kopieren. Diesen Text per Mail an jonm@geometrygym.com senden
6. Antwort auf Mail enthält Lizenz als XML-Datei. Diese Datei auf Computer speichern.
Empfohlener Speicherort: C:\ProgramData\GeometryGym
7. ggZZLicenceUpdate in Rhino-Befehlszeile eingeben. XML-Datei aus 6 auswählen
8. Rhino neu starten

Karamba3D muss vom Internet, auf <https://bit.ly/3PswSyj>, heruntergeladen werden. Die kostenlose Version reicht für das Werkzeug für die Findung der ökologischen Decken aus. Eine detaillierte Installationsanleitung ist auf Youtube unter folgendem Link auffindbar:
<https://bit.ly/3bYUEUS>

2.2 Projektspezifische Vorbereitungen

Für die Berechnung benötigt das Programm Last- und Materialannahmen. Die Lastannahmen müssen primär mit der auftraggebenden Person und mit dem Architekten oder der Architektin besprochen werden. Bei den Auflasten handelt es sich um

- die ständigen Auflasten (Standardwert 2 kN/m²)
- die Nutzlast

Unter die ständigen Auflasten fallen die Einwirkungen aus dem Bodenaufbau, einer niedergehängten Decke und den Leitungen. Bei den Nutzlasten kann entweder eine Kategorie aus der SIA 261, Tabelle 8 ausgewählt werden oder es kann ein eigener Wert eingegeben werden.

Die Lastannahmen muss der Ingenieur oder die Ingenieurin bestimmen. In den meisten Fällen ist es zugleich die Person, welche die Grasshopperanwendung bedient. Es sind für alle Angaben bereits Standardwerte eingegeben. Für die erste Berechnung müssen keine Veränderungen vorgenommen werden. In der Tabelle 1 sind alle Parameter, welche verändert werden können. In der rechten Spalte steht sogleich der vergebene Wert.

Decke	Material	Parameter	Defaultwert
Holoribblechdecke	Beton	Betondruckfestigkeit Betonstärke zu Beginn	C25/30, f _{ck} = 25 kN/m ² 150 mm
	Holoribblech	Streckgrenze	320 N/mm ²
	Stahl	Stahlsorte	SE235, f _y = 235 N/mm ²
Holzdecke	Brettschichtholz	Biegefestigkeit E-Modul	GL24h, f _{m,d} = 16 N/mm ² GL24h, E _{m,mean} = 11'500 N/mm ²
	Balkenlage	Eigengewicht Balkenlage	0.3 kN/m ²
	Binder	Eigengewicht Binder	1.0 kN/m ²
	Dreischichtplatte	Stärke	d = 27mm

Tabelle 1 Materialparameter Berechnungsvorgang

3 Anwendung in Grasshopper

Sind alle Parameter definiert, kann mit dem Benutzen der Grasshopperanwendung begonnen werden. Dafür muss die Datei, fendoekodecke.gh mit Doppelklick gestartet werden. Rhino und Grasshopper öffnet sich. Beim Öffnen ist eine grüne Maske zu sehen (Abbildung 7). Falls dies nicht geschieht, muss zuerst neben dem Auge auf das Dreieck und dann auf das kleine Auge neben «Startansicht» geklickt werden (Abbildung 6). Innerhalb dieses grünen Feldes lassen sich alle Eingabeparameter verändern.

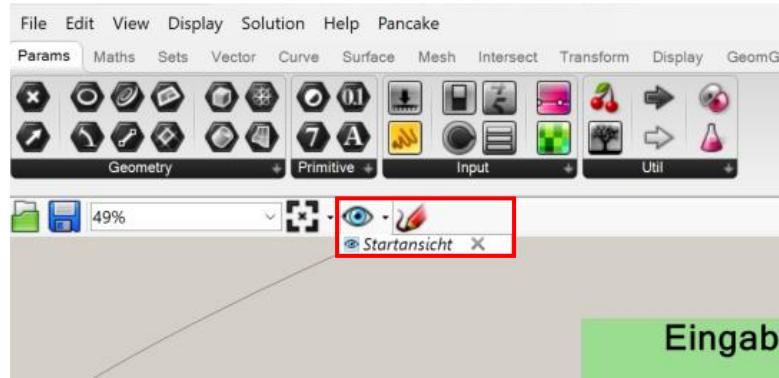


Abbildung 6 Einstellung Startansicht

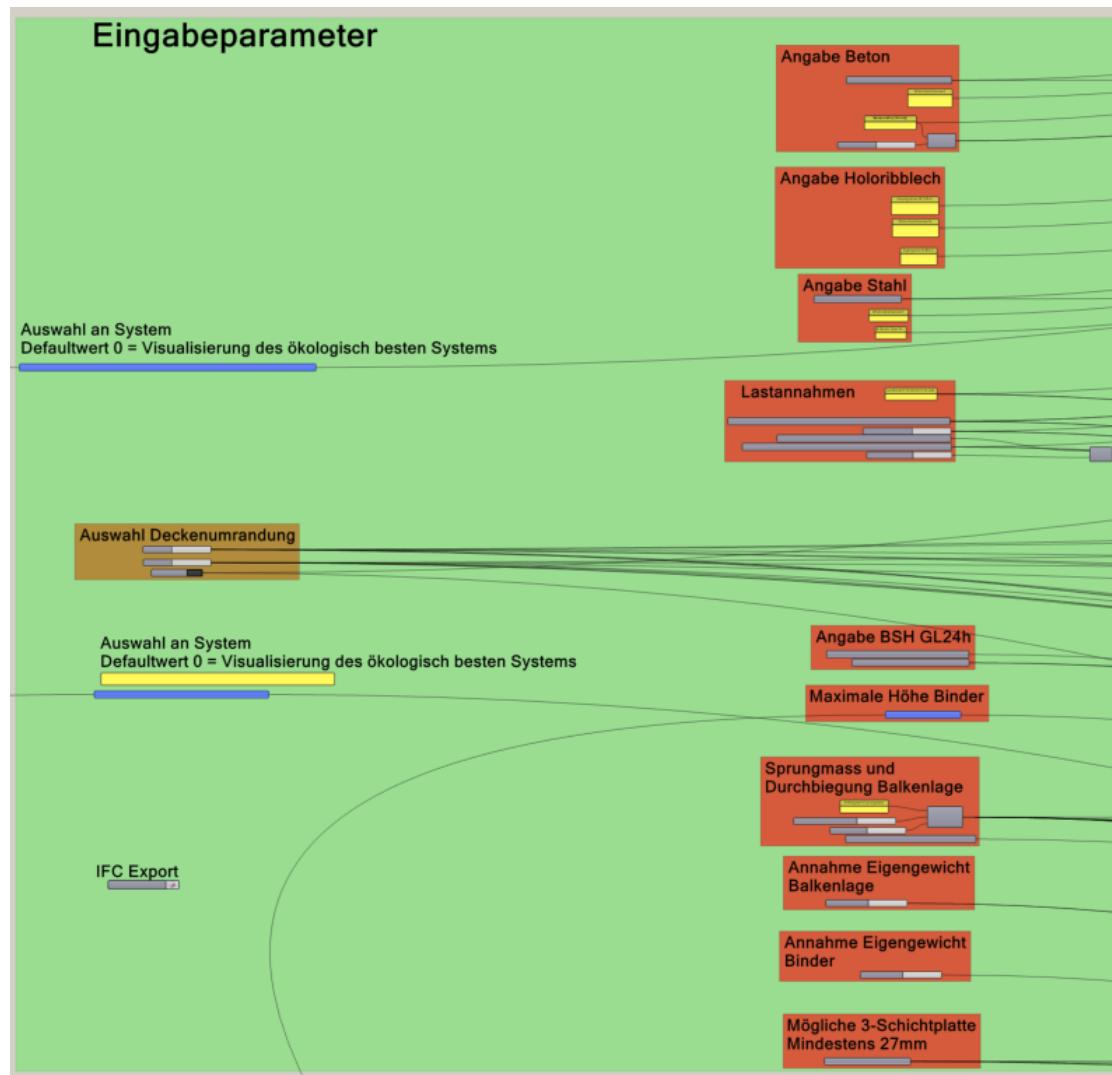


Abbildung 7 Ansicht beim Öffnen der Grasshopperdatei | Parametereingabe

In der nachstehenden Tabelle sind alle Eingabemöglichkeiten erläutert. Wie bereits in Kapitel 2.2 erklärt, sind überall Defaultwerte hinterlegt. Diese vorgegebenen Werte lassen eine erste Berechnung zu, ohne dafür Eingaben vorzunehmen.

