

Diplomarbeit

**Automatisierte Bewertungsmethode für die ökologische
Optimierung ausgewählter Deckentragsysteme
Parametrisierung und ökonomische Ansätze
der tragenden Bauteile**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

**Automated valuation method for the ecological optimiza-
tion of selected ceiling support systems
Parameterization and economic approaches
of load-bearing components**

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

von

Benjamin Schramel, BSc.

Matr.Nr.: 01227281

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. **Peter Bauer**
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.in techn. **Iva Kovacic**
Institut für Architekturwissenschaften
Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/259.2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Jänner 2023

Benjamin Schramel

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

DIPLOMARBEIT

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Es ist allgemein bekannt, dass die Baubranche durch das Realisieren und Nutzen von Gebäuden einen wesentlichen Einfluss auf die Umwelt und infolgedessen auf den Klimawandel nimmt. Um hierzu eine erhebliche Verbesserung zu erreichen und verlangte Klimaziele tatsächlich umsetzen zu können, sind zeitnahe wirkungsvolle Maßnahmen zu fokussieren. Der Schwerpunkt liegt bei der Reduzierung von, vor allem in der Herstellungsphase erzeugten, anthropogenen Emissionen und der Senkung von grauer Energie. Diese Vorkehrung wird beispielsweise durch eine frühzeitige und zweckdienliche Materialwahl tragender und nicht tragender Bauteile respektive gesamter Gebäude wirksam. Für eine derartige Gebäudeoptimierung während der Planungsphase ist das Erstellen eines materiellen Gebäudepasses ein effizienter Ansatz. Dieser Gebäudepass umfasst eine qualitative und quantitative Dokumentation der Materialzusammensetzung des jeweiligen Bauteils bzw. Gebäudes. Anhand dieser Auswertung ist eine ökologische Optimierung der Baustoffwahl oder von Gebäudeteilen vor Beginn der Ausschreibung durchführbar. Für eine fortgeschrittene, nachhaltige Gebäudeplanung wird diese Vorgangsweise für Ingenieurinnen und Ingenieure in Planungsbüros zunehmend bedeutender.

Die Diplomarbeit impliziert ökologische Optimierungspotentiale ausgewählter Geschoßdeckentragsysteme von Bürogebäuden, welche anhand eines erarbeiteten Anwendungstools festgestellt werden. Begleitet wurde die vorliegende Arbeit vom Institut für Architekturwissenschaften (ITI) und der DELTA Gruppe¹ aus Wien. Mittels individueller Eingabe der Parameter durch den Benutzer, können anhand einer automatisierten Bewertungsmethode und unter Einhaltung festgelegter Rahmenbedingungen sowie statischer Nachweisführungen, die ökologischen Optimierungspotentiale erfasst und kritisch beurteilt werden. Es wurde ein Anwendungstool im Softwareprogramm Rhinoceros bzw. im Plug-in *Grasshopper* als „proof of concept“ modelliert. Ziel dieser algorithmischen Modellierung ist es, durch die manuelle Parametrisierung der Systemeigenschaften, Baustoffwahl und Bauteileigenschaften bzw. -abmessungen, eine quantitative Gegenüberstellung der Deckensysteme anhand eines Punktevergabesystems unter Berücksichtigung statisch erforderlicher Nachweisführungen herzustellen und in weiterer Folge zu analysieren. Mithilfe vorab definierter Rahmenbedingungen ist es möglich anhand der Bewertungsmethodik das beispielweise ökologisch günstigste System der angeführten Decken zu interpretieren. Darüber hinaus werden nach Eingabe aktueller Kostenrichtwerte die erwartenden Materialkosten angeführt.

Die Diplomarbeit beinhaltet keine Untersuchung bauphysikalischer Eigenschaften, bautechnische Anforderungen betreffend Schallschutz, Brandschutz oder Wärmeschutz werden nicht berücksichtigt.

¹ DELTA Gruppe (Wien) – <https://www.delta.at>

Abstract

It is well known that the construction industry has a significant impact on the environment and, as a result, on climate change through the construction and use of buildings. In order to achieve a significant improvement in this respect, and to be able to implement the ambitious climate targets set by governments across the globe, timely and effective measures must be taken within the industry. The focus is on the reduction of anthropogenic emissions, mainly generated in the manufacturing phase, and the embodied energy of the building components. Achieving these necessary reductions is aided, for example, by an early and optimal choice of material for load-bearing and non-load-bearing components, or entire buildings. For such an optimization, creating a material certification during the planning phase is an efficient approach. This building pass includes qualitative and quantitative documentation of the material composition of the respective component or building. Based on this information, an ecological optimization of the choice of building materials or parts of the building can be carried out before the start of the tender. For advanced, sustainable building planning, this approach is becoming increasingly important for engineers in planning offices.

This diploma thesis considers the ecological optimization potential of selected ceiling support systems of office buildings, which is determined using a developed application tool. This work was carried out in collaboration with the Institute for Architectural Sciences (ITI) and DELTA group, a planning company from Vienna, Austria. By means of individual input of the parameters by the user, the ecological optimization potential can be recorded and critically assessed using an automated evaluation method in compliance with defined basic conditions and static calculations. An application tool in the software program Rhinoceros, for example, in the plug-in Grasshopper, was modeled as "proof of concept". The aim of this algorithmic modeling is to produce and subsequently analyze a quantitative comparison of the ceiling systems, using a points based system, taking into account static calculations, by manually characterising the system properties, choice of building materials and component properties and dimensions. For instance, with the help of previously defined framework conditions, it is possible to use the evaluation methodology to interpret the most ecologically favorable system of the ceilings considered for a construction project. In addition, entering of current cost benchmarks into the model allows for the expected material costs to be calculated.

This diploma thesis does not contain any analysis of the physical properties and structural requirements of soundproofing, fire protection or thermal insulation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen	2
2.1	Nachhaltigkeit im Bauwesen.....	2
2.2	Problemstellung und Strategie zur Verringerung der grauen Emissionen.....	3
2.3	Nachhaltige Planung und ökologische Optimierung im Bauwesen.....	5
2.4	Forschungsfrage und grundlegender Aufbau.....	6
3	Wahl der Trag- und Deckensysteme	8
3.1	Tragsystem 1	8
3.1.1	Holzbalkendecke	10
3.1.2	Holz-Beton-Verbunddecke (kurz HBV-Decke).....	11
3.2	Tragsystem 2	12
3.2.1	Punktgelagerte Decke- Flachdecke	13
4	Grundsätze und Aufbau der Forschungsmethodik – Das Optimierungstool	14
4.1	Forschungsdesign	14
4.2	Konzipierung des Optimierungstools in Grasshopper	15
4.3	Bauteile und Materialien der Deckentragssysteme.....	20
4.4	Benutzereingabe.....	21
4.5	Berechnungskennwerte.....	23
4.6	Einwirkung und Beanspruchung.....	27
4.6.1	Einwirkende Lasten und Einwirkungskombinationen.....	27
4.6.2	Einwirkungen	29
4.7	Statische Nachweisführung der Deckentragssysteme	30
4.7.1	Holzbalkendecke	33
4.7.2	Holz-Beton-Verbunddecke	35
4.7.3	Flachdecke.....	36
4.8	Ökoindikatoren.....	36
4.8.1	Auswirkung der Umweltindikatoren.....	37
4.8.2	Ökologische Kennwerte.....	38
4.9	Kostenrichtwerte	41
4.10	Gesamtübersicht.....	42
4.10.1	Beurteilungskriterien des Optimierungsverfahrens.....	43
5	Auswertung und Ergebnisse des Optimierungstools.....	45
5.1	Evaluierung der Mindest- und Höchstmaße DH_{\min} und DH_{\max}	46
5.2	Auswertung der Beurteilungskriterien	47
5.3	Grundgedanke des Optimierungsverfahrens	48
5.4	Optimierungskennzahl und Untersuchungsfälle	50
5.5	Grafische Darstellung und Beurteilung der Auswertungen.....	53
5.5.1	Ergebnisse und Beurteilung der Baumaterialien.....	53

5.5.2	Ergebnisse und Beurteilung der Kriterien	55
5.5.3	Ergebnisse und Beurteilung der Optimierungskennzahlen	59
6	Zusammenfassung.....	62
6.1	Gegenüberstellung der Untersuchungsfälle und Deckensysteme.....	62
6.2	Fazit.....	63
7	Literaturverzeichnis	65
8	Abbildungsverzeichnis	68
9	Tabellenverzeichnis	70
	Anhang A- Beschreibung der grafischen Benutzeroberfläche	71
A.1	Allgemein.....	71
A.2:	Holzbalkendecke	74
A.3:	Holz-Beton-Verbunddecke.....	77
A.4:	Flachdecke.....	80
A.5:	Übersicht und Beurteilung.....	82
	Anhang B- Verbindungsmittelwahl der Holz-Beton-Verbunddecke.....	84
	Anhang C- Ermittlung von DH_{\min} und DH_{\max} und Versagensfälle	90
C.1	Parameter und Berechnung der Deckenhöhen.....	90
C.2	Statische Systemkombinationen und deren Versagensfälle	92
	Anhang D- Auswertung der Kriterien für DH_{\min} und DH_{\max}	95

1 Einleitung

Er wird durch dauerhafte Wechsel der Temperatur, des Niederschlages sowie der Meeresströmungen gekennzeichnet- der Klimawandel. Seit der industriellen Revolution trägt der Mensch maßgeblich zur Erderwärmung bei.²

Die Bauwirtschaft führt mit einem Anteil von knapp 40% der globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen zu einem wesentlichen Beitrag.³

Für die Erreichung der klimapolitischen Ziele, wie beispielsweise das EU-weite Treibhausgasemissions-Reduktionsziel, ist eine nachhaltige Planung, welche die ökologischen, ökonomische und soziale Dimensionen miteinbezieht, maßgeblich.⁴ Ein minimaler Einsatz kohlenstoffarmer und maximaler Einsatz erneuerbarer Energiequellen ist für die Eindämmung des Klimawandels entscheidend.

Elementare Aspekte (Indikatoren) umweltgerechter Bauweisen sind der CO₂- Verbrauch und der Primärenergieinhalt, die sogenannte „graue Energie“. Dabei handelt es sich um jene Energie, welche durch die Herstellung eingebauter oder zukünftig einzubringender Materialien verursacht wird. Um sowohl diesen Energieinhalt, als auch das Treibhauspotential reduzieren zu können, ist vor allem auf die „richtige“ Bauteildimensionierung unter Berücksichtigung der Materialwahl, Wert zu legen.⁵

Um diese und andere umweltschädigende Auswirkungen entsprechend beurteilen zu können, sind die Stoff- und Energieflüsse von Bauprodukten oder Gebäude zu bilanzieren und ökologisch zu bewerten.⁶

Die Wahl geeigneter Baustoffe ist schon zu Beginn der Planungsphase *zielführend*.

² vgl. CARE Deutschland e.V. (2022) Klimawandel: Definition, Ursachen, Folgen [online]. Bonn: CARE. <https://www.care.de/schwerpunkte/klimakrise/klimawandel/> [Zugriff am: 07.12.2022]

³ vgl. Elbers, U. (2022) Ressourcenschonendes Bauen- Wege und Strategien der Tragwerksplanung. Bautechnik 99, H. 1, S. 57-64. <https://doi.org/10.1002/bate.202100114> [Zugriff am: 07.12.2022]

⁴ vgl. Bundesministerium für Finanzen (2022) Das Übereinkommen von Paris- Auswirkung auf Österreich [online]. Wien: BMF. https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000325.html [Zugriff am: 19.12.2022]

⁵ vgl. Anstalt des öffentlichen Rechts (2022) Beim Renovieren Klima und Ressourcen schonen [online]. München: Anstalt des öffentlichen Rechts. <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/bauen-klima-oekologisch-emission-nachhaltig-100.html> [Zugriff am: 07.12.2022]

⁶ vgl. IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) Materialökologie- Lebenszyklusanalysen- Ökobilanzen [online]. Wien: IBO. <https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/oekobilanzen> [Zugriff am: 07.12.2022]

2 Grundlagen

Das Planen und Realisieren von Gebäuden wird im Allgemeinen unter Berücksichtigung ästhetischer, technischer und ökonomischer Aspekte abgewickelt. Doch gerade in der heutigen Zeit ist es wichtig, um nachfolgende Generationen eine weithin gleichwertige Umwelt und gleiche Lebenschancen hinterlassen zu können, diese Projektphasen auch aus ökologischer Perspektive betrachtet werden. Sowohl aus gesellschaftlichem, als auch politischem Blickwinkel wird das Thema der Nachhaltigkeit im Bauwesen stark vorangetrieben. Aufgrund des maßgeblichen Umwelteinflusses durch die Bauindustrie und die Erfüllung der globalen Klimaziele wird die Einhaltung ökologischer Kriterien zunehmend bedeutender.⁷

2.1 Nachhaltigkeit im Bauwesen

Um eine aussagekräftige Beurteilung hinsichtlich der Nachhaltigkeit im Bausektor von Gebäuden oder Bauteilen tätigen zu können, ist eine entsprechende Untersuchung des gesamten Lebenszyklus bezüglich ökologischer Auswirkungen erforderlich. Hierbei wird der Lebensweg ab der Rohstoffgewinnung, über die Herstellung der Produkte, die Transporte, die Herstellung des Gebäudes, die Nutzung und Instandhaltung, sowie des End-of-Life, hinsichtlich Deponierung, Verwertung, Recycling bzw. Wiederverwendung, betrachtet. Zu den negativen Umweltauswirkungen zählen zum Beispiel die Treibhausgasemissionen in der Luft und im Wasser, sämtliche Abfälle und der Energie- und Rohstoffverbrauch. Es werden anhand eines quantitativen Bewertungsverfahrens die Input- und Outputflüsse von Bauprodukten, -systemen oder Prozessen und die potenziellen Umweltauswirkungen bilanziert und bewertet.⁸ Mit dieser sogenannten Ökobilanz sollen nachhaltige Lösungsansätze bzw. Entscheidungsfindungen entlang des Lebenszyklus eines Produktes bzw. Gebäudes getroffen werden.⁹

Ziel ist es, durch baulich- technische Gebäudekonzepte, welche gesetzliche und normative Bestimmungen berücksichtigen, durch integrale Planung und den Einsatz digitaler Technologien nachhaltige Gebäude mit entsprechend energiesparender und ressourcenschonender Qualität, welche die Ansprüche an die Nutzerinnen und Nutzer erfüllen, zu realisieren.¹⁰

⁷ vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (2022) Ökologisches Baustoffkonzept- Bewertungsmethodik, Zertifizierung, Anwendungsbeispiele, Demonstrationsgebäude [online]. Wien: BMK. https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/skriptum_hochbauplanung_1.4_oekologisches_baustoffkonzept.pdf [Zugriff am: 05.11.2022]

⁸ vgl. <https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/oekobilanzen> [Zugriff am: 05.11.2022]

⁹ vgl. https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/skriptum_hochbauplanung_1.4_oekologisches_baustoffkonzept.pdf [Zugriff am: 05.11.2022]

¹⁰ vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2022) Leitfaden Nachhaltiges Bauen- Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden [online]. Berlin: BMI. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/publikationen/BBSR_LFNB_D_190125.pdf [Zugriff am: 06.11.2022]

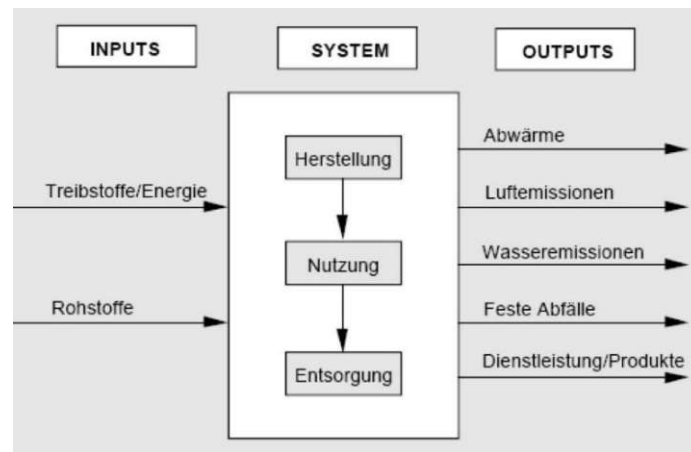


Abb. 2.1: Lebensweg Gebäude¹¹

2.2 Problemstellung und Strategie zur Verringerung der grauen Emissionen

Im Sinne der Nachhaltigkeit sollen bei neu erbauten Gebäuden die ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Aspekte gleichwertig und ganzheitlich beachtet werden. Doch in der Praxis ergeben sich aktuell beinahe unausweichliche Auseinandersetzungen wie beispielsweise die Ausführung hoher ökologischer Qualität zu einem Kostenaufwand vergleichbar mit einer herkömmlichen Ausführung.¹²

Im Bausektor werden noch immer vermehrt energie- und ressourcenintensive Baustoffe eingesetzt. Auch die Verwendung von Verbundmaterialien, schadstoffhaltigen Stoffen und die Ausführung nicht trennbarer Bauteilschichten (z.B. durch Verklebung) erschwert auch eine Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Für die Umsetzung von Nachhaltigkeit und Kreislaufführung sind neue Vorgehensweisen hinsichtlich des Gebäudedesigns und Verbindungstechniken, der Projektrealisierung, sowie der engeren Zusammenarbeit über die Wertschöpfungskette erforderlich.¹³

Um konkrete Nachhaltigkeitsziele in einem Bauprojekt umsetzen zu können, ist bereits in frühen Projektphasen, beginnend in der Vorplanung, eine entsprechende Abstimmung zwischen den Planungsbeauftragten, dem Bauherrn und den Bauausführenden unumgänglich. Hierbei ist es notwendig den Umgang mit Ressourcen effizient zu gestalten und das Fachwissen und Erfahrungen entsprechend einzusetzen.¹⁴

Um die Zielvorgaben des EU Klima- und Energiepaketes im vorgesehenen Jahr 2030¹⁵ erreichen zu können, ist ein Hauptaugenmerk auf das Bauwesen zu richten. Denn dieses ist anteilig der

¹¹ adap. https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/skriptum_hochbauplanung_1.4_oekologisches_baustoffkonzept.pdf [Zugriff am: 06.11.2022]

¹² vgl. Bartels, N.; Höper, J.; Theißen, S.; Wimmer, R. (2022) Anwendung der BIM- Methode im nachhaltigen Bauen- Status quo von Einsatzmöglichkeiten in der Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg.

¹³ vgl. <https://doi.org/10.1002/bate.202100114> [Zugriff am: 06.11.2022]

¹⁴ vgl. Schadow, T. (2022) Ressourcenschonung im Bauwesen- Aspekte der Planungspraxis. Bautechnik 99, H. 1, S. 50-56. <https://doi.org/10.1002/bate.202100110> [Zugriff am: 06.11.2022]

¹⁵ vgl. https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000325.html [Zugriff am: 02.12.2022]

größte Emittent klimaschädlicher Treibhausgase, welche gesamt durch das Referenzgas CO₂ umgerechnet und dargestellt werden. Der erhöhte Ausstoß menschengemachter Treibhausgase ist ein wesentlicher Faktor für die Erderwärmung. Somit wird der Fokus auf das Reduktionspotential der grauen Emissionen, welche für die Herstellung, den Einbau und den Abbruch von tragenden Bauelementen, gelegt. Bereits in den frühen Planungsphasen eines Bauprojektes ist es möglich eine entsprechende Reduktion der grauen Energie zu erzielen.

Die nachfolgende Abbildung 2.2 verdeutlicht die Auswirkung der globalen CO₂- Emissionen. Die Grafik beschreibt die prozentuelle Verteilung des zurzeit weltweiten CO₂- Ausstoßes in Form eines Ringdiagramms.

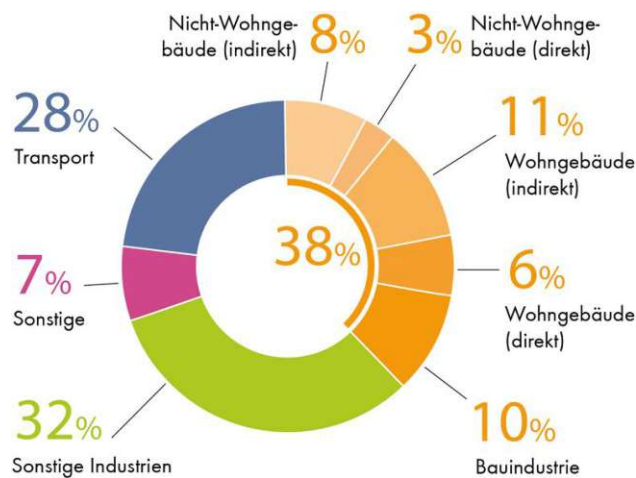


Abb. 2.2: Verteilung globaler CO₂- Ausstoß¹⁶

In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass Gebäude zu 38% für die Emissionen verantwortlich sind. Der Transport von Baumaterialien, Abbruchmaßnahmen oder Infrastrukturbauten werden in dieser Verteilung nicht berücksichtigt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der gesamten Baubranche weitaus höher liegt.

Die graue Energie eines Gebäudes wird auf das Tragwerk, den Ausbau und die Fassade aufgeteilt. Das größte Optimierungspotential liegt bei der Tragkonstruktion, da die für den größten Anteil von 50-70% der Gesamtemissionen verantwortlich ist.¹⁷

In der nachfolgenden Abbildung 2.3 wird der prozentuelle Einfluss von tragenden Bauteilen anhand eines dreistöckigen Beispielgebäudes hinsichtlich der grauen Emissionen dargestellt.

¹⁶ adap. Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R.; Sobek, W. (2021) Graue Emissionen im Bauwesen- Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. *Beton und Stahlbetonbau* 116, H. 12, S. 969-977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065> [Zugriff am: 02.12.2022]

¹⁷ vgl. <https://doi.org/10.1002/best.202100065> [Zugriff am: 02.12.2022]

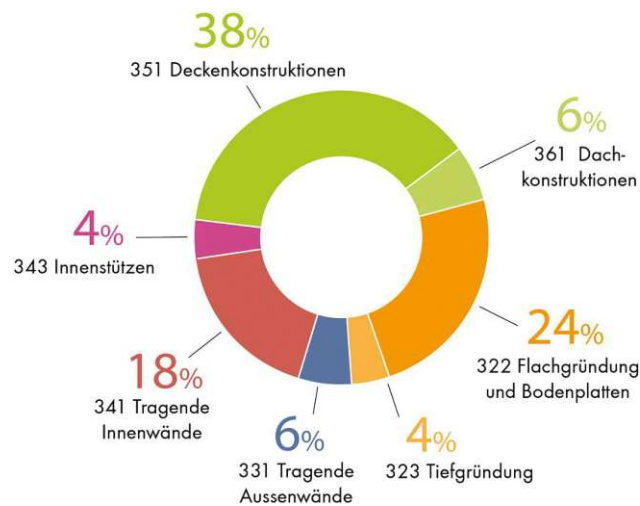


Abb. 2.3: Einfluss tragende Bauteile grauer Emission¹⁸

Aus diesem Ringdiagramm ist der dominierende Anteil den Deckenkonstruktionen zuzuweisen.

2.3 Nachhaltige Planung und ökologische Optimierung im Bauwesen

Die Umweltauswirkung von Bauprodukten bzw. Baustoffen wird über ein Bewertungsverfahren, die Ökobilanz, welche die Stoff- und Energieflüsse über einzelne Lebensabschnitte oder über den gesamten Lebensweg aufschlüsselt, ermittelt.¹⁹

Das nachhaltige Planen beinhaltet die Begriffe wie Optimierung, Reduzierung, Vermeidung und Wiederverwendung. Die Herausforderungen zu Beginn des Planungsprozesses umfassen die Reduzierung des Material- und Energiebedarfs, den Einsatz nachhaltiger Materialien, sowie die Eignung der Kreislaufwirtschaft.²⁰

Die Ressourcenschonung ist somit ein wesentlicher und wichtiger Beitrag zum nachhaltigen Bauen. Diese Ziele werden nur durch die Reduzierung der Rohbaumassen, die Optimierung der Herstellungs- und Produktionsprozesse, sowie die Verlängerung der durchschnittlichen Nutzungsdauern der Gebäude erreicht.²¹

Die Planerinnen und Planer können durch eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs bei der Herstellung von Baustoffen bzw. Bauteilen und der eingebetteten grauen Energie, sowie einer Erhöhung des recyclebaren Anteils der Konstruktionselementen die Ökobilanz erheblich verbessern.²²

¹⁸ adap. <https://doi.org/10.1002/best.202100065> [Zugriff am: 02.12.2022]

¹⁹ vgl. <https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/oekobilanzen> [Zugriff am: 05.11.2022]

²⁰ vgl. Elbers, U. (2022), <https://doi.org/10.1002/bate.202100114> [Zugriff am: 02.12.2022]

²¹ vgl. Schadow, T. (2022), <https://doi.org/10.1002/bate.202100110> [Zugriff am: 02.12.2022]

²² vgl. Berger, T.; Prasser, P.; Reinke HG. (2013) Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern, S. 395-403. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/best.201300019> [Zugriff am: 02.12.2022]

2.4 Forschungsfrage und grundlegender Aufbau

Das zunehmend an Bedeutung gewinnende und kritische Thema der Erderwärmung bzw. der globalen Klimaziele treibt vor allem uns Ingenieurinnen und Ingenieure im Bausektor an, dringliche Maßnahmen zu setzen.

Das Zusammenspiel aus hohen Qualitätsanforderungen und möglichst geringer Umweltbelastung mit gleichzeitig geringen Projektkosten stellt die Baubranche vor spannenden Herausforderungen. Diese Komponenten sollen hinsichtlich ökologischer Perspektiven und ökonomischen Ansätzen in der vorliegenden Diplomarbeit möglichst effizient und praxisbezogen beantwortet werden. Die daraus resultierenden Fragestellungen ergeben sich wie folgt:

- Wie können ausgewählte Geschoßdeckentragssysteme von Bürogebäuden während zeitgleicher Parametrisierung festgelegter Kenngrößen sowie unter Einhaltung sämtlicher Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen hinsichtlich ökologischer und Optimierungsmaßnahmen mit ökonomischen Ansätzen bewertet respektive kritisch beurteilt werden?
- Wie beeinflussen sich die verschiedenen Deckensysteme gegenseitig? Welche Auswirkungen und Erkenntnisse werden bei der Untersuchung der verschiedenen Deckentragssystemen festgestellt?



Abb. 2.4: Forschungsprozess der Diplomarbeit

Für diese Untersuchung wurde ein Anwendungstool im Softwareprogramm Rhinoceros bzw. dem Plug-in Grasshopper²³ erstellt. Dieses Tool umfasst einen automatisierten Berechnungsvorgang für ein individuelles Parametrisieren dreier festgelegter Deckentragsysteme.

Durch die Rhino.Inside-Technologie kann Rhino auch in andere Softwarepakete eingebunden werden. Dabei ist es möglich BIM (Building Information Modeling) in Grasshopper auszuführen. Die Einbettung in CAD-Programme, beispielweise Revit oder Archicad, ist durch Live-Link-Verbindungen möglich.²⁴

Die vom Benutzer zu definierenden Parameter wie beispielsweise die Systemstützweiten, Baustoffwahl, Bauteilabmessungen, Festigkeitseigenschaften oder statische Systeme bilden die Haupteingangswerte für den Berechnungsablauf.

Nach Eingabe der, im Kapitel 4.10.1 erläuterten, Beurteilungskriterien bzw. deren Priorisierung wird eine Bewertung des jeweiligen Deckentragsystems in Form einer Punktevergabe ermittelt. Darüber hinaus wurden im Anwendungstool bereits drei Untersuchungsfälle für einen Optimierungsprozess zur Auswahl angeführt. Diese Fälle sind im Kapitel 5.4 angeführt und wurden mit dem Institut für Tragwerkplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität (ITI) und der DELTA Gruppe festgelegt. Anhand dieser Punktevergabe ist ein parametrischer Optimierungseingriff der Deckentragsysteme im Anwendungstool möglich.

²³ Robert McNeel & Associates (1980) Rhinoceros 3D [Software]. <https://www.rhino3d.com/download/>

²⁴ vgl. BIM Corner (2022) BIM in Grasshopper- The ultimate software list [online]. Oslo: BIM Corner. <https://bimcorner.com/bim-in-grasshopper-the-ultimate-software-list/> [Zugriff am: 08.12.2022]

3 Wahl der Trag- und Deckensysteme

Die in diesem Kapitel beschriebenen, statischen Tragsysteme bzw. Deckenarten samt zusätzlichen Parameter, wie beispielsweise Deckenspannweiten, Baumaterialien, Fußbodenaufbauten, etc., wurden in gemeinsamer Abstimmung mit dem Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der TU Wien und der DELTA Gruppe definiert. Im Zuge der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit wurden nach diversen Zusammenkünften der beteiligten Personen Anpassungen durchgeführt.

Es wird darauf hingewiesen, dass für den festgelegten Untersuchungsrahmen aus Kapitel 2.4 ausschließlich das Tragsystem bzw. die statisch relevanten, einzelnen Bauteile der unterschiedlichen Deckensysteme herangezogen wurden.

3.1 Tragsystem 1

Das erste gewählte Tragsystem beruht auf eine einachsige gespannte Balkendecke in Holzbauteilweise. Die abzuleitenden Einwirkungen werden über stabförmige Primärträger (Holzbalken) auf querliegende Sekundärträger (Unterzug), welche wiederum auf Stützen gelagert sind, abgetragen.²⁵

Die Primärträger erstrecken sich über die Stützweite l_x , die Sekundärträger über die Spannweite l_y .

Im Grunde handelt es sich bei den beiden nachfolgenden Deckensystemen um eine Holzbalkendecke, welche in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

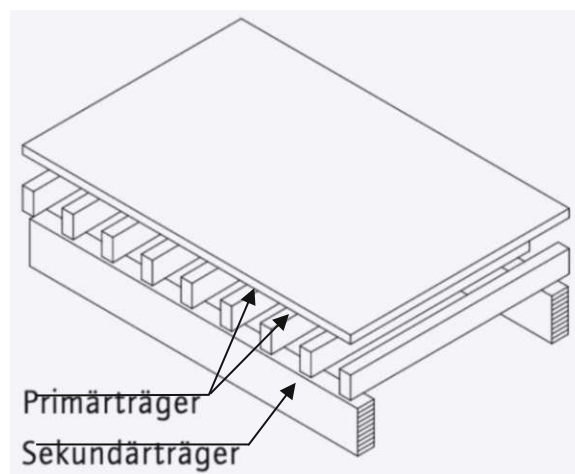


Abb. 3.1: Darstellung Tragsystem 1²⁶

Bei den nachfolgenden Deckenkonstruktionen kann sowohl der Primärträger als auch der Sekundärträger als Einfeldträger oder Mehrfeldträger (Zweifeldträger) untersucht werden.

²⁵ vgl. Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021) Baukonstruktionen Band 5- Decken. Basel: Birkhäuser. S. 4-5

²⁶ adap. proHolz Austria (2022) zuschnitt 54- Holzdecken [online]. Wien: proHolz Austria. <https://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt54/files/assets/common/downloads/publication.pdf> [Zugriff am: 05.12.2022]

Die statisch relevanten Eigenschaften der Primärträger bzw. Holzbalken werden im Kapitel 3.1.1 bzw. 3.1.2. erläutert.

Der Sekundärträger bzw. Unterzug kann zwischen einem Einfeld- oder Zweifeldträger bzw. als I- Stahlträger oder rechteckiger Stahlbetonträger gewählt werden.

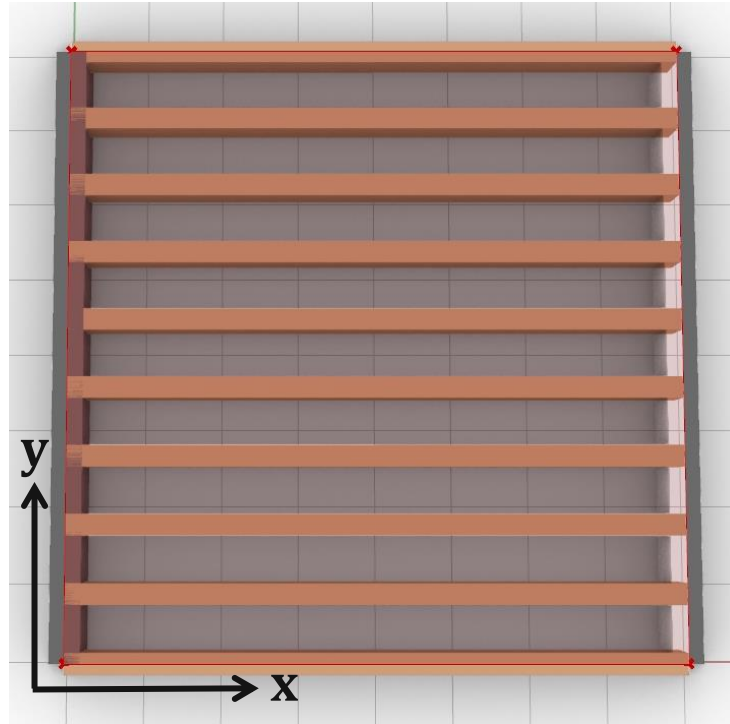


Abb. 3.2: Auszug Rhinoceros Draufsicht Balkendecke

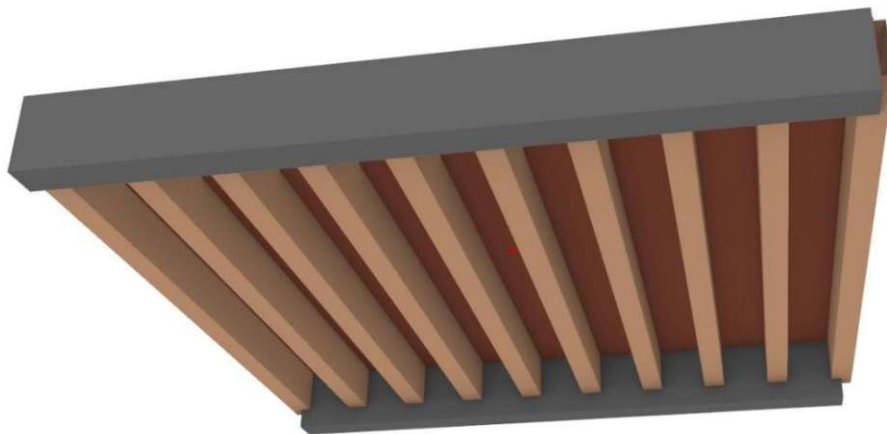


Abb. 3.3: Auszug Rhinoceros Perspektive1 Balkendecke



Abb. 3.4: Auszug Rhinoceros Perspektive2 Balkendecke

3.1.1 Holzbalkendecke

Bei der ausgewählten Holzbalkendecke handelt es sich um eine Tramdecke mit sichtbarer Untersicht, welche in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Die Primärträger, also die Holzbalken werden entweder aus Konstruktionsvollholz oder als Brettschichtholz ausgeführt. Die tragende Konstruktion der Decke wird durch eine Holzschalung, welche durch Verschraubung oder Verklebung auf die Primärträgern befestigt wird, vollendet. Zu den wesentlichen Einflüssen der Querschnittsabmessungen der Holzträger zählen die Spannweite, Aufbaulasten, einwirkende Nutzlasten und der Achsabstand der Träger.²⁷

Die in der nachfolgenden Abbildung 3.3 angeführten Aufbauhöhen sind gemäß den Auswahlmöglichkeiten im Anwendungstool angeführt.

Vertiefende Eingabemöglichkeiten und Untersuchungskriterien werden im Kapitel 4 näher erläutert.

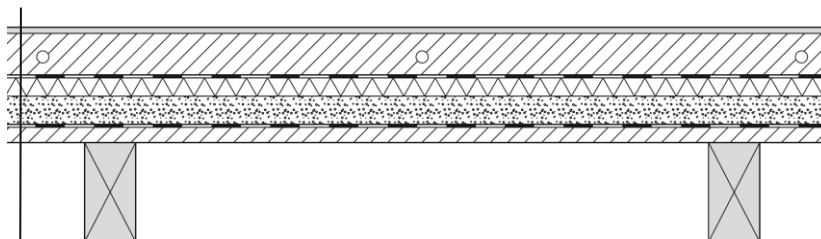


Abb. 3.5: Querschnitt Holzbalkendecke mit sichtbarer Untersicht²⁸

Bodenbelag	0,02-2,00cm
Estrich	4,50-10,00cm
PE- Folie	-
Trittschalldämmung	1,50-6,00cm
Schüttung	0,00-8,00cm
Rieselschutz	-
Holzschalung	1,20-4,00cm
Balken (KVH/BSH)	12,00-90,00cm

²⁷ vgl. Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021), S.78-80

²⁸ adap. <https://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt54/files/assets/common/downloads/publication.pdf> [Zugriff am: 05.12.2022]

Die grafische Darstellung im Anwendungstool der Holzbalkendecke wurde bereits im Kapitel 3.1 angeführt.

