

Fachgebiet Tragwerk und Material  
des Fachbereiches Architektur  
der Technischen Universität Kaiserslautern

**Holz-Beton-Verbund im Geschossdeckenbau –  
Ökologische und technische Optimierung durch  
ganzheitliche Betrachtung**

Abschlussbericht

gefördert unter dem AZ: 35611/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf & Dipl.-Ing. Christian Weisgerber &  
M.Eng. Yannick Braun

Dezember 2022

Fachgebiet Tragwerk und Material  
des Fachbereiches Architektur  
der Technischen Universität Kaiserslautern

**Holz-Beton-Verbund im Geschossdeckenbau –  
Ökologische und technische Optimierung durch  
ganzheitliche Betrachtung**

Abschlussbericht

gefördert unter dem AZ: 35611/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf & Dipl.-Ing. Christian Weisgerber &  
M.Eng. Yannick Braun

Dezember 2022

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis.....	2
Verzeichnis von Abkürzungen .....	3
Zusammenfassung.....	4
Kapitel 1 Einleitung und Zielsetzung.....	5
Kapitel 2 Entwicklung des Optimierungstools .....	7
2.1 Theoretische Grundlagen.....	7
2.1.1 Berechnungsmethoden für zusammengesetzte Querschnitte.....	7
2.1.2 HBV-Bemessung.....	10
2.1.3 Zielgrößen.....	15
2.2 Entwicklung Tool.....	18
2.2.1 Funktionsweise des Tools .....	18
2.2.2 Variante I und II.....	21
2.2.3 Variante III.....	22
2.2.4 Vergleichsrechnung.....	24
Kapitel 3 Technische und Ökologische Optimierung.....	26
3.1 Randbedingungen.....	26
3.2 Parameterstudie I: Vergleich Zielgrößen .....	28
3.3 Parameterstudie II: Vergleich Betonstärke .....	33
3.4 Parameterstudie III: Optimierte Systeme .....	35
3.5 Parameterstudie IV: Vergleich Balkenabstand.....	37
3.6 Parameterstudie V: Vergleich mit konventionellem System.....	39
Kapitel 4 Fazit.....	41
Literaturverzeichnis .....	43
Anhang A Optimierungstool.....	44
Anhang B Parameterstudie.....	49

## Abbildungsverzeichnis

Abb.2.1: Zusammengesetzter Querschnitt nach DIN EN 1995-1-1 [2].....	8
Abb.2.2: HBV-Stabwerkmodell auf Grundlage von [3] .....	9
Abb.2.3: Materialkriechwerte bezüglich des jeweiligen Endwerts [3].....	10
Abb.2.4: Optimierungsschritte mit Galapagos.....	18
Abb.2.5: Definition der Randbedingungen und Materialeigenschaften durch programminterne Schieberegler (links) und Matprops (rechts) .....	19
Abb.2.6: Grundsatz der Optimierung zur Erhaltung der minimierten Zielgröße .....	19
Abb.2.7: Galapagos Ausgabe.....	21
Abb.3.1: Bodenaufbau.....	27
Abb. 3.2: Vergleich Zielgrößen I .....	30
Abb.3.3: Vergleich Zielgrößen II .....	30
Abb.3.4: Variation der Betonstärke .....	34
Abb.3.5: Optimierung ( $K_{ser} = 200 \text{ N/mm/mm}$ ).....	36
Abb.3.6: Querschnittsabmessungen ( $K_{ser} = 200 \text{ N/mm/mm}$ ) mit Spannweite 6 m.....	37
Abb.3.7: Variation des Balkenabstandes .....	38
Abb.3.8: Variation des Balkenabstandes – Diagramme .....	39
Abb.3.9: Vergleich HBV-Decke und STB-PB-Decke.....	40

## Tabellenverzeichnis

Tab.2.1: Zeitabhängiger effektiver Elastizitätsmodul von Holz und Beton in GZT und GZG [4] .....	10
Tab.2.2: Zeitabhängige effektive Verbindungsmittelsteifigkeit in GZT und GZG [4] .....	11
Tab.2.3: Übersicht VM [7].....	14
Tab.2.4: Tragfähigkeit und Steifigkeit VM [7] .....	14
Tab.2.5: GWP der betrachteten Materialien auf Grundlage der Daten aus <i>Ökobaudat</i> [8] ....	15
Tab.2.6: Aktuelle Materialpreise laut der Informationen aus <i>Trapobet</i> [14] und <i>Müller-Beton</i> [15].....	16
Tab.2.7: Baukosten nach [10].....	17
Tab.2.8: Vergleichsrechnung FE-Programm.....	25
Tab.3.1: Eigengewicht Bodenaufbau .....	27
Tab.3.2: Berechnete VM-Abstände in Abhängigkeit des VM anhand von den grundsätzlichen Informationen aus [7].....	28
Tab.3.3: Randbedingungen Parameterstudie I .....	29

## Verzeichnis von Abkürzungen

HBV	Holz-Beton-Verbundbauweise
STB	Stahlbeton
VM	Verbindungsmittel
GWP	Globales Erwärmungspotential
NURBS	Non-uniform rational B-Splines
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
FE	Finite-Element

## Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde ein Tool zur Optimierung von HBV-Decken entwickelt, wobei das Ziel die Minimierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist. Hierfür wurde eine Untersuchungssystematik erarbeitet, anhand welcher die Optimierung durchgeführt werden kann. Im Anschluss wurden mit dem Tool verschiedene Parameterstudien durchgeführt.

Vor der Durchführung der Studien werden die Vor- und Nachteile verschiedener Berechnungsverfahren für HBV-Decken hinsichtlich der Verwendung im Optimierungstool beschrieben. Im Anschluss wird die HBV-Bemessung zum jetzigen Stand der Technik beschrieben. Zuletzt werden verschiedene mögliche Zielgrößen für die Parameterstudien erläutert und deren Bemessungsgröße ermittelt.

Im Anschluss wird im Detail auf die Funktionsweise und schrittweise Erarbeitung des Optimierungstools eingegangen. Hierfür wird vorab das verwendete Programm erklärt und im Anschluss werden die einzelnen Tool-Varianten erläutert und beschrieben, warum diese überarbeitet wurden.

Anhand des entwickelten finalen Tools konnten mehrere Parameterstudien durchgeführt werden. Im Rahmen der ersten beiden Studien werden verschiedene mögliche Zielgrößen und nachfolgend der Einfluss der Betonplattenstärke auf den Holzanteil des Gesamtsystems untersucht. Anhand dieser beiden Untersuchungen konnte die zuvor erläuterte Untersuchungssystematik erarbeitet werden.

Auf Grundlage dieser Systematik wurden in den nachfolgenden Parameterstudien optimierte Systeme entwickelt, der Einfluss des Balkenabstandes untersucht und die Ergebnisse einem konventionellen Tragwerk aus Stahlbeton gegenübergestellt. Als Schlussfolgerung dieser Untersuchungen konnten Empfehlungen bezüglich der Bauteilabmessungen für den Planer erarbeitet werden, wobei diese unter anderem in Form von Diagrammen im Anhang dargestellt sind.

## Kapitel 1 Einleitung und Zielsetzung

Es werden zum jetzigen Zeitpunkt in Deutschland jährliche mehr als 50 Mio. Kubikmeter Transportbeton produziert und verarbeitet, Tendenz steigend [1]. Ein großer Teil davon wird in Deckentragwerken von Gebäuden verbaut. Die hohe Verbreitung dieses Werkstoffes im Geschossdeckenbau ist einfach nachvollziehbar: Stahlbeton ist sehr gut geeignet, die technischen Ansprüche an eine Geschossdecke wie Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Schallschutz zu erfüllen, und dass bei niedrigen Kosten. Außerdem ist es aus der Sicht des Planers eine sehr einfache Bauweise mit standardisierten Berechnungsverfahren, die die Bemessung vereinheitlichen und erleichtern.

Nicht oder nur unwesentlich berücksichtigt werden jedoch die negativen Umweltauswirkungen, die im Zusammenhang mit der Stahlbetonbauweise auftreten. Bei der Produktion des Betons werden große Mengen an CO<sub>2</sub> freigesetzt, die Produktion des Bewehrungsstahls ist energieintensiv und beim Sand, welcher für die Herstellung benötigt wird, handelt es sich um einen immer knapper werdenden Rohstoff.

Holzdecken als alternatives Tragwerk besitzen nur eingeschränkte Anwendungsbereiche. Sobald höhere Anforderungen an Schallschutz und Schwingungsverhalten gestellt werden, genügt häufig eine reine Holzdecke nicht mehr. Die Gebrauchstauglichkeit der Decke ist hierbei häufig bestimmend, sodass zusätzliches Gewicht in Form von Schüttungen benötigt wird bzw. eine höhere Steifigkeit durch größere Querschnittsabmessungen erreicht werden muss. Beides führt zu mehr Materialbedarf und folglich zu einer weniger effizienten und weniger nachhaltigen Tragwerkslösung.

In einer HBV-Decke werden die beiden Materialien hingegen entsprechend ihren Eigenschaften optimal eingesetzt. Der Stahlbetonanteil sorgt zum einen für zusätzliches Eigengewicht, was das Schwingungsverhalten der Decke verbessert und erhöht zum anderen, im Gegensatz zu einer Schüttung, die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Tragwerks, da dieser über VM mit dem Holzanteil schubsteif verbunden ist. Durch die Verbundwirkung beider Materialien lässt sich der Einsatz von Beton und Betonstahl deutlich reduzieren.