<h3>Auswahl Deckenumrandung</h3>	<p>Mit Hilfe der beiden Numbersliders lässt sich die äussere Umrandung der Decke bestimmen. Ist die Decke nicht rechteckig, so muss die Fläche in Rechtecke geteilt und einzeln analysiert werden. Der Boolean Toggle soll zu Beginn auf False sein. Falls nicht die ökologischste Variante dargestellt werden soll, muss der Toggle auf True geändert werden.</p>
<h3>Angabe Beton</h3>	<p>Hier lässt sich der einzusetzende Beton bestimmen. Der Widerstandsbeiwert von Beton ist durch die SIA vorgeben, ebenso die Betonwichte. Die Wichte ist für Stahlbeton, das heisst, die Armierung ist sogleich miteinberechnet. Die Betondruckfestigkeit und die Betonstärke sind variabel.</p>
<h3>Angabe Holoribblech</h3>	<p>Das sind alles Standardwerte und sind alle auf das Holoribblech HR 51 1.00 mm bezogen. Die Eingaben sollen so belassen werden.</p>

<h2>Angabe Stahl</h2>	<p>Mit Hilfe dieser Dropdown-Liste kann die Stahlsorte ausgewählt werden. Zur Auswahl stehen S235 und S355. Der Widerstandsbeiwert und das E-Modul sollen nicht verändert werden.</p>
<h2>Lastannahmen</h2>	<p>Die Lastbeiwerte sind Standardwerte und fix. Die ständigen Auflasten müssen mit dem Numberslider gesetzt werden. Die Nutzlast kann im Dropdown-Liste ausgewählt werden. Wenn NL aus der Liste ausgewählt wird, muss im untersten Numberslider 0 stehen. Der Reduktionswert muss dabei die gleiche Kategorie besitzen. Möglich ist auch eine manuelle Eingabe der Nutzlast über den untersten Numberslider. Zu beachten ist, dass der Reduktionswert dann auf «frei gewählt» gesetzt sein muss (Reduktionsbeiwert = 1).</p>
<h2>Angabe BSH GL24h</h2>	<p>Mit diesen beiden Dropdown-Listen lassen sich die Festigkeitsklassen der Binder und der Balkenlage bestimmen. Die übliche Klasse ist dabei das Brettschichtholz GL24h.</p>
<h2>Maximale Höhe Binder</h2>	<p>Hier kann die Höhe des Holzbinders limitiert werden. Standardmäßig liegt der Wert bei 1120 mm.</p>
<h2>Sprungmass und Durchbiegung Balkenlage</h2>	<p>In diesem Feld werden die Sprungmasse der Balkenlage mit Hilfe einer Serie definiert. Im Panel (gelbes Feld) steht der Startwert. Im oberen Numberslider kann der Abstand zwischen den Sprungmassen bestimmt werden. Im unteren Numberslider ist die Anzahl Sprungmasse definiert. Mit den vorgegebenen Werten entstehen die Sprungmasse 500 mm, 600 mm und 700 mm. In der Dropdown-Liste kann das System der Balkenlage für die Durchbiegung ausgewählt werden. Es steht ein Einfeldträger oder ein Zweifeldträger zur Auswahl.</p>
<h2>Annahme Eigengewicht Balkenlage</h2>	<p>Hier kann das Eigengewicht der Balkenlage in kN/m² gesetzt werden.</p>

<h2>Annahme Eigengewicht Binder</h2> <div style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> Annahme EG Balkenlage <input checked="" type="radio"/> Annahme EG Plattenlage <input type="radio"/> Annahme EG Betonplatte </div>	<p>Hier kann das Eigengewicht der Binder in kN/m² gesetzt werden.</p>
<h2>Mögliche 3-Schichtplatte Mindestens 27mm</h2> <div style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> 3-Schichtplatte <input checked="" type="radio"/> 27mm <input type="radio"/> 50mm </div>	<p>In dieser Dropdown-Liste kann die Stärke der Dreischichtplatte bestimmt werden. Die Dreischichtplatte muss dabei mindestens 27 mm stark sein.</p>

Tabelle 2 Mögliche Parametereinstellungen

Sind alle Einstellungen so eingestellt, wie mit den auftraggebenden Personen besprochen, berechnet das Programm verschiedene Kombinationen von Sprungmassen, Binderabständen oder Profilquerschnitten. Alle Möglichkeiten werden als CSV Datei exportiert. Ebenfalls werden die ökologisch besten Varianten in die CSV-Datei Holorib best.csv und Holzdecke best.csv exportiert. Mit dieser Datei lassen sich Visualisierungen in Excel vornehmen. Mehr dazu ist in Kapitel 4 nachzulesen. Der Deckenaufbau beider Deckentypen mit der besten Ökobilanz wird in Rhino dargestellt. Dabei werden alle Bauteile beschriftet, die Außenkanten vermasst und die Gesamtumweltbelastung mit Umweltbelastungspunkten, grauer Energie und Treibhausgasemission ausgegeben. Die Beschriftung ist dynamisch und passt sich jeweils der aktuellen Ansicht an. Für Präsentationen ist die perspektivische Ansicht von Vorteil. Die Beschriftungen sind auf der Drauf-Ansicht optimal. Die Ansichten können unten links gewechselt werden. In den nachstehenden beiden Abbildungen ist die Drauf- und die perspektivische Sicht dargestellt.