3.1.2 Holz-Beton-Verbunddecke (kurz HBV-Decke)

Bei der ausgewählten Verbunddecke handelt es sich um ein Holz-Beton-Verbundsystem aus Holzbalkenlagen (Konstruktionsvollholz oder Brettschichtholz), einer verlorenen Holzschalung und bewehrtem Ortbeton. Die Verbundwirkung wird als Trägerverbund ausgeführt, wobei als Verbindungsmittel zwischen dem Holz und Beton Verbundschrauben eingesetzt werden.

Bei der vorliegenden Verbundtechnik werden die angeführten Baustoffe optimal ausgenutzt. Der Holzbalken übernimmt zum größten Teil Zugbelastungen im unteren Deckenbereich, während die bewehrte Ortbetonschicht (Aufbeton) im oberen Bereich die einwirkenden Druckkräfte aufnimmt. Die Steifigkeit der Verbunddecke erfolgt durch die Verbindung von Holz und Beton, insbesondere durch die Verbundmittel bzw. der entstehenden horizontalen Scheibentragwirkung. Im Wesentlichen kann somit die Deckenkonstruktion als ein Bauteil betrachtet werden.²⁹

Dieses System kann bei der Eingabe im Anwendungstool auch als Massivholzdecke bzw. Brettsperrholzdecke modelliert werden.

Vertiefende Eingabemöglichkeiten und Untersuchungskriterien werden im Kapitel 4 näher erläutert.

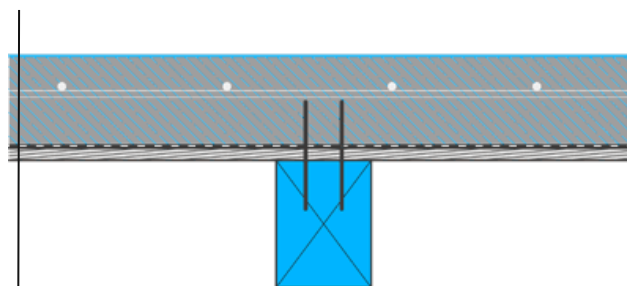


Abb. 3.6: Querschnitt Holz-Beton-Verbunddecke³⁰

Bodenbelag	0,02-2,00cm
Estrich	4,50-10,00cm
PE- Folie	-
Aufbeton	0,05-15,00cm
Holzschalung	0,00-04,00cm
Balken (KVH/BSH)	12,00-100,00cm

²⁹ vgl. wion media services GmbH & Co. KG (2022) 114 | Holz-Beton-Verbunddecken [online]. Erding: wion media services GmbH & Co. KG. <https://www.bauwion.de/wissen/rohbau/geschossdecke/114-holz-beton-verbunddecken>, [Zugriff am: 06.11.2022]

³⁰ adap. <https://www.bauwion.de/wissen/rohbau/geschossdecke/114-holz-beton-verbunddecken>, [Zugriff am: 06.11.2022]



Abb. 3.7: Beispielsicht einer Holz-Beton-Verbunddecke³¹

3.2 Tragsystem 2

Bei dem zweiten Tragverhalten handelt es sich um eine unterzuglose, punktförmig gelagerte Plattendecke aus Stahlbeton. Die Stahlbetondecke ist unmittelbar auf Stützen aufgelagert und biegefest oder gelenkig miteinander verbunden.³²

Die Stützweiten l_x und l_y in diesem System sind identisch mit den, im Kapitel 3.1 beschriebenen, Tragsystemen 1.

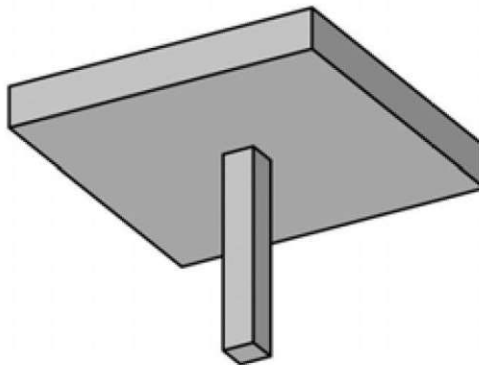


Abb. 3.8: Darstellung Tragsystem 2³³

³¹ adap. Spillner Spezialbaustoffe GmbH (2022) SFS intec- Holz-Beton-Verbundsystem VB [online]. Lübeck: Spillner Spezialbaustoffe GmbH. <https://www.spillner-ssb.de/sfs-system-vb/holz-beton-verbund.html> [Zugriff am: 06.11.2022]

³² vgl. Hestermann, U.; Rongen, L. (2015) Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 36. Auflage. Erfurt: Springer Vieweg, S. 369

³³ adap. Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021), S. 23



Abb. 3.9: Grundriss punktförmig gelagerte Platte³⁴

3.2.1 Punktgelagerte Decke- Flachdecke

Dieser Deckentyp wird als punktförmig gestützte Stahlbetonplatte ausgeführt. Die Flachdecke wird ohne Verwendung von Unterzügen direkt auf Stützen aufgelagert. Die punktuelle Einleitung der Querkraft im Stützenbereich wird, falls lt. Tragfähigkeitsnachweisen erforderlich, durch Einführen konstruktiver Maßnahmen, nämlich einer Durchstanzbewehrung im hoch beanspruchten Deckenbereich rund um die Stütze, aufgenommen.³⁵

Zur Auswahl des Materials der Stützen stehen im Anwendungstool die Baustoffe Holz oder Beton zur Verfügung. Sowohl bei der Stahlbetonstütze als auch bei der Variante aus Holz kann ein kreisrunder oder rechteckiger Querschnitt ausgewählt werden.

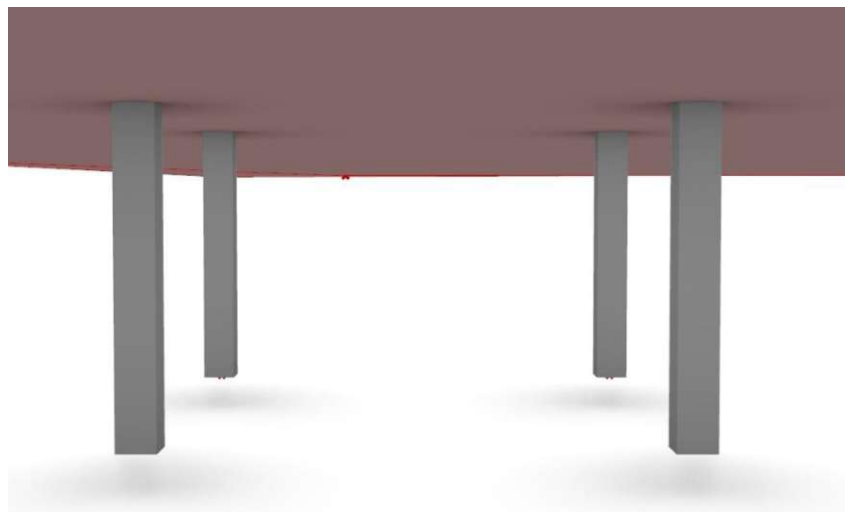


Abb. 3.10: Auszug Rhinoceros Perspektive Flachdecke

³⁴ adap. Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021), S. 4

³⁵ vgl. Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021), S. 28

4 Grundsätze und Aufbau der Forschungsmethodik – Das Optimierungstool

In diesem Teil der Diplomarbeit wird zu Beginn das Forschungsdesign und grundlegende Konzept des Anwendungstools beschrieben. Die anschließenden Kapitel erläutern den Inhalt des Tools.

Ein Leitfaden für den Ablauf der Benutzereingabe und des automatisierten Berechnungsprozesses im Optimierungstool ist aus dem Anhang A zu entnehmen.

4.1 Forschungsdesign

Um die, im Kapitel 2.4 formulierte, Forschungsfrage untersuchen zu können, wurde in dieser Abschlussarbeit die Methodik der quantitativen Analyse eingesetzt. Ziel ist es einen sachdienlichen Überblick über die vorliegende Thematik zu erlangen, um die daraus resultierenden Auswirkungen und Erkenntnisse schließlich in der Praxis einsetzen zu können.

Die Arbeit wurde darauf aufgebaut, ökologische Optimierungspotentiale und Differenzen gewählter Baumaterialien, während zeitgleicher Betrachtung der Materialkosten, zu erkennen und zu analysieren. Die Wirksamkeit der Geschoßdeckentragsysteme wurde anhand einer parametrischen Datenerhebung und Analyse für einige verschiedene Fälle eruiert.

Für die Erstellung des automatisierten Berechnungsverfahrens wurde ein Anwendungstool anhand der Modellierungssoftware Rhinoceros bzw. dem Plug-in Grasshopper³⁶ erarbeitet.

Nach Recherche normgerechter Anforderungen und Bestimmung der technischen Rahmenbedingungen, sowie die Ermittlung aller notwendigen Kennwerte der gewählten Systeme, konnte eine entsprechende Auswertung mit anschließender Beurteilung durchgeführt werden.

Dadurch wurde der automatisierte Ermittlungsprozess einer beispielweisen ökologischen Optimierung durch festgelegte Beurteilungskriterien und Belastungssituationen möglich.

Der Prozess der Untersuchung ist in der nachstehenden Abbildung 4.1 dargestellt.

³⁶ Rhinoceros 3D [Software].



Abb. 4.1: Untersuchungsprozess der Diplomarbeit

4.2 Konzipierung des Optimierungstools in Grasshopper

Der Aufbau des Anwendungstools in Grasshopper basiert auf einer geordneten Zusammenstellung unterschiedlicher Gruppen in Form einer Tabelle, welche in der Abbildung 4.4 imitiert wird. Eine Gesamtübersicht des Tools aus Grasshopper wird in Abbildung 4.5 repräsentiert. Diese Gruppen wurden jeweils in drei Spalten gegliedert.

Es wird zwischen der Hauptgruppe, der Gruppe und den Untergruppen unterschieden. Letzteres wurden die Trag- und Deckensysteme in weitere Spalten gegliedert.

Die einzelnen Zeilen beinhalten die Untersuchungsabfolge. Beginnend bei der Eingabe der Berechnungskenngrößen in der Hauptgruppe 1) *Benutzereingabe* bis hin zur Auswertung der Endergebnisse in 7) *Gesamtübersicht*, wird der Berechnungsablauf aufeinanderfolgend im Anwendungstool durchgeführt.

Für die benutzerfreundliche Bedienoberfläche im Anwendungstool wurden die einzelnen Untergruppen bzw. Themengebiete in „Grasshopper-Gruppen“ gegliedert. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Abschnitte wurde eine farbliche Zuweisung dieser Gruppen vorgenommen. Auch die sogenannten „Panel“ bzw. Ausgabefelder im Anwendungstool wurden einer Farbgebung zugewiesen. Die Farblegende der Gruppen und Panels ist in Abbildung 4.6 angeführt. Des Weiteren wurden die maßgebenden Angaben und Ergebnisse als Fettdruck formatiert.

Der, in Abbildung 4.2 dargestellte, Ausschnitt einer Grasshopper- Gruppe beinhaltet Materialkennwerte eines Holzwerkstoffes. In Abbildung 4.3 wird ein Beispiel eines Panels bzw. Eingabefeld dargestellt.

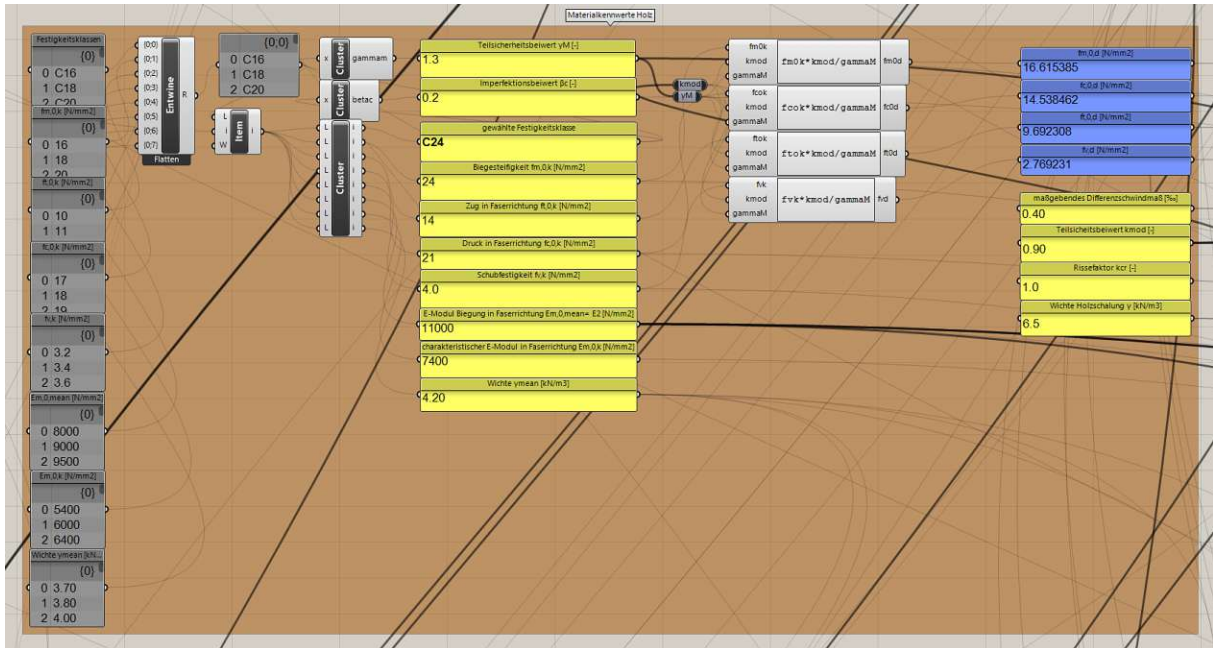


Abb. 4.2: Auszug Beispielgruppe



Abb. 4.3: Auszug Beispielpanel

Hauptgruppe	Gruppe	Untergruppen				
		TRAGSYSTEM 1		TRAGSYSTEM 2		
		DECKENSYSTEME				
		ALLGEMEIN	HOLZBALKENDECKE	HOLZ-BETON-VERBUNDECKE	FLACHDECKE	
1) BENUTZEREINGABE	1.1) EINGABE DER BERECHNUNGSKENNGRÖSSEN	1.1.1) Eingabe der Kenngrößen Deckensystem 1 und 2	1.1.2) Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Holzbalkendecke	1.1.3) Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Holz-Beton-Verbunddecke	1.1.4) Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Flachdecke	
2) BERECHNUNGSKENNWERTE	2.1) MATERIALKENNWERTE	2.1.1) Fußbodenaufbau	2.1.2) Holz	2.1.3) Beton	2.1.4) Stahl	2.1.5) Ökoindikatoren
	2.2) BAUTEILKENNWERTE		2.2.1) Kennwerte Holzbalkendecke	2.2.2) Kennwerte HBV-Decke	2.2.3) Kennwerte Flachdecke	
3) EINWIRKUNG / BEANSPRUCHUNG	3.1) EINWIRKUNG UND LASTAUFSTELLUNG	3.1.1) Einwirkung der Hauptkenngrößen	3.1.2) Einwirkung Holzbalkendecke	3.1.3) Einwirkung HBV-Decke	3.1.4) Einwirkung Flachdecke	
	3.2) SCHNITTGRÖSSENERMITTLUNG - BEMESSUNGSWERT DER BEANSPRUCHUNG		3.2.1) Schnittgrößen Holzbalkendecke	3.2.2) Schnittgrößen HBV-Decke	3.2.3) Schnittgrößen Flachdecke	
4) NACHWEISFÜHRUNG / GRENZUSTÄNDE	4.1) GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT (ULS) - BEMESSUNGSWERT DES TRAGWIDERSTANDES		4.1.1) ULS Holzbalkendecke	4.1.2) ULS HBV-Decke	4.1.3) ULS Flachdecke	
	4.2) GRENZZUSTAND DER GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT (SLS) - BEMESSUNGSWERT DES GEBRAUCHSTAUGLICHKEITSKRITERIUM		4.2.1) SLS Holzbalkendecke	4.2.2) SLS HBV-Decke	4.2.3) SLS Flachdecke	
5) ÖKOLOGISCHE BELASTUNG	5.1) ÖKOLOGISCHE KENNWERTE		5.1.1) Ökologische Kennwerte Holzbalkendecke	5.1.2) Ökologische Kennwerte HBV-Decke	5.1.3) Ökologische Kennwerte Flachdecke	
	5.2) AUSWERTUNG ÖKOLOGISCHER KENNWERTE		5.2.1) Ökologische Belastung Holzbalkendecke	5.2.2) Ökologische Belastung HBV-Decke	5.2.3) Ökologische Belastung Flachdecke	
6) KOSTENRICHTWERT	6.1) ERMITTLUNG DER EINHEITSPREISE		6.1.1) Kostenrichtwert und Einheitspreise Holzbalkendecke	6.1.2) Kostenrichtwert und Einheitspreise HBV-Decke	6.1.3) Kostenrichtwert und Einheitspreise Flachdecke	
	6.2) ÜBERSICHT DER RICHTWERTE		6.2.1) Übersicht Holzbalkendecke	6.2.2) Übersicht HBV-Decke	6.2.3) Übersicht Flachdecke	
7) GESAMTÜBERSICHT	7.1) AUSWERTUNG DER DECKENSYSTEME	7.1.1) Gegenüberstellung der berechneten Kennwerte	7.1.2) Beurteilung der Optimierungspotentiale des ausgewählten Untersuchungsfalles anhand der Optimierungskennzahl OKZ			
8) MODELLIERUNG Rhinoceros 3D			8.1) Modellierung Holzbalkendecke	8.2) Modellierung HBV-Decke	8.3) Modellierung Flachdecke	

Abb. 4.4: Schema Anwendungstool

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

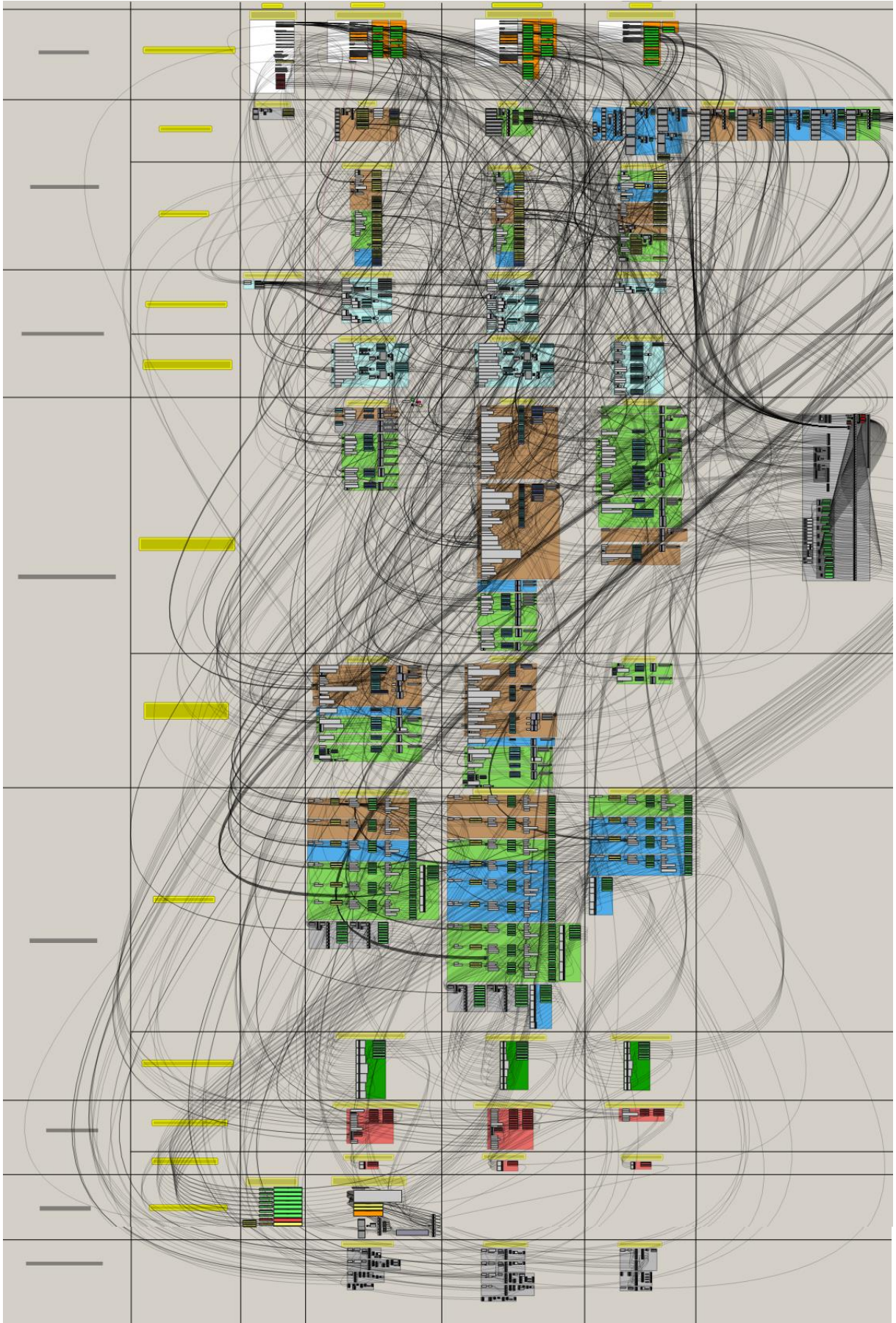


Abb. 4.5: Auszug Gesamtübersicht Anwendungstool

Anwendungstool- Gruppen	
Allgemein	
	Hauptüberschrift
	Überschrift
	Benutzereingabe
	Sonstiges, Liste
Baumaterialien	
	Holz
	Beton/Stahlbeton
	Stahl
Berechnung und Bemessung	
	Lastaufstellung und Schnittgrößenermittlung
	Ergebnis Nachweisführung
	Ökologische Belastung
	Kostenrichtwert

Anwendungstool- Panel	
	Liste
	Material- und Bauteilkennwert
	charakteristischer Kennwert
	Einwirkung
	Bemessungswert der Beanspruchung (Schnittgrößen)
	Richtkostenkennwert
	Ökologischer Kennwert

Abb. 4.6: Farblegende Anwendungstool Gruppe und Panel

4.3 Bauteile und Materialien der Deckentragssysteme

Die nachstehenden Abbildungen 4.7, 4.8 und 4.9 bzw. die horizontalen Organigramme sollen eine Übersicht der verwendeten Bauteile bzw. Materialien der einzelnen Geschößdeckensysteme vermitteln.

Für eine übersichtliche Darstellung der Baustoffe wurden die oben angeführten Farben aus der Abbildung 4.5 herangezogen.

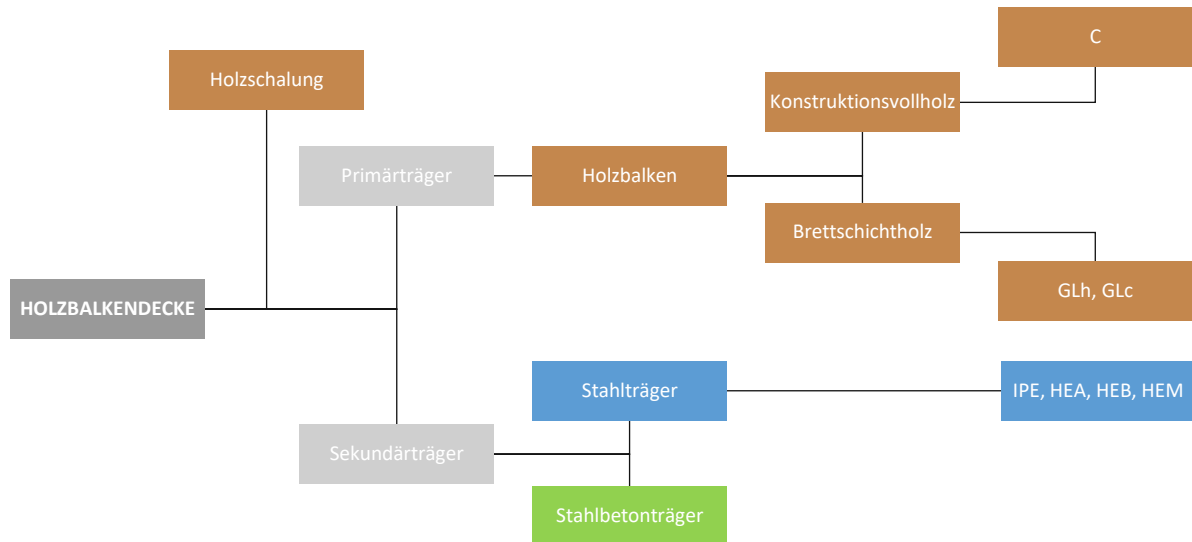


Abb. 4.7: Bauteile und Materialien Holzbalkendecke

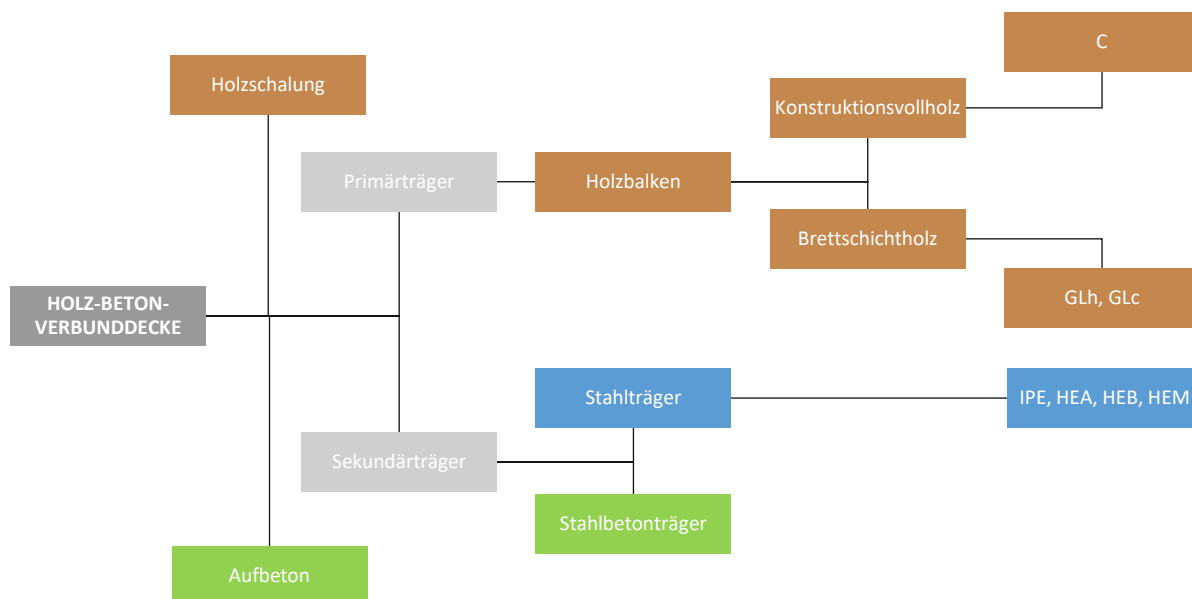


Abb. 4.8: Bauteile und Materialien Holz-Beton-Verbunddecke

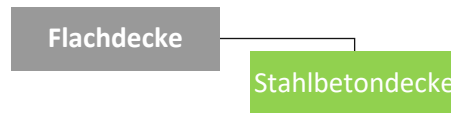


Abb. 4.9: Bauteile und Materialien Flachdecke

4.4 Benutzereingabe

In diesem Kapitel wird vorwiegend auf grundlegende Angaben und Hinweise sowie auf Empfehlungen eingegangen.

Die Vorgehensweise für die Eingabe aller erforderlichen Parameter respektive für weiterführende Anwendungs- und Auswertungsmöglichkeiten des Optimierungstools in Grasshopper werden im Anhang A erläutert.

In der Hauptgruppe 1) *Benutzereingabe* werden alle, für den gesamten Berechnungs- und Auswertungsablauf erforderlichen, Informationen angegeben. Beginnend bei der Untergruppe 1.1.1) *Eingabe der Kenngrößen Deckensystem 1 und 2* sind die Stützweiten und statischen Systeme, die unterschiedlichen Baustoffeigenschaften- und Festigkeitsklassen und die Kriterien für den Optimierungsvorgang festzulegen. Des Weiteren sind Materialeinheitspreise und Annahmen für den Fußbodenaufbau zu definieren. Für die beiden Deckenspannweiten ist eine Eingabe zwischen 4 und 8 m möglich.

Hinsichtlich ökologischer Aspekte steht dem Benutzer eine Auswahl an verschiedenen Datenbanken zur Verfügung. Es wurden die Richtwerte der ausgewählten Umweltindikatoren aus den Ländern Österreich, Deutschland und Schweiz eingearbeitet.

Um einen groben Kostenüberblick eines Deckensystems erhalten zu können, sind entsprechende Materialeinheitspreise einzugeben. Die derzeit angeführten Richtpreise im Optimierungstool wurden in gemeinsamer Abstimmung mit dem Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien sowie mit der DELTA Gruppe festgelegt. Diese Einheitspreise beziehen sich auf die Preisbasis des ersten Quartals im Jahr 2022 und sind vom Benutzer zu adaptieren.

Für die Optimierung ökologischer Resultate respektive der Beurteilungskriterien, welche im Kapitel 4.10.1 näher erläutert werden, ist vom Benutzer ein Untersuchungsfall oder eine selbst definierte Gewichtung dieser Kriterien einzugeben.

Bezugnehmend auf die Holzbalken- oder Verbunddecke steht dem Anwender die Auswahl des statischen Systems der Primär- und Sekundärträger als Einfeld- oder Mehrfeldträger bzw. Rand- oder Mittelträger zur Verfügung. Zudem wurde der Sekundärträger als Stahlträger oder Stahlbetonträger konzipiert. Durch eine entsprechende Erhöhung der Balkenbreite kann statt den einzelnen Holzbalken eine durchgehende Massivholzplatte konstruiert werden.

Die Stützen der Flachdecke wurden aus Holz oder Stahlbeton angeführt. Diese sind wiederum durch einen rechteckigen oder kreisrunden Querschnitt zu differenzieren.

Nachfolgend werden potenzielle Hinweise und Empfehlungen in den Untergruppen 1.1.1) bis 1.1.4) aufgezeigt.

1.1.1) Eingabe der Kenngrößen Deckensystem 1 und 2:

- Bedingung Stützweiten: Die Länge der Stützweite l_x ist aufgrund der gewählten Schnittgrößenermittlung der Flachdecke laut Anhang I der ÖNORM EN 1992-1-1³⁷ größer oder gleich der Stützweite l_y zu wählen! Diese Bedingung wird auch für die Stützweite des Primärträgers bzw. des Sekundärträgers vorgegeben.
- Die angeführten Kennwerte der Umweltindikatoren wurden aus dem Jahr 2022 im Oktober entnommen. Die Grundlage der Ökokennwerte wird im Kapitel 4.5 näher erläutert.
- Die Richtwerte der Materialeinheitspreise stammen aus der Preisbasis Q1 2022.

1.1.2) Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Holzbalkendecke:

In dieser Untergruppe werden die Kenngrößen der statisch relevanten Träger und die Ergebnisse der Nachweisführung ULS und SLS der Holzbalkendecke angeführt. Folgende Hinweiskfelder werden vorgegeben:

- Empfehlung Querschnittsabmessung Primärträger: Für den Rechteckquerschnitt des Holzbalkens wird das Seitenlängenverhältnis $\frac{b}{h}$ zwischen 0,25 und 0,75³⁸ empfohlen.
- Empfehlung Holzwerkstoffwahl: Ab einer Balkenbreite von 12,00 cm und einer Balkenhöhe von 24,00 cm³⁹ wird Brettschichtholz empfohlen.
- Empfehlung Primärträgerachsabstand: Für die Holzbalkenträger wird ein Achsabstand zwischen 0,65 m und 1,00 m empfohlen.
- Empfehlung Querschnittsabmessung Sekundärträger: Für den Rechteckquerschnitt des Stahlbetonträgers wird eine Mindestbreite von $\frac{h}{3}$ und eine maximale Breite von $\frac{h}{2}$ empfohlen. Die Mindesthöhe soll $\frac{l_y}{14}$ und die maximale Höhe $\frac{l_y}{8}$ betragen.⁴⁰

1.1.3) Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Holz-Beton-Verbunddecke:

Die Empfehlungen der Primär- und Sekundärträger wurden analog zur Holzbalkendecke angegeben.

³⁷ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: 2015, S. 239-240

³⁸ vgl. Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021), S. 96

³⁹ vgl. Holzforschung Austria- Österreichische Gesellschaft für Holzforschung (2022) Festigkeitsorientiertes Bauholz [online]. Wien: Holzforschung Austria. https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter_de/vh_de_01.pdf [Zugriff am: 12.11.2022]

⁴⁰ vgl. Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung (2021) Hochbaukonstruktionen- Teil C- Einwirkungen und Vorbemessung. Technische Universität Wien, S. 84

1.1.4) Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Flachdecke:

Für dieses Deckensystem werden keine konkreten Bedingungen empfohlen.

4.5 Berechnungskennwerte

In der Hauptgruppe 2) *Berechnungskennwerte* wurden die Kennwerte der verwendeten Baustoffe und Bauteile berechnet. Auf den mathematischen Berechnungsverlauf wird auf das Optimierungstool in Grasshopper verwiesen.

Die Materialkennwerte aus der Gruppe 2.1) *Materialkennwerte* wurden laut Tabelle 4.1 recherchiert.

Tab: 4.1: Materialkennwerte

Material	Informationsquelle
Parkett	Datenblatt für Mehrschichtparkett ⁴¹
Fliesen und Kautschuk	IBO- Richtwerte für Baumaterialien ⁴²
Trittschalldämmung, Ausgleichsschüttung, Estrich	Skriptum Hochbaukonstruktionen ⁴³
Holzschalung	Datenblatt für OSB- Platten ⁴⁴
Vollholz und Brettschichtholz	Skriptums Holzbau.bi- Bemessung nach Eurocode 5 ⁴⁵
Beton, Bewehrungsstahl, Baustahl	Bemessungstabellen für Stahlbetonbau ⁴⁶
Stahlprofil	Bemessungstabellen für Stahlbau ⁴⁷

Weitere Faktoren und Beiwerte von Holz, sowie die Ermittlung der Bemessungswerte des Tragwiderstandes wurden laut dem Skriptum Holzbau.bi⁴⁸ und ÖNORM EN 1995-1-1⁴⁹ ermittelt.

Für die Eingabe bauökologischer Richtwerte wurden die nachstehenden Onlinedatenbanken herangezogen. Auf die ausgewählten Umweltindikatoren und deren Auswirkung auf die verwendeten Materialien wird im Kapitel 4.8 eingegangen.

⁴¹ vgl. https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter_de/mlp_de_01.pdf [online: 12.11.2022]

⁴² vgl. IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) Beläge, Fußbodenmaterialien, Textilien [online]. Wien: IBO. <https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/belaege2013.pdf> [online: 12.11.2022]

⁴³ vgl. Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung (2021), S. 15-17

⁴⁴ vgl. https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter_de/osb_de_01.pdf [Zugriff am: 12.11.2022]

⁴⁵ vgl. Winter, Wolfgang (2016) Holzbau.bi- Bemessung nach Eurocode 5. Technische Universität Wien, S. 188-191

⁴⁶ vgl. Fritze, R.; Kidery, GF.; Potucek, W. (2009) Stahlbetonbau- Teil 2: Bemessungstabellen auf Basis des Eurocodes 2 (ÖNORM EN 1992-1-1 und nationaler Anhang ÖNORM B 1992-1-1). Wien: Manz. S. 4-5

⁴⁷ vgl. Luza, G.; Palka, M. (2010) Stahlbau- Formeln und Tabellen. Wien: Manz. S. 56-69

⁴⁸ vgl. Winter (2016), S. 23,27,32

⁴⁹ vgl. ÖNORM EN 1995-1-1:2019-06, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten- Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln für den Hochbau: 2019, S. 49

- Für die österreichischen Werte wurde die Onlinedatenbank aus der baubook-Zentrale⁵⁰ herangezogen. Die IBO- Richtwerte aus dem Jahr 2020 wurden für die Ermittlung der ökologischen Belastung aus dem EDV- Programm eco2soft- Gebäuderechner⁵¹ herausgelesen. Diese Datenbank beinhaltet bauphysikalische und bauökologische Daten für die Energie- und Ökobilanzberechnung von Bauteilen und Gebäuden. Zudem können mit diesen Katalogen beispielweise der Ökoindex OI3 oder der Entsorgungsindikator EI berechnet werden. Für den Betrachtungszeitraum der ökologischen Kennwerte aus Österreich wurde die Herstellungsphase (A1-A3) herangezogen.
- Die Kennwerte aus Deutschland wurden aus der ÖKOBAUDAT Datenbank⁵² entnommen. Analog zur Datenbank aus Österreich wurden für Deutschland die Phasen A1-A3 betrachtet.
- Für die Kennwerte aus der Schweiz wurde die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich 2099/1:2016⁵³ herangezogen. Die Bilanzierungskennwerte wurden aus der Spalte „Herstellung total“ bzw. „Herstellung“ entnommen.