Trotz der beschriebenen Vorteile werden für Deckentragwerke nur selten HBV-Lösungen gewählt. Der offensichtlichste Grund sind die sehr niedrigen Fertigungskosten der Stahlbetonbauweise. Da auch heute noch nicht die Umweltfolgekosten dieser Bauweise in Rechnung gestellt werden, wird der Werkstoff Stahlbeton bei nahezu allen neu gebauten Deckenkonstruktionen verwendet. Hier bedarf es einer politischen Veränderung.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die unklare Normung, die aufwendige Planung und Bemessung sowie fehlende Erfahrung bei der Realisierung von HBV-Systemen. Zudem stehen bei der Wahl des Deckensystems zahlreiche mögliche Konstruktionen wie Rippen-, Balken-, Kasten-, Hohlkasten-, Brettstapel- und Brettsperrholzdecke zur Verfügung. Neben der geeigneten Bauweise muss auch das passende Verbundmittel für den Schubverbund zwischen Beton und Holz gewählt werden. Hier stehen Kerfen, Schrauben, eingeklebte Stahlbleche sowie eigens entwickelte stiftförmige Verbundmittel mit bauaufsichtlichen Zulassungen zur Verfügung. Hinzu kommt, dass ein breites Wissen über den Werkstoff Holz und über die Wechselwirkung zwischen Beton und Holz benötigt wird. Der Planer steht vor der Aufgabe aus dieser großen Anzahl an Möglichkeiten eine Kombination zu wählen, die den Anforderungen an Tragverhalten, Gebrauchstauglichkeit, Schallschutz, Brandschutz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit gerecht wird.

Um die Verbreitung der Holz-Beton-Verbund-Bauweise (HBV) im Geschossdeckenbau zu steigern, ist die oben erwähnte Problemstellung gesamtheitlich zu erörtern und die Ergebnisse daraus Planern in einer einfachen Form an die Hand zu geben.

Zur Umsetzung dieses Zieles wird zunächst aufgrund der hohen Anzahl und der Interaktion der veränderlichen Randbedingungen für die erforderlichen Parameterstudien ein Bemessungs- und Bilanzierungstools entwickelt, das alle Wechselwirkungen berücksichtigt, indem es jede Veränderung bei der Eingabe unmittelbar erfasst, die erforderlichen Nachweise automatisch führt, die Ökobilanz der gefundenen Systeme selbst erstellt. Der Schwerpunkt der Optimierung ist die Reduktion des Umwelteinflusses (GWP) der Deckenkonstruktion, wobei sich auf HBV-Balkendecken fokussiert wird. Es sollen verschiedene Systeme überprüft und bewertet werden, um dann die effizientesten Varianten mithilfe des entwickelten Optimierungstools herauszustellen. Dies führt insgesamt zu einer Vereinfachung der HBV-Bauweise und trägt damit zu ihrer Verbreitung bei.



## Kapitel 2 Entwicklung des Optimierungstools

### 2.1 Theoretische Grundlagen

Der Umfang der Berechnung von HBV-System ist größer als der von vergleichbaren Tragwerken aus Stahlbeton oder aus Holz. Es werden zur Schnittgrößen- und Verformungsberechnung eigene mechanische Modelle bzw. Methoden benötigt und es müssen die Materialeigenschaften der beiden Verbundwerkstoffe im Detail berücksichtigt werden. Gängige Berechnungsansätze und der Ablauf der Bemessung werden im folgenden Kapitel erläutert. Darüber hinaus werden Zielgrößen für die nachfolgenden Parameterstudien definiert und deren Ausgangswerte hergeleitet.

#### 2.1.1 Berechnungsmethoden für zusammengesetzte Querschnitte

Bei HBV-Balkendecken teilt sich der Gesamtquerschnitt in der Regel in zwei Querschnittsteile auf – der Obergurt aus Beton und der Steg aus Holz. Beide Materialien besitzen voneinander abweichende Steifigkeiten und Festigkeiten sowie ausgeprägte Kriech-, Schwind- und Quelleigenschaften. Des Weiteren sind die beiden Querschnittsteile in der Kontaktfuge in der Regel nachgiebig verbunden, wobei die Steifigkeit des VM ebenfalls wesentlich durch die Materialeigenschaften der Verbundwerkstoffe beeinflusst wird.

Zur Berechnung von zusammengesetzten Querschnitten in der HBV-Bauweise haben sich mehrere Ansätze durchgesetzt [1]:

- Differentialgleichung
- $\gamma$ -Verfahren
- Schubanalogie-Verfahren
- Modellierung als Stabwerk
- FE-Modellierung

Aufgrund der häufigeren Verwendung in der Praxis [1] und der einfachen Anwendung sollen im Rahmen des Forschungsprojektes das  $\gamma$ -Verfahren und die Modellierung als Stabwerk genauer betrachtet werden.

Vorab lassen sich Vor- und Nachteile der beiden Berechnungsverfahren benennen. Die Berechnung einer HBV-Decke anhand eines Stabwerks bietet dem Anwender mehr Freiheiten in Hinsicht auf Verbindungsmittelabstand, mögliche statische Systeme und Materialeigenschaften. Beim  $\gamma$ -Verfahren gibt es mehrere Randbedingungen, welche zu seiner Verwendung eingehalten werden müssen [1]:

- Einfeldträger
- Gleichstreckenlast
- gleichmäßig verteilte Verbindungsmittel
- maximal drei nachgiebig angeschlossene Schichten

Es wurden über die Zeit verschiedene Anpassungsmöglichkeiten erarbeitet, mithilfe welcher auch Mehrfeldträger und voneinander abweichende Verbindungsmittel-abstände betrachtet werden können [1].

Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist die Berücksichtigung von Dehnungen infolge Temperatur, Schwinden und Quellen. Diese Einflüsse lassen sich bei der Modellierung als

Stabwerk als Temperaturlastfall berücksichtigen. Beim  $\gamma$ -Verfahren hingegen muss eine Ersatzlast der Schwindeinwirkung durch Verformungsgleichheit ermittelt und die Biegesteifigkeit des Verbundquerschnitts angepasst werden [1]. Darüber hinaus liefern die Rechnungsweise durch Stabwerkmodell genauere Ergebnisse.

Der Vorteil des  $\gamma$ -Verfahrens hingegen ist, dass dadurch mit relativ geringem Aufwand die Rechnungsgeschwindigkeit durch Programm erhöht und ebenso händisch bewerkstelligt werden kann.

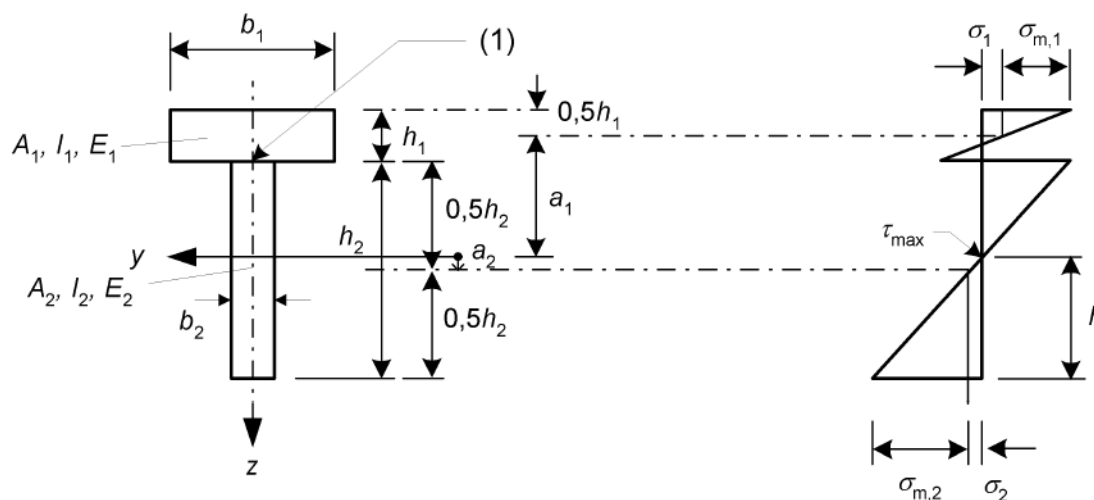
### $\gamma$ -Verfahren

Die Bemessung von zusammengesetzten Querschnitten anhand des  $\gamma$ -Verfahrens ist in DIN EN 1995-1-1 [2] geregelt. Hierbei werden die Spannungsverläufe über die Höhe des Gesamtquerschnitts, in Abhängigkeit der VM-Steifigkeit, über die sog. effektive Biegesteifigkeit  $EI_{eff}$  des zusammengesetzten Querschnitts berechnet. Der qualitative Spannungsverlauf in einer HBV-Decke und die geometrischen Größen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die effektive Biegesteifigkeit ermittelt sich hierbei wie folgt:

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

Formel (1) zeigt hierbei, dass der Steiner-Anteil der effektiven Biegesteifigkeit, wesentlich abhängig ist vom  $\gamma$ -Wert. Dieser  $\gamma$ -Wert berechnet sich zu:

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left(1 + \pi^2 \cdot \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot s_{eff}}{K_{ser} \cdot l^2}\right)} \quad (2)$$



**Abb.2.1: Zusammengesetzter Querschnitt nach DIN EN 1995-1-1 [2]**

Wobei

$$a_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2 + 2h_s)}{\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2}$$

Damit lässt sich die Druck- und Biegespannung unter der Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels ermitteln.