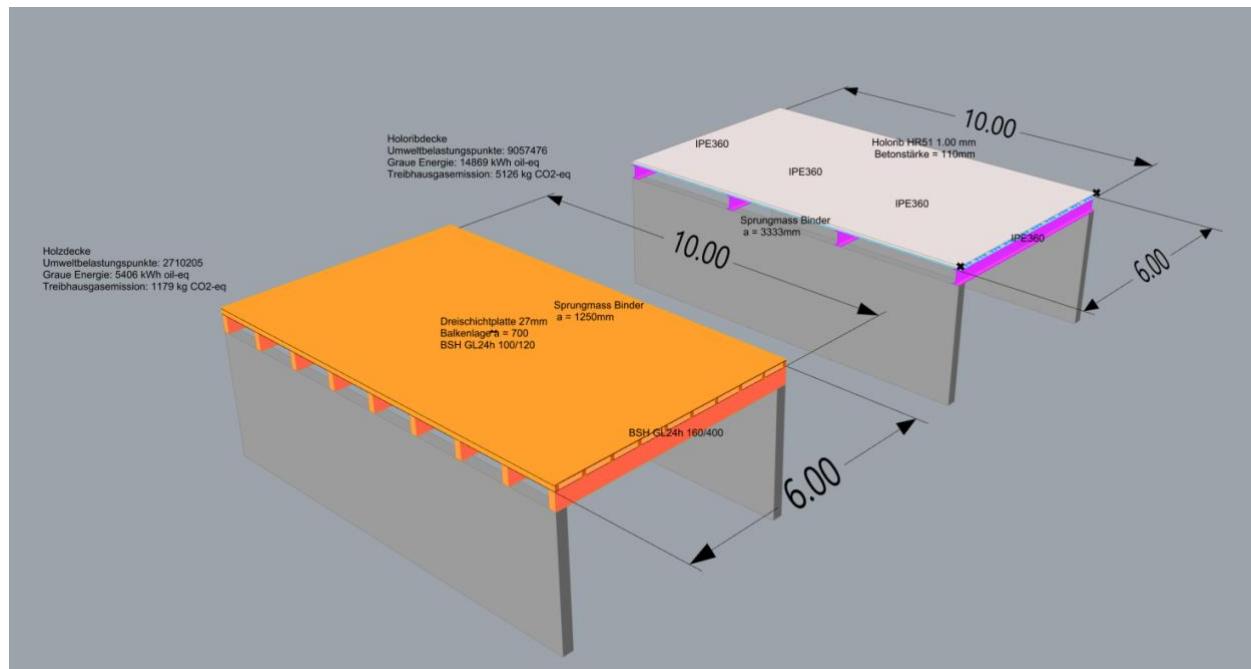


Abbildung 8 Perspektivische Ansicht

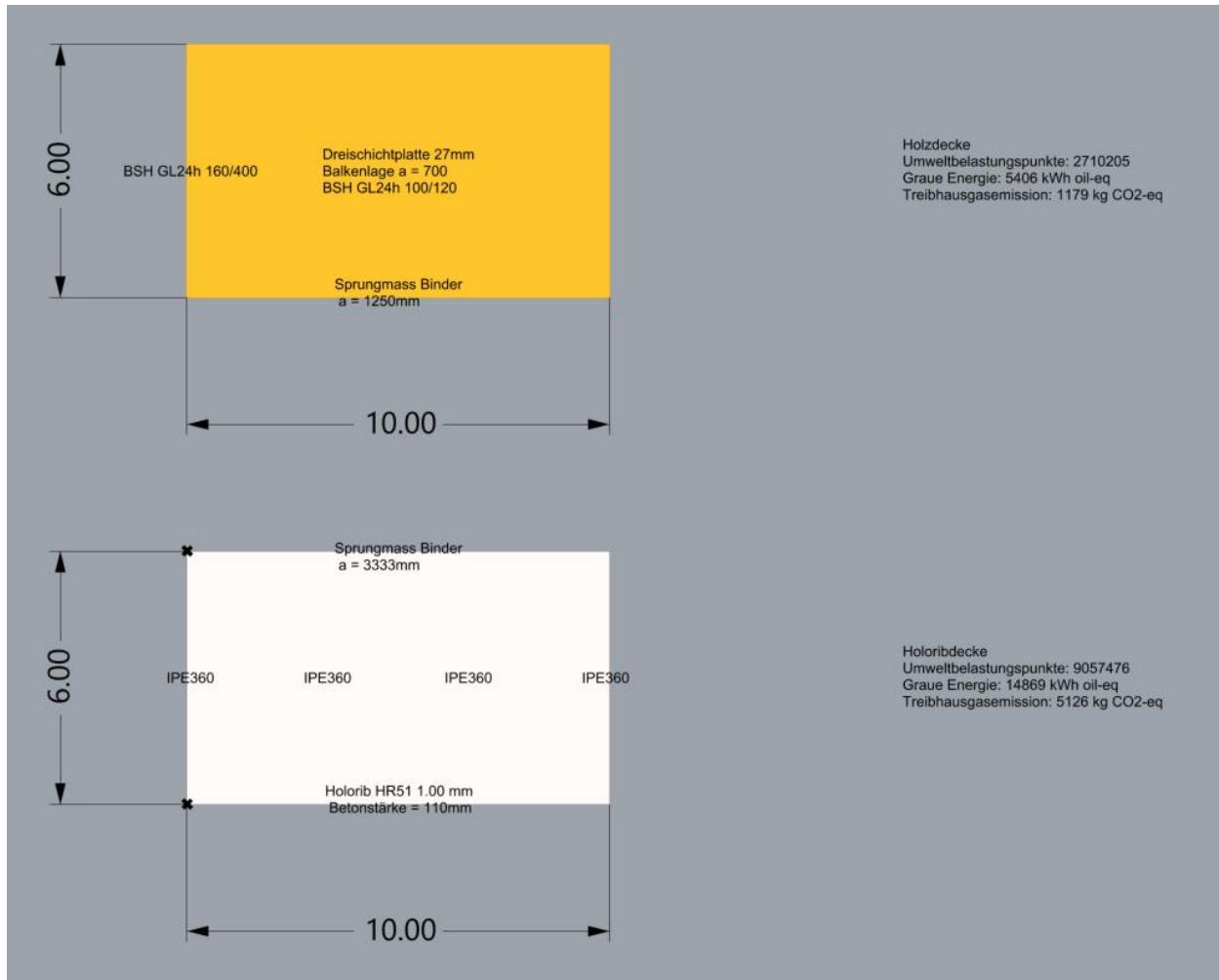


Abbildung 9 Draufsicht

Ist ein anderer Deckenaufbau gewünscht, kann dies im Feld Parametereingabe (Abbildung 7) geändert werden. Als erstes muss der Boolean Toggle im Feld «Auswahl Deckenumrandung» auf True gestellt werden. Danach ist das gewünschte System in zwei Dropdown-Listen auswählbar. Die, der Holoribdecke ist in **Error! Reference source not found.**, die für die Holzdecke ist in **Error! Reference source not found.** zu sehen. Bei der Holzdecke erklärt ein Panel, was welche Spalte bedeutet.

Auswahl an System Holoribdecke

Auswahl an System 0 IPE360 Anzahl Profile: 4, UBP: 1781303.16, Betonhoehe: 110mm ▾

Abbildung 10 Auswahl Holoribdecke

Auswahl an System Holzdecke

Anzahl Binder;Spannmasse Binder;Breite Binder;Höhe Binder;Spannmasse Balkenlage;Breite Balken;Höhe Balken

Item Selector 3;5000.0;180;720;500;160;200 ▾

Abbildung 11 Auswahl Holzdecke

Werden andere Systeme als die ökologisch beste Variante visualisiert, werden auch die CSV-Dateien «beste» überschrieben.

Das aktuell dargestellte System kann als IFC Datei exportiert werden. Mittels Doppelklick auf das Feld ggIFC BaketoFile (Abbildung 12), welches sich im Parametereingabefeld (Abbildung 7), kann eine IFC Datei erstellt werden. Mit Rechtsklick auf das Feld können noch Einstellungen, wie die ModelViewDefinition, geändert werden. Es ist empfehlenswert, hier nichts zu verändern.

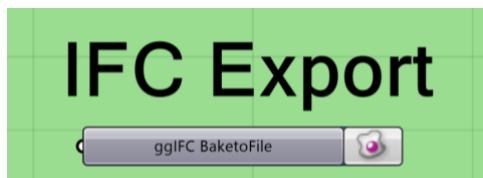


Abbildung 12 IFC BaketoFile

4 Beurteilung Resultate

Wie bereits im vorherigen Kapitel angedeutet, werden alle Ökodaten als CSV exportiert. Die Dateien, vier an der Zahl, werden im Ordner, wo sich das Grasshopperfile befindet, im Ordner «Oekobilanz» abgelegt. Die vier Dateien sind in nachstehender Tabelle beschrieben.