Zur Veranschaulichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.10 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

⁵⁰ vgl. baubook GmbH (2022) Produkte [online]. Wien: baubook GmbH. <https://www.baubook.at/zentrale/> [Zugriff am: 12.11.2022]

⁵¹ baubook GmbH- eco2soft [Software]. <https://www.baubook.at/eco2soft/> [Zugriff am: 12.11.2022]

⁵² vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2022) ÖKOBAUDAT 2021-II [online]. Berlin: BBR. <https://www.oekobaudat.de/service/downloads.html> [Zugriff am: 05.12.2022]

⁵³ vgl. Bundeskanzlei, Bundeshaus (2022) Ökobilanzdaten im Baubereich_Données des écobilans dans la construction 2009-1-2022 [online]. Bern: Bundeskanzlei. https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html [Zugriff am: 05.11.2022]

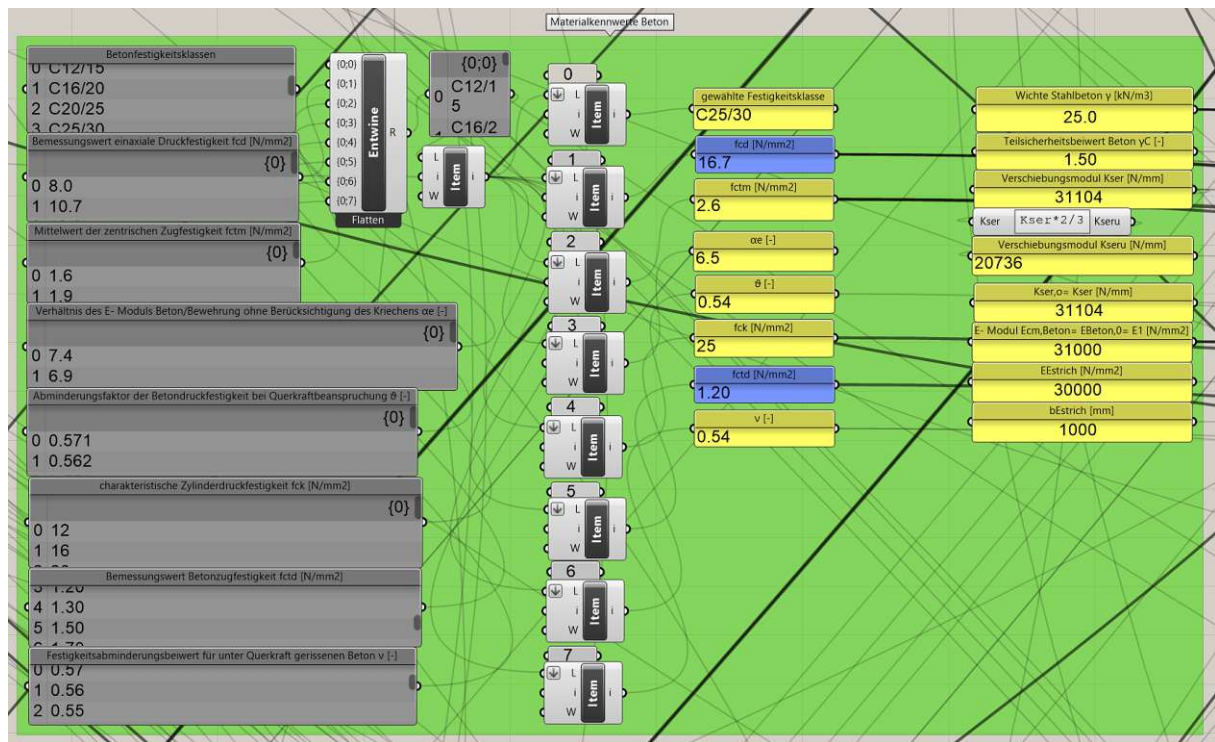


Abb. 4.10: Auszug beispielhafte Materialkennwerte

Die Bauteilkennwerte aus der Gruppe 2.2) *Bauteilkennwerte* wurden wie folgt ermittelt:

Auf die Berechnung der geometrischen Größen der Bauteilkörper, wie Längen, Flächen oder Volumina, wird nicht näher eingegangen. Die Massen wurden mit der vorhandenen Wichte und dem Volumen berechnet. Die Ermittlung weiterer Querschnittskenngrößen, beispielsweise Trägheits- oder Widerstandsmomente oder Trägheitsradien, wurden laut dem Lehrbuch für Festigkeitslehre⁵⁴ bestimmt. Die weiteren angeführten Beiwerte, Grenzwerte und Annahmen der Untergruppen 2.2.1) bis 2.2.3) werden im Kapitel 4.7 erläutert.

Für die einzelnen Berechnungsschritte wird auf das Optimierungstool in Grasshopper verwiesen.

Um einen ausreichend kraftschlüssigen Verbund zwischen Holz und Beton bei der Holz-Beton-Verbunddecke herstellen zu können, sind im Allgemeinen Verbindungsmittel erforderlich. Die notwendige Stückanzahl bzw. in weiterer Folge die Masse dieser Elemente für die ökologische Belastung wurde anhand einer vergleichbaren Beispieldecke mit dem EDV- Programm SFSintec⁵⁵ erarbeitet. Die Eingangsgrößen und Schnittgrößenermittlung bzw. die Übersicht der Verbindungsmittelwahl sind aus dem Anhang B zu entnehmen. Die einwirkende Last, Stützweiten und Querschnittsabmessungen basieren auf Annahmen. Beispielsweise wurde bei der Trägerlänge der Mittelwert aus der kürzesten bzw. längsten auszuwählenden Spannweite im Optimierungstool (l_x bzw. l_y) herangezogen. Laut dem Ausdruckprotokoll wurden über eine Trägerlänge von 6,00 m

⁵⁴ vgl. Mang, H.A.; Hofstetter, G. (2018) Festigkeitslehre. 5.Auflage. Wien: Springer Vieweg, S.159-177

⁵⁵ SFS intec AG SFSintec [Software]. <https://de.sfs.com/downloads/holzbau> [online 13.11.2022]

und einem Balkenachsabstand von 0,75 m insgesamt 146 stiftförmige Verbindungsmittel berechnet. Diese Berechnung ergab somit eine Stückanzahl von 25 Verbindungsmittel pro Laufmeter eines Trägers der Verbunddecke. Das tatsächliche Gewicht der gewählten Verbundschraube (SFS-VB-48-7,5x165mm) beträgt in etwa 0,11 Kilogramm.⁵⁶ Für die Massenermittlung wurde das Gewicht pro Schraube auf 0,15 Kilogramm aufgerundet. Mit der ermittelten Stückzahl, der tatsächlichen Trägeranzahl des Deckensystems und der angenommenen Masse eines Verbindungsmittels, wurde die Gesamtmasse der einzubringenden Verbindungsmittel pro Quadratmeter Deckenfläche für die Holz-Beton-Verbunddecke berechnet.

Die Querschnittskennwerte der Holzstütze gegen Biegeknicken für die Flachdecke wurden laut dem Skriptum Holzbau.bi- Bemessung nach Eurocode 5⁵⁷ berechnet. Die Knicklängen bzw. die Knicklängenbeiwerte der Eulerschen Knickfälle wurden aus den Bemessungstabellen⁵⁸ entnommen.

Die Vorgehensweise für die Berechnung der Umfänge des kritischen Rundschnittes und die Beiwerte der Lastübertragung der Stahlbetonstützen für das Nachweisverfahren des Durchstanzens der Flachdecke wurde laut ÖNORM EN 1992-1-1⁵⁹ entnommen.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.11 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

⁵⁶ vgl. Spillner Spezialbaustoffe GmbH (2022) Holz-Beton-Verbund- SFS Intec [online]. Lübeck: Spillner Spezialbaustoffe GmbH. <https://www.123baustoffe.de/shop/holz-beton-verbund-system/> [Zugriff am: 13.11.2022]

⁵⁷ vgl. Winter (2016), S. 65-70

⁵⁸ vgl. Luza, Palka (2010), S.38

⁵⁹ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02, 2015, S. 106-108, 113

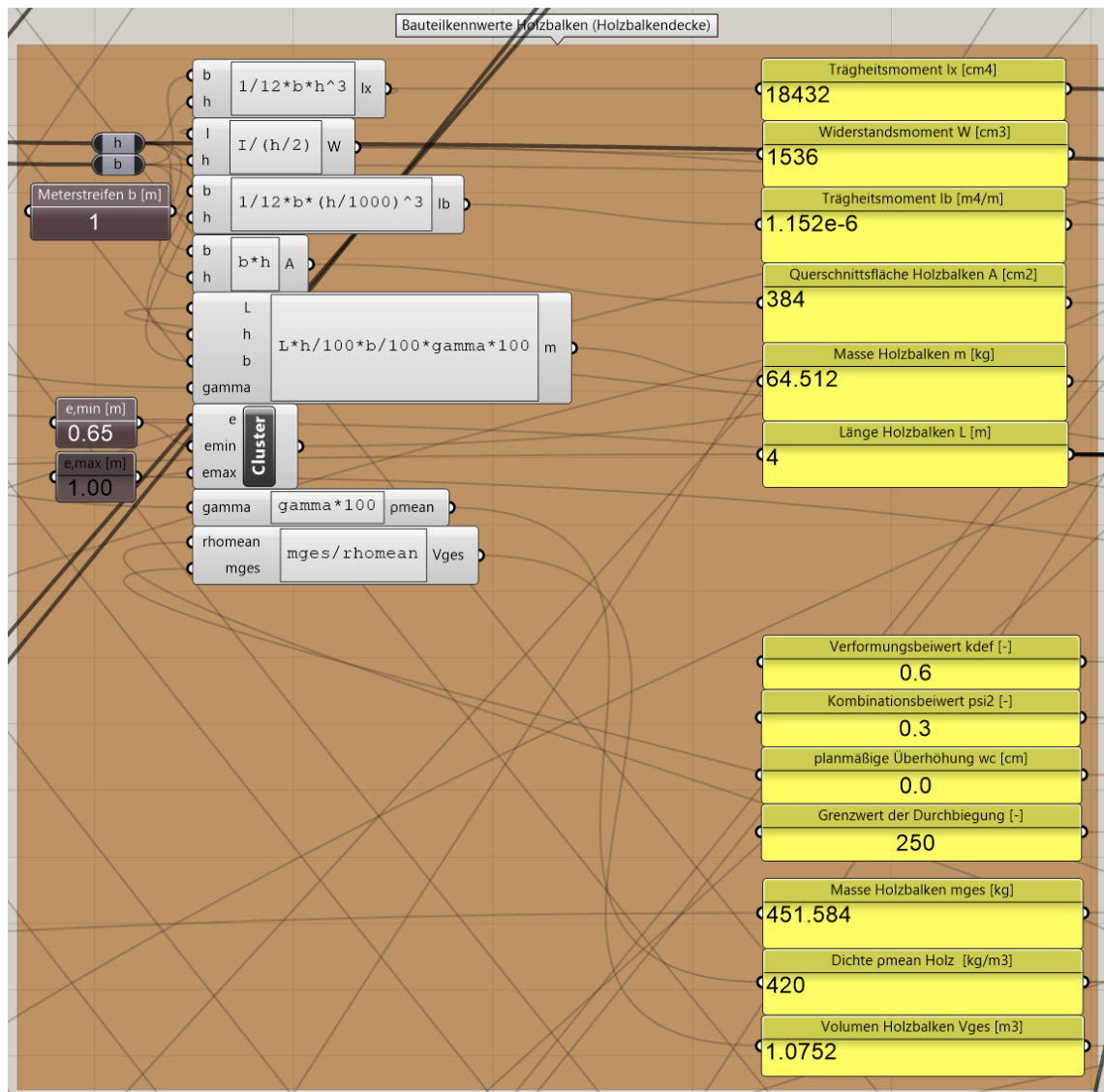


Abb. 4.11: Auszug beispielhafte Bauteilkennwerte

4.6 Einwirkung und Beanspruchung

In der Hauptgruppe 3) *Einwirkung/ Beanspruchung* wurden zum einen die Einwirkung samt Lastaufstellung und zum anderen die Schnittgrößenermittlung bzw. der Bemessungswert der Beanspruchung ermittelt.

4.6.1 Einwirkende Lasten und Einwirkungskombinationen

Die Nutzlasten wurden laut ÖNORM EN 1991-1-1⁶⁰ gewählt.

Nach der Ermittlung der charakteristischen Last des Fußbodenaufbaus und der Bauteile in der Untergruppe 3.1.1) wurden die maßgebenden Einwirkungskombinationen laut den Kombinationsregeln der ÖNORM EN 1990⁶¹ berechnet.

⁶⁰ vgl. ÖNORM EN 1991-1-1:2011-09, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke- Teil1-1: Allgemeine Einwirkungen- Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau: 2011, S. 17

⁶¹ vgl. ÖNORM B 1990:2013-01, Eurocode- Grundlagen der Tragwerksplanung- Teil 1: Hochbau: 2013. S. 37-43

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit wurde die Kombination der ständigen und vorübergehenden Beanspruchung sowie die außergewöhnliche Beanspruchung in den Untergruppen 3.1.2) bis 3.1.4) untersucht.

Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeitsnachweise wurde die charakteristische und quasi-ständige Einwirkungskombination ermittelt.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.12 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

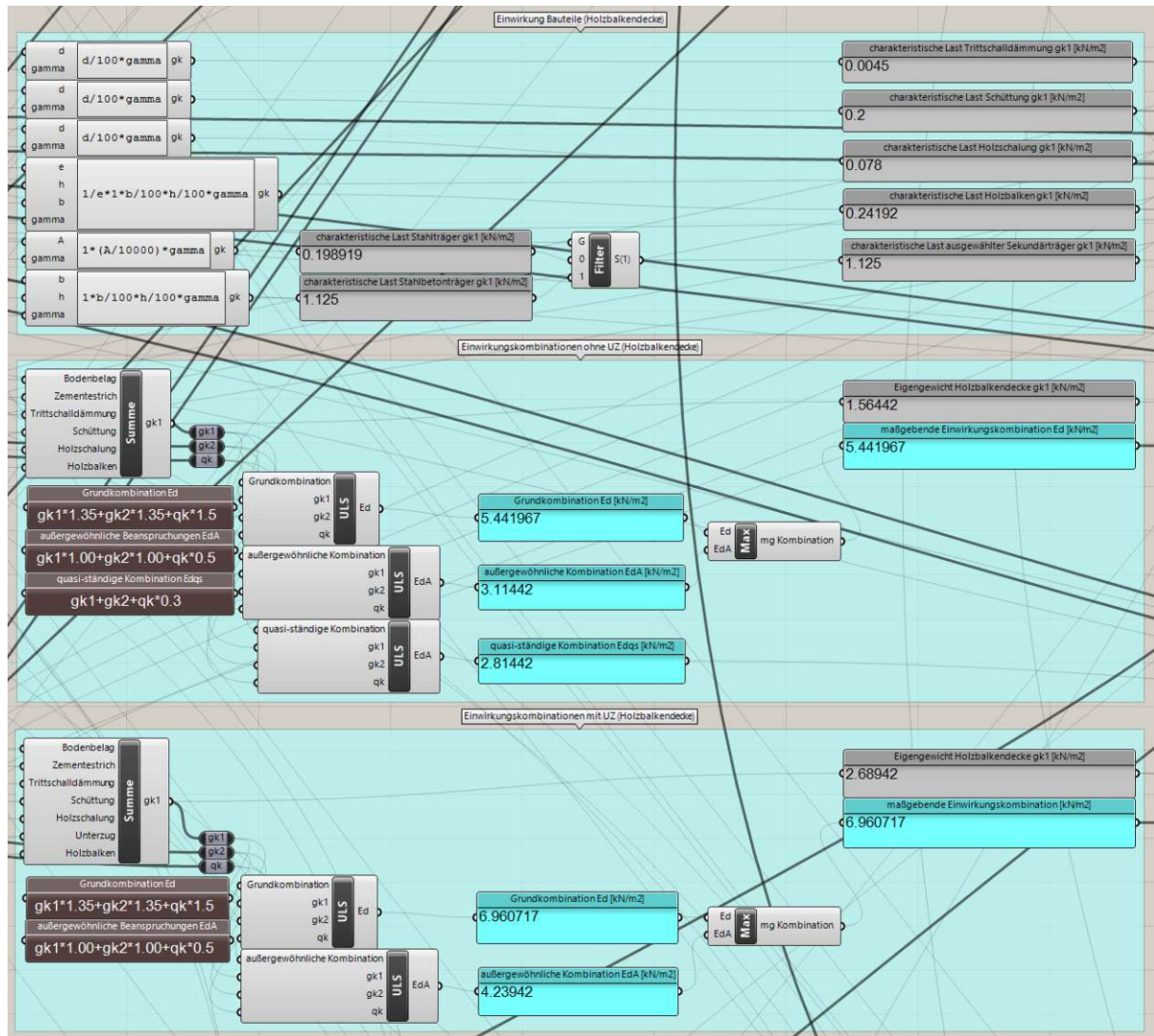


Abb. 4.12: Auszug beispielhafte Einwirkung

4.6.2 Einwirkungen

Die Schnittgrößenermittlung aus den Untergruppen 3.2.1) bis 3.2.3) des Primär- und Sekundärträgers der Holzbalken- und Verbunddecke wurde mithilfe von Bemessungstabellen aus dem Skriptum Hochbaukonstruktionen I- Teil C⁶² erstellt.

Anhand dieser Tabellen konnten je nach Auswahl des statischen Systems in der Benutzereingabe die maximalen Feld- oder Stützmente und die Querkraft berechnet werden.

Für die Untersuchung des Trägers als Randträger ist die halbe Einflussbreite $\frac{l_x}{2}$ bzw. $\frac{l_y}{2}$ (=halbe Stützweite) maßgebend. Die Wahl als Mittelträger berücksichtigt die volle Stützweite l_x bzw. l_y .

Für die Ermittlung der entstehenden Momente der Flachdecke wurden die ÖNORM EN 1992-1-1, Anhang I⁶³ und die Tafelwerte für Mehrfeldträger⁶⁴ herangezogen.

Für die Ermittlung der maßgebenden Feld- und Stützmente in x- und y-Richtung wurde eine Teilung in Gurt- und Feldstreifen anhand der nachstehenden Abbildung 4.13 vorgenommen.

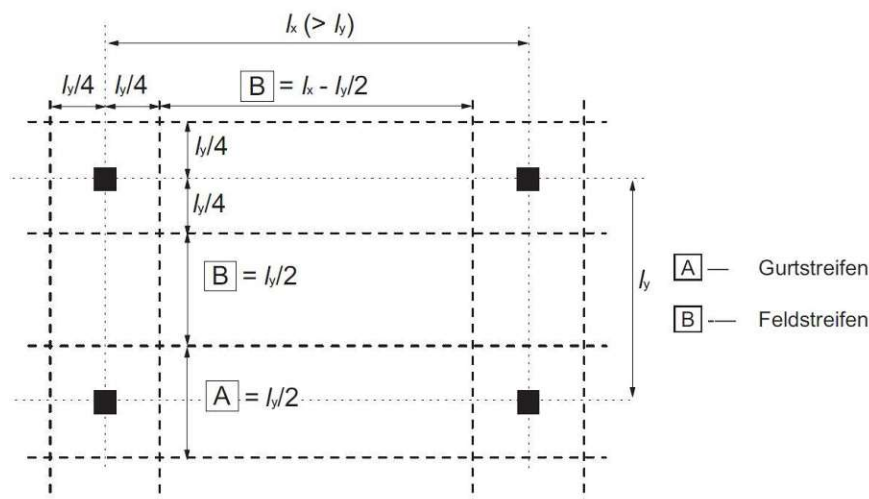


Abb. 4.13: Aufteilung der Gurt- und Feldstreifen⁶⁵

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.14 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

⁶² vgl. Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung (2021), S. 75-78

⁶³ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02, 2015, S. 239-240

⁶⁴ vgl. Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung (2021), S. 78

⁶⁵ adap. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02, 2015, S. 240

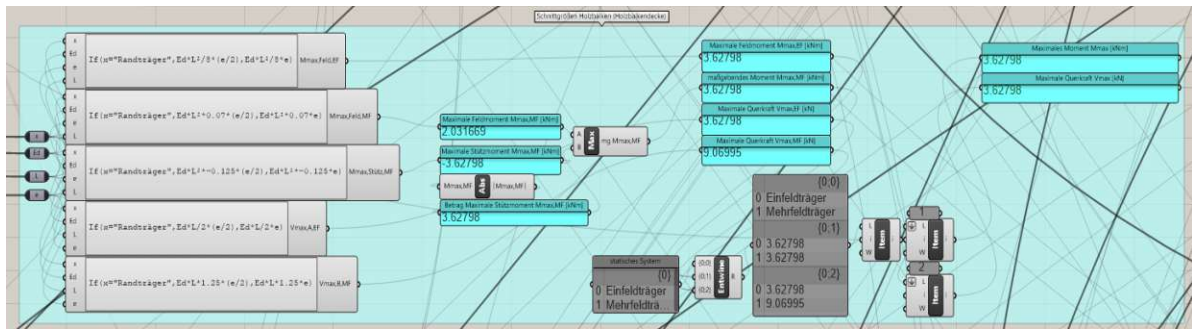


Abb. 4.14: Auszug beispielhafte Schnittgrößenermittlung

4.7 Statische Nachweisführung der Deckentragsysteme

Die statischen Nachweise der Deckensysteme werden in der Hauptgruppe 4) *Nachweisführung/ Grenzzustände* vorgenommen.

Auf den mathematischen Berechnungsablauf wird auf das Optimierungstool in Grasshopper verwiesen. Die Nachweisführung ist auf jeden, der in Gruppe 1.1) *Eingabe der Berechnungskenngrößen* eingegeben Parameter, automatisiert abgestimmt.

Die nachfolgenden Abbildungen 4.15 und 4.16 bzw. horizontalen Organigramme stellen eine grafische Übersicht der, in Gruppe 4.1) *Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)- Bemessungswert des Tragwiderstandes* und 4.2) *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)- Bemessungswert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums* angeführten, Nachweisführungen der einzelnen Bauteile dar.

Zur Verdeutlichung wurden hier ebenso die Farben der Legende aus der Abbildung 4.6 verwendet.

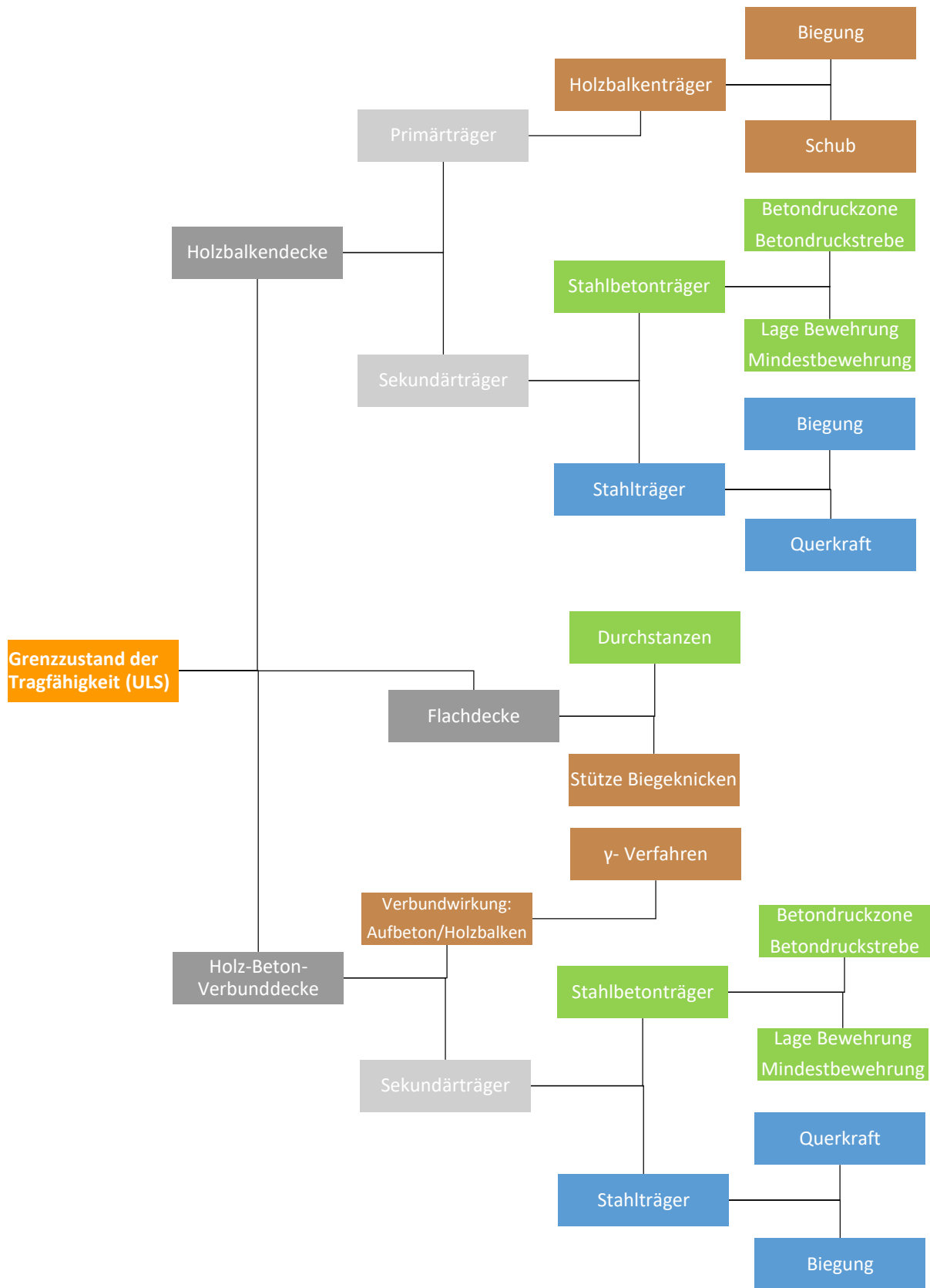


Abb. 4.15: Nachweisführung ULS

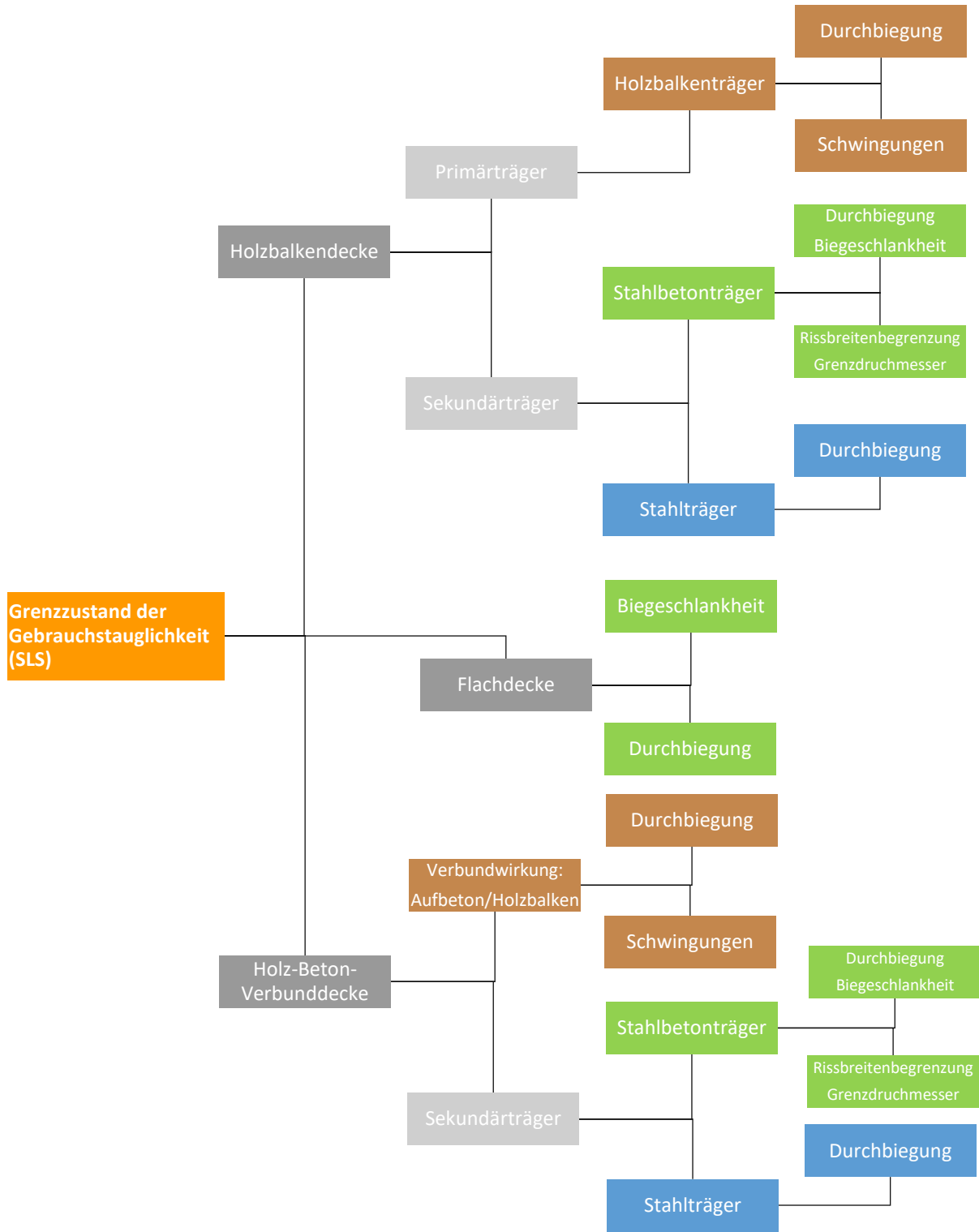


Abb. 4.16: Nachweisführung SLS

4.7.1 Holzbalkendecke

Für die statische Nachweisführung der Holzbalkendecke wird zwischen dem Primärträger, also der Holzbalken aus Konstruktionsvollholz oder Brettschichtholz, und dem Sekundärträger, nämlich der Stahlbetonträger oder das Stahlprofil, unterschieden.

Folgende Grenzzustände der Tragfähigkeit wurden für die Holzbalkendecke in der Untergruppe 4.1.1) ULS Holzbalkendecke durchgeführt:

Der Biege- und Schubnachweis des Holzbalkens wurde laut ÖNORM EN 1995-1-1⁶⁶ berechnet.

Der Biege- und Querkraftnachweis des Stahlträgers wurde laut ÖNORM EN 1993-1-1⁶⁷ berechnet. Zur Feststellung der Beanspruchbarkeit wurde die Querschnittsklasse 1 angenommen.

Die Mindestzugbewehrung des Stahlbetonträgers wurde laut ÖNORM EN 1992-1-1⁶⁸ ermittelt. Die Überprüfung der Betondruckzone im Querschnitt, die Ermittlung der erforderlichen Zugbewehrung sowie die Überprüfung der Lage der Bewehrung wurde laut der Fachliteratur Stahlbetonbau⁶⁹ durchgeführt. Der Bewehrungsgrad der gewählten Zugbewehrung wurde laut ÖNORM 1992-1-1⁷⁰ bestimmt. Neben der Ermittlung und Einhaltung der gewählten Querkraftbewehrung und dessen Bewehrungsgrades wurde die Überprüfung der Betondruckstreben laut der Fachliteratur Stahlbetonbau⁷¹ angeführt. Die Neigung der Betondruckstreben wurde mit 0,60⁷² und der Wert für $\cot\theta$ mit 1,00⁷³ angenommen. Sowohl für die erforderliche Zug-, als auch Querkraftbewehrung ist eine prozentuelle Erhöhung der Bewehrungsquerschnittsfläche in der Gruppe 1.1) möglich.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.17 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

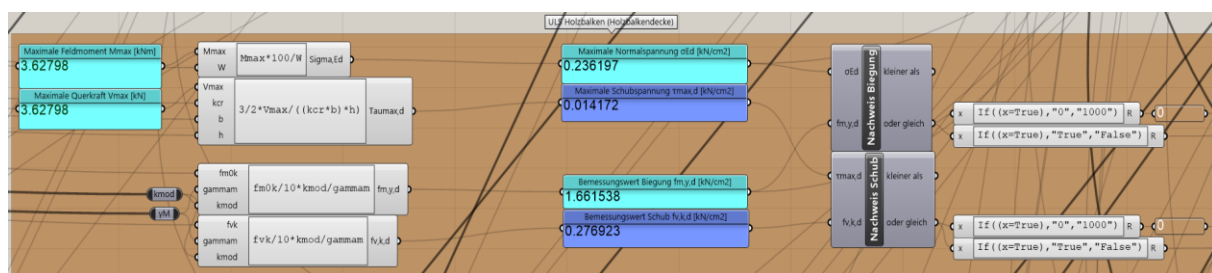


Abb. 4.17: Auszug beispielhafter ULS

⁶⁶ vgl. ÖNORM EN 1995-1-1:2019-06: 2019, S. 44-45

⁶⁷ vgl. ÖNORM EN 1993-1-1:2014-10, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: 2014. S. 56-57

⁶⁸ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02, 2015, S. 166

⁶⁹ vgl. Valentin, G.; Potucek, W.; Kidery, GF.; Fritze, R. (2009) Stahlbetonbau- Teil 1: Grundlagen und Beispiele auf Basis des Eurocodes 2 (ÖNORM EN 1992-1-1 und nationaler Anhang ÖNORM B 1992-1-1). Wien: Manz. S. 124-127

⁷⁰ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02: 2015, S. 170

⁷¹ vgl. Valentin, G. et al. (2009), S. 191-194, 203

⁷² vgl. Valentin, G. et al. (2009), S. 190

⁷³ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02: 2015, S. 96

Folgende Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit wurden für die Holzbalkendecke in der Untergruppe 4.2.1) *SLS Holzbalkendecke* durchgeführt:

Für den Durchbiegungsnachweis des Holzbalkens wurde zum einen die elastische Anfangsdurchbiegung unter Berücksichtigung der charakteristischen Einwirkungskombination und zum anderen die gesamte Enddurchbiegung unter Berücksichtigung der quasi- ständigen Einwirkungskombination und Kriechen untersucht. Des Weiteren wurde das Schwingungsverhalten des Trägers ermittelt. Die Nachweisführung der Durchbiegungen und Schwingungen wurden laut ÖNORM EN 1995-1-1⁷⁴ bzw. dem Skriptum Holzbau.bi- Bemessung nach Eurocode 5⁷⁵ vorgenommen.