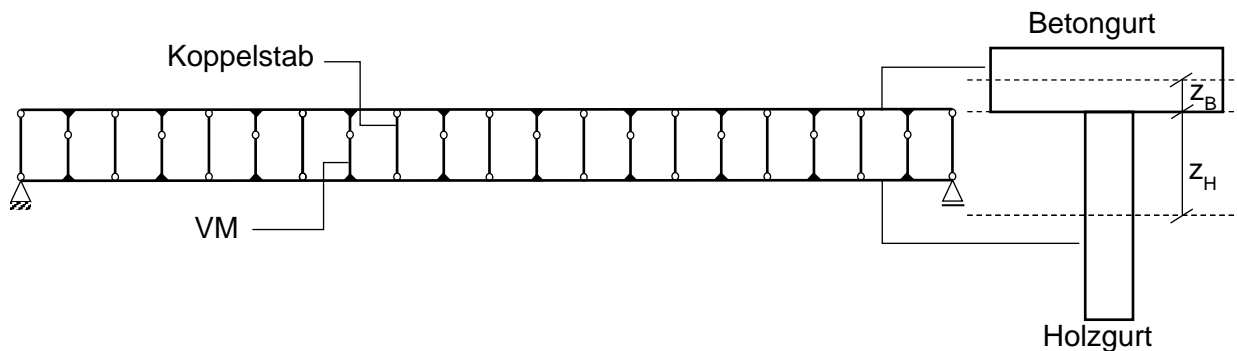
$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}} \quad (4)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_{i,ef} M}{(EI)_{ef}} \quad (5)$$

Der  $\gamma$ -Wert gibt hierbei eine Aussage über die Steifigkeit der Verbundfuge, wobei Formel (2) zeigt, dass dieser wesentlich abhängig ist von der Verbindungsmittelsteifigkeit  $K_{ser}$ . Der Wert  $\gamma=1$  steht hierbei für einen starren Verbund (annähernd vorhanden z.B. bei einer Verklebung) und der Wert  $\gamma=0$  für eine lose Verbindung der beiden Querschnittsteile, sodass keine Steineranteile des Gesamtquerschnitts aktiviert werden. Die Berechnungen der Abstände der Einzelschwerpunkte zum Gesamtschwerpunkt  $a_2$  und der Spannungen ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{m,1}$  und  $\sigma_{m,2}$ ) innerhalb des Verbundquerschnittes werden durch die oberen Formeln (3, 4, 5) durchgeführt.

### Stabwerkmodell

Bei der Berechnung von HBV-Decken mit Hilfe von Stabwerkmodellen, werden der Ober- und der Untergurt als durchgängige Stabquerschnitte modelliert. Die Verbindung der beiden Gurte wird durch dehnsteife Koppelstäbe und an den Gurten eingespannte Kragarme realisiert. Erstere stellen hierbei sicher, dass sich die Gurte bei Belastung komplementär zueinander verformen. Letztere wiederum stehen stellvertretend für das VM und sind mit dessen Abstand angeordnet. Der Aufbau des Stabwerkmodells ist beispielhaft in Abb.2.2 zu sehen.



**Abb.2.2: HBV-Stabwerkmodell auf Grundlage von [3]**

Ober- und Untergurt besitzen die Dehn- und Biegesteifigkeit der beiden Einzelquerschnitte. Die Biegesteifigkeit  $EI_{VM}$  der Kragarme berechnet sich zu:

$$EI_{VM} = \frac{K_{ser}}{3} \cdot (z_B^3 + z_H^3) \quad (6)$$

Formel (6) zeigt, dass die Biegesteifigkeit der Verbindungsmittel wesentlich abhängig von der Verbindungsmittelsteifigkeit  $K_{ser}$  ist. Die Verbindung der beiden Gurte durch die Kragarme entsteht im Obergurt eine zusätzliche Druckkraft und im Untergurt eine zusätzliche Zugkraft,

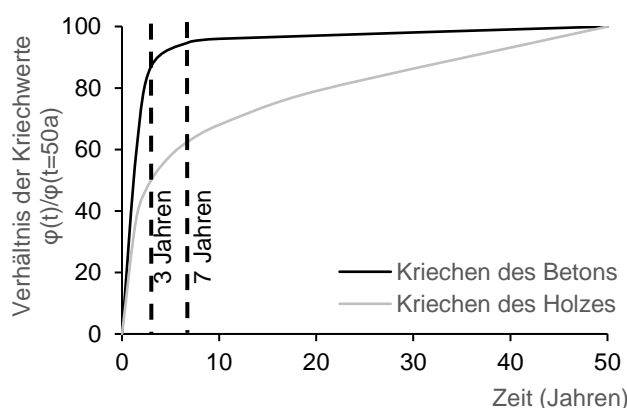
sodass die beiden Querschnittsteile komplementär zum  $\gamma$ -Verfahren als Verbundquerschnitt wirken.

## 2.1.2 HBV-Bemessung

Holz und Beton weisen ausgeprägtes Kriech-, Schwind- und Quellverhalten auf, wobei sich diese Eigenschaften im Betrag und in der zeitlichen Abfolge in Bezug auf die beiden Werkstoffe unterscheiden. Aufgrund dessen müssen im Gegensatz zur herkömmlichen Bemessung von Holz- und Stahlbetontragwerke verschiedenste Bemessungszeitpunkte, zusätzliche Lastgrößen und der Einfluss der Verbindungsmittel beachtet werden.

### Bemessungszeitpunkte

Bei der Bemessung von HBV-Elementen wurden in der Vergangenheit häufig ausschließlich die beiden Bemessungszeitpunkte  $t=0$  und  $t=\infty$  betrachtet. Hierbei wird für die Bemessung zum jeweiligen Zeitpunkt, durch die Verwendung des Kriechbeiwertes  $k_{\text{def}}$  (Holz) bzw.  $\varphi$  (Beton), das E-Modul abgemindert.



**Abb.2.3: Materialkriechwerte bezüglich des jeweiligen Endwerts [3]**

Es hat sich jedoch in Abb.2.3 gezeigt, dass sich die einzelnen Kriechverformungen durch den zeitlich unterschiedlichen Ablauf gegenseitig behindern. Beton kriecht vor allem in den ersten 3-7 Jahren wesentlich schneller als Holz, wodurch sich Steifigkeit und folglich Lasten hin zum Holzquerschnitt verlagern. Es können hierbei zum Zeitpunkt  $t=3-7$  Jahre größere Spannungen als zu den beiden anderen Bemessungszeitpunkten auftreten, sodass dieser Zeitpunkt im Rahmen der Bemessung im GZT zusätzlich betrachtet werden muss. [3,4]

Neben den Trag- und Verformungsverhalten von Holz und Beton ist die Steifigkeit von Schubverbinder ebenso zeitabhängig. Somit sind die Bemessungszeitpunkte im GZT und GZG laut [4] durch die unteren Formeln in Tab.2.1. und Tab.2.2 zu berücksichtigen.

Es müssen somit aufgrund der großen Variation der Steifigkeiten 5 verschiedene Systeme betrachtet werden. Zur Ermittlung der effektiven Kriechzahlen zum jeweiligen Bemessungszeitpunkt werden Verbundfaktoren  $\psi$  verwendet. Diese wiederum sind abhängig vom in Formel (2) berechneten  $\gamma$ -Wert. Bezüglich der genauen Herleitung der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Tab.2.2 gezeigten Steifigkeiten und für weitere Hintergrundinformationen wird auf [4] verwiesen.

**Tab.2.1: Zeitabhängiger effektiver Elastizitätsmodul von Holz und Beton in GZT und GZG [4]**

Zeitpunkt	t = 0	t = 3-7	t = ∞
Holz	$E_{H,mean}$	$\frac{E_{H,mean}}{1 + \Psi_{H,3-7} \cdot k_{def}}$	$\frac{E_{H,mean}}{1 + \Psi_{H,\infty} \cdot k_{def}}$
Beton	$E_{cm}$	$\frac{E_{cm}}{1 + \Psi_{B,3-7} \cdot \varphi}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <math>\varphi = 3,5 \rightarrow</math> </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <math>\Psi_{B,3-7} = 2,5 - \gamma^{1,1}</math> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <math>\varphi = 2,5 \rightarrow</math> </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <math>\Psi_{B,3-7} = 1,9 - 0,6 \cdot \gamma^{1,1}</math> </div> </div>	$\frac{E_{cm}}{1 + \Psi_{B,\infty} \cdot \varphi}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <math>\Psi_{B,\infty} = 2,6 - 0,8 \cdot \gamma^2</math> </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <math>\Psi_{B,\infty} = 2,0 - 0,5 \cdot \gamma^{1,9}</math> </div> </div>

Tab.2.2: Zeitabhängige effektive Verbindungsmittelsteifigkeit in GZT und GZG [4]

Zeitpunkt	t = 0	t = 3-7	t = ∞	
VM	GZT	$K_{ser,0} = K_{ser}$	Nicht relevant	$K_{ser,\infty} = \frac{K_{ser}}{1 + \Psi_{VM,\infty} \cdot k_{def}}$
	GZG	$K_{u,0} = 2/3 K_{ser}$ (allgemein) $K_{u,0} = K_{ser}$ (beim Kerven)	$K_{u,3-7} = \frac{K_{u,0}}{1 + \Psi_{VM,3-7} \cdot k_{def}}$	$K_{u,\infty} = \frac{K_{u,0}}{1 + \Psi_{VM,3-7} \cdot k_{def}}$

### Äußere Lastgrößen

Bei den äußeren direkten Einwirkungen wird unterschieden zwischen kriecherzeugenden (permanent wirkend) und nicht kriecherzeugenden (kurzzeitig wirkend) Lasten. Ständige Lasten sind hierbei kriecherzeugend und veränderliche Lasten sind phasenweise wirksam, sodass sich diese aus einem kriecherzeugenden und einem nicht kriecherzeugenden Teil zusammensetzen. [5]