Holorib best.csv	Daten der Holoribdecke, die visualisiert wird. Standardmässig die ökologisch beste Decke.
Holoribdecke.csv	Alle Kombinationen von Sprungmass Binder und Binderquerschnitt.
Holzdecke best.csv	Daten der Holzdecke, die visualisiert wird. Standardmässig die ökologisch beste Decke.
Holzdecke.csv	Alle Kombinationen von Sprungmass Binder und Sprungmass Balkenlage,

Tabelle 3 CSV Export Grasshopper - Erläuterung Daten

Für die Visualisierung muss die Exceldatei, Visualisierung_Oekobilanz.xlsx, geöffnet werden. Diese Datei befindet sich ebenfalls im Ordner «Oekobilanz». Die angehängten Dateien besitzen noch den falschen Pfad. Dieser muss geändert werden. Dies geschieht folgendermassen:

1. Reiter Daten, Daten abrufen und transformieren, Daten abrufen, Datenquelleneinstellung

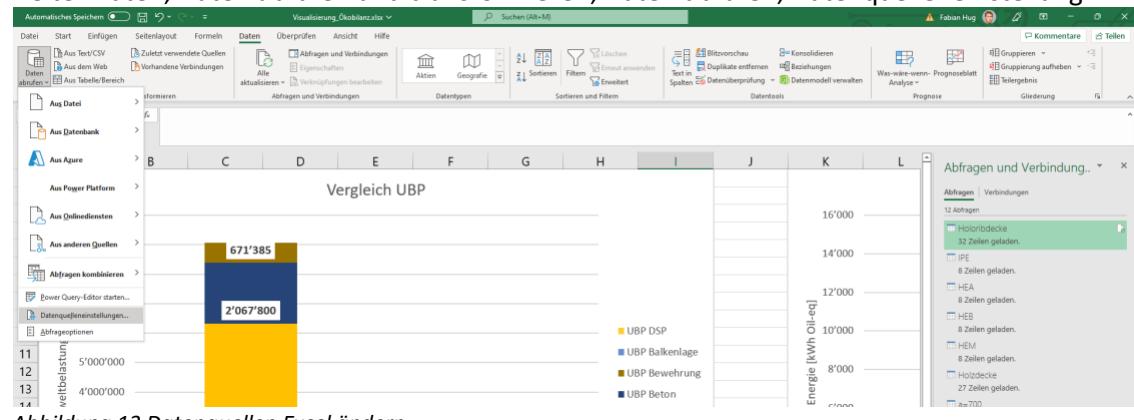


Abbildung 13 Datenquellen Excel ändern

2. Für alle vier Verbindungen den aktuellen Pfad einstellen über das Feld «Quelle ändern»
3. schliessen

Falls in Grasshopper die Parameter verändert werden, schreibt es eine neue Datei raus. Um die aktuelle Visualisierung betrachten zu können, müssen die Daten aktualisiert werden. Dies kann unter Daten, «Alle aktualisieren» erreicht werden.

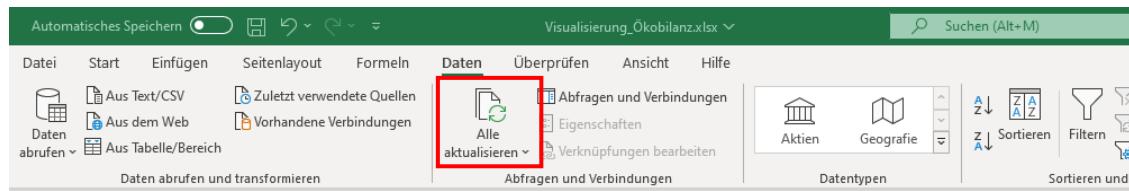


Abbildung 14 Abfrage aktualisieren

Diese Datei beinhaltet zwei Arbeitsmappen. Die erste Arbeitsmappe enthält den Vergleich der beiden besten Decken. Dort werden die beiden Deckensysteme in Umweltbelastungspunkte, grauer Energie und Treibhausgasemission verglichen. Dabei sind die Werte der einzelnen Baugruppen beschriftet und farblich markiert. So ist direkt ersichtlich, welche Bauteile den grössten Einfluss haben. Bei der Holoribdecke ist vor allem das Holoribblech umweltschädlich. Trotz vergleichbar wenig Material. Die zweite Arbeitsmappe enthält die Visualisierung aller Kombinationen aus Holorib- und Holzdecke. Die anderen Arbeitsmappen sind ausgeblendet. Mit einem Rechtsklick auf einen Reiter der Arbeitsmappen können sie eingeblendet werden. Es ist empfehlenswert, in diesen Arbeitsmappen nur die Werte zu betrachten und Nichts zu verändern. Die Chance besteht, dass der automatische Arbeitsvorgang dann nicht mehr funktioniert.

In den nachfolgenden Bildern sind zwei Diagramme abgebildet.