Der Nachweis der Durchbiegung für den Stahlträger wurde laut der Fachliteratur Stahlbau⁷⁶ vorgenommen. Der maximale Durchhang des Stahlträgers ist mit $\frac{1}{300}$ der Stützweite l_y beschränkt.⁷⁷

Für die Beschränkung der Rissbreite und die Einhaltung des Grenzdurchmessers der Biegebewehrung des Stahlbetonträgers wurde, da sich das Bauteil im Innenraum befindet, die Expositionsklasse XC1 gewählt. Daraus ergab sich der empfohlene Wert für w_{\max} zu 0,40⁷⁸. Die vorhandene Stahlspannung des Bewehrungsstabes wurde laut der Fachliteratur Stahlbetonbau⁷⁹ ermittelt. Für die Ermittlung des rechnerischen Grenzdurchmessers bei Betonstählen wurde die Tabelle 9 aus der ÖNORM EN 1992-1-1⁸⁰ herangezogen. Dieser rechnerische Durchmesser konnte durch lineare Interpolation zwischen den angeführten Stahlspannungen aus der Tabelle und der maßgebenden Stahlspannung festgestellt werden. Für die Modifizierung des zuvor ermittelten Grenzdurchmessers wurde laut ÖNORM EN 1992-1-1⁸¹ der maßgebende Grenzdurchmesser bestimmt. Aufgrund der Annahme, dass die Rissbildung innerhalb 28 Tagen eintreten wird, ist das Gleichsetzen der wirksamen Zugfestigkeit $f_{ct,eff}$ mit der mittleren Zugfestigkeit des Betons f_{ctm} laut ÖNORM EN 1992-1-1 zulässig.⁸² Für eine vereinfachte Berechnung der maximalen Durchbiegung wurde für einen Einfeldträger, ein von der Belastung abhängiger Beiwert η_s , eine konstante Biegesteifigkeit und das aus der quasi-ständigen Einwirkungskombination ermittelte, einwirkende Moment M_{qs} , herangezogen.⁸³ Der maximale Durchhang des Trägers ist mit $\frac{1}{250}$ der Stützweite l_y beschränkt.⁸⁴ Bezugnehmend auf die Begrenzung der Verformung ist mit der Einhaltung der entsprechenden Biegeschlankheit ein weiterer Nachweis vorgenommen worden. Nach der Bestimmung der

⁷⁴ vgl. ÖNORM EN 1995-1-1:2019-06: 2019, S. 60-62

⁷⁵ vgl. Winter (2016), S. 83-93

⁷⁶ vgl. Luza, G.; Palka, M.; Schnaubelt, S. (2011) Stahlbau- Grundlagen, Konstruktion, Bemessung. Wien: Manz. S. 88-89, 106-107

⁷⁷ vgl. ÖNORM B 1990:2013-01, 2013. S. 7

⁷⁸ vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018-01, Eurocode 2- Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für Hochbau: 2018. S. 32

⁷⁹ vgl. Valentin, G. et al. (2009), S. 287-289

⁸⁰ vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018-01: 2018, S. 34

⁸¹ vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018-01: 2018, S. 34

⁸² vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02: 2015, S. 131

⁸³ vgl. Valentin, G. et al. (2009), S. 314-315

⁸⁴ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02: 2015, S. 139

vorhandenen Biegeschlankheit $\frac{ly}{d_{vorh}}$ und des Bewehrungsgrades ρ_l , konnte durch lineare Interpolation zwischen gering und hoch beanspruchten Beton bzw. eines Einfeld- oder Mehrfeldträgers laut Tabelle 12 der ÖNORM B 1992-1-1⁸⁵ der Grenzwert der Biegeschlankheit ermittelt werden. Hierbei wurde angenommen, dass anschließende Bauteile aufgrund der Verformung nicht gefährdet werden.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.18 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

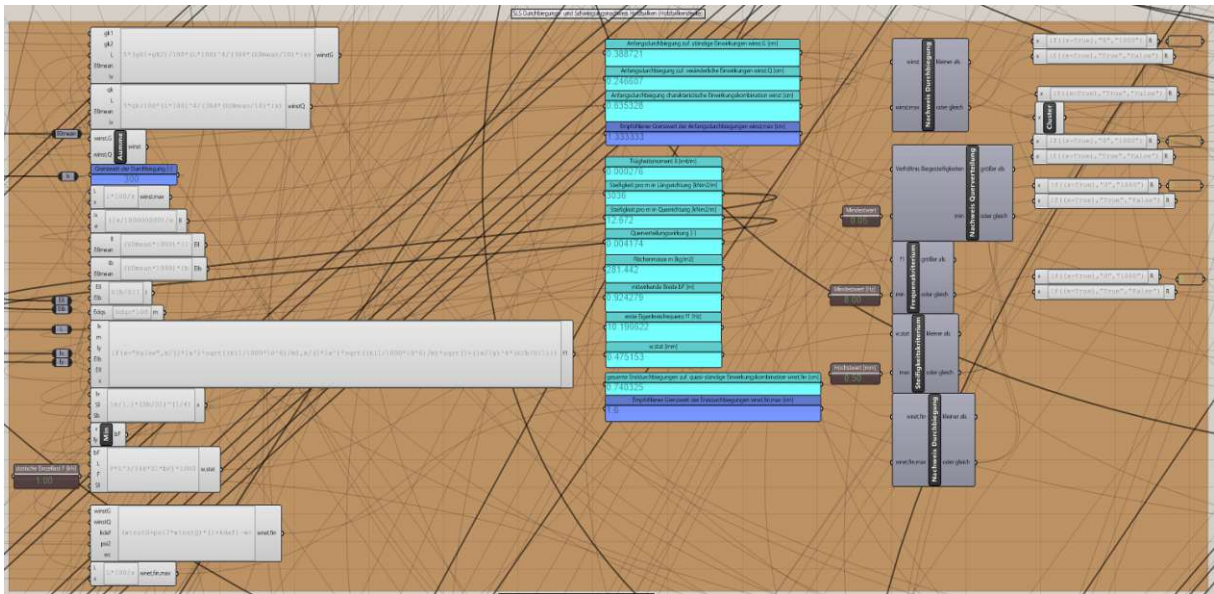


Abb. 4.18: Auszug beispielhafter SLS

4.7.2 Holz-Beton-Verbunddecke

Die Untersuchung des Sekundärträgers der Verbunddecke wird analog zum Holzbalkendeckensystem aus Kapitel 4.7.1 durchgeführt. Auf die Erläuterung des Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweises für den Stahlbeton- und Stahlträger wird daher auf das vorige Kapitel 4.7.1 verwiesen.

Die Holz-Beton-Verbundbauweise wurde nach dem vereinfachten Gammaverfahren (kurz γ -Verfahren) in Untergruppe 4.1.2) *ULS HBV-Decke* bemessen. Alle dafür notwendigen Kenn- und Beiwerte sind bei den Material- und Bauteilkennwerten in den Untergruppen 2.1.3) und 2.2.2) angeführt. Im Allgemeinen wurde das vereinfachte Verfahren aus dem Anhang B der ÖNORM B 1995-1-1⁸⁶ herangezogen. Der konkrete Berechnungsablauf und die notwendigen Annahmen bzw. Festlegungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit wurde aus den Vorlesungsfolien der Lehrveranstaltung 259.383 Holzbau 2 des Sommersemesters 2021⁸⁷

⁸⁵ vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018-01: 2018, S. 36

⁸⁶ vgl. ÖNORM B 1995-1-1:2019-06, 2019, S. 162-165

⁸⁷ vgl. Müllner, A. (2021) 259,383 Holzbau 2 | SS 2021 | Verbundbauteile- Modellierung und Bemessung 1+2 und Verbundbauteile- Personeninduzierte Schwingungen. Technische Universität Wien.

entnommen. Das Verbundsystem, welches während der Betonage unterstützt wird, wurde im Tragfähigkeitsnachweis auf Längs- und Schubspannungen zum Zeitpunkt $t=0$ und $t=\infty$ untersucht.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit wurden in der Untergruppe 4.2.2) *SLS HBV-Decke* die Anfangs- und Endverformungen für die beiden Zeitpunkte $t=0$ und $t=\infty$ sowie die auftretenden personen-induzierten Schwingungen nachgewiesen.

4.7.3 Flachdecke

Die Ermittlung der Grenzzustände der Stahlbetondecke, welche punktförmig auf Stahlbeton- oder Holzstützen gelagert ist, wurde laut ÖNORM EN 1992-1-1⁸⁸ und ÖNORM B 1992-1-1⁸⁹ vorgenommen. Nach der Kontrolle einer vorhandenen konzentrierten Last im Bereich der Stützen in der Untergruppe 4.1.3) *ULS Flachdecke*, konnte der Nachweis im Stützenanschnitt nachgewiesen werden. Mit dieser Erkenntnis ist die Überprüfung der Notwendigkeit einer Durchstanzbewehrung im kritischen Rundschnitt laut dem Nachweisverfahren möglich. Nach mathematischer Umformung der Gleichung für die erforderliche Bewehrung gegen Durchstanzen⁹⁰, konnte die Querschnittsfläche des Bewehrungsstahls in einem Rundschnitt um die Stütze ermittelt werden.

Die Stabilität der rechteckigen bzw. kreisrunden Holzstütze wurde laut ÖNORM B 1995-1-1⁹¹ nachgewiesen.

Die Verformungsbegrenzung der Flachdecke in Untergruppe 4.2.3) *SLS Flachdecke* wurde laut dem Nachweisverfahren des Stahlbetonträgers aus Kapitel 4.7.1 und der Tabelle 12 der ÖNORM B 1992-1-1⁹² erarbeitet. Bei dem statischen System handelt es sich um eine Stahlbetonplatte, welche ohne Unterzüge auf Stützen gelagert ist. Auch bei diesem Deckensystem wird bei der Untersuchung der Biegeschlankheit angenommen, dass durch die Verformung der Platte keine angrenzenden Bauteile gefährdet werden. Jedoch sind die angegebenen Grenzwerte für gering bzw. hoch beanspruchten Beton weniger streng, als der zulässige Durchhang der Flachdecke anzusehen. Die Begrenzung des Durchhangs liegt bei $\frac{1}{250}$ der Stützweite l_x .

4.8 Ökoindikatoren

In diesem Kapitel werden anhand von Gegenüberstellungen bzw. Vergleichen die unterschiedlichen Umwelteinflüsse der drei Baumaterialien Holz, Beton und Stahl aufgezeigt. Eine ausführliche Erläuterung der Auswertungsmethodik der ökologischen Belastung und der Analyse der Deckensysteme wird im Kapitel 5 angeführt. Alle ökologischen Berechnungen sind auf jeden, der in Gruppe 1.1) *Eingabe der Berechnungskenngrößen* eingegeben Parameter, automatisiert abgestimmt.

⁸⁸ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02: 2015, S. 105-116

⁸⁹ vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018-01: 2018, S. 24-27

⁹⁰ vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02: 2015, S. 115

⁹¹ vgl. ÖNORM B 1995-1-1:2019-06: 2019, S. 57-59

⁹² vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018-01: 2018, S. 36

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.19 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

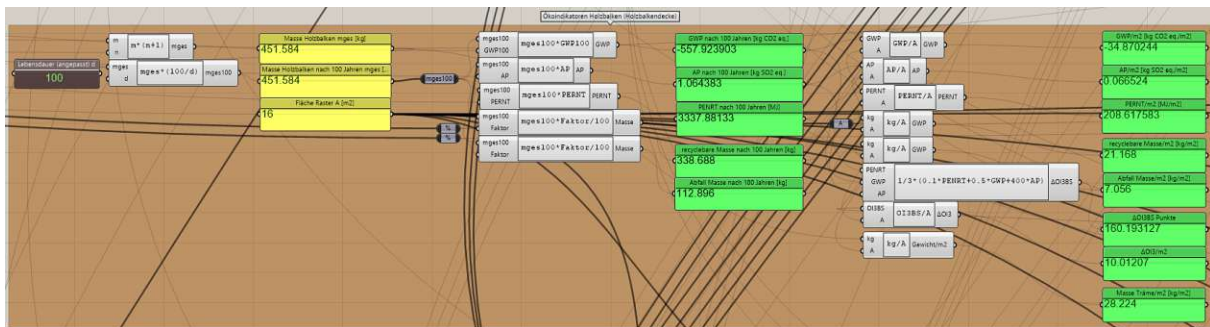


Abb. 4.19: Auszug beispielhafte ökologische Kennwerte

Folgende Umweltindikatoren der Gruppe 5.1) *Ökologische Kennwerte* wurden für die Untersuchungen herangezogen:

- Treibhauspotential- total (GWP)
- Versauerungspotential (AP)
- Primärenergieinhalt an nicht- erneuerbaren Ressourcen (PENRT)

Diese Umweltkriterien werden auch für die Bewertung der ökologischen Qualität anhand des Bauteilschichten- Indikators ($\Delta OI3$) herangezogen.

Aufgrund der ausschließlich vorhandenen, tragenden Konstruktionsteile der drei Geschosdeckensysteme, konnte für alle Bauteile die gleiche Nutzungsdauer herangezogen werden. Demnach wurde die Dauer laut Tabelle 2 aus dem OI3- Berechnungsleitfaden⁹³ für Tragkonstruktionen mit 100 Jahren angenommen. Es wird die Ökobilanz laut der Vorgehensweise des IBO innerhalb der Herstellungsphase (A1-A3) betrachtet. Diese umfasst die Prozesse von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Herstellung des ausgelieferten Produktes.⁹⁴

4.8.1 Auswirkung der Umweltindikatoren

Der Indikator über Bauteilschichten (kurz $\Delta OI3$), welcher durch die drei Umweltindikatoren berechnet wird, ergibt eine quantitative Aussage für das Potential das Klima zu erwärmen, das Säurebildungspotential und für die graue Energie aus nicht erneuerbaren Energiequellen, also jene Energie, welche für die Herstellung von Produkten benötigt wird. Das Treibhauspotential wird in kg CO₂ äquivalent, die graue Energie in Megajoule und das Potential die Umwelt zu versauern in kg SO₂ äquivalent angegeben.

⁹³ vgl. IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 und des Globalen Erwärmungspotenzials für Bauteile und Gebäude [online]. Wien: IBO. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI-Berechnungsleitfaden_V5_Sep2022.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

⁹⁴ vgl. IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) IBO- Richtwerte für Baumaterialien- Wesentliche methodische Annahmen für die IBO- Richtwerte 2017 [online]. Wien: IBO. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/IBO-Richtwerte-2017_Methode_v32_2020-12-28.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

Die gewählten Deckensysteme setzen sich aus den Baumaterialien Holz, Beton und Stahl zusammen. Für eine ökologisch betrachtete Rangordnung der Baustoffe wurden die, im Anwendungstool eingegebenen, Bilanzierungskennwerte aus Österreich herangezogen und in der Abbildung 4.20 aufgelistet.

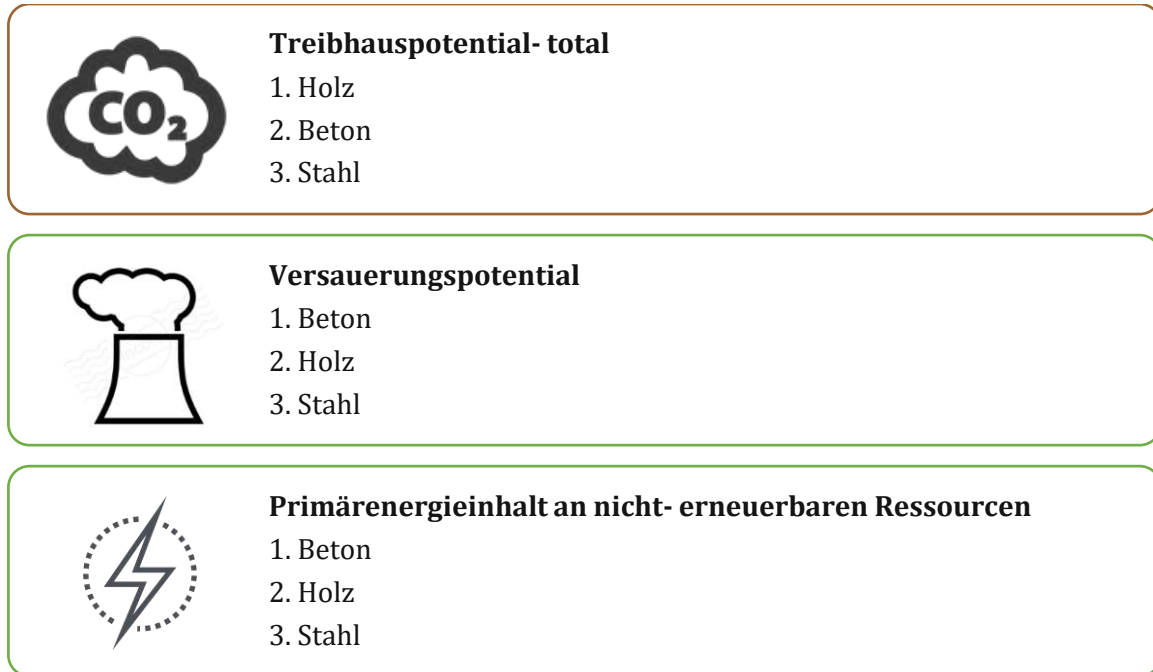


Abb. 4.20: Rangfolge der Baustoffe

Auf Platz 1 wird jeweils der Baustoff mit den geringsten Grundwerten angeführt, wobei für Platz 3 das Material mit der höchsten Umweltbelastung des jeweiligen Kriteriums zutrifft. Im Allgemeinen ist aus dieser Platzierung zu erkennen, dass der Baustoff Stahl bei jedem angeführtem Umweltindikator an letzter Stelle steht. Der Eisenwerkstoff ist während der Herstellungsphase für die meiste Klimaerwärmung und Umweltversäuerung in diesem Untersuchungsrahmen verantwortlich. Auch der Anteil an nicht erneuerbaren Energieressourcen liegt höher als bei Holz oder Beton.

Aus der Abbildung 4.20 ersichtlich, dass hinsichtlich der Gesamtbetrachtung aller angeführten Ökoindikatoren der Baustoff Beton die führende Position erreicht. Nachfolgend werden die Holzwerkstoffe auf den zweiten Platz gereiht.

4.8.2 Ökologische Kennwerte

Nach Ermittlung der Bauteilmasse nach 100 Jahren und der, für jedes Deckensystem, gleichbleibenden Grundrissfläche, konnten für das Treibhauspotential, das Versauerungspotential und den Primärenergieinhalt durch Multiplikation der Masse und den Grundwerten aus der IBO Datenbank die maßgebenden Werte berechnet werden. Des Weiteren konnte anhand der

Verwertungspotentiale⁹⁵, welche aus der Onlinedatenbank entnommen wurde, und der Gesamtmasse des Bauteils der Anteil an recyclebarer Masse sowie die Abfallmasse bestimmt werden. Es werden alle ermittelten, ökologischen Bauteilkennwerte pro Quadratmeter Deckenfläche angeführt.

Zudem wurde der Ökoindikator der Bauteilschichten für die Herstellungsphase (A1-A3) der jeweiligen Bauteilschichten laut dem OI3- Berechnungsleitfaden⁹⁶ berechnet. Die $\Delta OI3$ - Punkte pro Quadratmeter Deckenfläche konnten durch die Formel (1)⁹⁷ berechnet werden:

$$\Delta OI3 = \frac{1}{3} [0,1 \times PENRT_{A1-A3} + 0,5 \times GWP_{total,A1-A3} + 400 \times AP_{A1-A3}] \quad (1)$$

Eine erhebliche Umweltauswirkung eines Baustoffes oder Bauteils wird durch einen hohen Wert bzw. einer hohen Punkteanzahl festgestellt. Eine ökologische Optimierung kann durch die Reduzierung dieser Punkte erreicht werden.⁹⁸

Mit den Kennzahlen der einzelnen Baustoffschichten bzw. Bauteilen wurde in der Gruppe 5.2) *Auswertung ökologischer Kennwerte* die gesamte ökologische Belastung je Deckensystem angeführt.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.21 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

⁹⁵ vgl. IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) EI- Entsorgungsindikator- Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators von Bauteilen und Gebäuden [online]. Wien: IBO. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/ei_berechnungsleitfaden_v1_2012.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

⁹⁶ vgl. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI-Berechnungsleitfaden_V5_Sep2022.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

⁹⁷ vgl. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI-Berechnungsleitfaden_V5_Sep2022.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

⁹⁸ vgl. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI-Berechnungsleitfaden_V5_Sep2022.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

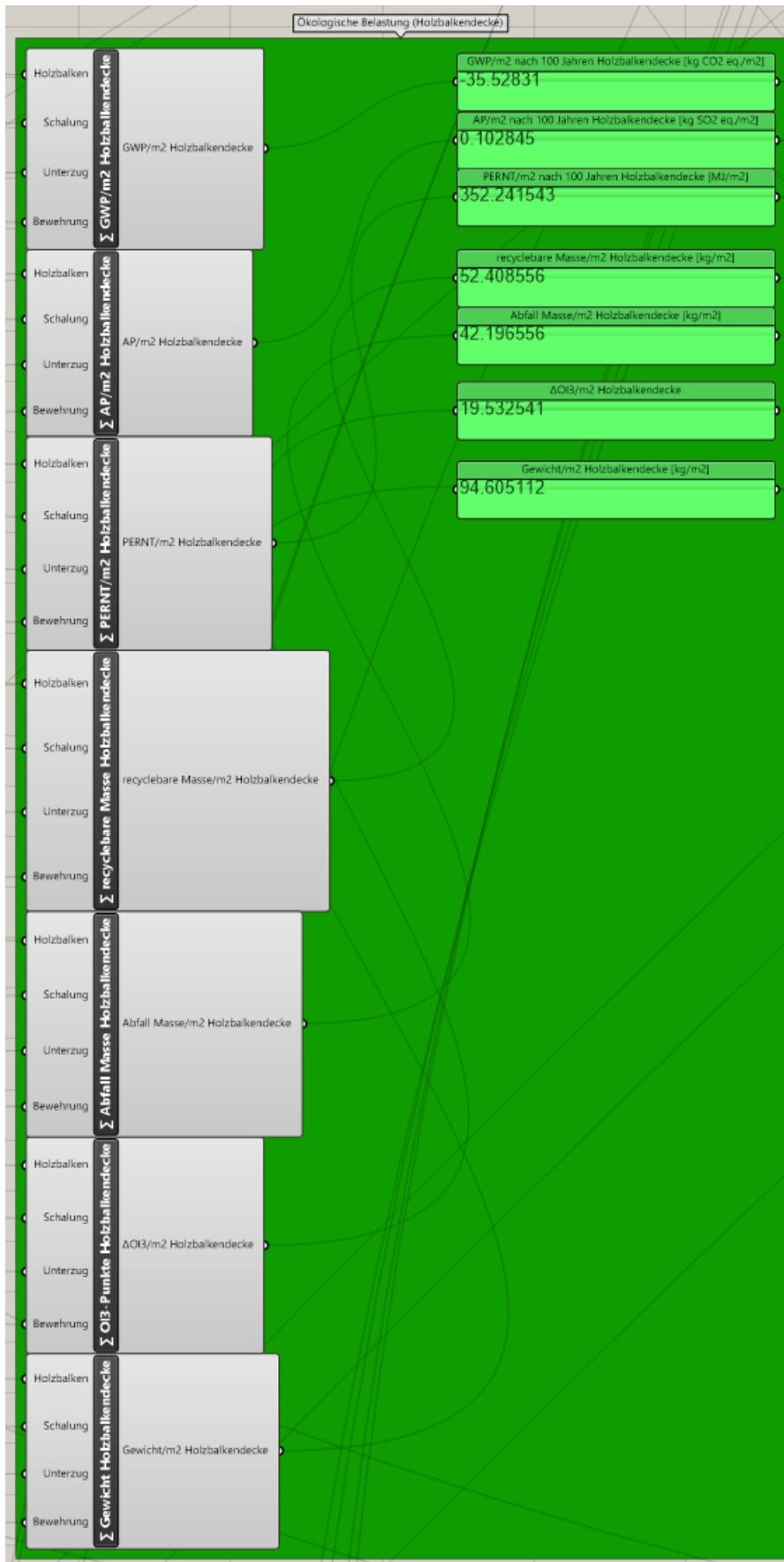


Abb. 4.21: Auszug beispielhafte Auswertung ökologischer Kennwerte

4.9 Kostenrichtwerte

Wie bereits im Kapitel 4.4 erwähnt, sind im Eingabefeld der Untergruppe 1.1.1) die aktuellen Materialeinheitspreise zu adaptieren. Nach Vollendung dieser Eingabe können die Richtpreise der einzelnen Materialien bzw. Bauteile der einzelnen Deckensysteme aus den Untergruppen 6.1.1) bis 6.1.3) entnommen werden.

Die Materialkosten wurden durch Multiplikation des Volumens bzw. der Masse mit den Einheitspreisen ermittelt. Diese Kosten werden pro Quadratmeter Deckenfläche umgerechnet.

In der Gruppe 6.2) *Übersicht der Richtwerte* konnte nach Ermittlung aller Einheitspreise eine grobe Kostenübersicht je Deckensystem erstellt werden. Aus dieser Kostenaufstellung sind die Materialrichtpreise (rein materialbezogen, exklusive Umsatzsteuer) für die Gesamtkubatur bzw. pro Quadratmeter Deckenfläche eines Bauteiles bzw. Bauteilschicht herauszulesen.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.22 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

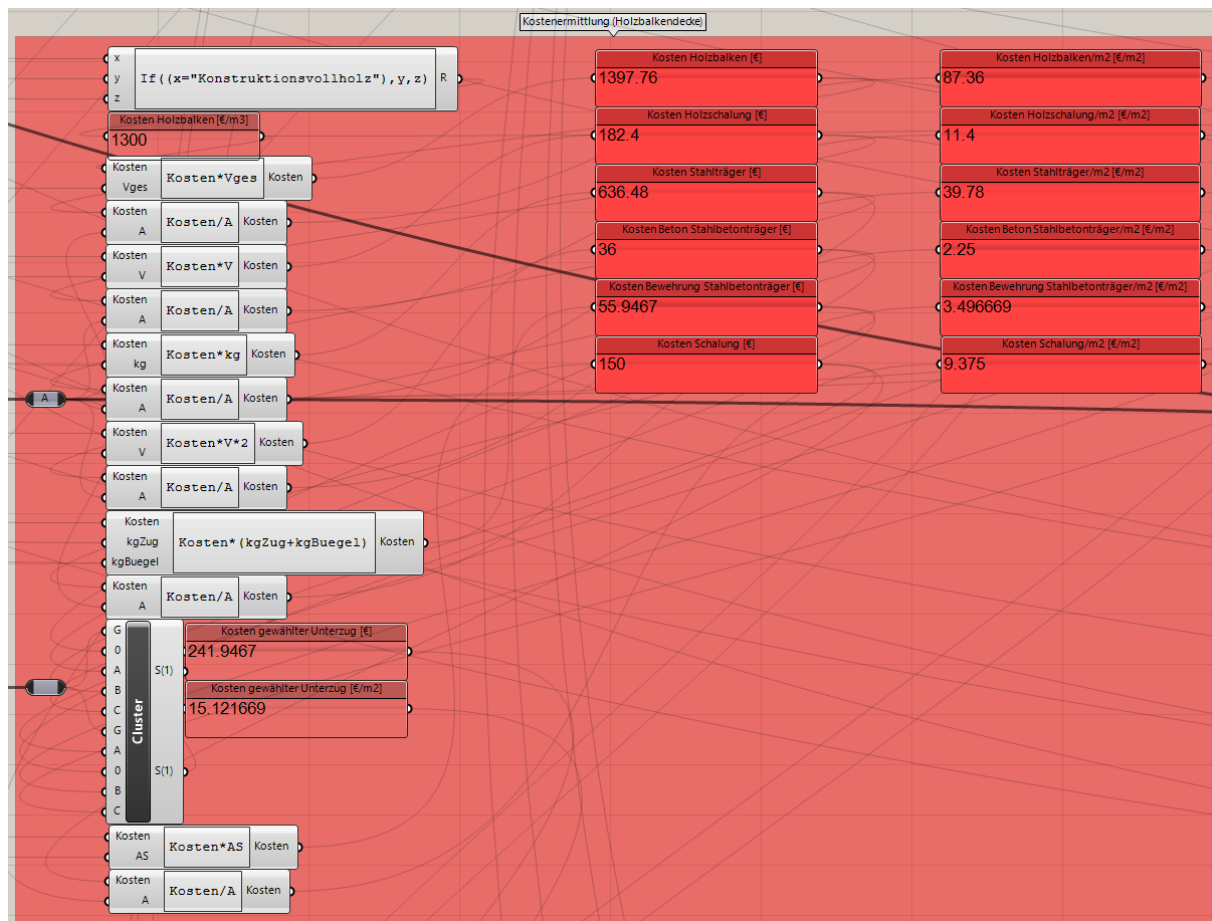


Abb. 4.22: Auszug beispielhafte Kostenrichtwerte

4.10 Gesamtübersicht

Dieser Endabschnitt des Anwendungstools beinhaltet zum einen die Auswertung der ökologischen und ökonomischen Kennwerte der Deckentragsysteme samt Bauteilhöhen und deren Gewicht. Dies wurde anhand einer zusammenfassenden Gegenüberstellung in der Untergruppe 7.1.1) *Gegenüberstellung der berechneten Kennwerte* aufgelistet.

Zur Verdeutlichung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.23 ein Auszug einer Untergruppe aus dem Anwendertool angeführt.

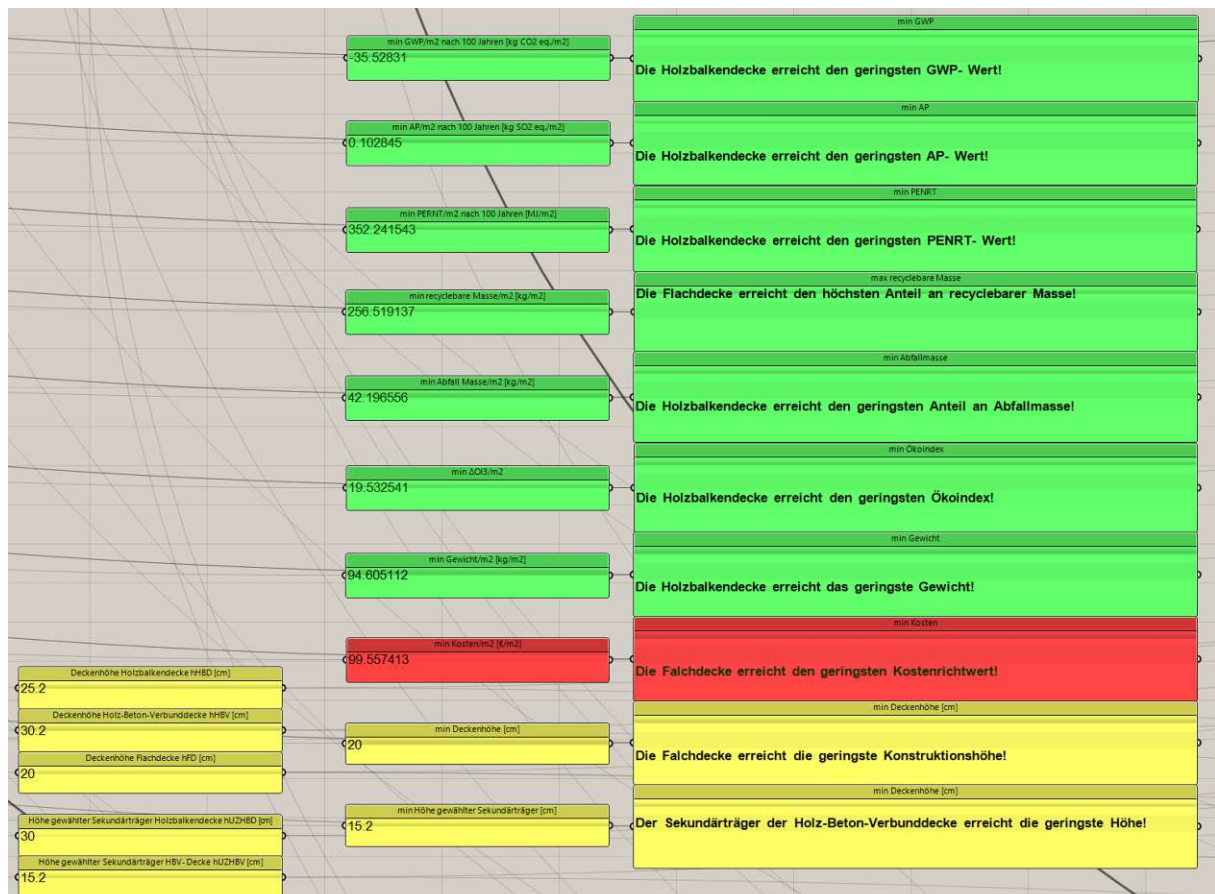


Abb. 4.23: Auszug beispielhafte Gegenüberstellung der Kennwerte

Zum anderen konnte durch die Evaluierung der Mindest- und Höchstwerte, der im Anwendungstool verfügbaren Grenzwerte unter ständiger Einhaltung aller Tragfähigkeit- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen, aller festgelegten Beurteilungskriterien mittels einer konzipierten Gewichtung untereinander, im Kapitel 7.1.2) *Beurteilung der Optimierungspotentiale des ausgewählten Untersuchungsfallles anhand der Optimierungskennzahl*, eine entsprechende Bewertungsmethode erstellt werden.

Die zuvor erwähnten Untersuchungskriterien sind im nachfolgenden Kapitel 4.10.1 angeführt.

4.10.1 Beurteilungskriterien des Optimierungsverfahrens

Bezugnehmend der sieben Beurteilungskriterien für die Optimierung eines der drei Deckentragssysteme wurden folgende Überlegungen vorgenommen:

- Für die bauökologischen Kennwerte wurden die drei Umweltindikatoren des Ökoindex, nämlich das Treibhauspotential GWP total, das Versauerungspotential AP und der Primärenergieinhalt an nicht erneuerbaren Ressourcen, ausgewählt. Diese Kenngrößen für ökologische Optimierungen im Bauwesen sind für die Gesamtauswertung im Anwendungstool von großer Bedeutung.
- In weiterer Folge, um die umweltschädlichen Ursachen eindämmen zu können, wurden die Konstruktionshöhen und anfallenden Massen der Tragsysteme in der Bewertungsmethodik mitberücksichtigt. Mit der Anpassung jeglicher Querschnittsabmessungen bzw. der Decken- und Unterzughöhen, wird die Gesamtmasse der Bauteile, nebenher das Gewicht der Decke, reduziert. Zudem ist auch das auszuwählende Material des Sekundärträgers (Unterzug) maßgeblich. Die erwähnten Maßnahmen wirken sich positiv auf die ökologischen Kennwerte aus. Daraus kann eine entsprechende Optimierung des jeweiligen Deckensystems erzielt werden.
- Schließlich wurden aus ökonomischer Betrachtung Richtwerte der Materialkosten in das Bewertungsverfahren miteingebunden. Die Kostenrichtwerte (rein materialbezogen, exklusive Umsatzsteuer) der einzelnen Bauteile und des gesamten Tragsystems wurden je Quadratmeter Deckenfläche kalkuliert.

In der nachstehenden Abbildung 4.24 sind die ausgewählten Kriterien für das Bewertungsverfahren aufgelistet.

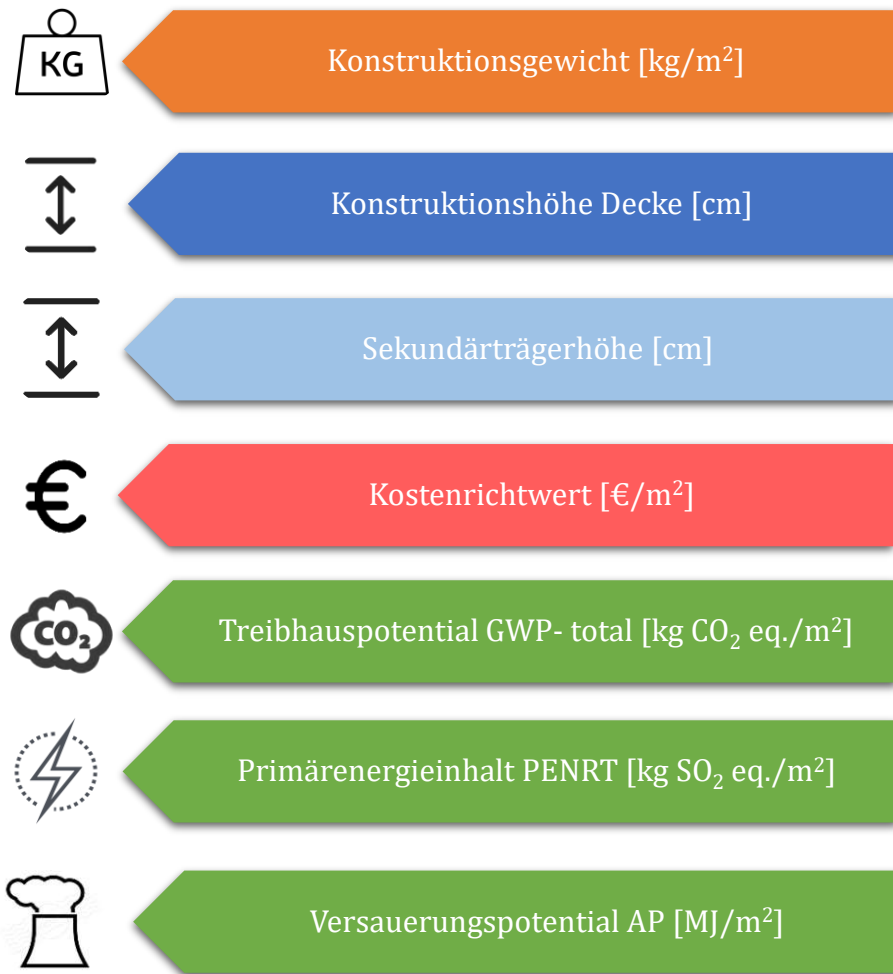


Abb. 4.24: Ausgewählte Kriterien des Optimierungsverfahrens

In der Untergruppe 7.1.1) *Gegenüberstellung der berechneten Kennwerte* wurden weitere Kenngrößen als informative Ergänzung ausgewertet und in Abbildung 4.25 angeführt.