Die Berechnung der Anteile ist nachfolgend dargestellt [4]:

$$Q_{k,i} = Q_{k,i,kurz} + Q_{k,i,perm} \quad (7)$$

mit

$$Q_{k,i,kurz} = (1 - \psi_{2,i}) \cdot Q_{k,i} \quad (8)$$

und

$$Q_{k,i,perm} = \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (9)$$

### Innere Lastgrößen:

Als innere Einwirkungen gilt es Temperatur, Schwinden und Quellen zur erwähnen. Temperatur- und Quell- sowie Schwindeinflüsse des Holzes dürfen in NKL 1 in der Regel vernachlässigt werden, da sich die Temperaturänderung im Innenbereich im Allgemeinen unter 20 K bewegt und sich die Holzfeuchte bei quasi-ständiger Umgebungsfeuchtigkeit

ebenfalls nur geringfügig ändert. Es muss in der Folge lediglich das Endschwindmaß  $\varepsilon_{cs,\infty}$  des Betons als Differenzdehnung  $\Delta\varepsilon_s$  berücksichtigt werden. [4]

Im Stabwerkmodell wird diese als äquivalente Temperaturänderung berücksichtigt und berechnet sich zu [4]:

$$\Delta T_{S,t} = \frac{\Delta\varepsilon_s}{\alpha_{T,B}} \cdot k_t \quad (10)$$

mit

$k_t = 0,6$  für den Bemessungszeitpunkt  $t=3-7$  Jahre  
oder

$k_t = 0,9$  für den Bemessungszeitpunkt  $t=\infty$

Bei der Berechnung anhand des  $\gamma$ -Verfahrens kann der Schwindeinfluss des Betons durch eine äußere Ersatzlast und eine Modifikation der effektiven Biegesteifigkeit berücksichtigt werden. Die Berechnung der beiden Größen ist relativ aufwendig, sodass an dieser Stelle auf [5] verwiesen wird. Für weitere Hintergrundinformationen zur Berücksichtigung der Schwinddehnung des Betons bei Stabwerkmodellen bzw. beim  $\gamma$ -Verfahrens wird auf [4] bzw. auf [5] verwiesen.

Die Einwirkungskombinationen der äußeren und inneren Lastgrößen im GZT und GZG sind durch die folgenden Formeln (11 - 18) laut [4] dargestellt. Um alle Nachweise im GZT und GZG zu führen, müssen anhand der 5 verschiedenen Systeme 8 Berechnung durchgeführt werden. Für weitere Hintergrundinformationen zu den Formeln wird erneut auf [4] verwiesen.

GZT:

Zum Zeitpunkt  $t = 0$ :

$$E_{d,GZT,0} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (11)$$

Zum Zeitpunkt  $t = 3-7$  Jahre und  $t = \infty$ :

$$E_{d,GZT,t} = E_{d,GZT,kurz} + E_{d,GZT,perm,t} \quad (12)$$

$$E_{d,GZT,t} = E_{d,GZT,kurz} + E_{d,GZT,perm,t} \quad (13)$$

$$E_{d,GZT,kurz} = \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1,kurz} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i,kurz} \quad (14)$$

$$E_{d,GZT,perm,t} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1,perm} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i,perm} + 1,35 \cdot \Delta T_{S,t} \quad (15)$$

GZG:

$$E_{d,char} = G_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (16)$$

$$E_{d, kurz} = Q_{k,1, kurz} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i, kurz} \quad (17)$$

$$E_{d, perm} = G_k + \sum_{i \geq 1} Q_{k,i, perm} + \Delta T_{S, \infty} \quad (18)$$

### Nachweise

Im GZT wird die Nachweisführung des Holz- und des Betonteils normgerecht nach DIN EN 1995-1-1 [2] und DIN EN 1992-1-1 [6] durchgeführt. Im GZG sind für die Bemessungszeitpunkte  $t=0$  und  $t=\infty$  entsprechend [2] die Grenzwerte der Anfangsverformung ( $W_{inst, grenz}$ ) zum Zeitpunkt  $t = 0$ , Endverformung ( $W_{fin, grenz}$ ) zum Zeitpunkt  $t = \infty$  sowie Nettoendverformung ( $W_{fin, n, grenz}$ ) einzuhalten:

$$w_{inst, grenz} = l/300$$

$$w_{fin, grenz} = l/200$$

$$w_{fin, n, grenz} = l/250$$

Bezüglich des Schwingungsnachweises der untersuchten Decken wurde für die Eigenfrequenz ein Grenzwert von 8 Hz und für den Steifigkeitsnachweis eine maximale Verformung von 0,5 mm in Feldmitte angesetzt. Der Brandnachweis wurde in den Nachweisen nicht explizit geführt, da dieser von vielen Faktoren, wie z.B. der Feuerwiderstandsklasse oder eventuell vorhandener Verkleidung, abhängig ist. Voruntersuchungen haben jedoch gezeigt, dass dieser in der Regel nicht maßgebend wird.

### Verbindungsmitel

Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Effektivität der HBV-Systeme ist die Verbundwirkung zwischen Holz und Beton. Hierbei ist die einfache Realisierung, die Wirtschaftlichkeit, aber auch die Zerlegung einer HBV-Decke am Ende ihrer Lebensdauer wesentlich abhängig vom VM. Somit sind die Eigenschaften der Verbindungsmitel zur Ausführung der HBV-Systeme besonders zu berücksichtigen. In der Regel wird die Anforderung an das VM erstrebt, dass dieses:

- über einer hohen Tragfähigkeit und Steifigkeit verfügt
- zur Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit eine hohe Duktilität aufweist
- möglichst geringe Herstellungs- und Montagekosten besitzt

Als Verbindungsmitel stehen punktuelle Verbindungsmitel (Schrauben, Bolzen, Nägel) oder flächige VM (eingeklebte und vergossene Stahlbleche) zur Verfügung. Eine Übersicht der wesentlich zur Verfügung stehenden Systeme, samt Zulassungsnummer, ist in Tab.2.3 dargestellt. Die aufgelisteten Zulassungen der VM definieren zudem Mindestabmessungen des Verbundquerschnitts, damit die VM verwendet werden dürfen. Durch die folgenden Querschnittsabmessungen werden die Vorgaben erfüllt:

- Mindeststärke Beton  $\geq 7$  cm
- Mindestabmessungen Balken  $\geq 8 \times 8$  cm
- Höhe Betonanteil / Höhe Holzanteil  $\leq 70$  %

Tab.2.3: Übersicht VM [7]

Zulassungsnummer	Zulassungsinhaber	Verbindungsmittel	Gültig bis
Z-9.1-342	SFS intec GmbH & Co. KG	SFS VB Schrauben als Verbindungsmittel in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	2018
Z-9.1-445	Sieglinde Amrath Timco. Vertrieb Deutschland	Timco II und III Schrauben als Verbindungsmittel für das Timco Holz-Beton-Verbundsystem	2017
Z-9.1-473	Hubert Schmid Bauunternehmen GmbH	Brettstapel-Beton-Verbunddecken mit Flachstahlschlössern	2015
Z-9.1-557	TiComTec GmbH	HBV-System mit eingeklebtem HBV-Schubverbinder	2020
Z-9.1-603	Com-Ing AG	TCC Schrauben als Verbindungsmittel für das TCC Holz-Beton-Verbundsystem	2015
Z-9.1-648	Adolf Würth GmbH & Co. KG	Würth ASSYplus VG Schrauben als Verbindungsmittel für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	2017
Z-9.1-845	Schmid Schrauben Hainfeld GmbH	Star-Drive und RAPID Schrauben als Verbindungsmittel für das Schmid Schrauben Holz-Beton-Verbundsystem	2019

Tab.2.4: Tragfähigkeit und Steifigkeit VM [7]

	<u>Schubtragfähigkeit</u> <u>Frk oder Tk in [N]</u>	<u>Anfangsverschiebungsmodul</u> <u>Kser in [N/mm]</u>
HBV-Verbinder HBV Typ 90/200	32000	165000
HBV-Verbinder HBV Typ 105/200	25803	79061
HBV-Verbinder HBV Typ 120/200	23236	66282
Würth ASSY 10mm mit FT Verbinder	31713	9000
TCC 7,3 x 150 mm je Schraube	8320	42423
TCC 8 x 180 mm je Schraube	10647	47241
TCC 9 x 180 mm je Schraube	11293	48368
TCC 12 x 210 mm je Schraube	15365	55108
SFS VB 100 [je Paar]	12090	22800
SFS VB 165 [je Paar]	17180	32400
Würth ASSY 8mm je Schraube	15167	20000
Würth ASSY 10mm je Schraube	17235	9000
TIMCO II je Schraube	8134	12740
TIMCO III je Schraube	12350	16900
Rapid T-Con 8 x 155 mm je Schraube	10000	9000
Rapid T-Con 8 x 205 mm je Schraube	10000	9000
StarDrive GPR je Schraube	10000	9000

Die verschiedenen Verbindungsmittel unterscheiden sich wesentlich hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Steifigkeit. Bei den in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten VM handelt es sich, bis auf den HBV-Verbinder (eingeklebtes und vergossenes Stahlblech), ausschließlich um punktuelle VM. Die erste Zahl des HBV-Verbinders bezieht sich hierbei auf die Einklebetiefe im Holzbalken und die zweite Zahl bezieht sich auf die betrachtete Länge zur Ermittlung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit.