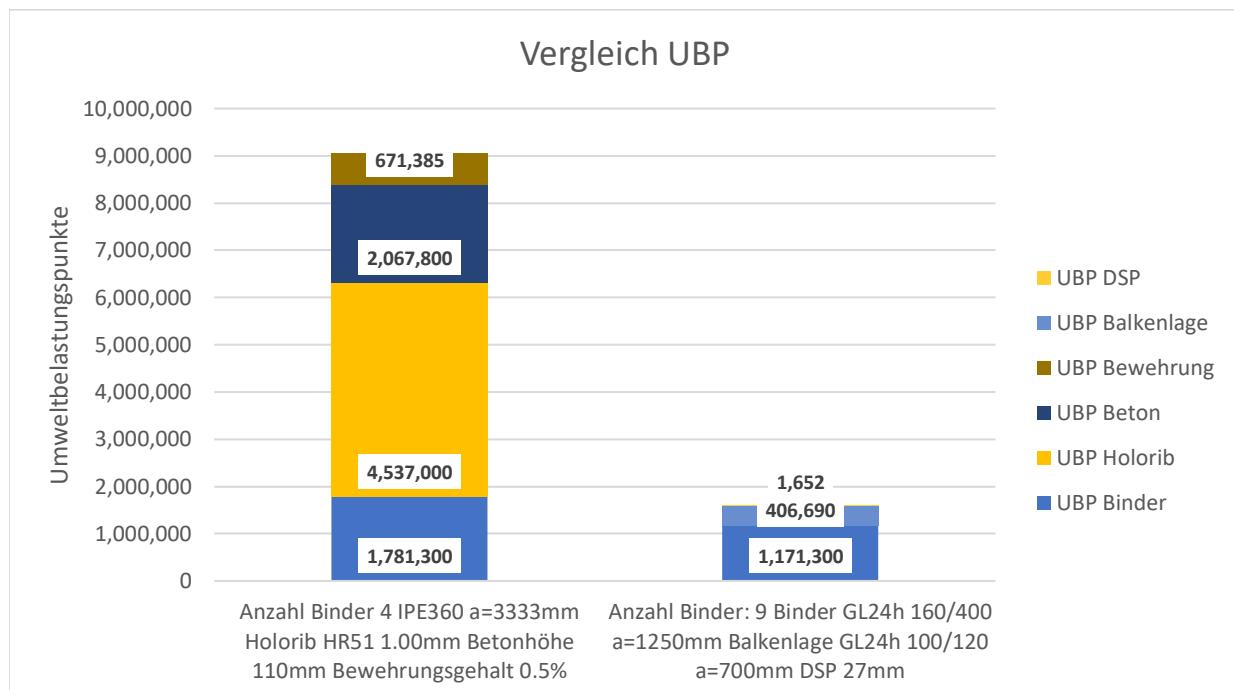


Abbildung 15 Vergleich UBP Holorib- und Holzdecke

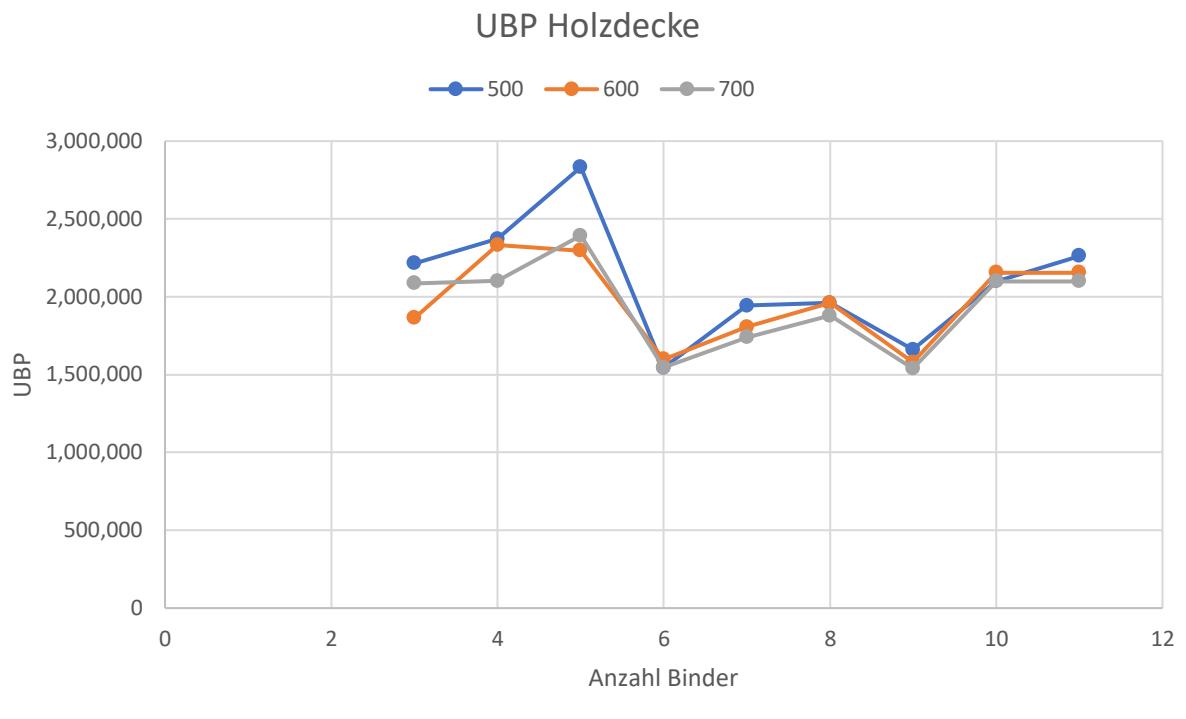


Abbildung 16 Vergleich UBP Holzdecke

Anhang 14

Vergleich Beste Varianten

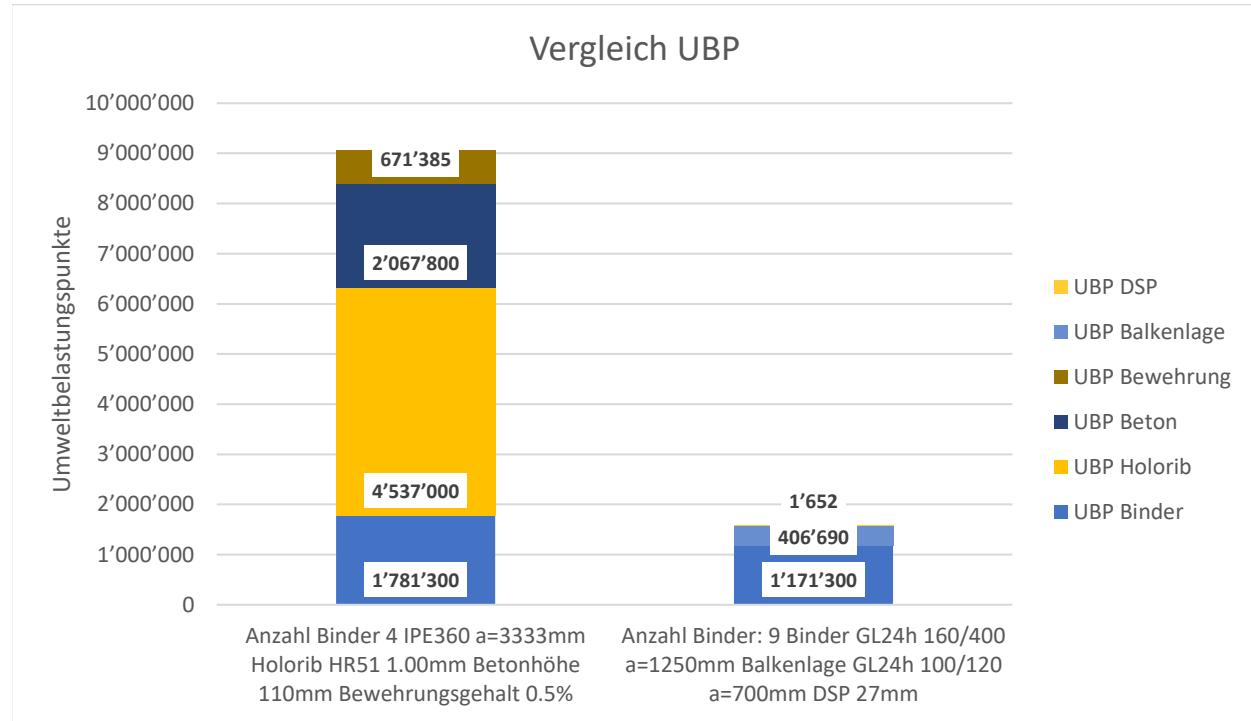


Abbildung 1 Vergleich beste Varianten – UBP

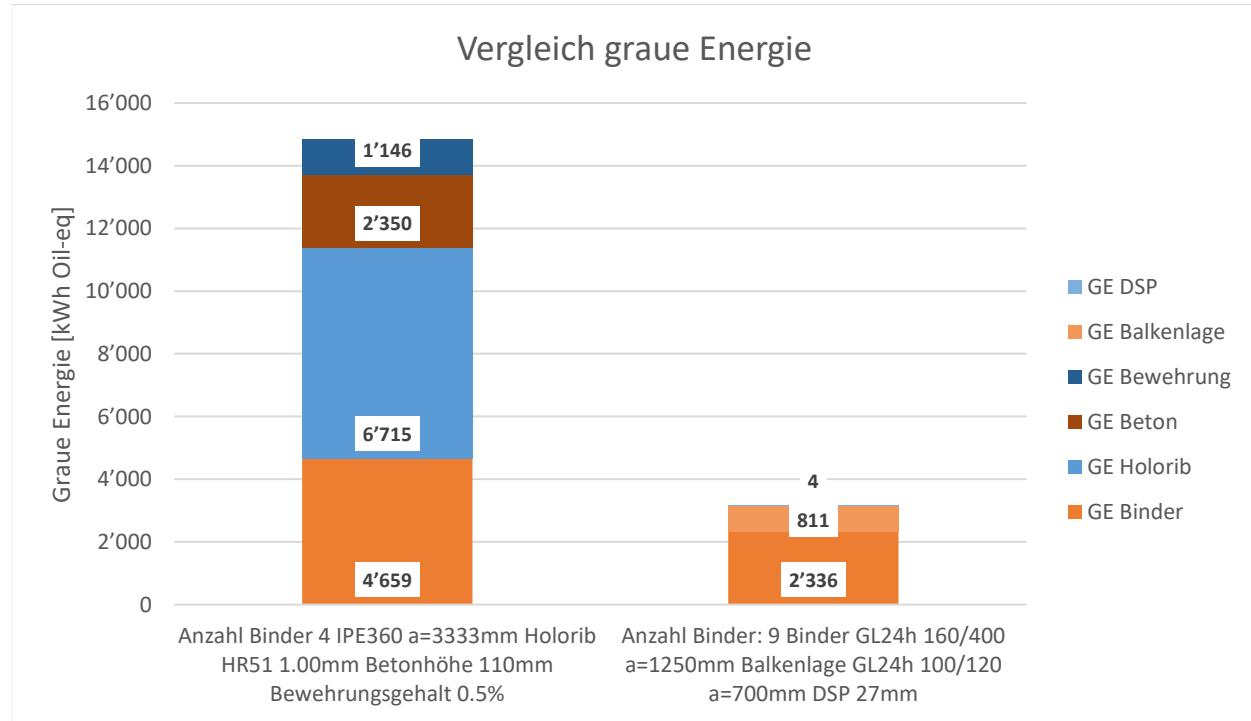


Abbildung 2 Vergleich beste Varianten – graue Energie