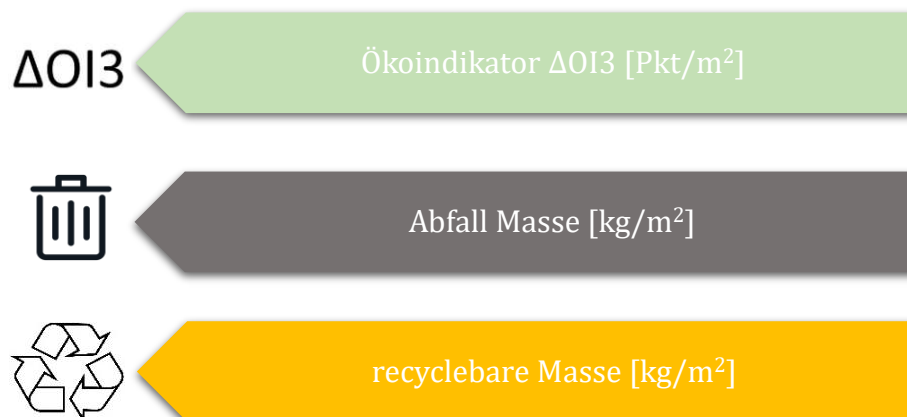


Abb. 4.25: Ergänzende Kenngrößen

5 Auswertung und Ergebnisse des Optimierungstools

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Ergebnisse angeführt und analysiert. Für die Erstellung des Bewertungsverfahrens wurden die statisch berücksichtigten Extremwerte der minimal bzw. maximal zu erreichende Decken- bzw. Trägerhöhen evaluiert. Mit diesen Grenzwerten konnten anhand des automatisierten Berechnungsvorganges im Anwendungstool die Ausgabewerte, welche für die Gewichtung des Gleichungssystems der nachfolgenden Tabelle 5.4 bzw. Formel (2) grundlegend waren, ermittelt werden. Für jeden Ausgabewert bzw. das gesamte Auswertungsverfahren wurden die statischen Nachweisführungen aus der Hauptgruppe 4) bzw. aller Eingabempfehlungen aus Gruppe 1) und die Untersuchung jeder Kombination der angeführten statischen Systeme berücksichtigt. Durch die Formel (2) und der Festlegung von Untersuchungsfällen aus Kapitel 5.4 oder definierter Priorisierung der Beurteilungskriterien ist ein Optimierungsvorgang der Deckentragsysteme anhand einer Parametrisierung in Gruppe 1) durchführbar.

Die nachstehende Abbildung 5.1 verdeutlicht den Prozess dieser Untersuchung.

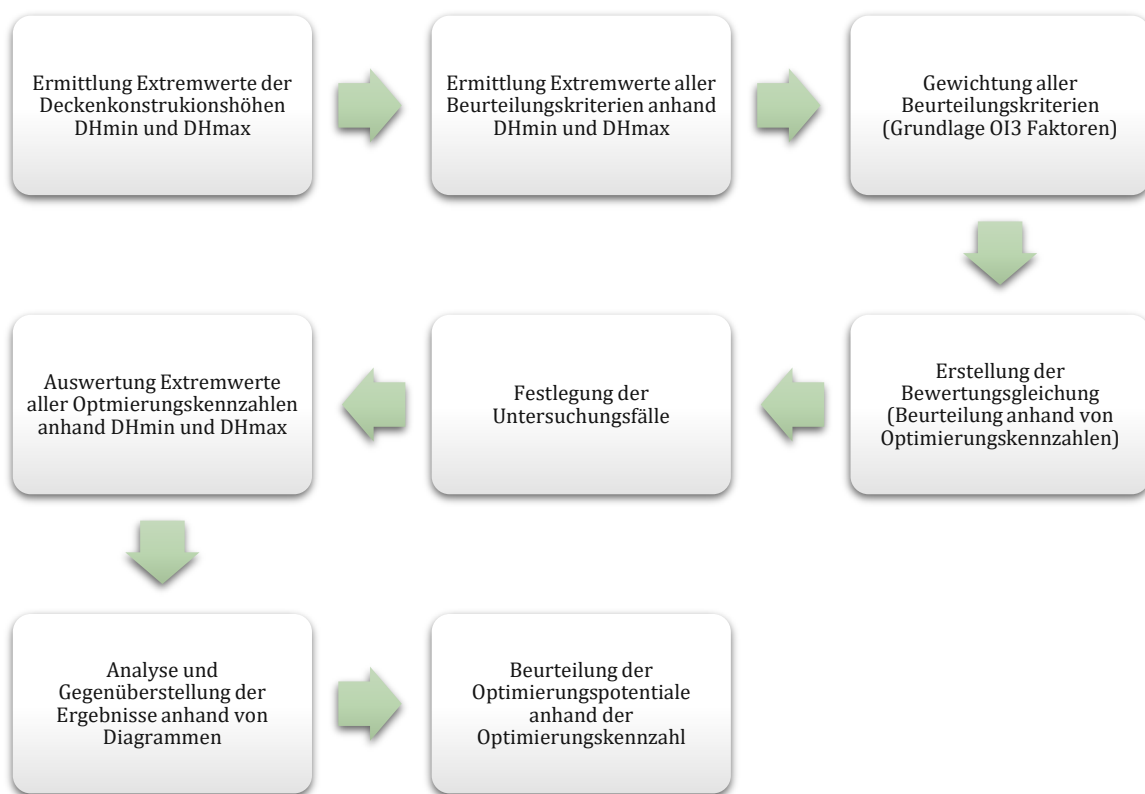


Abb. 5.1: Untersuchungsprozess der Auswertungsmethodik

5.1 Evaluierung der Mindest- und Höchstmaße DH_{\min} und DH_{\max}

Für die Bestimmung des Mindestmaßes der Deckentragkonstruktion bzw. der geringsten Konstruktionshöhe des jeweiligen Deckensystems wurden folgende Parameter in Gruppe 1) definiert:

- Geringste Stützweite in beiden Richtungen
- Geringste einwirkende Last (ständige und veränderliche Lasten, Fußbodenaufbau)
- „durchschnittliche“ Kategorisierung der Festigkeitseigenschaften (Beton- und Holzfestigkeitsklasse, Stahlsorte, Baustahl, etc.)
- Geringst zulässiges Seitenlängenverhältnis der Konstruktionsquerschnitte (laut der angeführten Empfehlungen) mit zeitgleichem Effekt des niedrigen Eigengewichts

Des Weiteren wird angemerkt, dass alle im Zuge des Forschungsprozesses, angeführten Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise, sowie die Einhaltung sämtlicher Empfehlungen, wie beispielsweise das Seitenlängenverhältnis der Konstruktionsquerschnitte, der Balkenabstand oder die Werkstoffwahl, während der Parametrisierung ständig eingehalten wurden. Zudem wurden auch alle möglichen Varianten der angeführten statischen Systeme nachgewiesen.

Der Berechnungsablauf bzw. die Parameterfestlegung für die Ermittlung der geringsten Höhen DH_{\min} ist aus dem Anhang C zu entnehmen.

Anhand dieser Parametereingabe konnte festgestellt werden, dass die Flachdecke, unter Einhaltung aller Querschnittsempfehlungen und statischen Nachweisen, die geringste Konstruktionshöhe von 20,00 cm erreichte. Mit einer Höhe von 25,20 cm erlangte die Holzbalkendecke den zweiten Platz. Die Verbunddecke wurde mit 30,20 cm an letzter Stelle gereiht.

Der schlankste Unterzug bzw. Sekundärträger der Holzbalken- und Verbunddecke wurde jeweils durch die Auswahl eines *Stahlträgers*, welcher eine Höhe von 15,20cm aufwies, festgestellt.

In Anhang C werden ergänzend die unterschiedlichen Versagensfälle, welche aufgrund eines nichtausreichenden Querschnittes einer oder mehrerer statischen Nachweise jedes einzelnen Bauteils, angeführt. Um diese Situation näher erläutern zu können wird bei der Ermittlung von DH_{\min} der Holzbalkendecke der Sekundärträger aus Stahl näher beschrieben: Das Stahlprofil (HEA 160) im Falle eines Randträgers führte erst bei der Wahl eines HEA 120 zum Versagen. Wird das gewählte Profil jedoch anhand eines Mittelträgers untersucht, so kam es beim HEA 160 gerade noch zur Erfüllung der gesamten Nachweisführung. Somit wurde für den schlanksten Stahlträger der Holzbalkendecke bzw. der weiteren ökologischen und ökonomischen Auswertungen das Profil HEA 160 gewählt. Diese kritische Untersuchung bzw. Parametrisierung wurde analog für alle Bauteile der Denksysteme vorgenommen und im Anhang C in Tabelle C.3 angeführt.

Für das Höchstmaß der Deckentragkonstruktion wurden folgende Parameter eingegeben:

- Maximale Stützweite in beiden Richtungen
- Maximale einwirkende Last (ständige und veränderliche Lasten, Fußbodenaufbau)
- „höhere“ Kategorisierung der Festigkeitseigenschaften (Beton- und Holzfestigkeitsklasse, Stahlsorte, Baustahl, etc.)
- Maximal zulässiges Seitenlängenverhältnis der Konstruktionsquerschnitte (laut der angeführten Empfehlungen)

Auch bei dieser Kenngrößenermittlung wurden alle statischen Nachweise und Empfehlungen eingehalten.

Der Berechnungsablauf samt Annahmen für die Ermittlung der größten Konstruktionshöhen DH_{\max} ist aus Anhang C zu entnehmen.

Der Tabelle C.2 zu entnehmen, hat das Holz-Beton-Verbundsystem die maximale Höhe mit 104,00 cm erreicht. Hinterher folgt die Holzbalkendecke mit 68,00 cm, wobei die Flachdecke bei maximaler Stützweite und Belastung die geringste Konstruktionshöhe von 35,00 cm aufwies.

Die größtmögliche Höhe der Sekundärträger erreichte die Verbunddecke mit einem Wert von 94,00 cm, welcher aus *Stahlbeton* ausgeführt wurde. Der Materialwechsel zu Stahl hat eine Höhe von 60,00 cm ergeben, welche geringer ist als der des Stahlbetonträgers und somit für diese Untersuchung nicht relevant war. Der Stahlbetonunterzug der Holzbalkendecke begrenzte sich auf 84,00 cm.

Auch diese, während der Parametrisierung von DH_{\max} resultierenden, Versagensfälle wurden im Anhang C in Tabelle C.4 ergänzend angeführt.

5.2 Auswertung der Beurteilungskriterien

Die, im Kapitel 5.1, festgestellten Mindest- und Höchstmaße der Deckenkonstruktions- und Sekundärträgerhöhen stellen die wesentliche Grundlage für die weiteren Untersuchungsabläufe in den nachfolgenden Kapiteln dar. Durch die Eingabe der, in Anhang C festgelegten, Parameter konnten alle, für die spätere Optimierung maßgebenden, Kennwerte der Kriterien aus dem Anwendungstool entnommen werden.

Die tabellarische Übersicht der Ausgabewerte ist aus dem Anhang D zu entnehmen. Die Beurteilung dieser Ergebnisse wird im Kapitel 5.5.2 anhand von Diagrammen vorgenommen. Die maßgebenden Kenngrößen bzw. Extremwerte sind in der nachstehenden Tabelle 5.1 angeführt.

Nochmals zu erwähnen ist, dass bei DH_{\min} jeweils der Unterzug aus *Stahl* ausgeführt wird. Im Fall DH_{\max} wird ein *Stahlbetonunterzug* eingesetzt.

Tab: 5.1: Extremwerte von DH_{\min} und DH_{\max}

Kriterien	DH_{\min} (Mindestmaß)			DH_{\max} (Höchstmaß)			Einheit
	Balken- decke	HBV- Decke	Flach- decke	Balken- decke	HBV- Decke	Flach- decke	
Konstruktionsge- wicht	51,24	-	-	-	-	920,88	kg/m ²
Konstruktions- höhe Decke	-	-	20,00	-	104,00	-	cm
Sekundärträger- höhe	15,20	15,20	-	-	94,00	-	cm
Kostenrichtwert	-	-	99,30	-	926,40	-	€/m ²
Treibhauspoten- tial GWP- total	-	-	-	-	-165,73	140,55	kg CO ₂ eq./m ²
Versauerungspo- tential AP	0,10	-	-	-	0,86	-	kg SO ₂ eq./m ²
Primärenergiein- halt PENRT	346,71	-	-	-	3098,49	-	MJ/m ²

Hinsichtlich des Treibhauspotentials (GWP- total) ist der Ausgabewert der Deckenhöhe DH_{\max} niedriger gegenüber der Mindesthöhe DH_{\min} . Dies wird aufgrund des höheren Massenanteils an Holz begründet. Demnach wurde der negative Wert aus der Verbunddecke und der höchste Wert aus der Flachdecke des Treibhausgases aus DH_{\max} für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

5.3 Grundgedanke des Optimierungsverfahrens

In diesem Kapitel wird für die Erstellung der Bewertungsgleichung ein Ansatz für einen numerischer Zusammenhang zwischen den sieben Beurteilungskriterien eruiert. Anhand der, bereits vom österreichischen Institut für Baubiologie und-ökologie vordefinierten, Gewichtung von den Werten GWP-total, AP und PENRT und der, im Kapitel 5.2, ermittelten Extremwerte von DH_{\min} und DH_{\max} , konnte die Beurteilungsgleichung (2) formuliert werden. Zur Verdeutlichung werden in der nachstehenden Tabelle 5.2 die Zusammenhänge der IBO- Umweltindikatoren des Baustoffes Brettschichtholz angeführt.

Tab: 5.2: Gewichtung der IBO- Umweltindikatoren

Kriterien IBO	Ökokennwerte Brett- schichtholz aus Anwen- dungstool	Faktor IBO aus Ökoindex $\Delta OI3^{99}$	Ergebnis (ge- rundet)
			Wert x Faktor
GWP [kg CO ₂ eq./m ²]	-1,235482	0,50	0,62
AP [kg SO ₂ eq./m ²]	0,002357	400	0,94
PENRT [MJ/m ²]	7,391496	0,10	0,74

Durch die Multiplikation der Kennwerte mit den Faktoren konnten Ergebniswerte mit geringfügigen Abweichungen festgestellt werden. Aus diesem Grund wurden diese Multiplikatoren für die weitere Formulierung der Bewertungsformel als Referenzwerte herangezogen. Zu Beginn wurden diese Faktoren mit den errechneten Umweltgrenzwerten von DH_{\min} und DH_{\max} in Tabelle 5.3 multipliziert. Anschließend wurden als Bezugsgröße die Mittelwerte dieser Ergebnisse berechnet.

Tab: 5.3: Berechnung der Referenzwerte

Kriterien IBO	Wert aus DH_{\min} (Tab. 5.1)	Wert aus DH_{\max} (Tab. 5.1)	Faktor IBO	Ergebnis DH_{\min}	Ergebnis DH_{\max}
				Wert x Faktor	Wert x Faktor
GWP [kg CO ₂ eq./m ²]	-165,73	140,55	0,50	82,86	70,28
AP [kg SO ₂ eq./m ²]	0,10	0,86	400,00	40,58	345,00
PENRT [MJ/m ²]	346,71	3098,49	0,10	34,67	309,85
Mittelwert aus GWP, AP, PENRT				52,71	241,71

Anhand dieser beiden Mittelwerte konnten durch mehrmaliges Erproben die maßgeblichen Faktoren für die restlichen Beurteilungskriterien evaluiert werden. Diese Multiplikatoren sind in Tabelle 5.4 angeführt. Die Ergebnisse weisen nach Multiplikation der Faktoren mit den Grenzwerten geringe numerische Abweichungen untereinander auf.

⁹⁹ vgl. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI-Berechnungsleitfaden_V5_Sep2022.pdf [Zugriff am: 28.11.2022]

Tab: 5.4: Ergebnisse

Kriterien	DHmin	DHmax	Faktor	Ergebnis DHmin	Ergebnis DHmax
Deckenkonstruktionshöhe [cm]	20,00	104,00	2,40	48,00	249,60
Höhe Sekundärträger [cm]	15,20	94,00	2,66	40,43	250,04
Gewicht [kg/m ²]	51,24	920,88	0,27	13,83	248,64
Kostenrichtwert [€/m ²]	99,30	926,40	0,26	25,82	240,86
<i>Zu erreichendes Ergebnis (Mittelwert aus Tab. 5.3)</i>				<i>55,71</i>	<i>241,71</i>

Beispielweise konnte bei der Deckenkonstruktionshöhe durch Multiplikation des Faktors 2,40 einen zufriedenstellenden Ergebniswert (249,60) zum Bezugswert (241,71) ermittelt werden. Mit diesen Annahmen und Annäherungen wurde im nachfolgenden Kapitel die Beurteilungsmethode fortgesetzt.

5.4 Optimierungskennzahl und Untersuchungsfälle

Durch die Ermittlung der Gewichtung aller sieben Kriterien in Tabelle 5.4 konnte die mathematische Formulierung für die Berechnung der Optimierungskennzahlen (kurz OKZ) in der Untergruppe 7.1.2) *Beurteilung der Optimierungspotentiale des ausgewählten Untersuchungsfall* anhand der *Optimierungskennzahl OKZ* formuliert werden.

Diese Formel wird für die Beurteilung des jeweiligen Deckensystems anhand manueller Parametereingaben aus der Gruppe 1) *Eingabe der Berechnungskenngrößen* angewendet. Dieses Gleichungssystem bildet eine gute Vergleichbarkeit der sieben Kriterien anhand der ermittelten Gewichtungsfaktoren. Für das Erreichen einer wirksamen Optimierung bzw. zweckdienlicher Optimierungskennzahlen ist ein Untersuchungsfall auszuwählen oder zu definieren. Hierfür sind die Bewertungsanteile (λ -Anteile für den Untersuchungsfall) aller sieben Bewertungskriterien quantitativ zu definieren. Für beispielsweise einer Optimierung aller angeführten Umweltindikatoren werden die entsprechenden Bewertungsanteile (λ_{GWP} , λ_{AP} , λ_{PENRt}) mit $\frac{1}{3}$ festgelegt. Die Eingabe, dieser vom Benutzer festzulegenden Priorisierung bzw. Anteile, wird im Anhang A erläutert. Die Summe dieser Anteile muss 1,0 ergeben, welche bei Einhaltung durch ein Hinweispanel bestätigt wird. Sobald nach Eingabe der Parameter ein Tragfähigkeits- oder Gebrauchstauglichkeitsnachweis des gewählten Deckensystems nicht erfüllt wurde, werden der Optimierungskennzahl automatisiert „Strafpunkte“ hinzugefügt. Diese Bedingung wird zusätzlich durch ein weiteres Hinweispanel angezeigt. Bei nicht erfüllter Nachweisführung werden 1000 Punkte je Versagensfall hinzugerechnet. Die Optimierungskennzahlen im Zuge dieser Untersuchungsrahmen liegen weit unter dem Wert 1000. Dadurch erkennt der Anwender, dass bei einer Punktevergabe in dieser

Größenordnung kein, im Zuge dieser Abschlussarbeit, zulässiger Optimierungserfolg erzielt wurde.

Die Beurteilung des jeweiligen Untersuchungsfalles erfolgt, über einen Werteabgleich bzw. der Gegenüberstellung der, während der Parametrisierung, berechneten Optimierungskennzahlen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass je niedriger die Kennzahl (OKZ), desto effizienter konnte die gewählte Optimierung durchgeführt werden. Die Ausgabewerte der OKZ werden im Kapitel 5.5.3 angeführt und im Kapitel 6.1 analysiert.

Die Optimierungskennzahl OKZ wird laut Formel (2) berechnet.

$$OKZ = \frac{GWP * 0,50 * \lambda_{GWP} + AP * 400 * \lambda_{AP} + PENRT * 0,10 * \lambda_{PENRT} + G * 0,27 * \lambda_G + KR * 0,26 * \lambda_{KR} + DH * 2,40 * \lambda_{DH} + HST * 2,66 * \lambda_{HST}}{7} + SP \quad (2)$$

Dabei ist

OKZ	Optimierungskennzahl [Pkt/m ²]
GWP	Treibhauspotential- total [kg CO ₂ eq./m ²]
AP	Versauerungspotential [kg SO ₂ eq./m ²]
PENRT	Primärenergieinhalt an nicht- erneuerbaren Ressourcen [MJ/m ²]
G	Gewicht des Deckentragsystems [kg/m ²]
KR	Kostenrichtwert des Deckentragsystems [€/m ²]
DH	Deckenkonstruktionshöhe [cm]
HST	Höhe Sekundärträger [cm]
λ_{GWP}	Bewertungsanteil GWP [-]
λ_{AP}	Bewertungsanteil AP [-]
λ_{PENRT}	Bewertungsanteil PENRT [-]
λ_G	Bewertungsanteil G [-]
λ_{KR}	Bewertungsanteil KR [-]
λ_{DH}	Bewertungsanteil DH [-]
λ_{HST}	Bewertungsanteil HST [-]
SP	Strafpunkte [Pkt]

Dabei gilt

$$\sum \lambda = 1$$

In Abstimmung mit der DELTA Gruppe wurden folgende drei Untersuchungsfälle (kurz UF) festgelegt:

- UF1: Optimierungsziel der Umweltindikatoren GWP, AP und PENRT
Hierfür wurde für λ_{GWP} , λ_{AP} , λ_{PENRT} jeweils $\frac{1}{3}$ und für die restlichen λ - Anteile 0,00 eingesetzt
- UF2: Optimierungsziel der Kostenrichtwerte KR
Hierfür wurde für λ_{KR} 1,0 und für die restlichen λ - Anteile 0,00 eingesetzt
- UF3: Optimierungsziel der Deckenkonstruktionshöhe DH
Hierfür wurde für λ_{DH} 1,0 und für die restlichen λ - Anteile 0,00 eingesetzt

Der nachstehende Auszug aus dem Anwendungstool der Untergruppe 7.1.2) *Beurteilung der Optimierungspotentiale des ausgewählten Untersuchungsfalles anhand der Optimierungskennzahl OKZ* in Abbildung 5.2 repräsentiert die Auswertung der Holzbalkendecke von DH_{max} für den Untersuchungsfall 1.

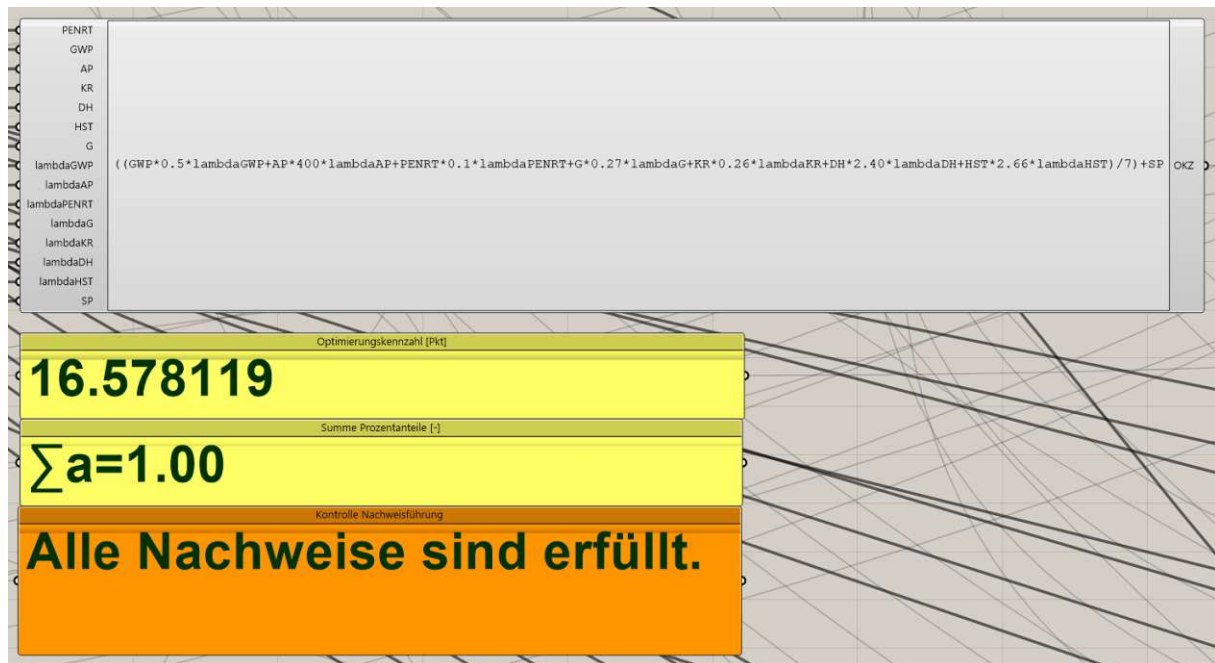


Abb. 5.2: Auszug beispielhafte Auswertung Optimierungskennzahl

Die restlichen Optimierungskennzahlen der Untersuchungsfälle bzw. Deckensysteme ist aus der Tabelle 5.5 zu entnehmen.

Tab: 5.5: Auswertung OKZ

Extremwerte Deckenhöhen	Untersuchungsfall	Deckensystem			Extremwerte [OKZ]
		Holzbalkendecke [OKZ]	HBV-Decke [OKZ]	Flachdecke [OKZ]	
DHmin	UF1	2,75	6,19	6,82	2,75
DHmax		16,58	26,96	16,33	26,96
DHmin	UF2	4,23	6,14	3,69	3,69
DHmax		22,43	34,41	6,02	34,41
DHmin	UF3	8,64	10,35	6,86	6,86
DHmax		23,31	40,80	12,00	40,80

Die ermittelten Optimierungskennzahlen liegen zwischen 2,75 und 40,80. Aus der Tabelle 5.5 ist erkennbar, dass beispielweise die Holzbalkendecke in diesem Untersuchungsrahmen die ökologisch günstigste Variante ausweist. Dies lässt sich durch eine, im Vergleich zu den anderen Deckensystemen, geringere Punktevergabe der Optimierungskennzahl feststellen.

Eine Beurteilung der Punktevergabe dieser Deckensysteme wird anhand von Diagrammen im Kapitel 5.5.3 vorgenommen.

5.5 Grafische Darstellung und Beurteilung der Auswertungen

In diesem Kapitel werden die berechneten Kennwerte aus der Tabelle 5.1 bzw. dem Anhang D und Tabelle 5.5 analysiert. Die nachfolgenden Kapitel beinhalten grafische Darstellungen der Ergebnisse und eine bautechnische Beurteilung.

5.5.1 Ergebnisse und Beurteilung der Baumaterialien

In den nachfolgenden Balkendiagrammen werden die Massenanteile der Baustoffe der beiden Systeme DH_{\min} und DH_{\max} dargestellt.

Während der Ermittlung des geringsten Konstruktionshöhen war bei der Holzbalkendecke bzw. Verbunddecke für den Sekundärträger des Tragsystems 1 der Stahlträger maßgebend. Dies kann anhand der Farblegende aus der Abbildung 5.3 festgestellt werden. Das Gewicht des Aufbetons für die Holz-Beton-Verbunddecke ergab 125,00kg. Der Stahlanteil beinhaltet sowohl den Anteil des verwendeten Stahlprofils, als auch die Masse der gesamten Bewehrung.

Der signifikante Massenanteil der Betonmasse von 500,00kg wurde der Flachdecke zugeordnet.

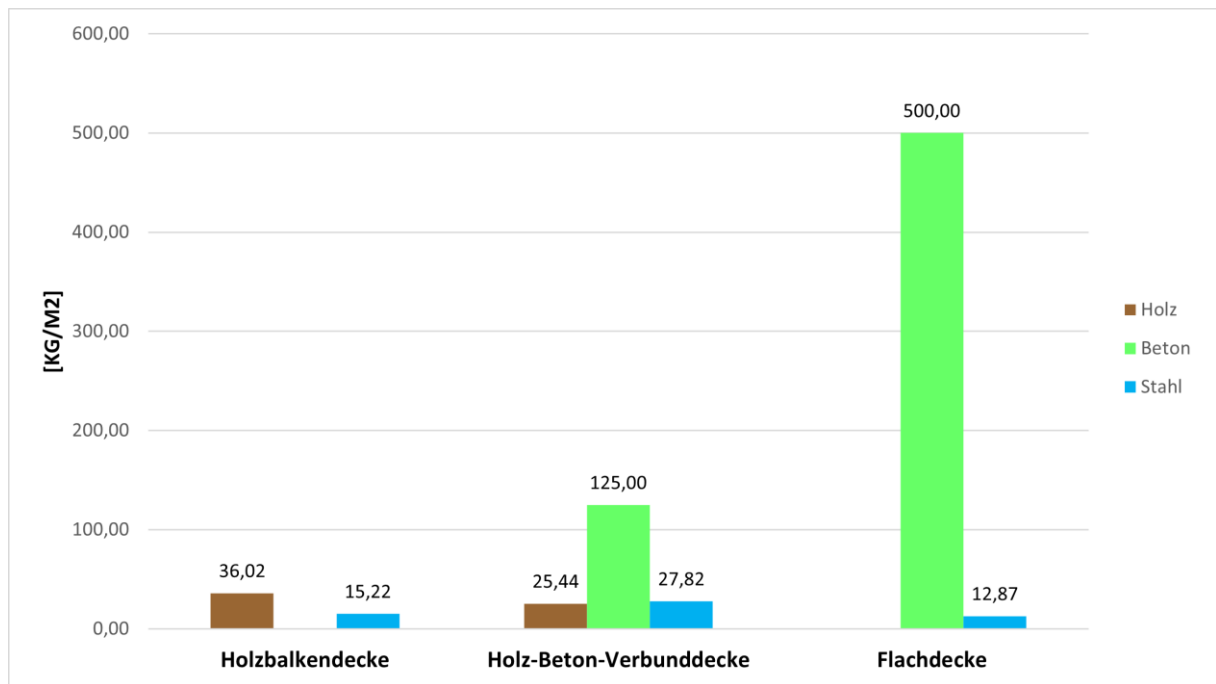


Abb. 5.3: Baustoffanteile der Deckensysteme DH_{\min}

Gegenüber der Massenverteilung von DH_{\max} in Abbildung 5.4, stieg nicht nur der Massenanteil von Holz aufgrund der vergrößerten Querschnitte der Primärträger, sondern auch der Anteil des reinen Betons. Dies lässt sich durch die Wahl des Stahlbetonunterzuges, aufgrund der größeren, erforderlichlich Sekundärträgerhöhe begründen. Der Stahlanteil beinhaltet ausschließlich die Bewehrungsmassen.

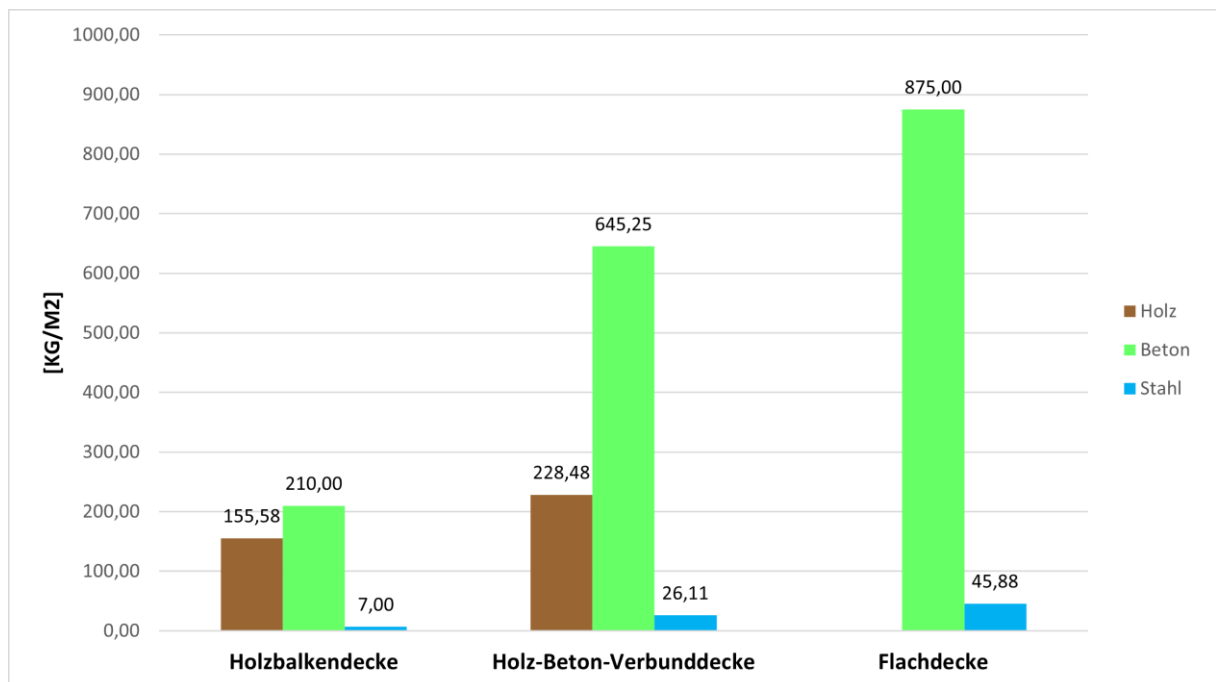


Abb. 5.4: Baustoffanteile der Deckensysteme DH_{\max}

5.5.2 Ergebnisse und Beurteilung der Kriterien

Die Auswertung der Beurteilungskriterien der drei Deckentragsysteme wird in den nachfolgenden Abbildungen anhand von Liniendiagrammen mit Datenpunkte dargestellt. Auf der horizontalen Achse sind die Grenzhöhen DH_{\min} (Unterzug: *Stahlträger*) und DH_{\max} (Unterzug: *Stahlbetonträger*) abgebildet. Die vertikale Achse beinhaltet die Ausgabewerte der, in Abbildung 4.24 aufgelisteten, jeweiligen Kriterien. Für eine übersichtliche Darstellung wurden den Linien der Deckensysteme unterschiedliche Farbtöne zugeteilt. Dadurch kann auf den ersten Blick der jeweilige Verlauf bzw. das Potential einer Decke betrachtet werden. Die Extremwerte sind durch rote bzw. grüne Punkte ersichtlich. Es wird erneut darauf hinzuweisen, dass im Zuge der Ermittlung der Extremwerte, die Holzbalkendecke und Verbunddecke bei den Höhen DH_{\min} und DH_{\max} unterschiedliche Materialien der Sekundärträger aufweisen. Bei der Ermittlung der geringsten Deckenhöhen DH_{\min} handelt es sich um einen *Stahlträger*, bei DH_{\max} kommt ein *Stahlbetonträger* zur Anwendung.

Anhand der, in Abbildung 5.5 dargestellten, Ergebnisse lässt sich aufgrund des steilen Anstieges der Geraden feststellen, dass das Konstruktionsgewicht der Verbunddecke das größte Spektrum der angeführten Extremsituationen DH_{\min} bzw. DH_{\max} besitzt.

Aufgrund der großen Schwankungsbreite weist die Verbunddecke eine erkennbar steilere Funktion auf. Die Flachdecke erreichte aufgrund ihres hohen Stahlbetonteils das höchste Gesamtgewicht. Hinsichtlich des Verlaufes bzw. der Steigung der Geraden, kann festgestellt werden, dass die Linie der Flachdecke nahezu parallel der Holzbalkendecke läuft. Das geringste Gewicht von rund 51kg/m² erreichte die Holzbalkendecke.

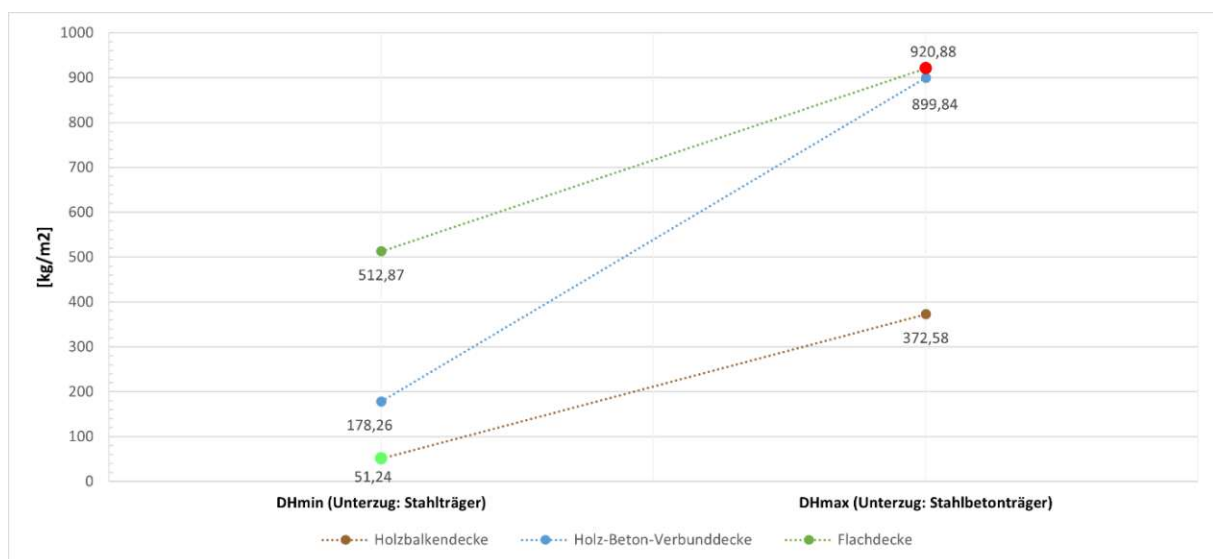


Abb. 5.5: Vergleich Konstruktionsgewicht der Deckensysteme

Die grafische Auswertung der ökonomischen Aspekte wird in Abbildung 5.6 dargestellt. Anhand der Funktionsverläufe wurden die günstigsten bzw. teuersten Materialpreise der Deckensysteme festgestellt.

In dieser Grafik ist die flach verlaufende, grüne Gerade der Flachdecke ersichtlich. Dies bedeutet, dass sich die Kosten zwischen der geringsten Deckentragkonstruktionshöhe und der höchstmöglichen Konstruktion die Kosten nur geringfügig ändern. Aufgrund des unterzuglosen Tragsystems können somit die geringsten resultierenden Materialkosten für dieses Deckensystem festgestellt werden.