### 2.1.3 Zielgrößen

Um die angestrebte Entwicklung zu realisieren, müssen zunächst die Zielgrößen, die alle Verfahren der Optimierung beeinflussen können, bestimmt werden. Hierbei sind für die Entwicklung eines Optimierungstools zur Verbreitung der Nutzung von HBV-System neben der Leistungsfähigkeit die ökologischen und ökonomischen Eigenschaften bei der Bewertung erforderlich zu berücksichtigen. Somit wurden im Rahmen der Vorrecherche folgende Zielgrößen in Betracht gezogen:

- Globales Erwärmungspotential (GWP)
- Umweltfolgekosten
- Materialkosten
- Baukosten

#### Global-Warming-Potential

Das GWP ist eine Maßzahl für den Einfluss von klimawirksamen Gasen auf den vom Menschen gemachten Klimawandel. Hierbei benennt das GWP die mittlere Erwärmungswirkung der Atmosphäre über einen betrachteten Zeitraum. Das GWP normiert hierbei der Einfluss aller klimawirksamen Gase auf das wirksamste Gas CO<sub>2</sub>. Die Dimension des GWP lautet hierbei „kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent“. Neben CO<sub>2</sub> sind die zwei wesentlichen Gase Lachgas und Methan. Das Verhältnis der Klimawirksamkeit der einzelnen Gase zu CO<sub>2</sub> ist hierbei wesentlich abhängig vom zuvor genannten zeitlichen Betrachtungszeitraum. Für langfristige Zielsetzungen wird, wie auch in den folgenden Berechnungen, ein mittlerer Wirkungszeitraum der Gase von 100 Jahren angesetzt.

Durch die Ökobilanz (life cycle assessments) erfolgt die Bezifferung der Umwelteinflüsse der Baustoffe über deren gesamten Lebensweg. Der Lebensweg des Materials wird hierbei in einzelne Lebenswegmodule unterteilt und durch die Summierung dieser Module lässt sich der Gesamtumwelteinfluss des Materials erhalten. Zur Ökobilanzierung eines HBV-Systems wird im vorliegenden Projekt die CO<sub>2</sub>-Emissionen der eingesetzten Baustoffe (Beton, Betonstahl, Holz) als die Basis der Lebezyklusanalysen angenommen.

**Tab.2.5: GWP der betrachteten Materialien auf Grundlage der Daten aus *Ökobaudat* [8]**

Material	Bezeichnung auf der <i>Ökobaudat</i>	GWP [kg/m <sup>3</sup> ]
Beton C 20/25	Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25	182,69
Beton C 25/30	Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30	201,69
Beton C 30/37	Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37	224,28
Betonstahl	Bewehrungsstahl	2892
KVH	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	-257,34
Duo-/Triobalken	Balkenschichtholz (Durchschnitt DE)	-193,77
BSH	Brettschichtholz Standardformen (Durchschnitt DE)	-160,37

Als Datengrundlage eignet sich zur Ermittlung des GWP die *Ökobaudat* [8]. Es handelt sich um eine Online-Datenbank des *Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und*

*Bauwesen*, wobei verifizierte und geprüfte Datensätze zu verschiedensten Materialien und Werkstoffen hinterlegt sind. Für die potenziell gängig anwendbaren Materialien in HBV-System wurden mehrere Betonsorten, Bewehrungsstahl und verschiedene Holzsorten in Betracht gezogen, deren GWP in Tab.2.5 eingetragen werden.

### Umweltfolgekosten

Durch die reine Berücksichtigung der Materialkosten oder Baukosten die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit eines Systems zu bewerten, ist nicht umfassend, da die Umweltbelastungen ebenso die Kosten für die gesamte Gesellschaft verursachen. Diese können in verschiedenen Formen in Erscheinung treten, z.B. Überschwemmungen, Ernteauffälle, Dürren, Gesundheits- und Materialschäden usw., welche auffälligen gesellschaftlichen Schaden anrichten können. Es ist das Ziel, diese Kosten zu internalisieren, sprich, dass sie dem Verursacher angelastet werden. Nur so gibt es wirtschaftliche Anreize, die Umweltbelastungen zu vermeiden und die anfallenden Kosten machen ökologische Alternativen zunehmend konkurrenzfähig.

Die Umweltkosten, welche durch CO<sub>2</sub>-Emissionen und deren Treibhauswirksamkeit verursacht werden, nennen sich Klimaschadenskosten. Sie umfassen die Schäden, die weltweit durch die Emission von Treibhausgasen und den dadurch bewirkten Temperaturanstieg entstehen. Diese Schadenskosten werden bei fehlender Internalisierung zum größten Teil nicht von den Verursachern, sondern von der Gesellschaft getragen. In der „Methodenkonvention 3.0 des Umweltbundesamtes zur Ermittlung von Umweltkosten“ werden die Schadenskosten des Treibhausgasausstoßes ermittelt, wobei diese im Jahr 2016 ca. 180 €/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent betragen und bis im Jahr 2030 auf 205 €/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent ansteigen. [9] Durch lineare Interpolation zwischen diesen beiden Schadenskosten ergeben sich die Kosten zu 190,71 €/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Jahr 2022. Um Effekte wie Inflation zu berücksichtigen, werden die Schadenskosten im Forschungsprojekt auf einen Betrag von 200 €/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent festgelegt.

### Materialkosten

Die Materialkosten sind aufgrund der aktuellen wirtschaftlichen Lage großen Schwankungen unterzogen. Infolgedessen werden den Materialkosten aktueller Kostenzustand zugrunde gelegt. Nach einer Marktrecherche der Preislisten von Beton-, Stahl- und Holzherstellern haben sich die in Tab.2.6 gezeigten Kosten ergeben.

**Tab.2.6: Aktuelle Materialpreise laut der Informationen aus *Trapobet* [14] und *Müller-Beton* [15]**

Material	Preis [€]	Bezugseinheit
Beton C 20/25	129,5	€/m <sup>3</sup>
Beton C 25/30	134,0	€/m <sup>3</sup>
Beton C 30/37	139,0	€/m <sup>3</sup>
Betonstahl	900,0	€/t
KVH	700,0	€/m <sup>3</sup>
BSH	900,0	€/m <sup>3</sup>

### Baukosten

Für die Baukosten werden neben den Materialkosten die Planungskosten, Fertigungskosten und Transportkosten usw. einberechnet. Als Grundlage hierfür wurden Werte aus [10] zugrunde gelegt. Die angesetzten Kosten sind in Tab.2.7 dargestellt.

**Tab.2.7: Baukosten nach [10]**

Nummer	Position	Beschreibung	Kosten [€]	Bezugseinheit
13-59	13-62, 13-110/111	Decke, Sichtbeton C25/30, bis 25 cm	157	m <sup>3</sup>
13-62		Schalung, Decken, glatt	44	m <sup>2</sup>
13-110		Betonstahlmatten, Bst500A/500B	1751	t
13-111		Betonstabstahl Bst 500B	1839	t
16-4	16-12	Liefern von KVH	570	m <sup>3</sup>
16-5	16-12	Balkenschichtholz, Nadelholz	683	m <sup>3</sup>
16-6	16-12	Liefern von BSH, Industriequalität	900	m <sup>3</sup>
16-12		Abbund + Aufstellen BSH	14	m
16-78		Brettstapeldecke 140 mm	122	m <sup>2</sup>
16-79		Brettstapeldecke 160 mm	149	m <sup>2</sup>
16-80		Brettstapeldecke 200 mm	201	m <sup>2</sup>

## 2.2 Entwicklung Tool

### 2.2.1 Funktionsweise des Tools

Die statische Berechnung der HBV-Bauweise ist im Gegensatz zur Berechnung von Holz- und STB-Decken sehr aufwendig und kann, je nach Berechnungsmethode, nur mit einem großen Mehraufwand bewerkstelligt werden. Es bietet sich somit auch bei einzelnen Berechnungen an, diese rechnergestützt durchzuführen. Im Rahmen der durchgeführten Parameterstudien, war die Verwendung eines geeigneten Programms, auf Grund der großen Anzahl an Berechnungen, unabdingbar.

Es hat sich in einer Vorrecherche gezeigt, dass das Programm *Rhinoceros 3D* mit seinen Addons geeignet für die hier gesuchte Anwendung ist. Bei *Rhinoceros 3D* handelt es sich um ein Zeichenprogramm, welche im Gegensatz zu den meisten vergleichbaren Programmen mit NURBS-Modellierung und nicht vektorbasiert arbeitet, sodass im Rahmen der Anwendung verschiedenste Freiformen konstruiert werden können. Innerhalb des Programms gibt es wiederum das Addon *Grasshopper 3D*. Dieses erlaubt dem Anwender parametrisierte Optimierungen. Die Dateneingabe findet in anschaulicher Form in einer Art Mindmap statt, wobei verschiedenste Operatoren und Eingabedaten miteinander verknüpft werden. Der Vorteil der Software ist hierbei, dass diese, auf Grund ihrer relativ einfachen Anwendung, auch von Personen verwendet werden kann, welche kein spezielles Fachwissen auf dem Gebiet der Programmierung besitzen. Berechnungen innerhalb von *Grasshopper 3D* können mit Punkten, Linien, Flächen und Köpern aus *Rhinoceros 3D* verknüpft werden. Innerhalb von *Grasshopper 3D* wiederum gibt es das Addon *Karamba 3D*. Es bietet weitere Operatoren und Funktionen innerhalb von *Grasshopper 3D*, welche bereits auf statische Berechnungen im Bauwesen zugeschnitten sind. Es lassen sich z.B. FE-Berechnungen durchführen und Materialien sowie Querschnitte aus Bibliotheken auswählen. Zudem bietet das Programm den Operator *Galapagos*. Dieser ermöglicht die parametrisierte Optimierung gesetzter Zielgrößen. Der theoretische Ablauf der Optimierung anhand von *Galapagos* ist bildlich in Abb.2.4 dargestellt.