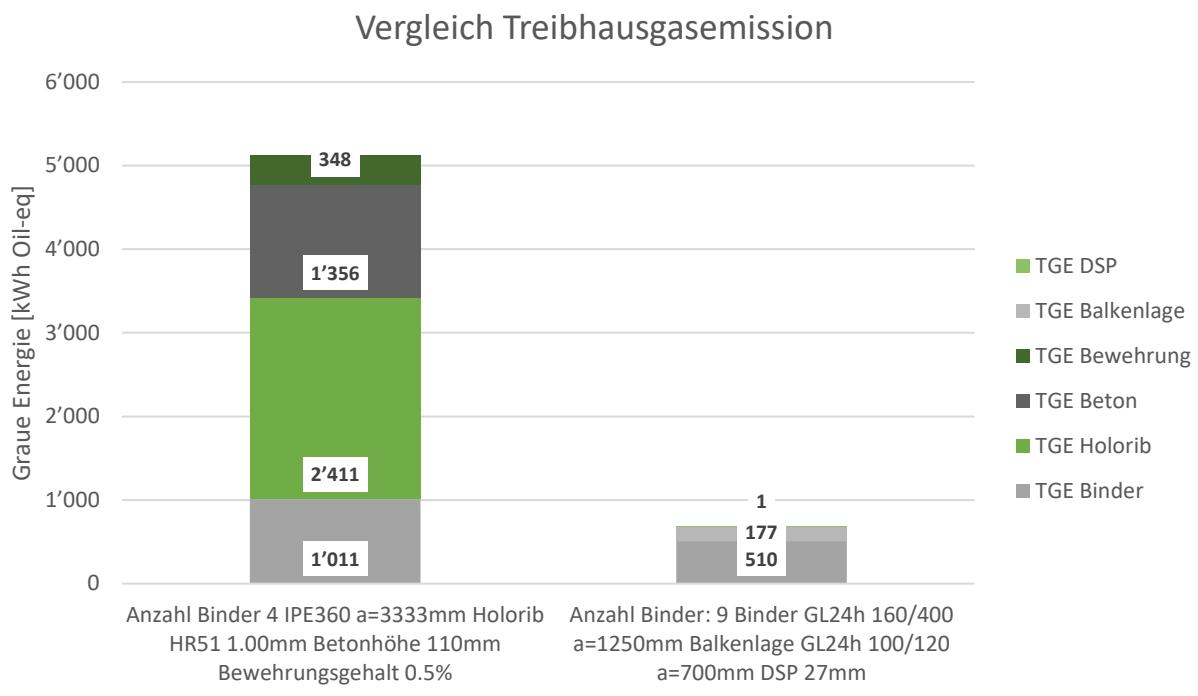


Abbildung 3 Vergleich beste Varianten – Treibhausgasemission

Vergleich aller Kombinationen Holoribdecke

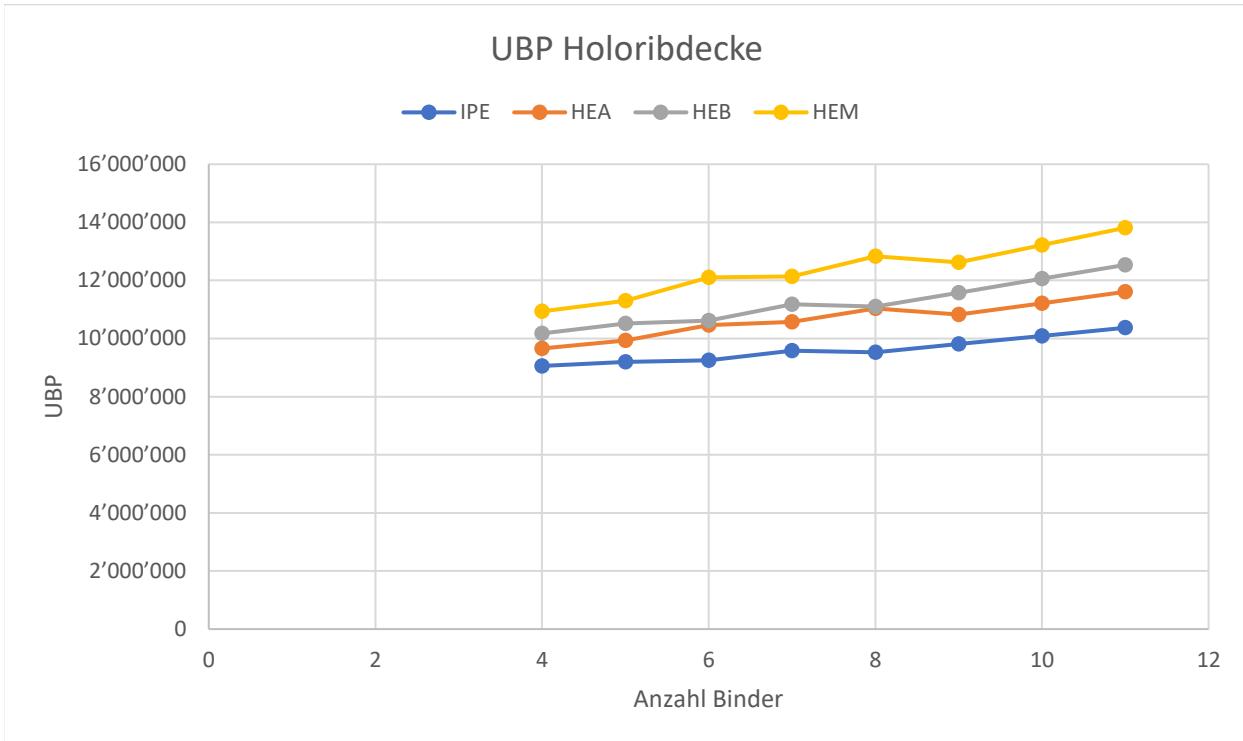


Abbildung 4 UBP Holoribdecke

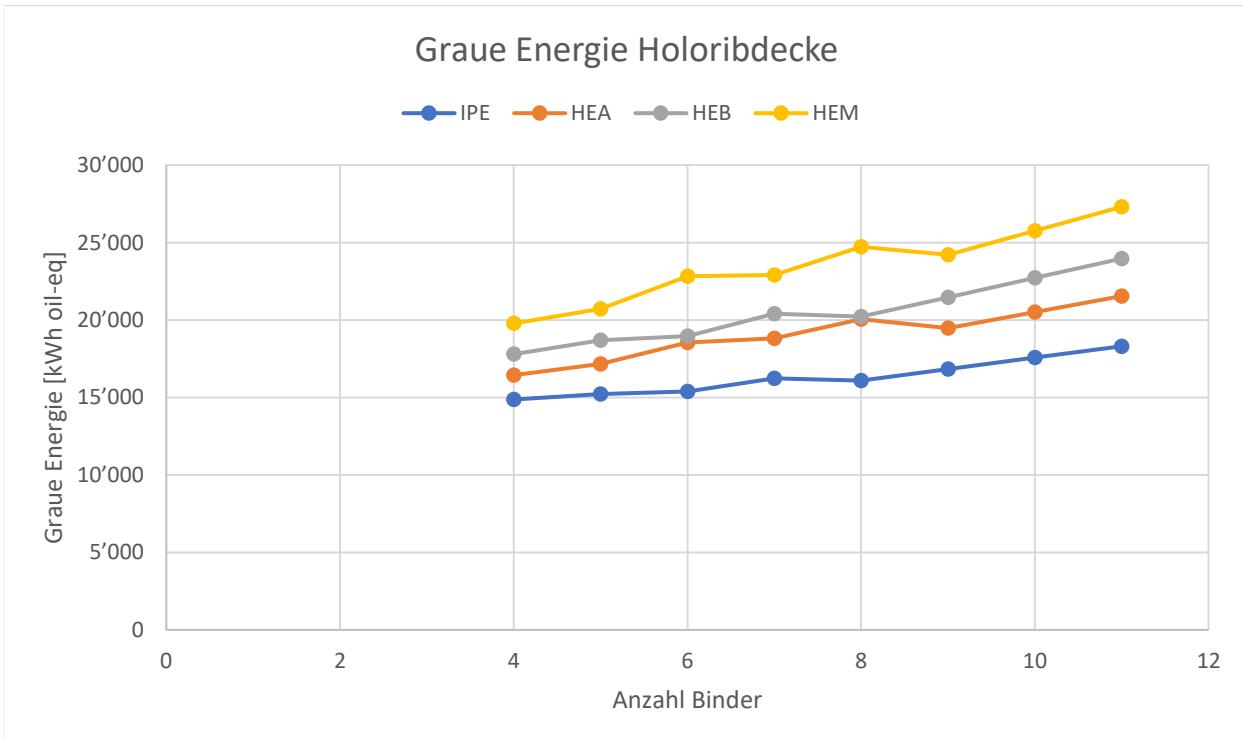


Abbildung 5 graue Energie Holoribdecke

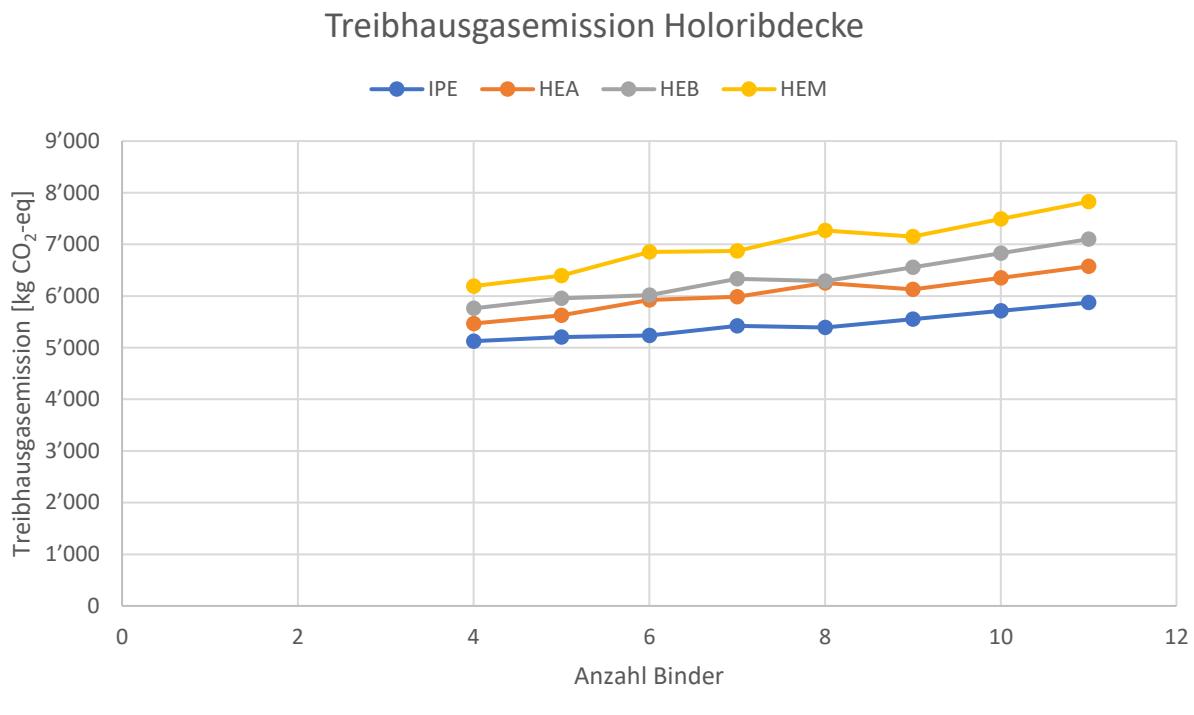


Abbildung 6 Treibhausgasemission Holoribdecke

Vergleich aller Kombinationen Holoribdecke