Die meisten Materialkosten pro Quadratmeter Deckenfläche erreichte, aufgrund des hohen Holz- und Betonanteils, die Verbunddecke. Auffallend bei dieser Auswertung ist die deutliche Zunahme der Ausgabewerte bzw. der starke Anstieg der Geraden der Holzbalken- und Verbunddecke je höher die Decke wird. Dies lässt sich durch die Querschnittsvergrößerung der Holzbalken und der Wahl der Stahlträger anstelle der Stahlbetonträger begründen.

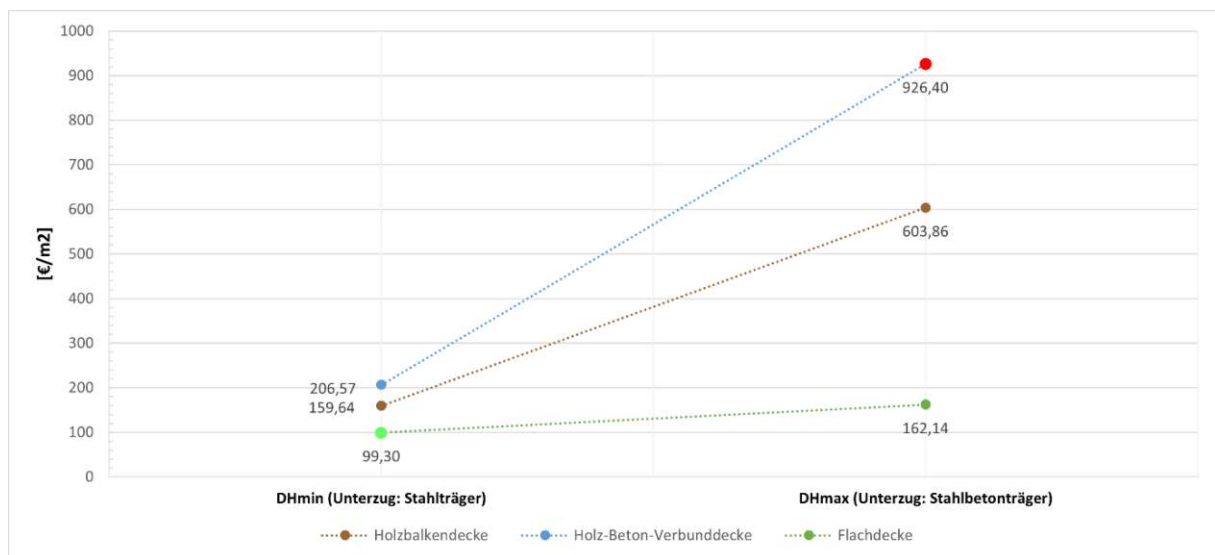


Abb. 5.6: Vergleich Kostenrichtwerte der Deckensysteme

Aus ökologischer Hinsicht wurde bei der Auswertung des Treibhauspotentials laut Abbildung 5.7 ein hoher Gehalt von Spurengase der Flachdecke bei DH_{\max} von rund 140 kg CO₂ eq./m² aufgrund der erheblichen Betonmasse festgestellt. Auch das Minimum der Treibhausgase bei DH_{\min} dieser Stahlbetondecke liegt im positiven Bereich.

Auffällig sind die negativen Werte der Holzbalkendecke und des Verbundsystems bei DH_{\max} . Holz besitzt die Fähigkeit das Kohlenstoffdioxid aus der Herstellungsphase zu speichern.

Herausragend ist der Übergang vom positiven zum negativen Wertebereich während der Parametrisierung der Verbunddecke. Für dieses Deckentragsystem ergibt sich hinsichtlich der Treibhausgasemissionen ein hohes Optimierungsvermögen. Die Differenzen zwischen den günstigen, positiven und den ungünstigen, negativen Ausgabewerten lassen sich aufgrund der schwankenden Massenanteile des Holzes während der Parametrisierung zurückzuführen.

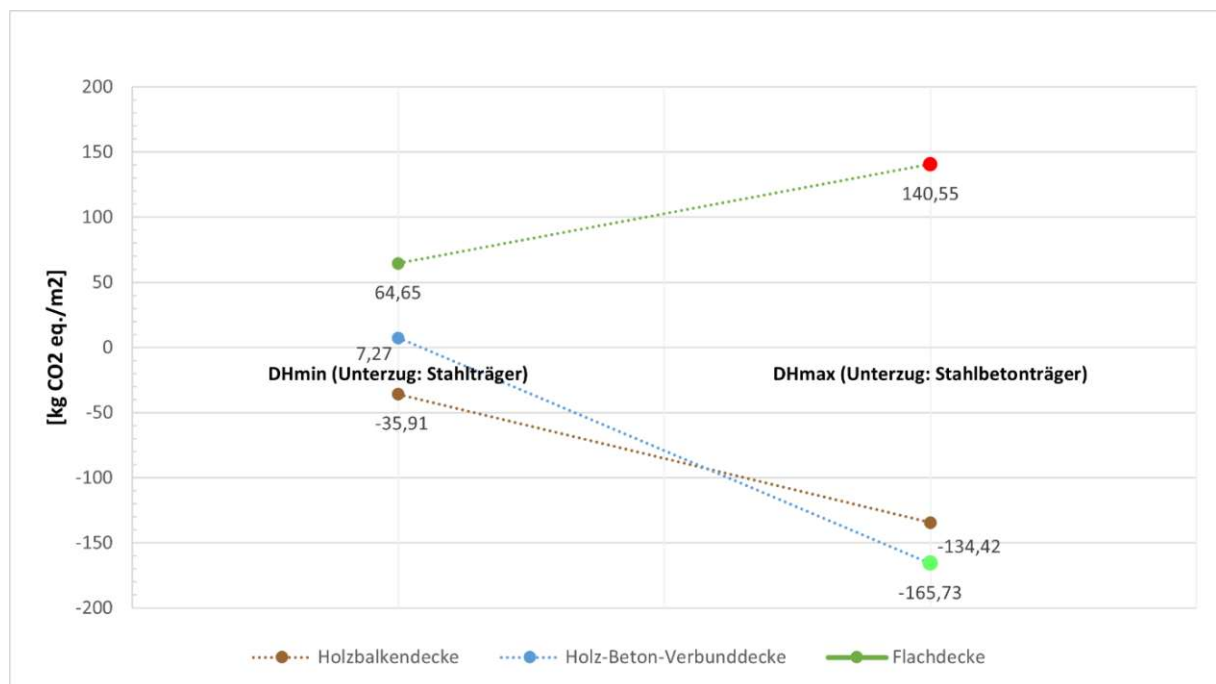


Abb. 5.7: Vergleich GWP- total der Deckensysteme

Der Vergleich der Versauerungspotentiale wird in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Werte der Luftschadstoffe bei DH_{\min} liegen nahe beisammen, wobei diese Emissionen bei steigender Deckenhöhen aufgrund der größer werdenden Querschnittsabmessungen entsprechend ansteigen. Der Ansatz zur Verminderung der umweltschädlichen Schadstoffe ist, aufgrund der annähernd gleichen Steigungsverhältnisse der Geraden, bei den drei Deckensystemen sehr ähnlich.

Die Verbunddecke erreichte mit $0,86 \text{ kg SO}_2 \text{ eq./m}^2$ das höchste Versauerungspotential. Den geringsten Wert erzielte die Holzbalkendecke.

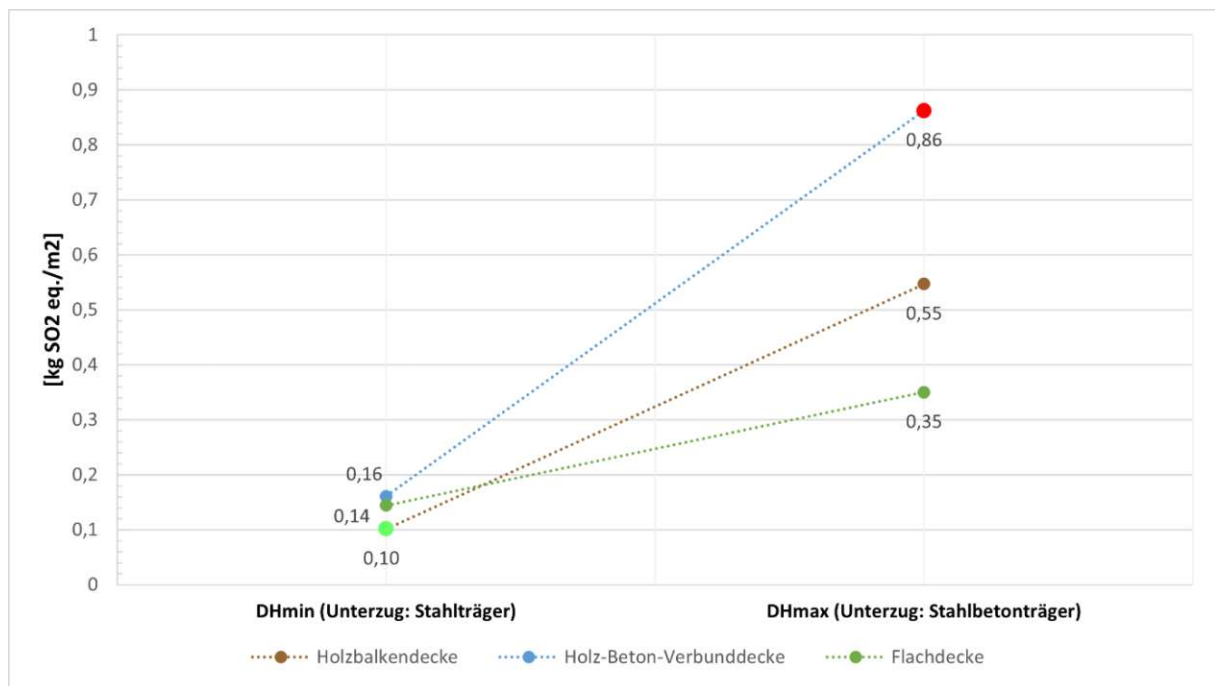


Abb. 5.8: Vergleich AP der Deckensysteme

Der Vergleich des nicht erneuerbaren Primärenergieinhalts wird in Abbildung 5.9 dargestellt. Es wird ein vergleichbarer Verlauf wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, festgestellt. Aufgrund der hohen Massenanteile der Brettschichtholz- und Stahlträger erzeugt die Verbunddecke mit knapp 4000 MJ/m² die höchste „graue Energie“. Die Holzbalkendecke verlangt mit rund 346 MJ/m² den geringsten Wert.

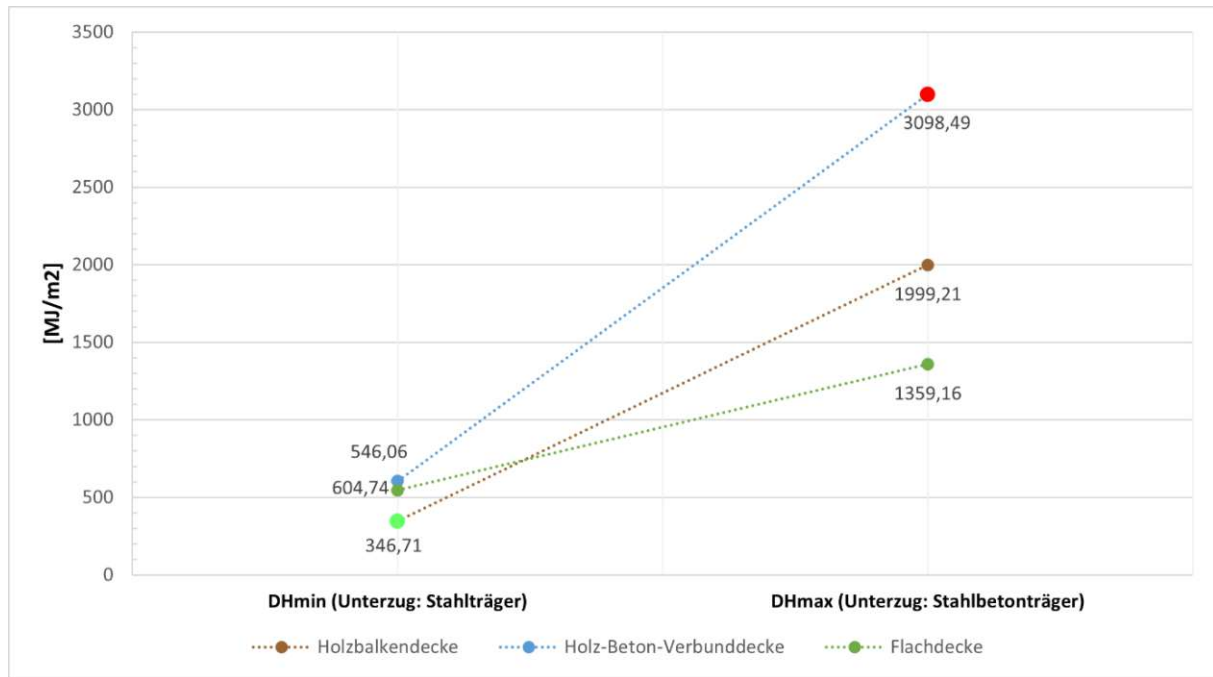


Abb. 5.9: Vergleich PENRT der Deckensysteme

5.5.3 Ergebnisse und Beurteilung der Optimierungskennzahlen

Beim Vergleich der ausgegebenen Optimierungskennzahlen wird zu Beginn der Definitionsbereich innerhalb der Grenzwerte festgestellt. Anschließend werden die Erkenntnisse bzw. die maßgeblichen Optimierungspotentiale der Deckensysteme innerhalb eines Untersuchungsfalles eruiert. In den nachstehenden Linien-Datenpunkt-Diagrammen sind die Ergebnisse aus Tabelle 5.5 der, im Kapitel 5.4 geschilderten, Untersuchungsfälle 1-3 ersichtlich.

Bei der Auswertung des Untersuchungsfalles 1, nämlich die gleiche Gewichtung der Umweltindikatoren, erzielte die Holzbalkendecke bei DH_{\min} laut Abbildung 5.10 die geringste Punkteanzahl, also die bestmögliche, zu vergebende Punkteanzahl von 2,75 OKZ. Die ungünstigste Punktermittlung wurde bei der Verbunddecke mit 26,96 OKZ angegeben.

Das meiste ökologische Optimierungsvermögen ist, aufgrund der größten Differenz zwischen der Mindest- und Maximaldeckenhöhe und der Auswahlmöglichkeiten unterschiedlicher Baustoffe, bei der Holz-Beton-Verbunddecke erkennbar.

Die geringste Optimierungsmöglichkeit lässt sich bei der Flachdecke feststellen. Zuzufolge der reinen Stahlbetonbauweise kann lediglich durch die Parametrisierung der Plattenhöhe eine ökologische Verbesserung erzielt werden.

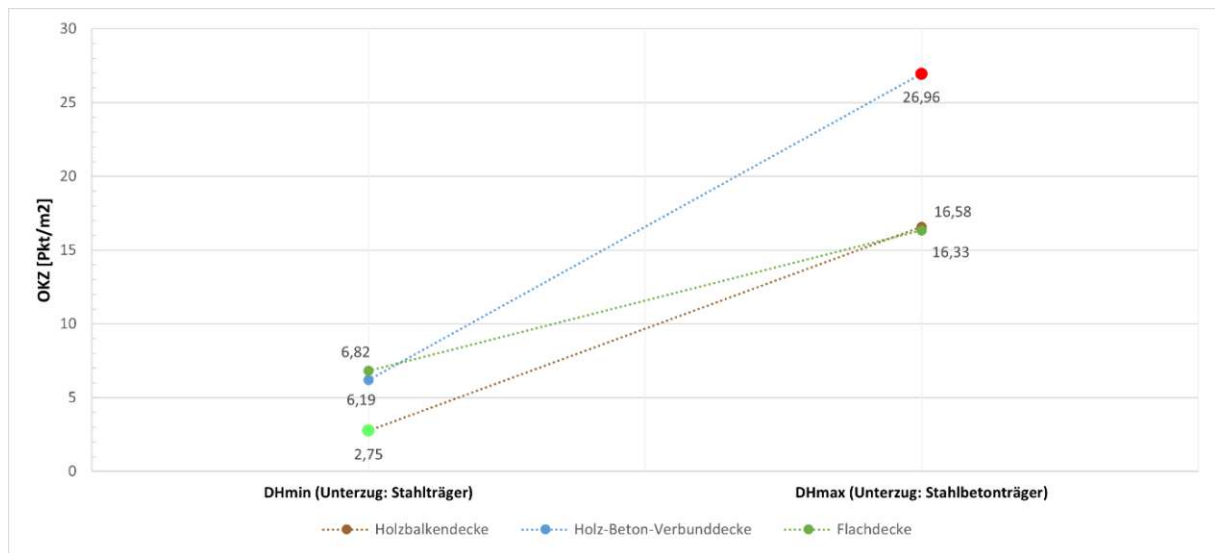


Abb. 5.10: Vergleich OKZ UF1 der Deckensysteme

Die Optimierungskennzahlen des Untersuchungsfalles 2 werden in Abbildung 5.11 angeführt. In diesem Fall werden ausschließlich die Kostenrichtwerte betrachtet. Der größte Definitionsbereich der Kosten liegt bei der Verbunddecke. Diese Decke weist demzufolge einen großen Handlungsspielraum der zu erwartenden Materialkosten während einer Parametrisierung auf.

Die Flachdecke, welche zwar in der Gesamtheit das materialkostengünstigste Deckensystem vorweist, besitzt jedoch aufgrund der geringen Differenz der Extremwerte das schwächste Optimierungsvermögen.

Die Optimierungskennzahlen der Holz balkendecke liegen in der mittleren Größenordnung.

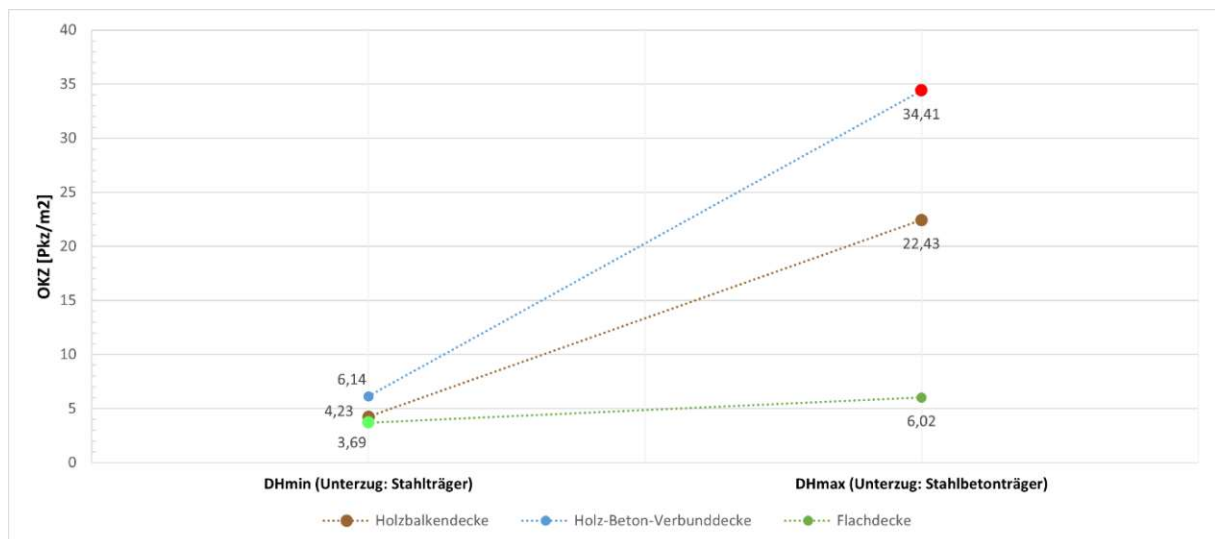


Abb. 5.11: Vergleich OKZ UF2 der Deckensysteme

Im Zuge der Auswertung des Untersuchungsfall 3, konnte anhand der Grafik aus der Abbildung 5.12 vergleichbare Verläufe wie bei den Materialkostenrichtwerte ersichtlich, festgestellt werden.

Durch die Parametereingabe des Aufbetons und der Primärträger des Verbunddeckensystems ist, gegenüber den anderen Deckensystemen, ein großes Optimierungsvermögen hinsichtlich der Deckenhöhe vorhanden. Dies konnte durch die steile blaue Gerade in der nachfolgenden Abbildung 5.13 festgestellt werden.

Der, bereits in Abbildung 5.11 erkennbare, flache grüne Linienverlauf repräsentiert erneut ein geringes Optimierungsvermögen der Flachdecke.

Gleichartig zu Untersuchungsfall 2 befindet sich die Holzbalkendecke in der mittleren Größenordnung.

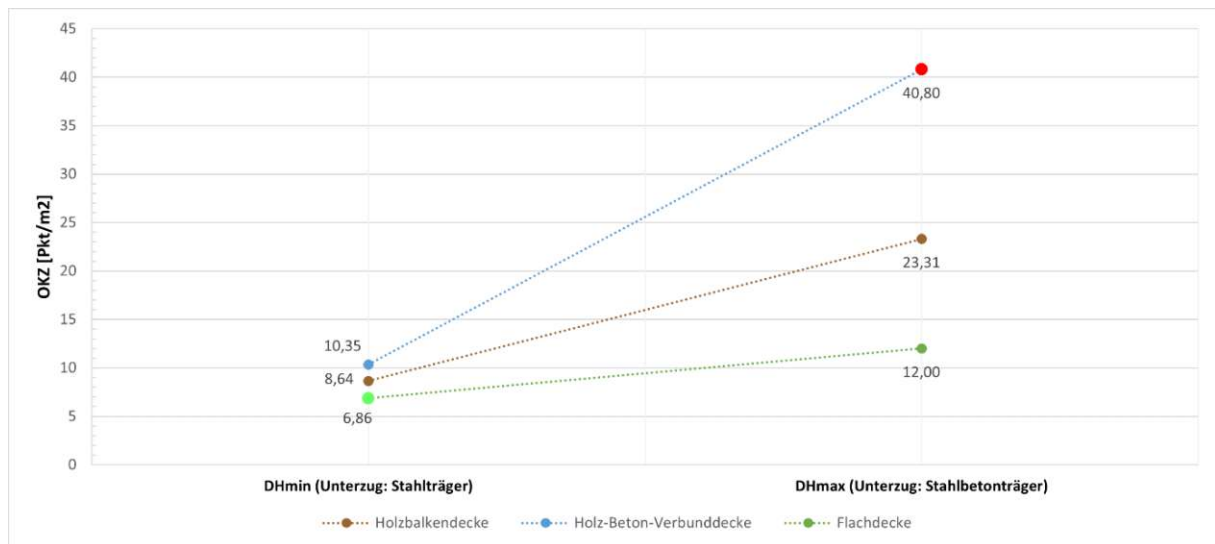


Abb. 5.12: Vergleich OKZ UF3 der Deckensysteme

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch Erreichen einer niedrigen Optimierungskennzahl, während der Parametrisierung in der Benutzereingabe im Anwendungstool, der Optimierungserfolg effizienter wird.

6 Zusammenfassung

Ein Vergleich der unterschiedlichen Deckentragsysteme kann nach entsprechender Vordimensionierung der Bauteile unter Einhaltung statischer Nachweise und der automatisierten Ermittlung der Massenanteile je Deckensystem vorgenommen werden. Im Rahmen der Untersuchung wurden keine bauphysikalischen Eigenschaften berücksichtigt.

6.1 Gegenüberstellung der Untersuchungsfälle und Deckensysteme

In der nachfolgenden Abbildung 6.1 wird ein Netzdiagramm mit Datenpunkten dargestellt. Das Nonagon umfasst alle drei Untersuchungsfälle je Deckensystem. Es beinhaltet alle Grenzwerte aus dem Kapitel 5.5.3.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die, während der Parametrisierung ergebenden, Optimierungspunkte der Untersuchungsfälle 1-3, unter Berücksichtigung der statischen Nachweiserfüllung und der empfohlenen Einhaltung aus der Gruppe 1) im Anwendungstool, innerhalb der Grenzwerte bzw. geometrischen Figuren aus der Abbildung 6.1 befinden werden.

Zudem werden in Tabelle 6.1 die, innerhalb der untersuchten Fälle, maximal zu erreichenden Optimierungskennzahlen angeführt.

Tab: 6.1: Bewertung der OKZ

Untersuchungsfall	Bestmögliche OKZ	Geringwertigste OKZ
Umweltindikatoren IBO	2,75	26,96
Materialkosten	3,69	34,41
Deckenhöhe	6,86	40,80

Anhand dieser Tabelle kann der Anwender beurteilen, wie effizient eine Optimierung während einer Parametrisierung ist.

Des Weiteren kann festgestellt werden, dass bei der nachhaltigen Auswertung die Holzbalkendecke die umweltfreundlichste Wahl ist. Die Holz-Beton-Verbunddecke ist aufgrund der hybriden Bauweise bzw. dem zusätzlichen Aufbeton laut Analyse die Decke mit den ungünstigsten ökologischen Ausgabewerten.

Hinsichtlich der Materialkosten und der Konstruktionshöhe liegt jeweils die Flachdecke an der Spitze. Das Verbundsystem liegt an letzter Stelle. Dies wird durch die erheblichen Abweichungen in Abbildung 6.1 verdeutlicht.

Darüber hinaus wurde erkannt, dass das nachhaltigste Deckensystem nicht der materialkostengünstigste Variante entspricht.

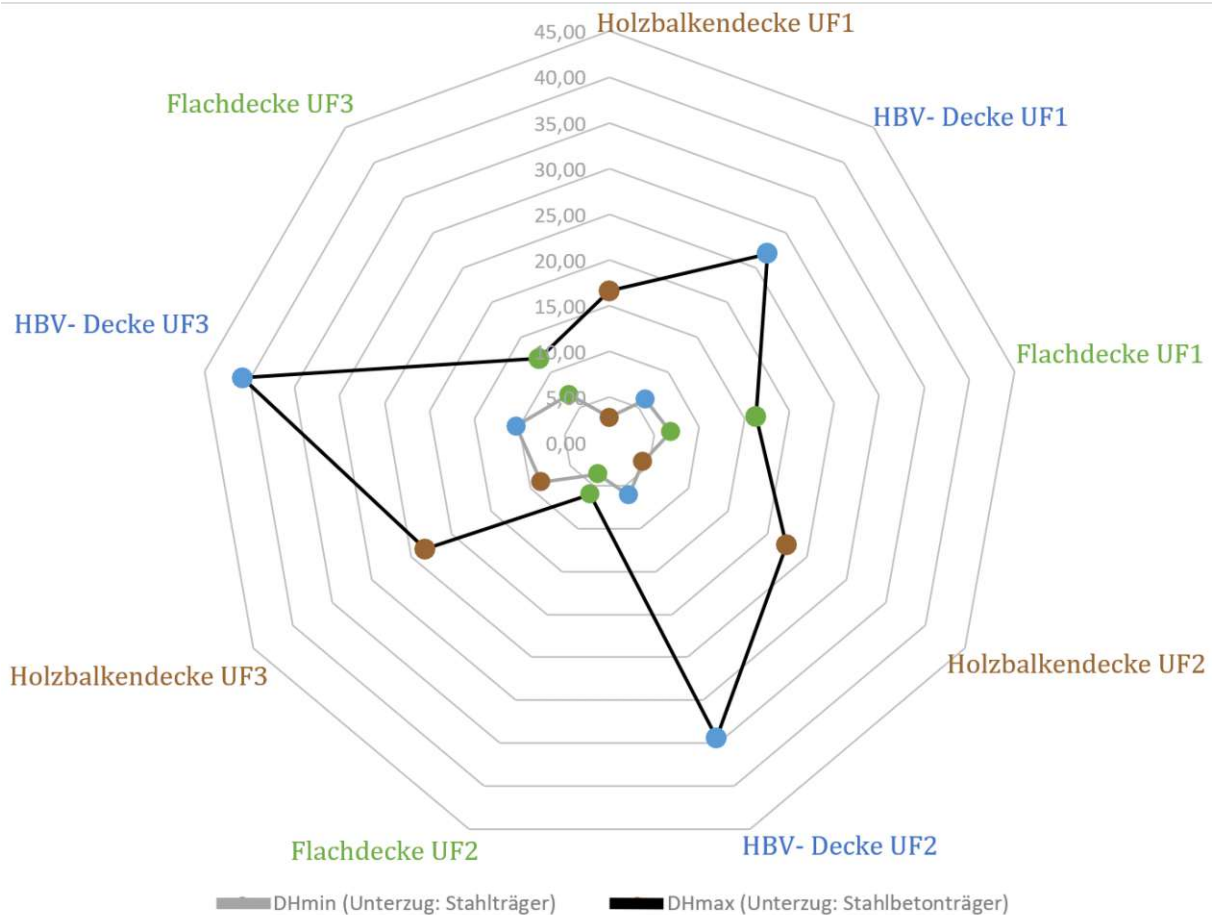


Abb. 6.1: Netzdiagramm Extremwerte OKZ

6.2 Fazit

In den vorliegenden Ausführungen hinsichtlich der Deckensysteme ist anhand der Tabelle C.1 und C.2 zu erkennen, dass die erforderlichen Querschnittshöhen der tragenden Bauteile aus unterschiedlichen Baumaterialien bei identer Belastungsannahme, identen statischen Systemen und identer Stützweiten dennoch deutlicher Differenzen ausweisen. Veranschaulicht wird dies beispielsweise im Zuge der Ermittlung der maximal erreichbaren, erforderlichen Trägerhöhen in Tabelle C.2. Bei Spannweiten von 8 Metern wurde der Unterzug aus Stahlbeton mit einer Höhe von 84cm bemessen, wobei für die Wahl eines Stahlträgers eine erforderliche Querschnittshöhe von 50cm benötigt wurde. Die Festlegung der Materialien durch den Benutzer und die Ausgabe der Massenanteile führen zu unterschiedlichen Ausgabewerten, diese sind jedoch für aussagekräftige Ergebnisse maßgeblich.

Die Abbildungen des Kapitels 5.5 zeigen, dass je größer die Stützweiten, desto größer die Differenz zwischen den Ausgabewerten der Deckensysteme. Diese graphische Entwicklung lässt sich sowohl bei den einzelnen Beurteilungskriterien im Kapitel 5.5.2, als auch bei den Untersuchungsfällen im Kapitel 5.5.3 erkennen.

Die größte Differenz der Ausgabewerte konnte bei der Ermittlung der Treibhausgaspotentiale aufgrund der negativen Ökobilanzkennwerte des Holzes sichtbar in Abbildung 5.7 festgestellt werden.

Flachdecken nehmen hinsichtlich der Materialkosten eine führende Position ein. Zuzufolge der hohen Rohdichte des Betons erreicht die Flachdecke stets das größte Konstruktionsgewicht.

Die ungünstigsten Ausgabewerte sind überwiegend bei der untersuchten Verbunddecke festzustellen. Aufgrund der geringeren Gesamtmasse und des negativen GWP-Kennwertes des Holzes konnte sich die hybride Bauweise gegenüber der Flachdecke im Untersuchungsfall 1 bei geringer Stützweite vorziehen. Bezugnehmend auf die Ermittlung des GWP-Kennwertes in Abbildung 5.7 kann bei der Verbunddecke bei maximaler Stützweite der günstigste Kennwert herauszulesen. Dieses Resultat lässt sich aufgrund der größten Holzträgerquerschnitte und der Gesamtmasse an Holz begründen.

Um zielführende Erkenntnisse während der Parametrisierung und der Untersuchung der Deckentragsysteme zu erlangen, sind vor Untersuchungsbeginn die Rahmenbedingungen und die Beurteilungskriterien festzulegen.

Rückt der Umweltschutz in den Vordergrund und es wird Wert auf eine Tragkonstruktion mit geringem Gewicht gelegt, wird vermutlich die Holzbalkendecke die zu empfehlende Wahl sein. Werden jedoch Materialkosten und eine schlanke Bauweise fokussiert, scheint die Flachdecke eine adäquate Wahl zu sein.

Die erstellte Bewertungsmethode liefert nach Eingabe von entsprechenden Parametern und der Einhaltung statischen Nachweisen aussagekräftige Angaben hinsichtlich der umweltfreundlichsten oder der materialbezogen kostengünstigsten Variante. Darüber hinaus kann festgestellt werden, welches das schlankste System ist oder welche Decke das geringste Gewicht aufweist. Es besteht weiters die Möglichkeit individuell definierte Priorisierung der unterschiedlichen Beurteilungskriterien festzulegen.

Besonders hervorzuheben ist, dass jeder Benutzer individuelle Prioritäten hinsichtlich der Auswahl aller genannten Beurteilungskriterien setzen kann.