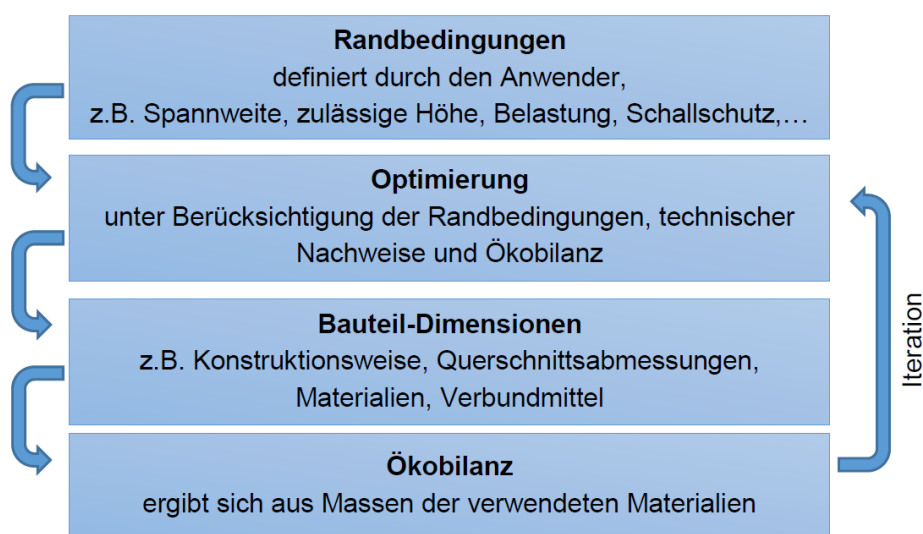


Abb.2.4: Optimierungsschritte mit Galapagos

Zur Ermöglichung der nachfolgenden praktischen Umwandlung sind zunächst bei der Rechnungsweise des zu entwickelnden Tools die notwendigen Randbedingungen (Einwirkungen, Spannweite, Querschnittsabmessung usw.) anhand der Regelwerke zu bestimmen. Außerdem müssen die stark voneinander unterschiedenen zeitabhängigen Verformungsverhalten von Holz und Beton bei der Bemessung von HBV-System berücksichtigt werden. Anschließend erfolgt die Nachweisführung als die Optimierungsgrenze zur Ermittlung der optimalen Zielgröße.

### Randbedingungen

In der ersten Instanz werden die Randbedingungen definiert. Dies geschieht in der Regel über sogenannte *Slider*. Hierbei handelt es sich um programminterne Schieberegler, welche mithilfe des Mauszeigers verschiebbar sind, damit die einzelnen Parameter frei definiert werden können. Zur Veranschaulichung ist der *Slider* für die Längeneingabe in Abb.2.5 gezeigt. In dem Systemrahmen der Randbedingungen werden die Einwirkungen, Spannweite, Querschnittsabmessung, Verbindungsmittleigenschaften bestimmt und zugleich lassen sich die notwendigen Querschnittswerte berechnen. Außerdem sind in diesem Schritt die Materialarten bzw. -eigenschaften festzulegen, wobei die Kriech- und Schwindeinwirkungen berücksichtigt werden sollten.

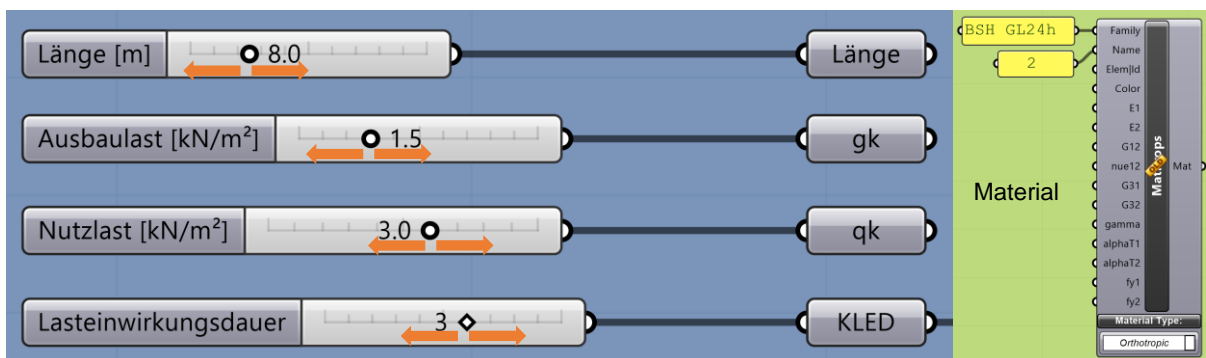


Abb.2.5: Definition der Randbedingungen und Materialeigenschaften durch programminterne Schieberegler (links) und Matprops (rechts)

### Optimierung

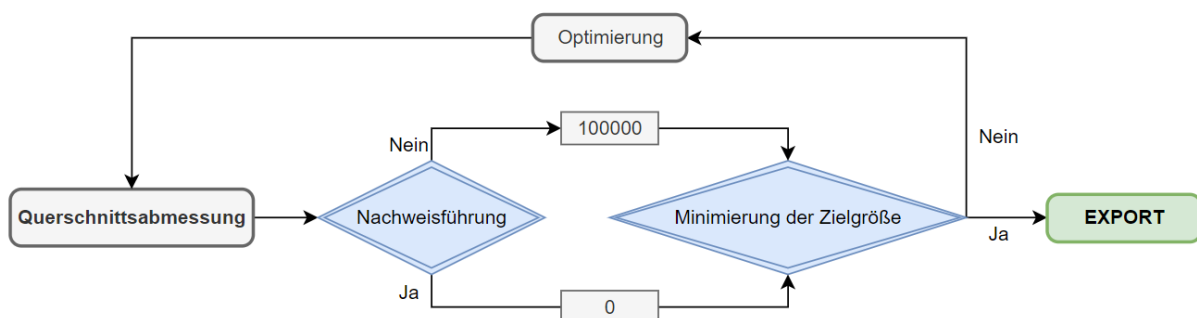


Abb.2.6: Grundsatz der Optimierung zur Erhaltung der minimierten Zielgröße

Im Anschluss wird auf Grundlage der zuvor definierten Randbedingungen die Optimierung orientierend auf die Zielgrößen durchgeführt. In der Regel ist es beabsichtigt, dass ein bestimmter Wert minimiert oder maximiert wird, z.B. die Minimierung der Materialkosten oder der Umweltfolgekosten.

Damit die Optimierung an die Nachweisführung im GZT und GZG gekoppelt ist, wird diese mit der Zielgröße verknüpft (Abb.2.6). Praktisch stellt es sich so dar, dass wenn ein einzelner Nachweis nicht eingehalten ist, die Zielgröße um einen großen Wert (= 100000) erhöht wird, sodass der Optimierungsgrundsatz (Minimierung der Zielgröße) verstoßt wird und den Nachweis erneut durchgeführt werden muss. Sind alle Nachweise eingehalten, haben diese keinen Einfluss auf die Zielgröße. Die Optimierung wird, wie bereits zuvor erwähnt, anhand des Tools durch die Funktion *Galapagos* durchgeführt.

### Bauteil-Dimensionen

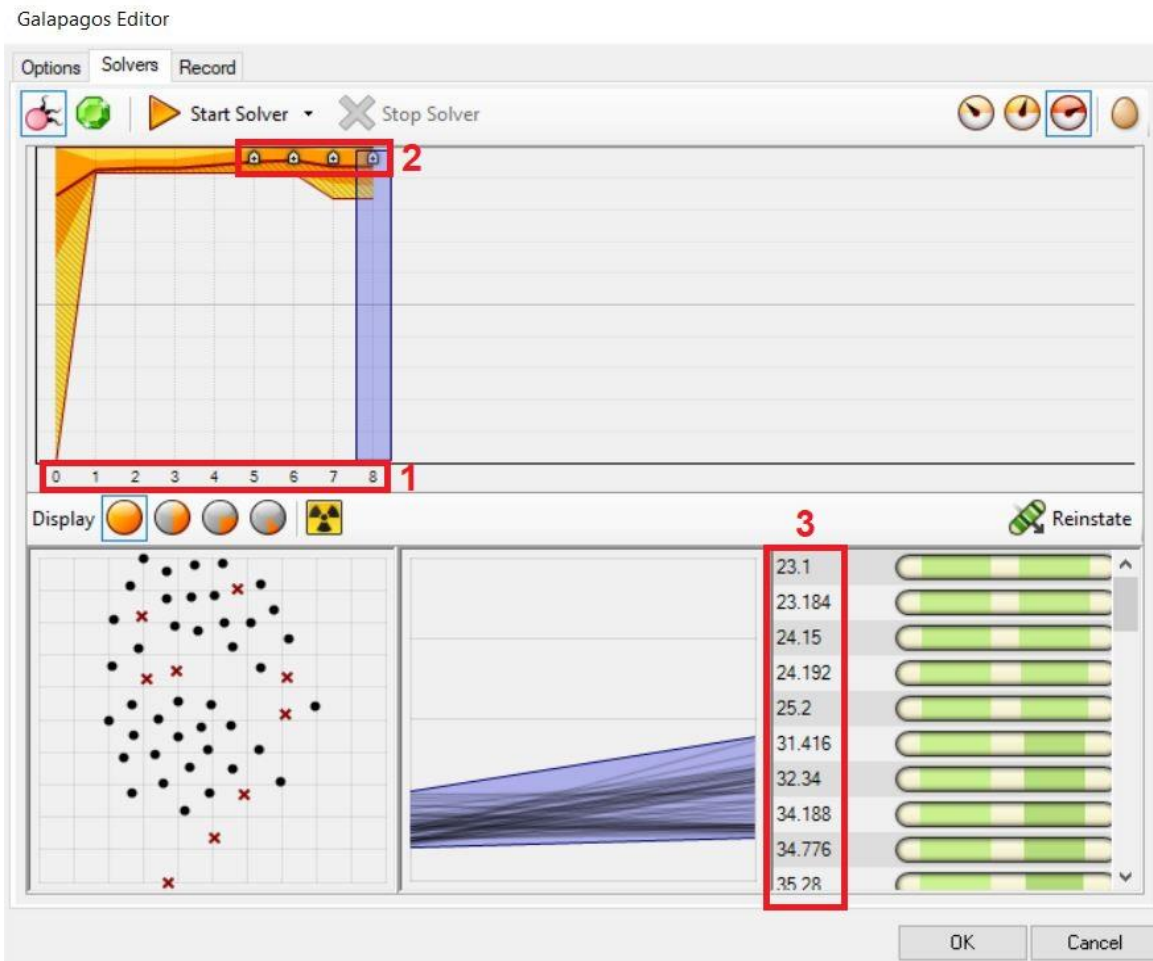
Das Tool besitzt hierbei zwei Verknüpfungspunkte. Anhand des unteren Punktes *Fitness* kann die zu optimierende Zielgröße definiert werden und anhand des oberen Punktes *Genome* kann das Tool z.B. mit Slidern zu Bauteil-Dimensionen verknüpft werden. Durch diese beiden Verknüpfungen kennt das Tool die Zielgröße und die Größen, welche optimiert werden sollen.