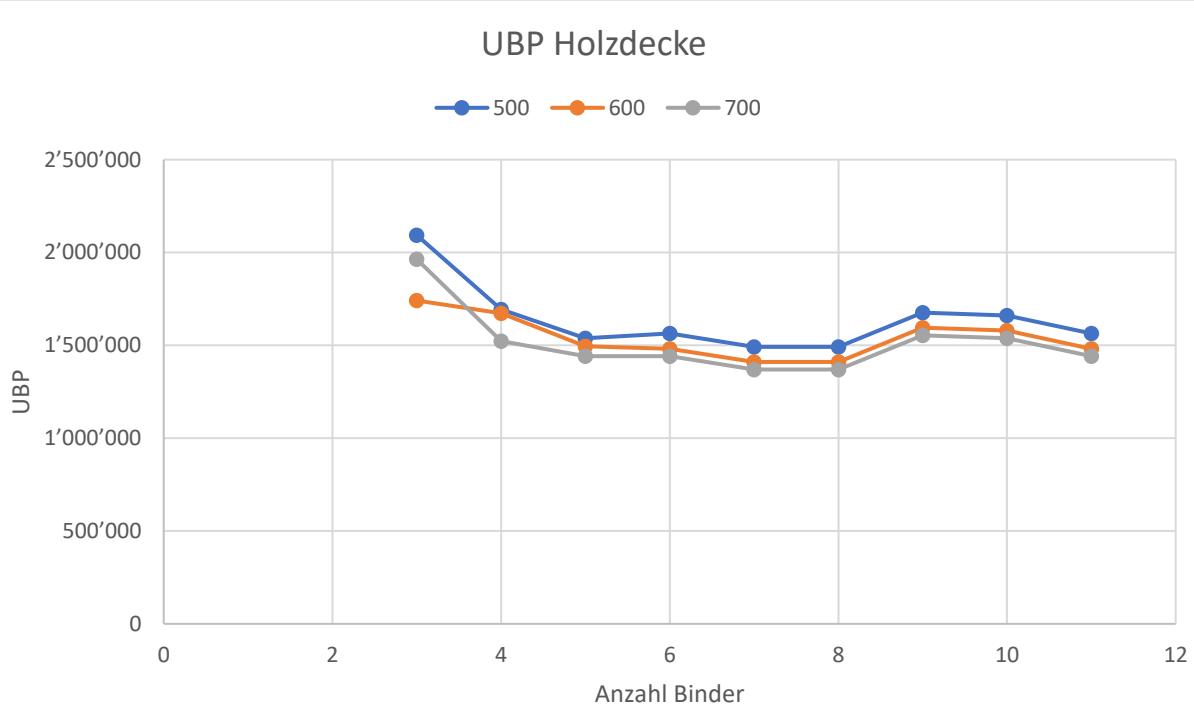


Abbildung 7 UBP Holzdecke

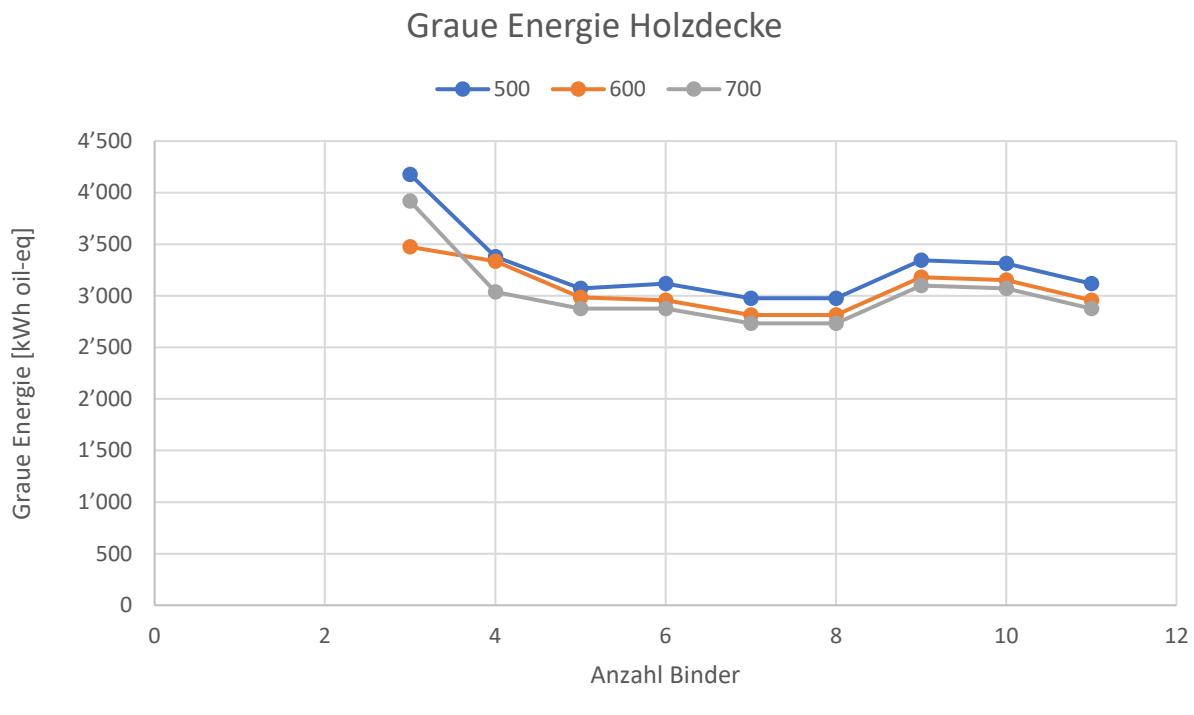


Abbildung 8 graue Energie Holzdecke

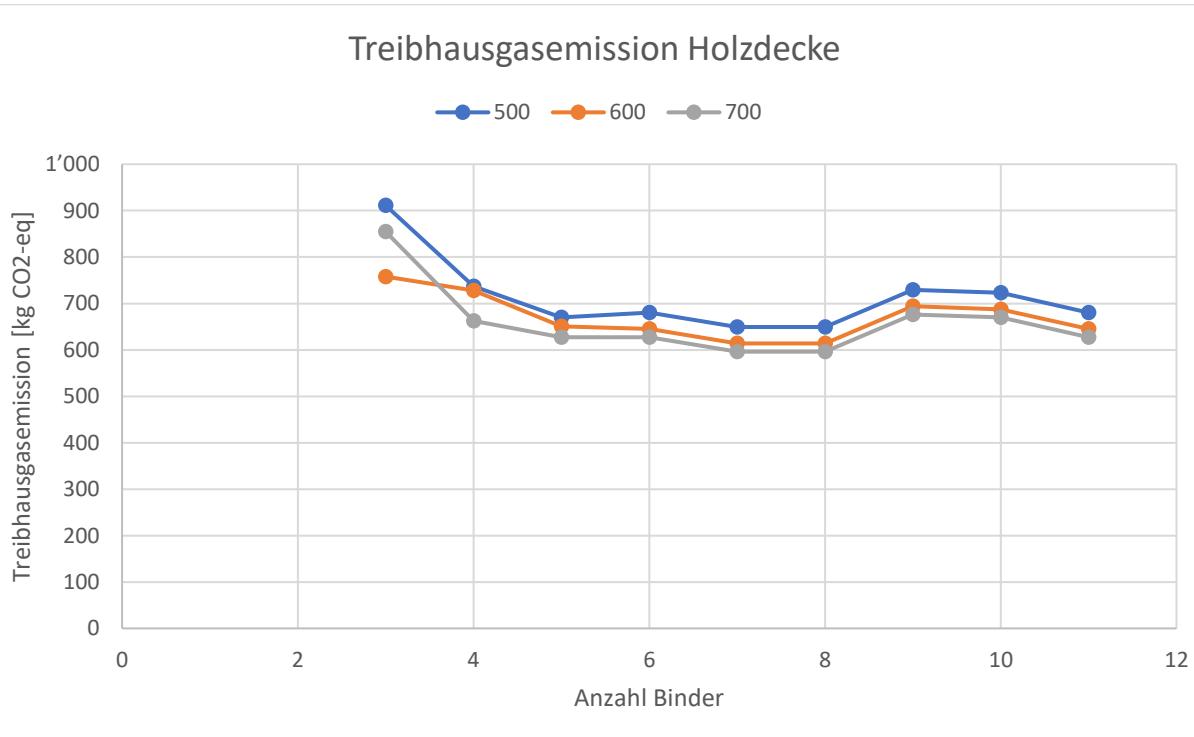
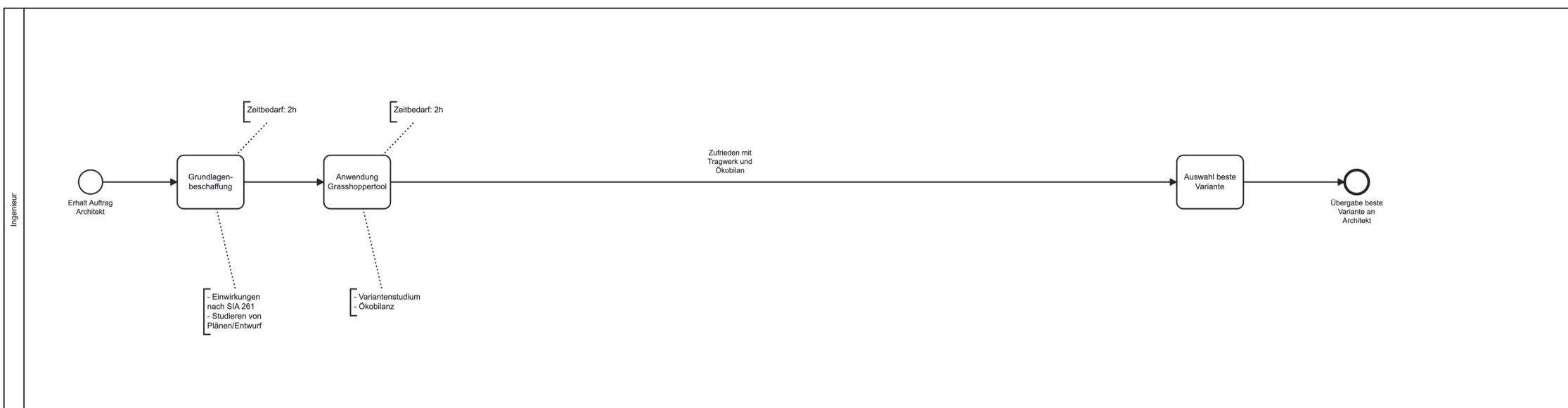


Abbildung 9 Treibhausgasemission

Anhang 15



Anhang 16

**Schriftliche Arbeiten
in den Studiengängen der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik**

Redlichkeitserklärung für Einzelarbeiten

Hiermit erkläre ich, Fabian Hug, dass ich die Arbeit mit dem Titel

«Vergleich parametrischer Deckensysteme – Analyse des statischen Verhaltens im Vergleich zur
Ökobilanz»

selbstständig und nur mit den angegebenen Quellen und erlaubten Hilfsmitteln geschrieben habe und dass
alle Zitate kenntlich gemacht sind.

Ort, Datum

Liestal, 19.08.2022

Unterschrift