7 Literaturverzeichnis

- CARE Deutschland e.V. (2022) Klimawandel: Definition, Ursachen, Folgen [online]. Bonn: CARE. <https://www.care.de/schwerpunkte/klimakrise/klimawandel/> [Zugriff am: 07.12.2022]
- Elbers, U. (2022) Ressourcenschonendes Bauen- Wege und Strategien der Tragwerksplanung. Bautechnik 99, H. 1, S. 57-64. <https://doi.org/10.1002/bate.202100114> [Zugriff am: 07.12.2022]
- Anstalt des öffentlichen Rechts (2022) Beim Renovieren Klima und Ressourcen schonen [online]. München: Anstalt des öffentlichen Rechts. <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/bauen-klima-oekologisch-emission-nachhaltig-100.html> [Zugriff am: 07.12.2022]
- IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) Materialökologie- Lebenszyklusanalysen- Ökobilanzen [online]. Wien: IBO. <https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/oekobilanzen> [Zugriff am: 07.12.2022]
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (2022) Ökologisches Baustoffkonzept- Bewertungsmethodik, Zertifizierung, Anwendungsbeispiele, Demonstrationsgebäude [online]. Wien: BMK. https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/skriptum_hochbauplanung_1.4_oekologisches_baustoffkonzept.pdf [Zugriff am: 05.11.2022]
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2022) Leitfaden Nachhaltiges Bauen- Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden [online]. Berlin: BMI. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/publikationen/BBSR_LFNB_D_190125.pdf [Zugriff am: 06.11.2022]
- Bartels, N.; Höper, J.; Theißen, S.; Wimmer, R. (2022) Anwendung der BIM- Methode im nachhaltigen Bauen- Status quo von Einsatzmöglichkeiten in der Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schadow, T. (2022) Ressourcenschonung im Bauwesen- Aspekte der Planungspraxis. Bautechnik 99, H. 1, S. 50-56. <https://doi.org/10.1002/bate.202100110> [Zugriff am: 06.11.2022]
- Bundesministerium für Finanzen (2022) Das Übereinkommen von Paris- Auswirkung auf Österreich [online]. Wien: BMF. https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000325.html [Zugriff am: 02.12.2022]
- Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R.; Sobek, W. (2021) Graue Emissionen im Bauwesen- Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. Beton und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969-977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065> [Zugriff am: 02.12.2022]
- Berger, T.; Prasser, P.; Reinke HG. (2013) Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern, S. 395-403. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/best.201300019> [Zugriff am: 02.12.2022]
- Robert McNeel & Associates (1980) Rhinoceros 3D [Software]. <https://www.rhino3d.com/download/>
- BIM Corner (2022) BIM in Grasshopper- The ultimate software list [online]. Oslo: BIM Corner. <https://bimcorner.com/bim-in-grasshopper-the-ultimate-software-list/> [Zugriff am: 08.12.2022]
- Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zach, F. (2021) Baukonstruktionen Band 5- Decken. Basel: Birkhäuser. S. 4-5
- proHolz Austria (2022) zuschnitt 54- Holzdecken [online]. Wien: proHolz Austria. <https://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt54/files/assets/common/downloads/publication.pdf> [Zugriff am: 05.12.2022]

- wion media services GmbH & Co. KG (2022) 114 | Holz-Beton-Verbunddecken [online]. Erding: wion media services GmbH & Co. KG. <https://www.bauwion.de/wissen/rohbau/geschossdecke/114-holz-beton-verbunddecken>, [Zugriff am: 06.11.2022]
- Spillner Spezialbaustoffe GmbH (2022) SFS intec- Holz-Beton-Verbundsystem VB [online]. Lübeck: Spillner Spezialbaustoffe GmbH. <https://www.spillner-ssb.de/sfs-system-vb/holz-beton-verbund.html> [Zugriff am: 06.11.2022]
- Spillner Spezialbaustoffe GmbH (2022) Holz-Beton-Verbund- SFS Intec [online]. Lübeck: Spillner Spezialbaustoffe GmbH. <https://www.123baustoffe.de/shop/holz-beton-verbund-system/> [Zugriff am: 13.11.2022]
- Hestermann, U.; Rongen, L. (2015) Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 36. Auflage. Erfurt: Springer Vieweg, S. 369
- ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: 2015
- Holzforschung Austria- Österreichische Gesellschaft für Holzforschung (2022) Festigkeitsorientiertes Bauholz [online]. Wien: Holzforschung Austria. https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter_de/vh_de_01.pdf [Zugriff am: 12.11.2022]
- Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung (2021) Hochbaukonstruktionen- Teil C- Einwirkungen und Vorbemessung. Technische Universität Wien
- IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) Beläge, Fußbodenmaterialien, Textilien [online]. Wien: IBO. <https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/belaenge2013.pdf> [online: 12.11.2022]
- Winter, Wolfgang (2016) Holzbau.bi- Bemessung nach Eurocode 5. Technische Universität Wien
- Fritze, R.; Kidery, GF.; Potucek, W. (2009) Stahlbetonbau- Teil 2: Bemessungstabellen auf Basis des Eurocodes 2 (ÖNORM EN 1992-1-1 und nationaler Anhang ÖNORM B 1992-1-1). Wien: Manz.
- Luza, G.; Palka, M. (2010) Stahlbau- Formeln und Tabellen. Wien: Manz.
- ÖNORM EN 1995-1-1:2019-06, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten- Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln für den Hochbau: 2019
- baubook GmbH (2022) Produkte [online]. Wien: baubook GmbH. <https://www.baubook.at/zentrale/> [Zugriff am: 12.11.2022]
- baubook GmbH- eco2soft [Software]. <https://www.baubook.at/eco2soft/> [Zugriff am: 12.11.2022]
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2022) ÖKOBAUDAT 2021-II [online]. Berlin: BBR. <https://www.oekobaudat.de/service/downloads.html> [Zugriff am: 05.12.2022]
- Bundeskanzlei, Bundeshaus (2022) Ökobilanzdaten im Baubereich_Données des écobilans dans la construction 2009-1-2022 [online]. Bern: Bundeskanzlei. https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html [Zugriff am: 05.11.2022]
- Mang, H.A.; Hofstetter, G. (2018) Festigkeitslehre. 5.Auflage. Wien: Springer Vieweg
- SFS intec AG SFSintec [Software]. <https://de.sfs.com/downloads/holzbau> [online 13.11.2022]
- ÖNORM EN 1991-1-1:2011-09, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke- Teil1-1: Allgemeine Einwirkungen- Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau: 2011

- ÖNORM B 1990:2013-01, Eurocode- Grundlagen der Tragwerksplanung- Teil 1: Hochbau: 2013.
- ÖNORM EN 1993-1-1:2014-10, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: 2014.
- Valentin, G.; Potucek, W.; Kidery, GF.; Fritze, R. (2009) Stahlbetonbau- Teil 1: Grundlagen und Beispiele auf Basis des Eurocodes 2 (ÖNORM EN 1992-1-1 und nationaler Anhang ÖNORM B 1992-1-1). Wien: Manz.
- Luza, G.; Palka, M.; Schnaubelt, S. (2011) Stahlbau- Grundlagen, Konstruktion, Bemessung. Wien: Manz.
- ÖNORM B 1992-1-1:2018-01, Eurocode 2- Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für Hochbau: 2018.
- Müllner, A. (2021) 259,383 Holzbau 2 | SS 2021 | Verbundbauteile- Modellierung und Bemessung 1+2 und Verbundbauteile- Personeninduzierte Schwingungen. Technische Universität Wien.
- IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 und des Globalen Erwärmungspotenzials für Bauteile und Gebäude [online]. Wien: IBO. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI-Berechnungsleitfaden_V5_Sep2022.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]
- IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) IBO- Richtwerte für Baumaterialien- Wesentliche methodische Annahmen für die IBO- Richtwerte 2017 [online]. Wien: IBO. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/IBO-Richtwerte-2017_Methode_v32_2020-12-28.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]
- IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (2022) EI- Entsorgungsindikator- Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators von Bauteilen und Gebäuden [online]. Wien: IBO. https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/ei_berechnungsleitfaden_v1_2012.pdf [Zugriff am: 22.11.2022]

8 Abbildungsverzeichnis

ABB. 2.1: LEBENSWEG GEBÄUDE	3
ABB. 2.2: VERTEILUNG GLOBALER CO ₂ - AUSSTOß	4
ABB. 2.3: EINFLUSS TRAGENDE BAUTEILE GRAUER EMISSION	5
ABB. 2.4: FORSCHUNGSPROZESS DER DIPLOMARBEIT	6
ABB. 3.1: DARSTELLUNG TRAGSYSTEM 1	8
ABB. 3.2: AUSZUG RHINOCEROS DRAUFSICHT BALKENDECKE.....	9
ABB. 3.3: AUSZUG RHINOCEROS PERSPEKTIVE1 BALKENDECKE	9
ABB. 3.4: AUSZUG RHINOCEROS PERSPEKTIVE2 BALKENDECKE	10
ABB. 3.5: QUERSCHNITT HOLZBALKENDECKE MIT SICHTBARER UNTERSICHT	10
ABB. 3.6: QUERSCHNITT HOLZ-BETON-VERBUNDDECKE.....	11
ABB. 3.7: BEISPIELANSICHT EINER HOLZ-BETON-VERBUNDDECKE	12
ABB. 3.8: DARSTELLUNG TRAGSYSTEM 2.....	12
ABB. 3.9: GRUNDRISS PUNKTFÖRMIG GELAGERTE PLATTE	13
ABB. 3.10: AUSZUG RHINOCEROS PERSPEKTIVE FLACHDECKE.....	13
ABB. 4.1: UNTERSUCHUNGSPROZESS DER DIPLOMARBEIT	15
ABB. 4.2: AUSZUG BEISPIELGRUPPE	16
ABB. 4.3: AUSZUG BEISPIELPANEL	16
ABB. 4.4: SCHEMA ANWENDUNGSTOOL.....	17
ABB. 4.5: AUSZUG GESAMTÜBERSICHT ANWENDUNGSTOOL.....	18
ABB. 4.6: FARBLEGENDE ANWENDUNGSTOOL GRUPPE UND PANEL	19
ABB. 4.7: BAUTEILE UND MATERIALIEN HOLZBALKENDECKE	20
ABB. 4.8: BAUTEILE UND MATERIALIEN HOLZ-BETON-VERBUNDDECKE	20
ABB. 4.9: BAUTEILE UND MATERIALIEN FLACHDECKE	21
ABB. 4.10: AUSZUG BEISPIELHAFTE MATERIALKENNWERTE	25
ABB. 4.11: AUSZUG BEISPIELHAFTE BAUTEILKENNWERTE.....	27
ABB. 4.12: AUSZUG BEISPIELHAFTE EINWIRKUNG.....	28
ABB. 4.13: AUFTEILUNG DER GURT- UND FELDSTREIFEN	29
ABB. 4.14: AUSZUG BEISPIELHAFTE SCHNITTGRÖßENERMITTLUNG	30
ABB. 4.15: NACHWEISFÜHRUNG ULS.....	31
ABB. 4.16: NACHWEISFÜHRUNG SLS	32
ABB. 4.17: AUSZUG BEISPIELHAFTER ULS	33
ABB. 4.18: AUSZUG BEISPIELHAFTER SLS	35
ABB. 4.19: AUSZUG BEISPIELHAFTE ÖKOLOGISCHE KENNWERTE	37
ABB. 4.20: RANGFOLGE DER BAUSTOFFE.....	38
ABB. 4.21: AUSZUG BEISPIELHAFTE AUSWERTUNG ÖKOLOGISCHER KENNWERTE	40
ABB. 4.22: AUSZUG BEISPIELHAFTE KOSTENRICHTWERTE	41
ABB. 4.23: AUSZUG BEISPIELHAFTE GEGENÜBERSTELLUNG DER KENNWERTE	42
ABB. 4.24: AUSGEWÄHLTE KRITERIEN DES OPTIMIERUNGSVERFAHRENS	44

ABB. 4.25: ERGÄNZENDE KENNGRÖßEN	44
ABB. 5.1: UNTERSUCHUNGSPROZESS DER AUSWERTUNGSMETHODIK.....	45
ABB. 5.2: AUSZUG BEISPIELHAFTE AUSWERTUNG OPTIMIERUNGSKENNZAHL	52
ABB. 5.3: BAUSTOFFANTEILE DER DECKENSYSTEME DH_{MIN}	54
ABB. 5.4: BAUSTOFFANTEILE DER DECKENSYSTEME DH_{MAX}	54
ABB. 5.5: VERGLEICH KONSTRUKTIONSGEWICHT DER DECKENSYSTEME	55
ABB. 5.6: VERGLEICH KOSTENRICHTWERTE DER DECKENSYSTEME	56
ABB. 5.7: VERGLEICH GWP- TOTAL DER DECKENSYSTEME	57
ABB. 5.8: VERGLEICH AP DER DECKENSYSTEME.....	58
ABB. 5.9: VERGLEICH PENRT DER DECKENSYSTEME	59
ABB. 5.10: VERGLEICH OKZ UF1 DER DECKENSYSTEME	60
ABB. 5.11: VERGLEICH OKZ UF2 DER DECKENSYSTEME	60
ABB. 5.12: VERGLEICH OKZ UF3 DER DECKENSYSTEME	61
ABB. 6.1: NETZDIAGRAMM EXTREMWERTE OKZ	63
ABB. A.1: ABLAUF BENUTZEREINGABE UNTERGRUPPE 1.1.1).....	72
ABB. A.2: AUSZUG BEDIENOBBERFLÄCHE UNTERGRUPPE 1.1.1).....	73
ABB. A.3: ABLAUF BENUTZEREINGABE UNTERGRUPPE 1.1.2).....	74
ABB. A.4: AUSZUG BEDIENOBBERFLÄCHE UNTERGRUPPE 1.1.2).....	75
ABB. A.5: AUSZUG KONTROLLE NACHWEISFÜHRUNG UNTERGRUPPE 1.1.2).....	76
ABB. A.6: ABLAUF BENUTZEREINGABE UNTERGRUPPE 1.1.3).....	77
ABB. A.7: AUSZUG BEDIENOBBERFLÄCHE UNTERGRUPPE 1.1.3).....	78
ABB. A.8: AUSZUG KONTROLLE NACHWEISFÜHRUNG UNTERGRUPPE 1.1.3).....	79
ABB. A.9: ABLAUF BENUTZEREINGABE UNTERGRUPPE 1.1.4).....	80
ABB. A.10: AUSZUG BEDIENOBBERFLÄCHE UNTERGRUPPE 1.1.4).....	80
ABB. A.11: AUSZUG KONTROLLE NACHWEISFÜHRUNG UNTERGRUPPE 1.1.4).....	81
ABB. A.12: AUSZUG AUSWERTUNG UNTERGRUPPE 7.1.1).....	82
ABB. A.13: AUSZUG AUSWERTUNG UNTERGRUPPE 7.1.2).....	83
ABB. B.1: AUSZUG ANSICHT UND SCHNITT	84
ABB. B.2: AUSZUG ANGABEN	85
ABB. B.3: AUSZUG EINWIRKUNG UND SCHNITTGRÖßEN.....	86
ABB. B.4: AUSZUG SCHNITTGRÖßEN UND BEMESSUNGSWERTE.....	87
ABB. B.5: AUSZUG NACHWEISFÜHRUNG	88
ABB. B.6: AUSZUG ANORDNUNG UND ANZAHL DER VERBINDERTYPEN UND SCHUBDECKUNGSLINIE	89

9 Tabellenverzeichnis

TAB: 4.1: MATERIALKENNWERTE.....	23
TAB: 5.1: EXTREMWERTE VON DH_{MIN} UND DH_{MAX}	48
TAB: 5.2: GEWICHTUNG DER IBO- UMWELTINDIKATOREN	49
TAB: 5.3: BERECHNUNG DER REFERENZWERTE	49
TAB: 5.4: ERGEBNISSE	50
TAB: 5.5: AUSWERTUNG OKZ.....	53
TAB: 6.1: BEWERTUNG DER OKZ.....	62
TAB: C.1: ERMITTLUNG DH_{MIN}	90
TAB: C.2: ERMITTLUNG DH_{MAX}	91
TAB: C.3: STATISCHE SYSTEMKOMBINATIONEN UND ERSTMALIGER VERSAGENSFALL WÄHREND DER PARAMETRISIERUNG FÜR DIE GERINGSTEN DECKEN- UND SEKUNDÄRTRÄGERHÖHEN	93
TAB: C.4: STATISCHE SYSTEMKOMBINATIONEN UND ERSTMALIGER VERSAGENSFALL WÄHREND DER PARAMETRISIERUNG FÜR DIE HÖCHSTEN DECKEN- UND SEKUNDÄRTRÄGER	94
TAB: D.1: AUSWERTUNG DER KRITERIEN	95

Anhang A- Beschreibung der grafischen Benutzeroberfläche

In diesem Anhang wird die Parametereingabe im Anwendungstool schrittweise erläutert. Um zweckdienliche Ausgabewerte zu erlangen, ist während der Eingabe auf die Erfüllung der Nachweise zu achten. Bei Nichteinhaltung eines Nachweises werden je 1000 Punkte bei den Optimierungskennzahlen hinzuaddiert. Weiters sind die orangen gefärbten Panels zu beachten. Die Einhaltung sämtlicher Querschnittsabmessungen oder Achsabstände werden empfohlen. Für die Nichteinhaltung einer Empfehlung werden keine zusätzlichen Punkte vergeben.

A.1 Allgemein

Folgender Eingabeprozess ist in der Untergruppe *1.1.1) Eingabe der Kenngrößen Deckensystem 1 und 2* vorzunehmen:

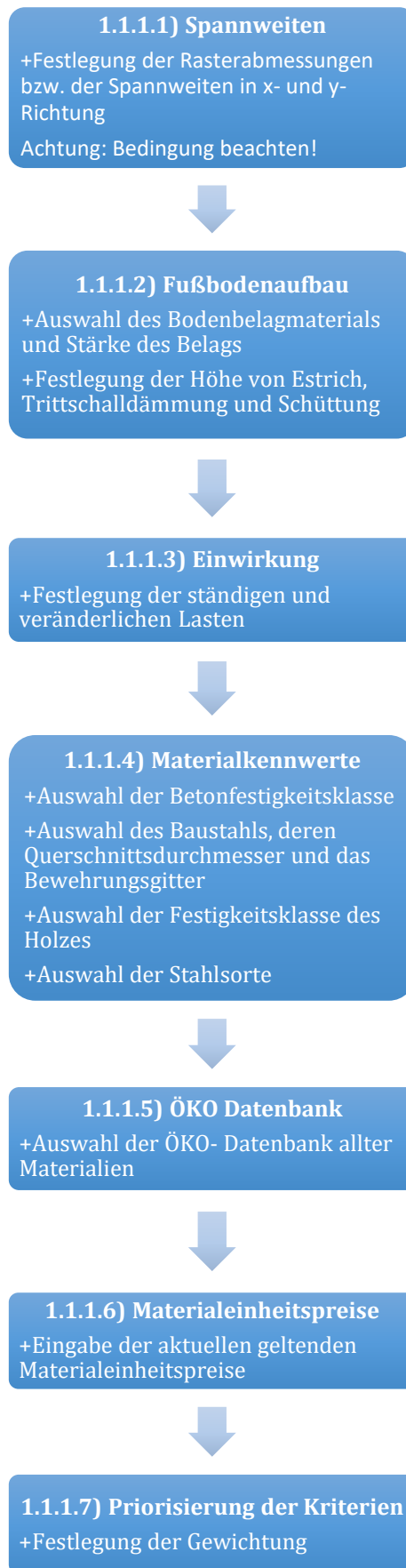
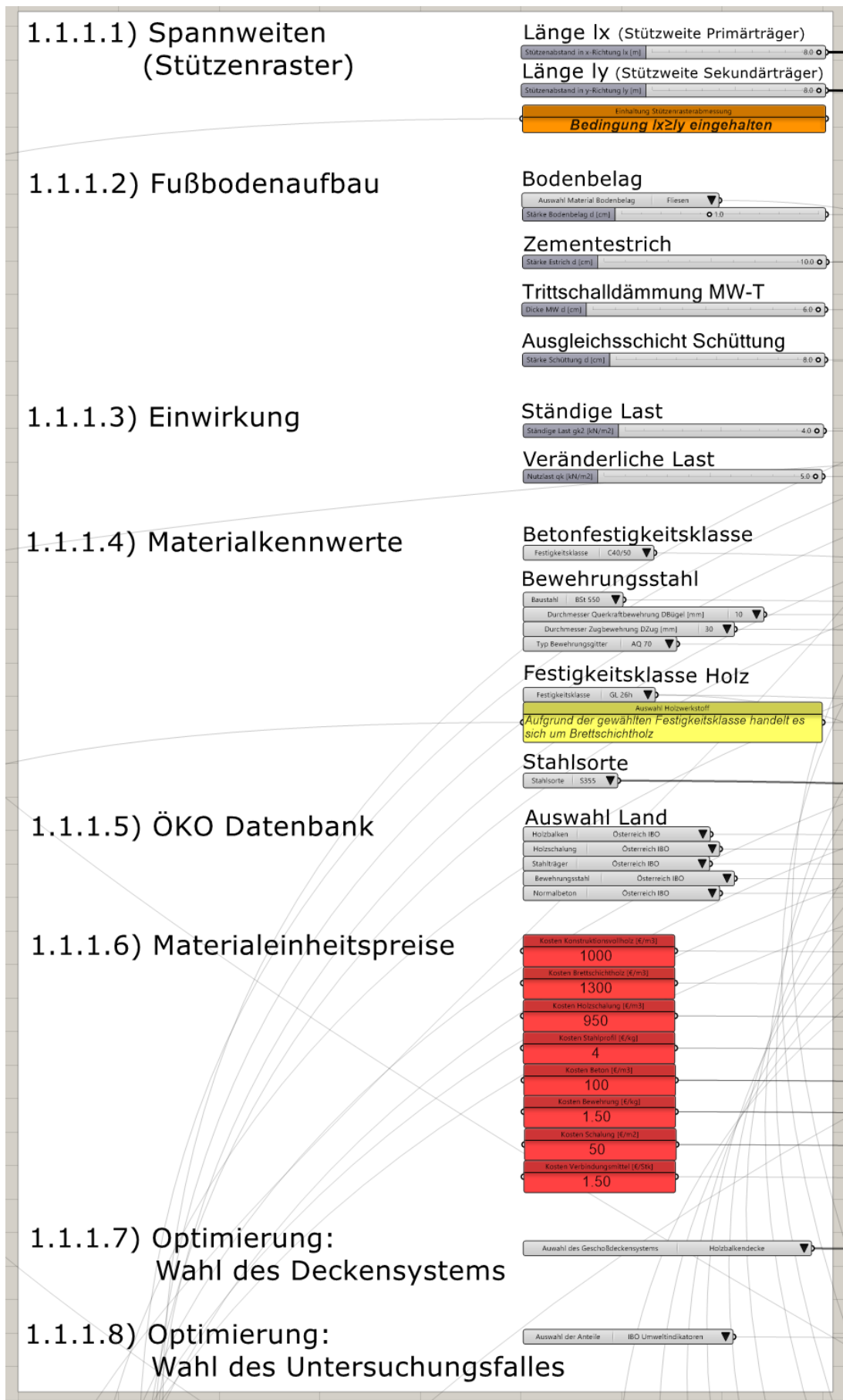


Abb. A.1: Ablauf Benutzereingabe Untergruppe 1.1.1)



The screenshot displays a software interface for structural design, organized into sections on the left and corresponding input fields on the right. The sections are:

- 1.1.1.1) Spannweiten (Stützenraster)**: Includes input fields for 'Länge lx (Stützweite Primärträger)' (8.0) and 'Länge ly (Stützweite Sekundärträger)' (8.0). A highlighted orange box contains the text: 'Einhaltung Stützenabmessung: **Bedingung $l_x \geq l_y$ eingehalten**'.
- 1.1.1.2) Fußbodenaufbau**: Includes input fields for 'Bodenbelag' (Auswahl Material Bodenbelag: Fliesen), 'Stärke Bodenbelag d [cm]' (1.0), 'Zementestrich' (Stärke Estrich d [cm]: 10.0), 'Trittschalldämmung MW-T' (Dicke MW d [cm]: 6.0), and 'Ausgleichsschicht Schüttung' (Stärke Schüttung d [cm]: 8.0).
- 1.1.1.3) Einwirkung**: Includes input fields for 'Ständige Last' (Ständige Last qk2 [kN/m2]: 4.0) and 'Veränderliche Last' (Nutzlast qk [kN/m2]: 5.0).
- 1.1.1.4) Materialkennwerte**: Includes input fields for 'Betonfestigkeitsklasse' (Festigkeitsklasse: C40/50), 'Bewehrungsstahl' (Bau Stahl: BSt 550, Durchmesser Querkraftbewehrung DBügel [mm]: 10, Durchmesser Zugbewehrung DZug [mm]: 30, Typ Bewehrungsgitter: AQ 70), 'Festigkeitsklasse Holz' (Festigkeitsklasse: GL 28h), and 'Stahlsorte' (Stahlsorte: S355). A highlighted yellow box contains the text: 'Auswahl Holzwerkstoff: **Aufgrund der gewählten Festigkeitsklasse handelt es sich um Brettschichtholz**'.
- 1.1.1.5) ÖKO Datenbank**: Includes input fields for 'Auswahl Land' (Holzbalken: Österreich IBO, Holzschalung: Österreich IBO, Stahlträger: Österreich IBO, Bewehrungsstahl: Österreich IBO, Normalbeton: Österreich IBO).
- 1.1.1.6) Materialeinheitenpreise**: Includes a list of costs in red boxes: 'Kosten Konstruktionsholz [€/m3]: 1000', 'Kosten Brettschichtholz [€/m3]: 1300', 'Kosten Holzschalung [€/m3]: 950', 'Kosten Stahlprofil [€/kg]: 4', 'Kosten Beton [€/m3]: 100', 'Kosten Bewehrung [€/kg]: 1.50', 'Kosten Schalung [€/m2]: 50', and 'Kosten Verbindungsmittel [€/Stk]: 1.50'.
- 1.1.1.7) Optimierung: Wahl des Deckensystems**: Includes an input field for 'Auswahl des Geschoßdeckensystems' (Holzbalkendecke).
- 1.1.1.8) Optimierung: Wahl des Untersuchungsfall'es**: Includes an input field for 'Auswahl der Anteile' (IBO Umweltindikatoren).

Abb. A.2: Auszug Bedienoberfläche Untergruppe 1.1.1)

A.2: Holzbalkendecke

Folgender Eingabeprozess ist in der Untergruppe 1.1.2) *Eingabe und Ergebnisse der Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Holzbalkendecke* vorzunehmen:

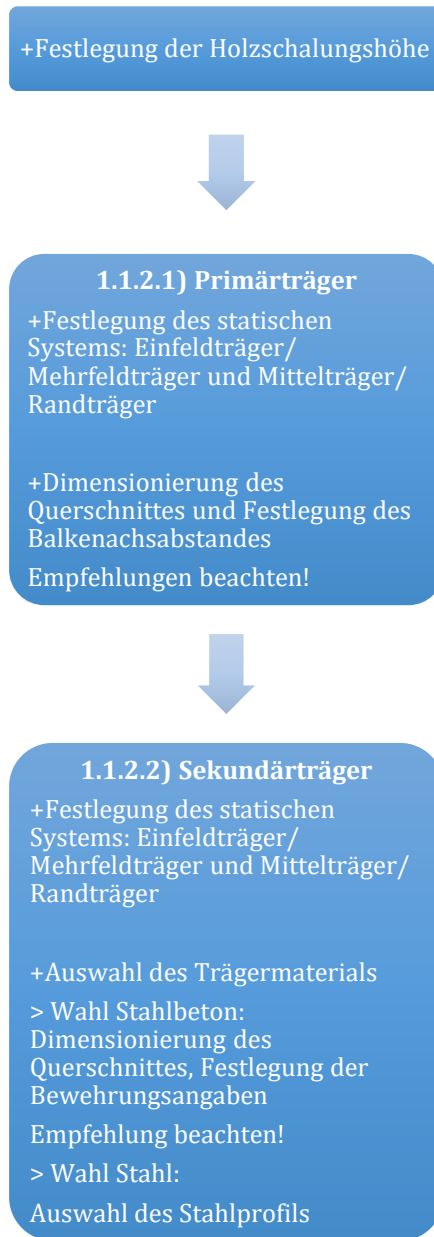


Abb. A.3: Ablauf Benutzereingabe Untergruppe 1.1.2)

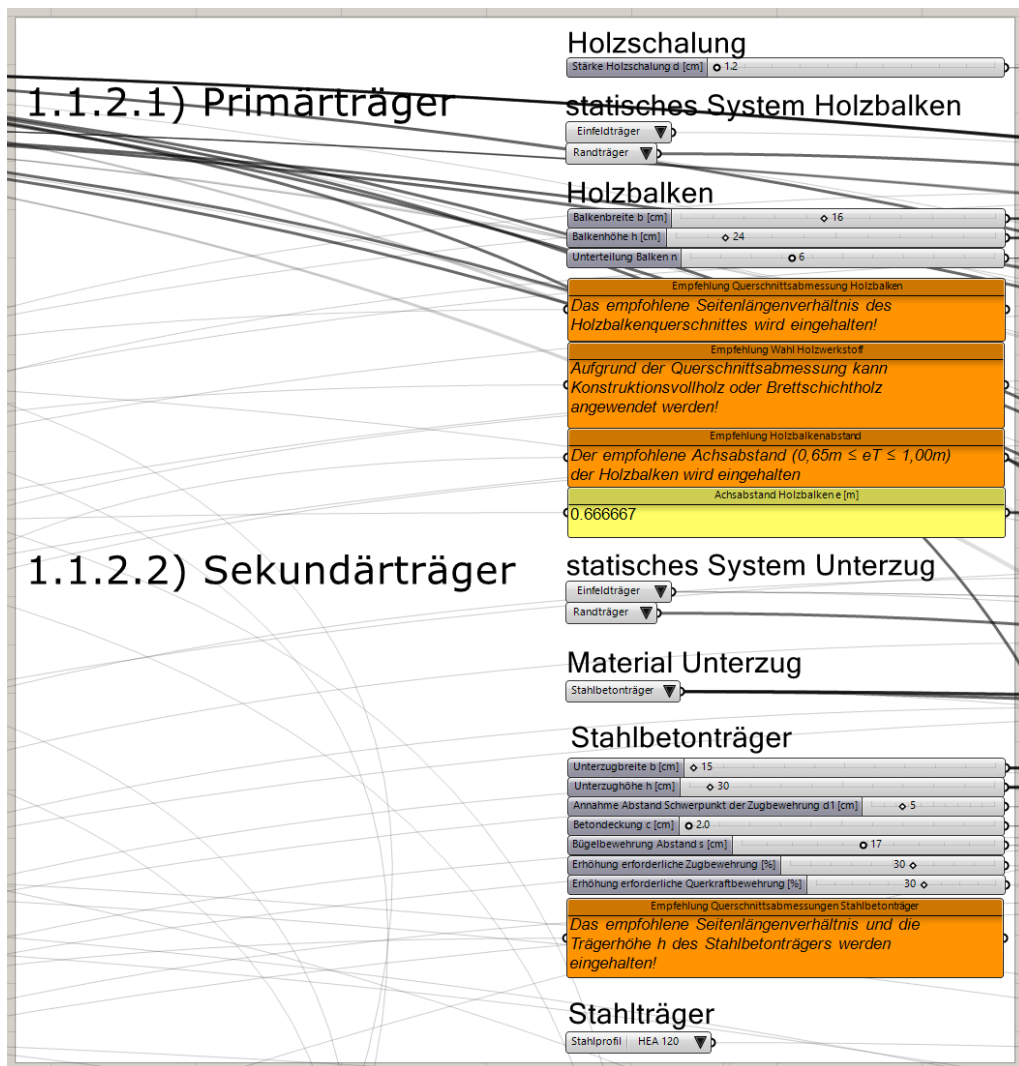


Abb. A.4: Auszug Bedienoberfläche Untergruppe 1.1.2)

A.3: Holz-Beton-Verbunddecke

Folgender Eingabeprozess ist in der Untergruppe 1.1.3) *Eingabe und Ergebnisse der Nachweise HBV-Decke* vorzunehmen:

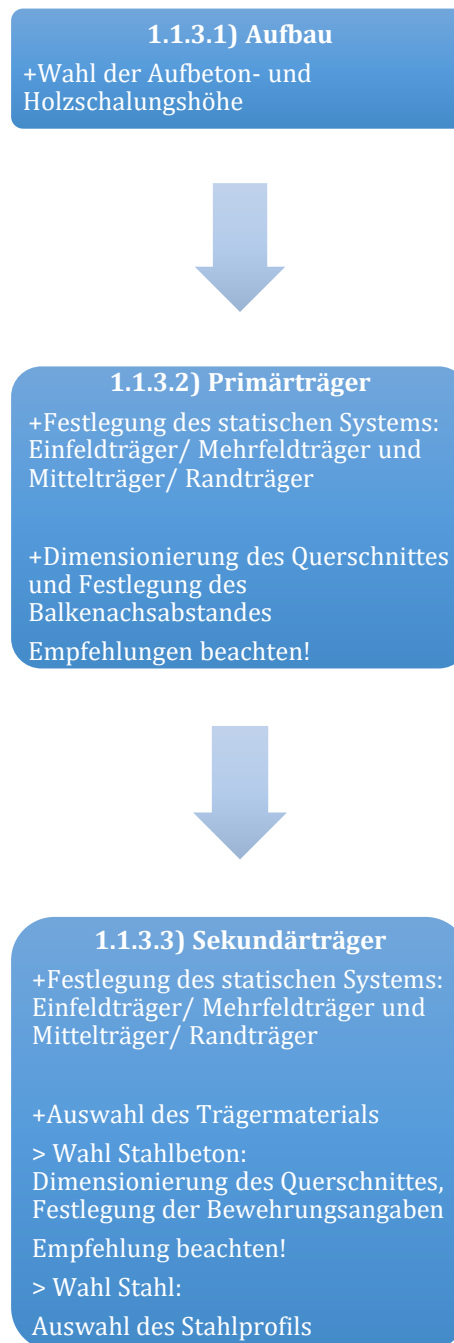


Abb. A.6: Ablauf Benutzereingabe Untergruppe 1.1.3)

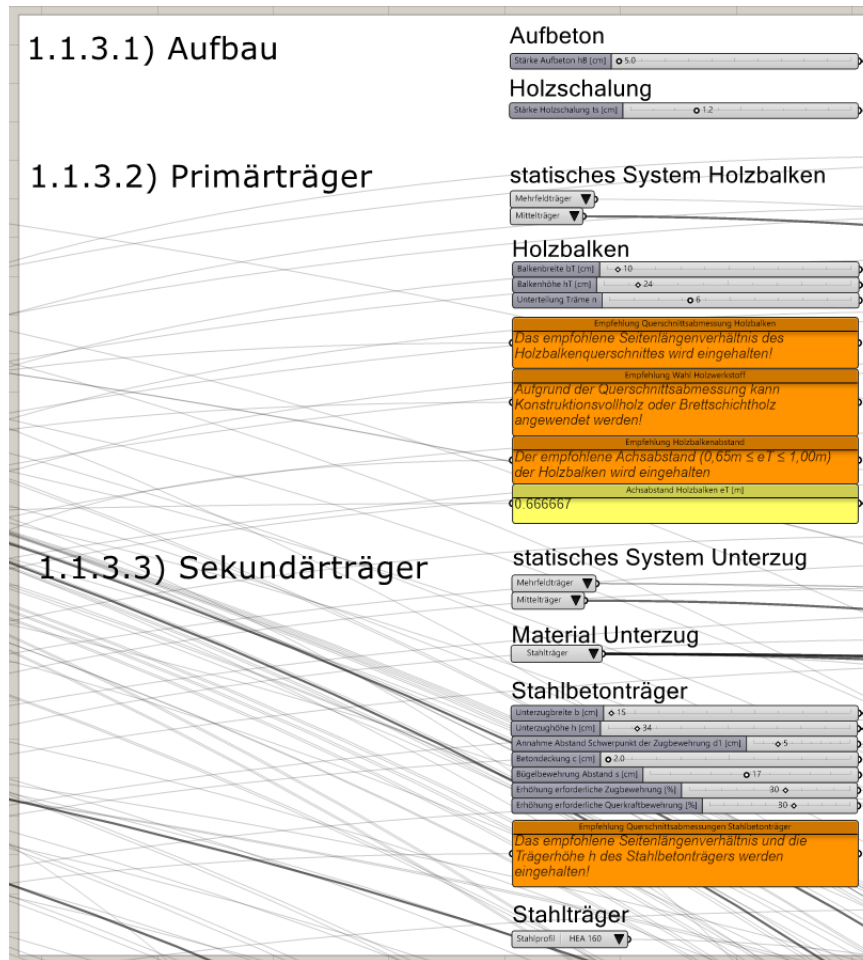


Abb. A.7: Auszug Bedienoberfläche Untergruppe 1.1.3)

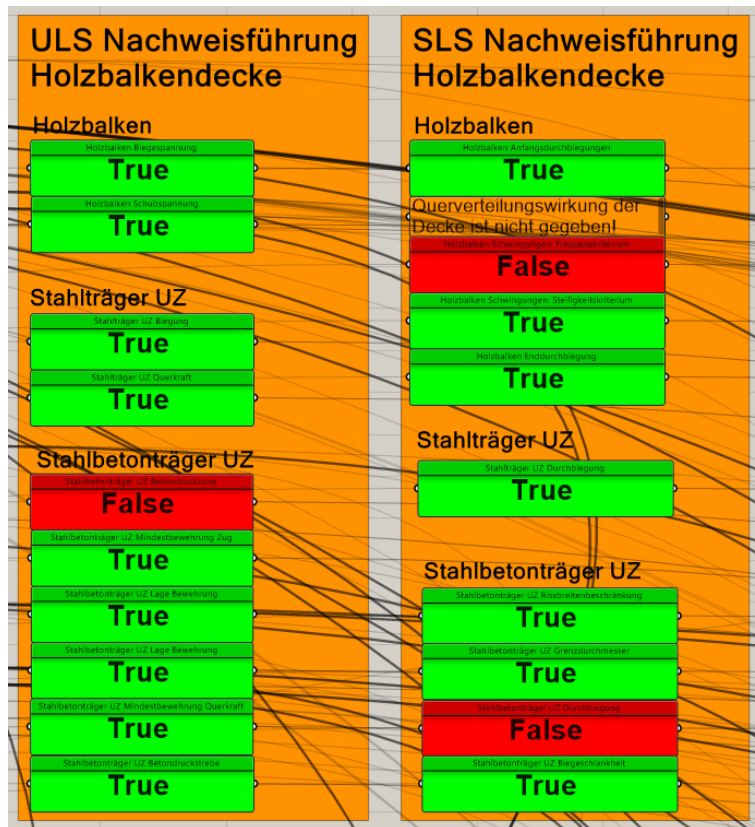


Abb. A.8: Auszug Kontrolle Nachweisführung Untergruppe 1.1.3)

A.4: Flachdecke

Folgender Eingabeprozess ist in der Untergruppe 1.1.3) *Eingabe und Ergebnisse der Nachweise Flachdecke* vorzunehmen:

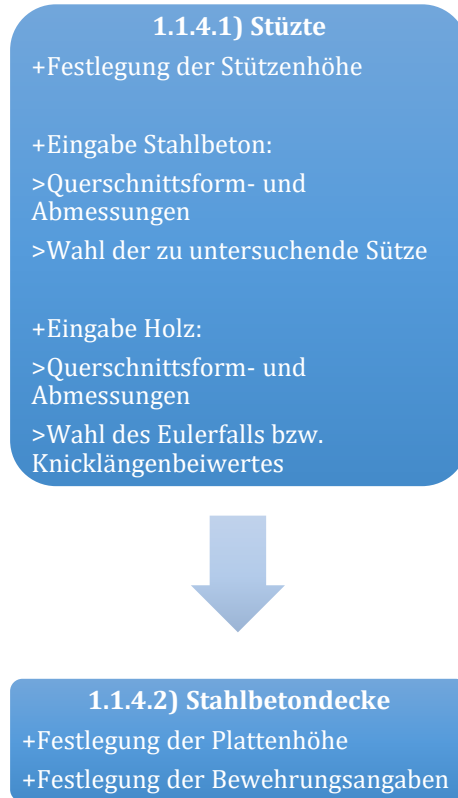


Abb. A.9: Ablauf Benutzereingabe Untergruppe 1.1.4)

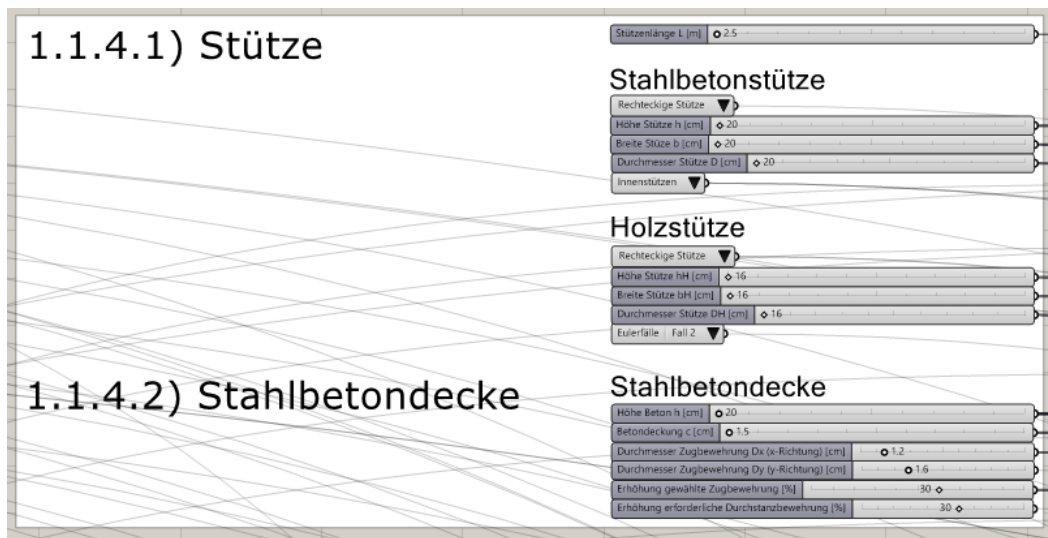


Abb. A.10: Auszug Bedienoberfläche Untergruppe 1.1.4)

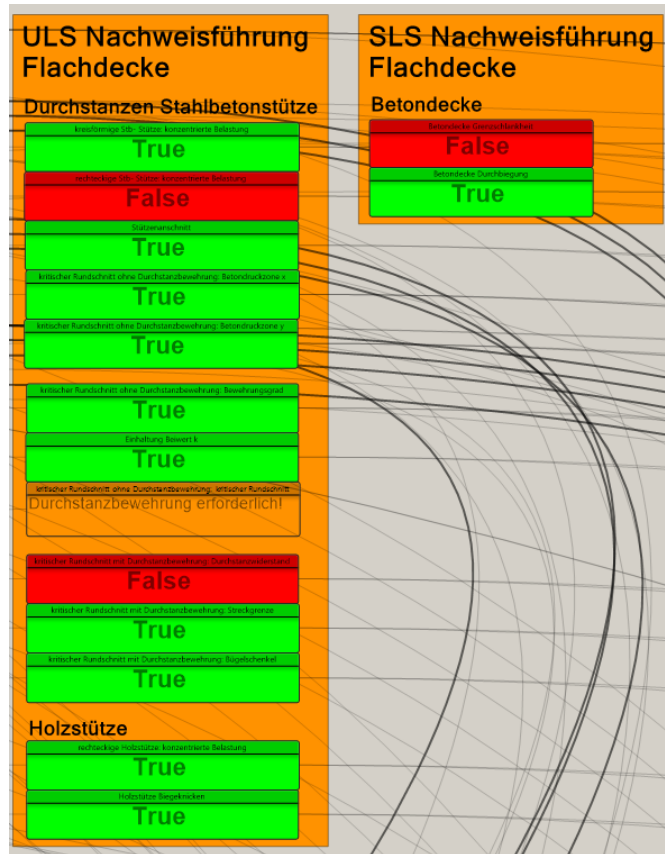


Abb. A.11: Auszug Kontrolle Nachweisführung Untergruppe 1.1.4)

A.5: Übersicht und Beurteilung

Nach Abschluss der Parametereingabe aus Anhang A.1 bis A.4, sind die Auswertungen in Gruppe 7.1) *Auswertung der Deckensysteme* angeführt. In der Untergruppe 7.1.1) *Gegenüberstellung der berechneten Kennwerte* werden laut Abbildung A.12 die maßgebenden Berechnungskennwerte und die Bekanntgabe des jeweils günstigsten Deckentragsystems aufgelistet.