### Ökobilanz

Im letzten Schritt berechnet das Tool den Betrag der Zielgröße anhand hinterlegter Werte für z.B. das GWP der einzelnen Materialien.

### Ablauf der Optimierung

Bei der Durchführung der Optimierung mit dem Tool *Galapagos* werden in schneller Abfolge nacheinander verschiedenste Stellungen der *Slider*, welche mit dem Punkt *Genome* verknüpft sind, untersucht, wobei das Tool die einzelnen Ergebniswerte der Zielgröße notiert. Das Tool führt hierbei eine definierte Anzahl von Berechnungen durch. Am Ende dieses ersten Berechnungsschrittes wählt das Tool die Sliderstellungen aus, welche zu den kleinsten Werten der Zielgröße geführt haben und führt anhand ähnlicher Sliderstellungen einen zweiten Berechnungsschritt durch. Anschließend werden wieder die besten Ergebniswerte dem folgenden Berechnungsschritt zugrunde gelegt. Es wird des Weiteren innerhalb der Berechnungsschritte auch immer ein definierbarer Teil der Berechnungen zufallsbasiert durchgeführt.



**Abb.2.7: Galapagos Ausgabe**

Die Ergebnisausgabe des Tools *Galapagos* ist zur Veranschaulichung in Abb.2.7 dargestellt. Punkt 1 markiert die durchgeführte Anzahl an Berechnungsschritten. Punkt 2 verdeutlicht durch kleine Symbole, in welchem Berechnungsschritt ein neues Minimum der Berechnung gefunden wurde. Punkt 3 zeigt den Betrag der Zielgröße der einzelnen Berechnungen innerhalb des ausgewählten Berechnungsschrittes.

## 2.2.2 Variante I und II

Schon vor Beginn des Forschungsprojektes wurde mit Variante I ein erstes Berechnungstool innerhalb des Programms *Karamba 3D* entwickelt. Ziel war es hierbei, die grundlegende Eignung des Programms für die beabsichtigte Zielsetzung zu überprüfen. Als Berechnungsmethodik wurde das in Kapitel 2.1.1 erläuterte Stabwerkmodell gewählt. Als Eingangsparameter ließen sich hierbei die Systemlänge, die Ausbaulast, die Nutzlast und die Verbindungsmittelsteifigkeit wählen. Es konnten hierbei ausschließlich kontinuierliche Verbindungsmittelsteifigkeiten definiert werden. Die zu optimierenden Slider waren die Höhe und Breite des Betonanteils und die Höhe und Breite des Holzanteils. Als Materialien waren ein Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und ein Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h hinterlegt. Für die Bemessung wurde lediglich ein Bemessungszeitpunkt betrachtet. Als Zielgröße war es möglich, die Baukosten, die Schadenskosten oder das GWP anzusetzen.

Nach Fertigstellung von Variante I war es möglich, mit dem Tool Optimierungen durchzuführen.

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde das Berechnungstool in Variante II um mehrere Punkte angepasst. Es wurden die Materialien Beton C20/25, C30/37, Vollholz C24, C30, Brettschichtholz GL24h und GL28h ergänzt. Darüber hinaus wurde das Tool um die drei Bemessungszeitpunkte  $t=0$ , 3-7 und  $\infty$  ergänzt. Die Bemessungszeiträume richten sich hierbei nach *Eurocode 5: Design of Timber Structures – Part 1-3: Structural design of timber concrete composite structures* [12] und entsprechen somit dem aktuellen Stand der Technik. Es wurden des Weiteren als Eingabedaten das Betonalter und die Zementart ergänzt. Beides zusammen ist Grundlage für die Berechnung des Kriechbeiwertes innerhalb des Tools. Der Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$  des Holzes wird in Abhängigkeit von der in den Eingabedaten definierbaren Lasteinwirkungsdauer gewählt. Ergänzend zu Variante I wurde das Tool um die Möglichkeit erweitert, sodass neben kontinuierlichen VM punktuelle VM betrachtet werden können. Außerdem wurde das Nachweisverfahren um alle wesentlichen Nachweise im GZT und GZG zu den zuvor erwähnten maßgebenden Zeitpunkten ergänzt. Die Ermittlung der erforderlichen Bewehrung im Plattenteil wird nach dem Omega-Verfahren durchgeführt. Es wird in der Berechnungssystematik überprüft, ob die Mindestbewehrung oder die statisch erforderliche Bewehrung maßgebend ist. Es wird in der Berechnung die mitwirkende Plattenbreite berücksichtigt, wobei diese nach der Empfehlung der *Technical Specification* ermittelt wird (Berechnungsgrundlage *DIN EN 1994-1-1:2010* [13]). Auftretende Schnittkräfte infolge des Schwindens des Betons werden in Form von Temperaturlasten berücksichtigt. Es wird ebenfalls die Nebentragrichtung nach dem Omega-Verfahren bemessen.

### 2.2.3 Variante III

In Variante I kann die Berechnung anhand des in Kapitel 22.1.1 erläuterten Stabwerkmodell problemlos durchgeführt werden. Dieses ist ebenfalls Grundlage der Variante II. Hier hat sich jedoch im Rahmen der Parameterstudien zunehmend herausgestellt, dass die Durchführung der Berechnung sehr zeitaufwendig ist. Kann bei Variante I eine Optimierung noch in 1-2 Minuten durchgeführt werden, rechnet das Programm in Variante II mitunter fast eine ganze Stunde. Hintergrund der aufwendigen Berechnung ist die Zerlegung des statischen Systems in viele einzelne FE-Stabelemente bei der Berechnung als Stabwerkmodell. Zudem muss das System aufgrund der verschiedenen Bemessungszeitpunkte und der verschiedenen Nachweise im GZT und GZG insgesamt achtmal berechnet werden. Bei der Durchführung der ersten Parameterstudien hat sich schnell herausgestellt, dass die Berechnungsmethodik als Stabwerkmodell bei dem betrachteten Umfang von Systemen und Nachweisen nicht mehr zielführend ist.

Als Alternative wurde die gesamte Berechnungsmethodik von Variante II auf das  $\gamma$ -Verfahren umgestellt. Hierbei muss keine kleingliedrige FE-Analyse durchgeführt werden, sondern es handelt sich um eine einfache analytische Berechnung. Der Großteil der zuvor erwähnten Nachweise konnten beibehalten werden. Es musste lediglich bei der Berechnung der Spannungen das  $\gamma$ -Verfahren hinterlegt werden. Zur Übersicht der Funktionsweise des finalen Tools sind seine wichtigsten Einzelbestandteile im Anschluss erläutert.



### Eingangsparameter

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die möglichen Eingangsparemeter, welche definiert werden können. Es handelt sich hierbei um einen Auszug aus dem Tool. Es zeigt sich, dass die Systemlänge, die Lasten, die Einwirkungsduer, die Verbindungsmittleigenschaften, das Betonalter sowie die Zementklasse definiert werden können.

Hierdurch sind das statische System, die Steifigkeit in der Verbindungsfuge und die Kriech- und Schwindeigenschaften festgelegt.

### Systemparameter

Die Querschnittsabmessungen des Systems werden in den Systemparametern, welche in Anhang A-1 zu sehen sind, definiert. Es handelt sich ebenfalls, wie bei den Eingangsparametern um Slider, wobei der Unterschied darin besteht, dass im Rahmen der Parameterstudien einzelne der Slider mit dem Optimierungstool *Galapagos* verknüpft sind. Dies hat zur Folge, dass das Tool bei der Optimierung die ausgewählten Slider als Variationsparameter erkennt.

Neben den Abmessungen der beiden Querschnittsbestandteile (Betonplatte und Holzbalken) werden in den Systemparametern auch die Gesamthöhe und die wirksame Gurtbreite  $b_{eff}$  definiert. Die Aufbauhöhe der Deckenkonstruktion kann definiert werden, da diese ein wesentlicher Einflussparameter in der Planung einer HBV-Decke ist. Durch die Festlegung dieser Obergrenze werden die Optimierungen des Tools für Deckenhöhen mit einem kleineren Aufbau durchgeführt. Die Breite  $b_{eff}$  wiederum berechnet sich normgerecht anhand der Breite der Betonplatte und der Systemlänge.