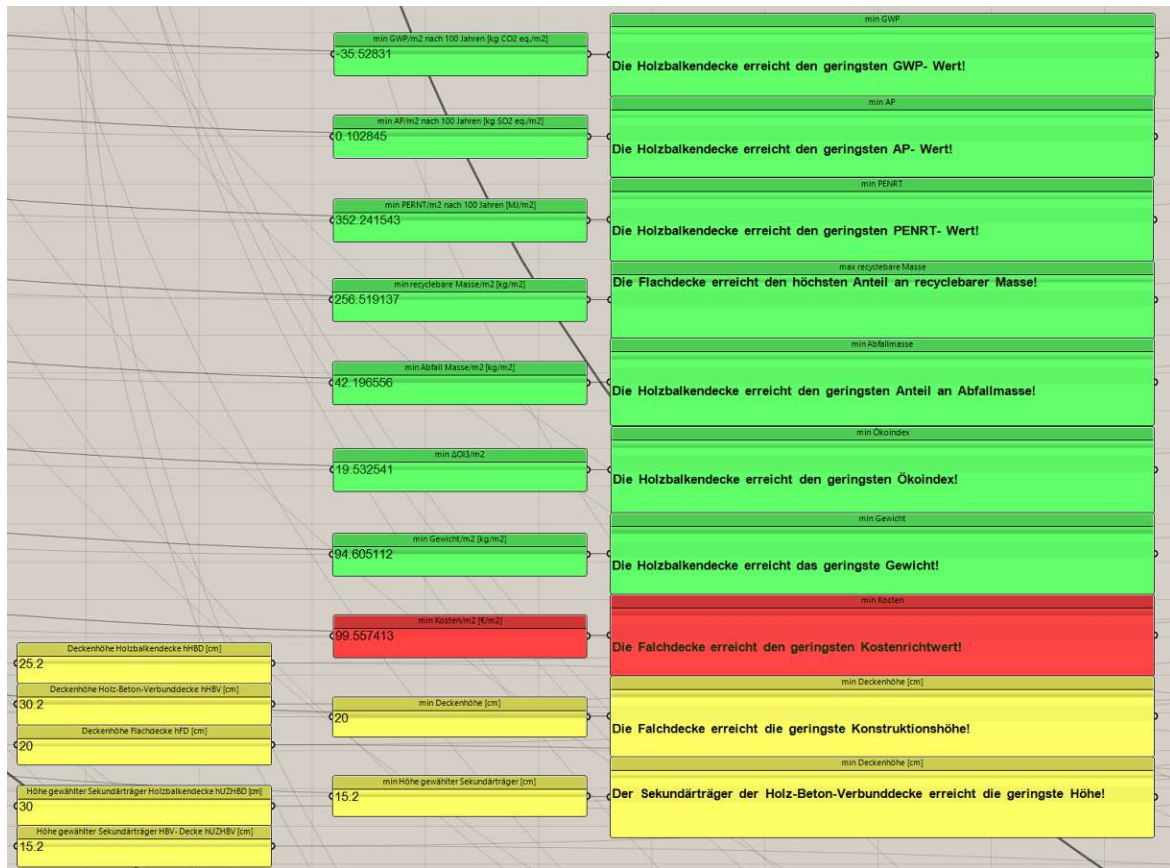


Abb. A.12: Auszug Auswertung Untergruppe 7.1.1)

Die Vorgehensweise der Beurteilung des Optimierungserfolges wurde im Kapitel 5.4 bereits erläutert.

In Abbildung A.13 ist ein Auszug der Untergruppe 7.1.2) *Beurteilung der Optimierungspotentiale des ausgewählten Untersuchungsfall* anhand der Optimierungskennzahl dargestellt.

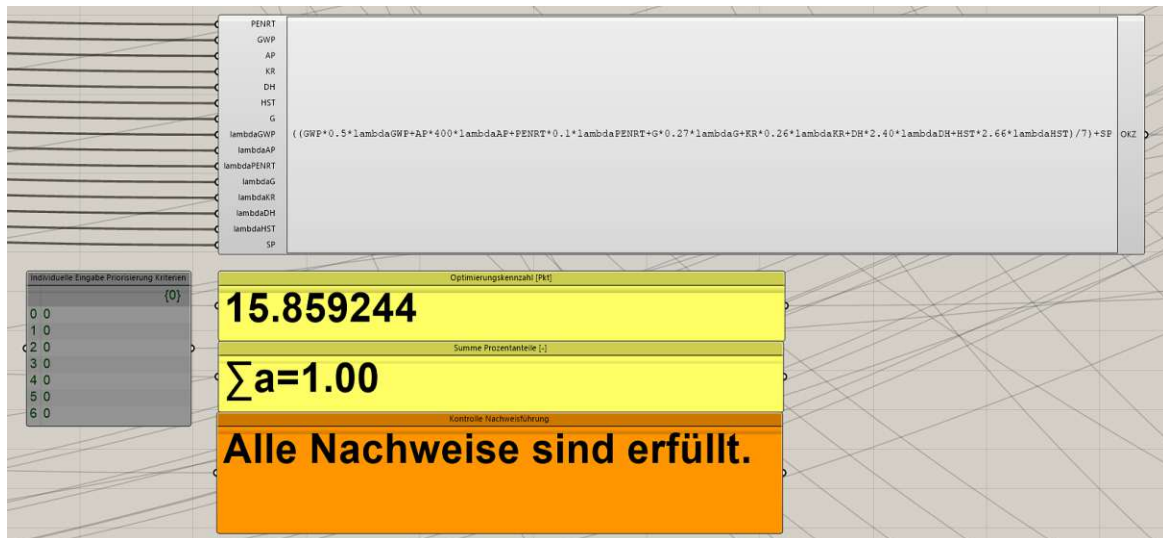


Abb. A.13: Auszug Auswertung Untergruppe 7.1.2)

Das Optimierungsgebiet kann entweder durch die Festlegung eines Untersuchungsfalles in der Untergruppe 1.1.1) oder durch die manuelle Eingabe der λ - Anteile festgelegt werden.

Die Eingabe der Anteile ist in dem grauen Panel (vgl. Abbildung A.13) durchzuführen. Hierbei ist in der Untergruppe 1.1.1) der Zeile 1.1.1.8) *Optimierung: Wahl des Untersuchungsfalles* im Dropdownmenü „manuelle Eingabe der Anteile“ auszuwählen.

Dabei gilt:

Index 0 $\hat{=}$ λ_{GWP}

Index 1 $\hat{=}$ λ_{AP}

Index 2 $\hat{=}$ λ_{PENRT}

Index 3 $\hat{=}$ λ_{GW}

Index 4 $\hat{=}$ λ_{KR}

Index 5 $\hat{=}$ λ_{DH}

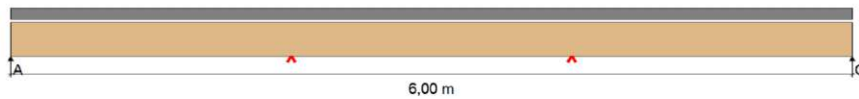
Index 6 $\hat{=}$ λ_{HST}

Es wird auf die Erfüllung der Nachweisführung und der Summe der Anteile hingewiesen.

Anhang B- Verbindungsmittelwahl der Holz-Beton-Verbunddecke

In diesem Anhang sind Auszüge der Ermittlung der Verbindungsmittelwahl aus dem EDV- Programm SFSintec¹⁰⁰, welche im Kapitel 4.5 erläutert wurden, angeführt.

System unterstützt!



Statisches System - Schnitt

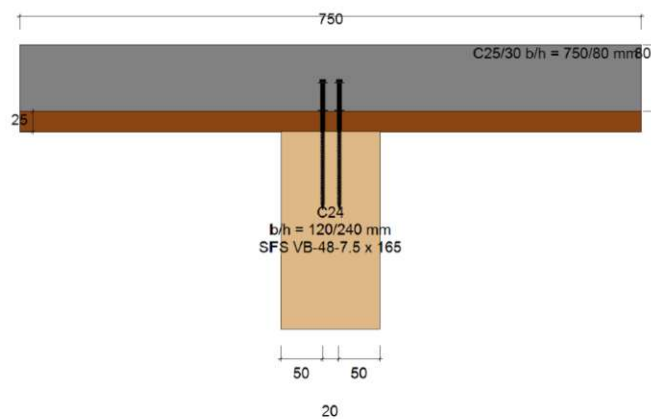


Abb. B.1: Auszug Ansicht und Schnitt

¹⁰⁰ SFS intec AG SFSintec [Software]. <https://de.sfs.com/downloads/holzbau> [online 13.11.2022]

Bemessung eines Holz-Beton-Verbundträgers nach Eurocode 5

Systemangaben zum Holzträger

Breite [mm]	Höhe [mm]	Stützweite [m]	I_y [cm ⁴]	W_y [cm ³]	A [cm ²]	Festigkeitsklasse
120	240	6,0	13824,0	1152,0	288,0	C24 nach Eurocode 5 DE
Nutzungsstufe: 1						

Systemangaben zur Betonplatte

Breite* [mm]	Dicke [mm]	I_y [cm ⁴]	W_y [cm ³]	A [cm ²]	Festigkeitsklasse	Schalung [mm]
750	80	3200,0	800,0	600,0	C25/30	25,0
*) mitwirkende Plattenbreite nach DIN 1045 / EN 1991 / Sia 262						

Charakt. Festigkeitswerte des Holzträgers nach Eurocode 5 DE

$E_{mean, t=0}$ [N/mm ²]	$E_{mean, t=∞}$ [N/mm ²]	$f_{m, k}$ [N/mm ²]	$f_{t, k}$ [N/mm ²]	$f_{t, 90, k}$ [N/mm ²]	$f_{c, 0, k}$ [N/mm ²]	$f_{c, 90, k}$ [N/mm ²]	$f_{v, k}$ [N/mm ²]
11000	6875	24,0	14,5	0,40	21,0	2,5	4,0

Modifikation

Nutzungsstufe	k_{mod} ständig	k_{mod} lang	k_{mod} mittel	k_{mod} kurz	k_{mod} sehr kurz	γ_M	k_{cr}
1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	1,30	0,500
2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	1,30	0,500
3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90	1,30	0,500

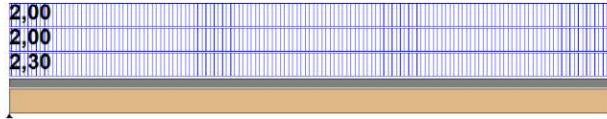
Abb. B.2: Auszug Angaben

Projekt: Beispieldecke Verbindungsmittelwahl

1

Charakt. Einwirkungen auf das System

e = 0,75m



Charakt. Einwirkungen auf das System

LF	Lasttyp	Einwirkungsdauer	Betrag [kN, kN/m ²]	Länge [m]	Position [m]	Modifikation	ψ_0	ψ_1	ψ_2	Herkunft
1	Gleichlast	ständig	2,30			0,60	1	1	1	Eigenlast gk1
2	Gleichlast	ständig	2,00			0,60	1	1	1	gk2
3	Gleichlast	mittel	2,00			0,80	0,7	0,5	0,3	qk

Endschwindmaß = -0,50

Bemessungswerte der Schnittgrößen zum Zeitpunkt t=0

Maßgebende Lastkombination::

1,35*(LF1+LF2) (Nachweis der Biegespannungen)

1,35*(LF1+LF2)+1,5*LF3 (Nachweis der Schubspannungen)

x [m]	Gurtkraft [kN]	Momente im Beton [kNm]	Momente im Holzträger [kNm]	Querkraft im Holz [kN]	Schubfluss [kN/m]
0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	71,08
0,30	13,91	0,45	0,70	17,83	68,88
0,60	27,06	0,80	1,25	15,85	63,75
0,90	39,03	1,08	1,69	13,87	57,06
1,20	49,58	1,32	2,05	11,89	49,55
1,50	58,60	1,51	2,35	9,91	41,61
1,80	66,02	1,66	2,58	7,92	33,44
2,10	71,82	1,78	2,77	5,94	25,14
2,40	75,97	1,86	2,90	3,96	16,79
2,70	78,46	1,91	2,97	1,98	8,40
3,00	79,29	1,92	3,00	0,00	0,00
3,30	78,46	1,91	2,97	-1,98	-8,40
3,60	75,97	1,86	2,90	-3,96	-16,79
3,90	71,82	1,78	2,77	-5,94	-25,14
4,20	66,02	1,66	2,58	-7,92	-33,44
4,50	58,60	1,51	2,35	-9,91	-41,61
4,80	49,58	1,32	2,05	-11,89	-49,55
5,10	39,03	1,08	1,69	-13,87	-57,06
5,40	27,06	0,80	1,25	-15,85	-63,75
5,70	13,91	0,45	0,70	-17,83	-68,88
6,00	0,00	0,00	0,00	-19,81	-71,08

Abb. B.3: Auszug Einwirkung und Schnittgrößen

Projekt: Beispieldecke Verbindungsmittelwahl**1**Bemessungswerte der Schnittgrößen zum Zeitpunkt $t=00$

Maßgebende Lastkombination::

1,35*(LF1+LF2) (Nachweis der Biegespannungen)

1,35*(LF1+LF2)+1,5*LF3 (Nachweis der Schubspannungen)

x [m]	Gurtkraft [kN]	Momente im Beton [kNm]	Momente im Holzträger [kNm]	Querkraft im Holz [kN]	Schubfluss [kN/m]
0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	40,71
0,30	7,08	0,55	1,87	17,83	54,45
0,60	17,05	0,88	3,01	15,85	57,42
0,90	27,59	1,11	3,78	13,87	54,52
1,20	37,54	1,27	4,33	11,89	48,73
1,50	46,34	1,39	4,73	9,91	41,52
1,80	53,70	1,48	5,04	7,92	33,62
2,10	59,51	1,55	5,27	5,94	25,39
2,40	63,69	1,59	5,43	3,96	16,99
2,70	66,20	1,62	5,53	1,98	8,51
3,00	67,04	1,63	5,56	0,00	0,00
3,30	66,20	1,62	5,53	-1,98	-8,51
3,60	63,69	1,59	5,43	-3,96	-16,99
3,90	59,51	1,55	5,27	-5,94	-25,39
4,20	53,70	1,48	5,04	-7,92	-33,62
4,50	46,34	1,39	4,73	-9,91	-41,52
4,80	37,54	1,27	4,33	-11,89	-48,73
5,10	27,59	1,11	3,78	-13,87	-54,52
5,40	17,05	0,88	3,01	-15,85	-57,42
5,70	7,08	0,55	1,87	-17,83	-54,45
6,00	0,00	0,00	0,00	-19,81	-40,71

Bemessungswerte der Holzfestigkeit (EN 1995-1-1:2004)

Maßgebende Lastkombination: 1,35*(LF1+LF2) / 1,35*(LF1+LF2)+1,5*LF3

Fkl.	k_{mod}	γ_M	$f_{m,d}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,d}$ [N/mm ²]	$f_{c,0,d}$ [N/mm ²]	$f_{v,d}$ [N/mm ²]
C24	0,60/0,80	1,3	11,08	6,69	9,69	2,46

Auflagerkräfte (charakteristisch)

LF	A_k [kN]	B_{1k} [kN]	B_{2k} [kN]	C_k [kN]
1	5,18	0,00	0,00	5,18
2	4,50	0,00	0,00	4,50
3	4,50	0,00	0,00	4,50

Abb. B.4: Auszug Schnittgrößen und Bemessungswerte

Projekt: Beispieldecke Verbindungsmittelwahl

1

Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit
zum Zeitpunkt $t=0$

x [m]	$\sigma_{m,d}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,d}$ [N/mm ²]	$\sigma_{t,d}$ [N/mm ²]	Nachweis der Randspannung oben	Nachweis der Randspannung unten	OK?
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	✓
3,00	2,60	-2,75	2,75	0,18	0,65	✓
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	✓

Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit
zum Zeitpunkt $t=\infty$

x [m]	$\sigma_{m,d}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,d}$ [N/mm ²]	$\sigma_{t,d}$ [N/mm ²]	Nachweis der Randspannung oben	Nachweis der Randspannung unten	OK?
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	✓
3,00	4,83	-2,33	2,33	0,09	0,78	✓
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	✓

Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit
Schubspannungen zum Zeitpunkt $t=0$ und $t=\infty$

x [m]	$V_{d,0}$ [kN]	$\tau_{v,d,0}$ [N/mm ²]	Nachweis $t=0$	$V_{d,\infty}$ [kN]	$\tau_{v,d,\infty}$ [N/mm ²]	Nachweis $t=\infty$	OK?
0,00	19,81	2,06	0,84	19,81	2,06	0,84	✓
6,00	-19,81	-2,06	0,84	-19,81	-2,06	0,84	✓

$b(\text{eff}) = k_{cr} \cdot b = 0,500 \cdot 120,0 = 60,00 \text{ mm}$

Abb. B.5: Auszug Nachweisführung

Anhang C- Ermittlung von DH_{min} und DH_{max} und Versagensfälle

C.1 Parameter und Berechnung der Deckenhöhen

Tab: C.1: Ermittlung DH_{min}

Eingabeelemente	Holzbalkendecke	Sekundärträger Holzbalkendecke	HBV- Decke	Sekundärträger HBV- Decke	Flachdecke	Einheit
Stützweiten	4x4m	4x4m	4x4m	4x4m	4x4m	m
Bodenbelag	Parkett	Parkett	Parkett	Parkett	Parkett	-
Dicke Bodenbelag	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	cm
Dicke Estrich	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	cm
ständige Last gk2	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	kN/m2
veränderliche Last qk	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	kN/m2
Betonfestigkeitsklasse	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	-
Baustahl	Bst 500	Bst 500	Bst 500	Bst 500	Bst 500	-
Durchmesser Bügelbewehrung	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	mm
Durchmesser Zugbewehrung	26,00	26,00	26,00	26,00	16,00	mm
Typ Bewehrungsgitter	-	-	AQ 70	AQ 70	-	-
Stahlsorte	S235	S235	S235	S235	-	-
Holzfestigkeitsklasse	C24 (KVH)	C24 (KVH)	C24 (KVH)	C24 (KVH)	-	-
Trittschalldämmung	1,50	1,50	-	-	1,50	cm
Schüttung	4,00	4,00	-	-	4,00	cm
Holzschalung	1,20	1,20	1,20	1,20	-	cm
statische Systeme von PT und ST	EF+MF, RT+MT	EF+MF, RT+MT	EF+MF, RT+MT	EF+MF, RT+MT	-	-
Balkenbreite (KVH)	16,00	-	10,00	-	-	cm
Balkenhöhe (KVH)	24,00	-	24,00	-	-	cm
Achsabstand Balken	0,67	-	0,67	-	-	m
Aufbeton	-	-	5,00	-	-	cm
Unterzugbreite Stb	15,00	-	15,00	-	-	cm
Unterzughöhe Stb	30,00	30,00	34,00	34,00	-	cm
Ann Abstand Zugbewehrung d1	5,00	-	5,00	-	-	cm
Betondeckung	2,00	-	2,00	-	-	cm
Abstand Bügelbewehrung s	17,00	-	17,00	-	-	cm
Erhöhung Zugbewehrung	30,00	-	30,00	-	-	%
Erhöhung Querkraftbewehrung	30,00	-	30,00	-	-	%
Stahlprofil/Profilhöhe	HEA 160	15,20	HEA 160	15,20	-	cm
Stützenlänge	-	-	-	-	2,50	m
Höhe Stahlbetonstütze	-	-	-	-	20,00	cm
Breite Stahlbetonstütze	-	-	-	-	20,00	cm
Durchmesser Stahlbetonstütze	-	-	-	-	20,00	cm
Höhe Holzstütze	-	-	-	-	16,00	cm
Breite Holzstütze	-	-	-	-	16,00	cm
Durchmesser Holzstütze	-	-	-	-	16,00	cm
Höhe Stahlbetondecke	-	-	-	-	20,00	cm
Betondeckung Stb- Decke	-	-	-	-	1,50	cm
Dx Zugbewehrung Stb- Decke	-	-	-	-	1,20	cm
Dy Zugbewehrung Stb-Decke	-	-	-	-	1,60	cm
Erhöhung Zugbewehrung Stb-Decke	-	-	-	-	30,00	%
Erhöhung Durchstanzbew. Stb-Decke	-	-	-	-	30,00	%
Konstruktionshöhe gesamt	25,20	15,20	30,20	15,20	20,00	cm

Abkürzungen:

EF	Einfeldträger
MF	Mehrfeldträger
RT	Randträger
MT	Mittelträger
PT	Primärträger
ST	Sekundärträger

Tab: C.2: Ermittlung DH_{max}

Eingabelemente	Holzbalkendecke	Sekundärträger Holzbalkendecke	HBV- Decke	Sekundärträger HBV- Decke	Flachdecke	Einheit
Stützweiten	8x8m	8x8m	8x8m	8x8m	8x8m	m
Bodenbelag	Fliesen	Fliesen	Fliesen	Fliesen	Fliesen	-
Dicke Bodenbelag	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	cm
Dicke Estrich	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	cm
ständige Last gk2	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	kN/m2
veränderliche Last qk	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	kN/m2
Betonfestigkeitsklasse	C40/50	C40/50	C40/50	C40/50	C40/50	-
Baustahl	Bst 550	Bst 550	Bst 550	Bst 550	Bst 550	-
Durchmesser Bügelbewehrung	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	mm
Durchmesser Zugbewehrung	30,00	30,00	30,00	30,00	16,00	mm
Typ Bewehrungsgitter	-	-	AQ 70	AQ 70	-	-
Stahlsorte	S355	S355	S355	S355	-	-
Holzfestigkeitsklasse	GL 26h (BSH)	GL 26h (BSH)	GL 26h (BSH)	GL 26h (BSH)	-	-
Trittschalldämmung	6,00	6,00	-	-	6,00	cm
Schüttung	8,00	8,00	-	-	8,00	cm
Holzschalung	4,00	4,00	4,00	4,00	-	cm
statische Systeme von PT und ST	EF+MF, RT+MT	EF+MF, RT+MT	EF+MF, RT+MT	EF+MF, RT+MT	-	-
Balkenbreite (BSH)	28,00	-	28,00	-	-	cm
Balkenhöhe (BSH)	64,00	-	100,00	-	-	cm
Achsabstand Balken	0,67	-	0,67	-	-	m
Aufbeton	-	-	15,00	-	-	cm
Untertzugbreite Stb	40,00	-	46,00	-	-	cm
Untertzughöhe Stb	84,00	84,00	94,00	94,00	-	cm
Ann Abstand Zugbewehrung d1	5,00	-	5,00	-	-	cm
Betondeckung	2,00	-	2,00	-	-	cm
Abstand Bügelbewehrung s	17,00	-	17,00	-	-	cm
Erhöhung Zugbewehrung	30,00	-	30,00	-	-	%
Erhöhung Querkraftbewehrung	30,00	-	30,00	-	-	%
Stahlprofil/ Profilhöhe	HEB 500	50,00	HEB 600	60,00	-	cm
Stützenlänge	-	-	-	-	5,00	m
Höhe Stahlbetonstütze	-	-	-	-	60,00	cm
Breite Stahlbetonstütze	-	-	-	-	60,00	cm
Durchmesser Stahlbetonstütze	-	-	-	-	50,00	cm
Höhe Holzstütze	-	-	-	-	34,00	cm
Breite Holzstütze	-	-	-	-	34,00	cm
Durchmesser Holzstütze	-	-	-	-	38,00	cm
Höhe Stahlbetondecke	-	-	-	-	35,00	cm
Betondeckung Stb- Decke	-	-	-	-	1,50	cm
Dx Zugbewehrung Stb- Decke	-	-	-	-	1,20	cm
Dy Zugbewehrung Stb-Decke	-	-	-	-	1,60	cm
Erhöhung Zugbewehrung Stb-Decke	-	-	-	-	50,00	%
Erhöhung Durchstanzbew. Stb-Decke	-	-	-	-	50,00	%
Konstruktionshöhe gesamt	68,00	84,00	104,00	94,00	35,00	cm

Abkürzungen:

EF	Einfeldträger
MF	Mehrfeldträger
RT	Randträger
MT	Mittelträger
PT	Primärträger
ST	Sekundärträger

C.2 Statische Systemkombinationen und deren Versagensfälle

In Tabelle C.3 werden die Versagensszenarien während der Ermittlung von DH_{\min} angeführt.

In Tabelle C.4 werden die Versagensszenarien während der Ermittlung von DH_{\max} angeführt.

Tab. C.3: Statische Systemkombinationen und erstmaliger Versagensfall während der Parametrisierung für die geringsten Decken- und Sekundärträgerhöhen

Deckensysteme	Einfeldträger + Randträger	Mehrfeldträger + Randträger	Einfeldträger + Mittelträger	Mehrfeldträger + Mittelträger
Holzbalkendecke	SLS: Steifigkeitskriterium	SLS: Steifigkeitskriterium	SLS: Steifigkeitskriterium	SLS: Steifigkeitskriterium
Holzträger	ULS: Biegung SLS: Durchbiegung	ULS: Biegung SLS: Durchbiegung	ULS: Biegung	ULS: Biegung
STB- Träger	SLS: Biegeschlankheit	SLS: Biegeschlankheit ULS: Betondruckzone	SLS: Biegeschlankheit	ULS: Betondruckzone
HBV- Decke				
Holzbalcken	ULS: Längsspannungen Beton (Zug $t=\infty$)	ULS: Längsspannungen Beton (Zug $t=\infty$)	ULS: Längsspannungen Beton (Zug $t=0$)	ULS: Schub Fuge (Holz $t=\infty$)
Stahlträger	ULS: Biegung SLS: Durchbiegung	ULS: Biegung SLS: Durchbiegung	ULS: Biegung	ULS: Biegung und Querkraft
STB- Träger	SLS: Biegeschlankheit	ULS: Betondruckzone	ULS: Betondruckzone	ULS: Betondruckzone
Flachdecke				
Stahlbetonplatte	kritischer Rundschnitt ohne Durchstanzbewehrung: Grenzwert für Beiwert k			

Tab. C.4: Statische Systemkombinationen und erstmaliger Versagensfall während der Parametrisierung für die höchsten Decken- und Sekundärträger

Deckensysteme	Einfeldträger + Randträger	Mehrfeldträger + Randträger	Einfeldträger + Mittelträger	Mehrfeldträger + Mittelträger
Holzalkendecke				
Holzbalken	SLS: Frequenzkriterium	SLS: Frequenzkriterium	SLS: Frequenzkriterium	SLS: Frequenzkriterium
Stahlträger	ULS: Biegung	ULS: Biegung	ULS: Biegung	SLS: Durchbiegung
STB- Träger	SLS: Durchbiegung	SLS: Durchbiegung	SLS: Grenzdurchmesser	SLS: Grenzdurchmesser
HBV- Decke				
Holzbalken	SLS: Verformung $t=\infty$	SLS: Verformung $t=\infty$	SLS: Verformung $t=\infty$	ULS: Schub Fuge (Holz $t=0$)
Stahlträger	ULS: Biegung SLS: Durchbiegung	ULS: Biegung SLS: Durchbiegung	ULS: Biegung	ULS: Querkraft
STB- Träger	SLS: Durchbiegung	SLS: Durchbiegung	ULS: Betondruckzone	ULS: Betondruckstrebe
Flachdecke				
Stahlbetonplatte	kritischer Rundschnitt mit Durchstanzbewehrung; Durchstanzwiderstand			

Anhang D- Auswertung der Kriterien für DH_{min} und DH_{max}

Tab: D.1: Auswertung der Kriterien

	DH _{min} (Mindestmaß Decke/Träger)			DH _{max} (Höchstmaß Decke/Träger)			Einheit
	Holzbalken- decke	HBV- Decke	Flachdecke	Holzbalken- decke	HBV- Decke	Flachdecke	
Gewicht Holzschalung	7,80	7,80	-	26,00	26,00	-	kg/m ²
Gewicht Konstruktionsvollholz	28,22	17,64	-	-	-	-	kg/m ²
Gewicht Brettschichtholz	-	-	-	129,58	202,48	-	kg/m ²
Gewicht Aufbeton	-	125,00	-	-	375,00	-	kg/m ²
Gewicht Bewehrung Aufbeton	-	12,60	-	-	12,13	-	kg/m ²
Gewicht Beton Stahlbetonträger	56,25	63,75	-	210,00	270,25	-	kg/m ²
Gewicht Bewehrung Stahlbetonträger	2,02	3,75	-	7,00	13,98	-	kg/m ²
Gewicht Stahlprofil	15,22	15,22	-	46,83	52,98	-	kg/m ²
Gewicht Betondecke	-	-	500,00	-	-	875,00	kg/m ²
Gewicht Bewehrung Betondecke	-	-	12,87	-	-	45,88	kg/m ²
Summe maßgebendes Gewicht	51,24	178,26	512,87	372,58	899,84	920,88	kg/m²
Kostenrichtwert Holzschalung	11,40	11,40	-	38,00	38,00	-	€/m ²
Kostenrichtwert Konstruktionsvollholz	87,36	54,60	-	-	-	-	€/m ²
Kostenrichtwert Brettschichtholz	-	-	-	378,56	591,50	-	€/m ²
Kostenrichtwert Aufbeton	-	5,00	-	-	15,00	-	€/m ²
Kostenrichtwert Bewehrung Aufbeton	-	9,06	-	-	9,06	-	€/m ²
Kostenrichtwert Verbindungsmittel Aufbeton	-	65,63	-	-	60,94	-	€/m ²
Kostenrichtwert Beton Stahlbetonträger	2,25	2,55	-	8,40	10,81	-	€/m ²
Kostenrichtwert Bewehrung Stahlbetonträger	3,02	5,62	-	10,50	20,92	-	€/m ²
Kostenrichtwert Schalung Stahlbetonträger	9,38	10,38	-	13,00	14,63	-	€/m ²
Kostenrichtwert Stahlprofil	60,88	60,88	-	187,30	211,90	-	€/m ²
Kostenrichtwert Betondecke	-	-	20,00	-	-	35,00	€/m ²
Kostenrichtwert Schalung Betondecke	-	-	60,00	-	-	58,75	€/m ²
Kostenrichtwert Bewehrung Betondecke	-	-	19,30	-	-	68,39	€/m ²
Summe maßgebende Kostenrichtwerte	159,64	206,57	99,30	603,86	926,40	162,14	€/m²
GWP Holzschalung	-8,98	-8,98	-	-29,94	-29,94	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Konstruktionsvollholz	-34,87	-21,79	-	-	-	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Brettschichtholz	-	-	-	-160,10	-250,15	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Aufbeton	-	12,34	-	-	37,03	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Bewehrung Aufbeton	-	14,96	-	-	14,41	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Beton Stahlbetonträger	5,55	6,29	-	20,74	26,69	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Bewehrung Stahlbetonträger	2,39	4,45	-	8,31	16,57	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Stahlprofil	18,08	18,08	-	55,62	62,92	-	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Betondecke	-	-	49,37	-	-	86,40	kg CO ₂ eq./m ²
GWP Bewehrung Betondecke	-	-	15,28	-	-	54,15	kg CO ₂ eq./m ²
Summe maßgebendes GWP	-35,91	7,27	64,65	-134,42	-165,73	140,55	kg CO₂ eq./m²
AP Holzschalung	0,0163	0,0163	-	0,0545	0,0545	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Konstruktionsvollholz	0,0665	0,0416	-	-	-	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Brettschichtholz	-	-	-	0,3054	0,4772	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Aufbeton	-	0,0224	-	-	0,0671	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Bewehrung Aufbeton	-	0,0536	-	-	0,0516	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Beton Stahlbetonträger	0,0101	0,0114	-	0,0376	0,0484	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Bewehrung Stahlbetonträger	0,0086	0,0159	-	0,0297	0,0593	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Stahlprofil	0,0609	0,0609	-	0,1874	0,2121	-	kg SO ₂ eq./m ²
AP Betondecke	-	-	0,0895	-	-	0,1566	kg SO ₂ eq./m ²
AP Bewehrung Betondecke	-	-	0,0547	-	-	0,1937	kg SO ₂ eq./m ²
Summe maßgebendes AP	0,10	0,16	0,14	0,55	0,86	0,35	kg SO₂ eq./m²
PERNT Holzschalung	66,74	66,74	-	222,47	222,47	-	MJ/m ²
PERNT Konstruktionsvollholz	208,62	130,89	-	-	-	-	MJ/m ²
PERNT Brettschichtholz	-	-	-	957,82	1496,59	-	MJ/m ²
PERNT Aufbeton	-	80,25	-	-	240,76	-	MJ/m ²
PERNT Bewehrung Aufbeton	-	220,39	-	-	212,20	-	MJ/m ²
PERNT Beton Stahlbetonträger	36,11	40,93	-	134,83	173,51	-	MJ/m ²
PERNT Bewehrung Stahlbetonträger	35,24	65,54	-	122,40	243,94	-	MJ/m ²
PERNT Stahlprofil	266,18	266,18	-	818,92	926,47	-	MJ/m ²
PERNT Betondecke	-	-	321,01	-	-	561,78	MJ/m ²
PERNT Bewehrung Betondecke	-	-	225,05	-	-	797,38	MJ/m ²
Summe maßgebendes PERNT	346,71	604,74	546,06	1999,21	3098,49	1359,16	MJ/m²