### Materialeingabe

In der Materialeingabe können die Materialien des Betongurtes und des Holzbalkens ausgewählt werden. Exemplarisch sind in

Anhang A-2 die Betonsorten dargestellt, welche zur Auswahl stehen. Durch Verschieben des Sliders kann die gewollte Betonfestigkeit ausgewählt werden. Deckungsgleich kann bezüglich der Holzsorte vorgegangen werden.

### Berechnung effektive Steifigkeit

In Anhang A-3 ist die Berechnung der effektiven Steifigkeit nach Formel (1) in Kapitel 2.1.1 gezeigt. Die Darstellung zeigt hierbei, als repräsentatives Beispiel, die Berechnung zum Bemessungszeitpunkt  $t=0$ . Es wird hierfür anhand der gewählten Materialien und deren E-Module der  $\gamma$ -Wert des Systems berechnet. Dieser ist wiederum Grundlage der Schwerpunktabstände ( $a_1$  und  $a_2$ ) und der effektiven Steifigkeit.

### Berechnung der Einwirkung

In

Anhang A-4 ist beispielhaft die Berechnung der Einwirkungen zum Bemessungszeitpunkt  $t=0$  gezeigt. Es wird hierbei das maßgebende Gesamtmoment auf den Verbundquerschnitt und die maßgebende Querkraft aus den Eigengewichts-, Aufbau- und Nutzlasten berechnet.

#### Berechnung Schnittkräfte und Spannungen

Die Berechnung der Schnittkräfte ist exemplarisch zum Zeitpunkt  $t=0$  in Anhang A-5 zu sehen. Es werden hierbei das Moment und die Normalkraft der beiden Querschnittsbestandteile berechnet. Im Anschluss werden anhand dieser Werte die Spannungen der beiden Querschnitte berechnet.

#### Nachweis der Einzelquerschnitte

In Anhang A-6 und Anhang A-7 ist die Nachweisführung der beiden Einzelquerschnitte, zum Zeitpunkt  $t=0$ , dargestellt. Beim Nachweis des Betonquerschnitts wird die Bewehrung anhand der statisch erforderlichen Bewehrung über das  $\omega$ -Verfahren oder über die Mindestbewehrung ermittelt.

Der Holzquerschnitt hingegen wird auf die Interaktion von Biege- und Normalspannungen nachgewiesen. Die gesamte Querkraft wird dem Holzanteil zugeschrieben und der Querschnitt für diese nachgewiesen.

Neben den Querschnitten werden noch die Durchbiegung nachgewiesen und der Schwingungsnachweis geführt. Darüber hinaus wird auch die Nebentragsrichtung hinsichtlich des GZT und GZG nachgewiesen.

#### Berechnung Zielgrößen

In letzter Instanz werden die jeweils untersuchten Zielgrößen (GWP, Materialkosten, Baukosten, Eigengewicht, Holzgewicht) ermittelt. Deren Berechnungsgrundlage ist hierbei immer das Volumen der Einzelbestandteile. Die Berechnung der Zielgrößen ist somit eine simple Multiplikation der Volumina der Einzelbestandteile mit dem jeweiligen Kosten-, GWP-Faktor usw. Die untersuchte Zielgröße ist wiederum mit dem Optimierungstool *Galapagos* verknüpft.

### **2.2.4 Vergleichsrechnung**

Die Berechnungssystematik des Berechnungstools wurde anhand einer Vergleichsrechnung mit einem FE-Programm verifiziert. Es wurden hierbei die Berechnungsergebnisse der Schnittkräfte gegenübergestellt. Die folgenden Berechnungen wie die Nachweisführung und die Ermittlung der Zielgrößen ist unabhängig von der Berechnungssystematik. Folgende Ausgangswerte sind die Randbedingungen der Berechnungen:

- Spannweite: 8m
- Abmessungen Holzbalken (GL24h):  $b \times h = 10 \times 40$  cm
- Abmessungen Betonplatte (C25/30):  $b \times h = 200 \times 14$  cm
- Verbindungsmittelsteifigkeit (HBV-Verbinder, kontinuierlich): 820 N/mm/mm

Repräsentativ sind die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen zum Zeitpunkt  $t=0$  in Tab.2.8 dargestellt.

**Tab.2.8: Vergleichsrechnung FE-Programm**

Nachweis	Bauteil	Größe	Karamba 3D	FE-Ber.	Abweichung
GZT ( $t=0$ )	Betonplatte	$N_{Ed}$	-413,05 kN	-400,45 kN	3,1 %
		$M_{Ed}$	55,77 kNm	60,79 kNm	9,0 %
	Holzbalken	$N_{Ed}$	413,05 kN	400,45 kN	3,1 %
		$M_{Ed}$	24,13 kNm	22,51 kNm	7,2 %
		$V_{Ed}$	95,71 kN	95,71 kN	0,0 %
GZG ( $t=0$ )	Gesamtqu.	$w_{inst}$	18,41 mm	20,50 mm	11,4 %
		Eigenfrequenz $f$	4,96 Hz	4,67	6,2 %
		Verformung $w_{1kN}$	0,21 mm	0,24 mm	14,0 %

Es zeigt sich hierbei, dass die Steifigkeit des Systems bei der Berechnung anhand des  $\gamma$  - Verfahrens etwas größer ausfällt als bei der Berechnung mit einem Stabwerkmodell. Des Weiteren sind die Abweichung im GZG größer als im GZT. Die Abweichungen sind auf die unterschiedliche Modellbildung zurückzuführen und sind zusammenfassend tolerierbar.

## Kapitel 3 Technische und Ökologische Optimierung

Im Rahmen der folgenden Parameterstudien sollen verschiedene Zielgrößen untersucht werden. Vorab müssen jedoch für die Optimierung Mindestabmessungen und Grenzwerte gesetzt werden. Rein mechanisch ist ein 1 cm breiter und 50 cm hoher Holzbalken einer HBV-Decke aufgrund seines große Trägheits- und Widerstandsmomentes sehr steif und tragfähig. Aus einer praktischen Betrachtung wird sich jedoch jedem erschließen, dass ein solches System nicht realisierbar ist. Der Holzbalken ist hierbei zu schlank, um die VM normgerecht einzubringen und aus einer brandschutztechnischen Perspektive besitzt das Bauteil eine viel zu große relative Oberfläche. Als Mindestabmessungen werden die Werte aus Kapitel 2.1.2 angesetzt:

- Mindeststärke Beton  $\geq 7$  cm
- Mindestabmessungen Balken  $\geq 8 \times 8$  cm
- Höhe Betonanteil / Höhe Holzanteil  $\leq 70$  %

Hierdurch ist sichergestellt, dass je nach VM eine oder zwei VM-Reihen in den Holzbalken eingebracht werden können und die Betonplatte baupraktisch ausgeführt werden kann.

### 3.1 Randbedingungen

Die Parameterstudien werden hinsichtlich verschiedener Zielgrößen durchgeführt, wobei die Ergebnisse von den gesetzten Randbedingungen abhängig sind. Die wesentlichen Randbedingungen stellen sich wie folgt dar:

- Nutzungskategorie der Decke (wesentlich davon abhängig ist die Nutzlast der Decke)
- Eigengewicht der Decken
- Werkstoffe
- Verbindungsmittelsteifigkeit

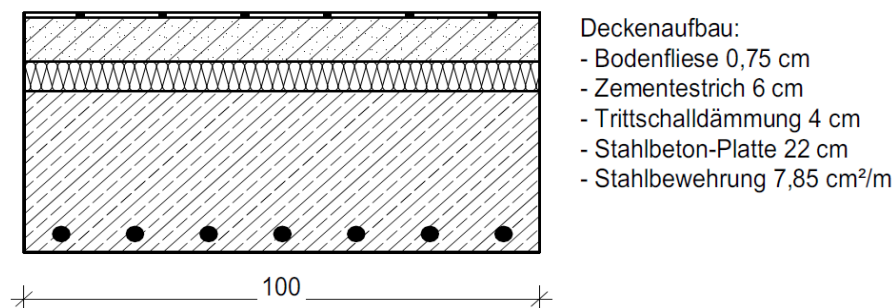
Die einzelnen Randbedingungen werden im Folgenden detailliert beschrieben.

#### Nutzungskategorien

Die optimierten Deckensysteme sollen sich auf die Nutzung in Wohn- und Aufenthaltsräumen sowie Büroflächen, Arbeitsflächen und Flure beziehen. Die maßgebende charakteristische Nutzlast nach [11] ergibt sich hierbei zu 2 kN/m<sup>2</sup>. Unter der Berücksichtigung der Anordnung von leichten Trennwänden ergibt sich eine charakteristische Nutzlast von 2,8 kN/m<sup>2</sup>. Im Rahmen der Untersuchungen wird der gerundete Wert von 3 kN/m<sup>2</sup> angesetzt.

#### Eigengewicht der Decke

Neben dem Eigengewicht der Deckenkonstruktion und der Nutzlast hat auch der Bodenaufbau einen Einfluss auf die Größe der Belastung. Zur Ermittlung des Eigengewichtes des Bodenaufbaus wird eine standardmäßige Konstruktion angesetzt. Der Schichtaufbau des Bodens ist hierbei in Abb.3.1 zu sehen.



**Abb.3.1: Bodenaufbau**

Anhand der gezeigten Schichten wurde die Flächenlast (ohne Tragschicht) in Tab.3.1 berechnet.

**Tab.3.1: Eigengewicht Bodenaufbau**

Material	Berechnung	Wert
Bodenfliese	0,22 kN/m <sup>2</sup> /cm × 0,75 cm =	0,17 kN/m <sup>2</sup>
Zementestrich	0,22 kN/m <sup>2</sup> /cm × 6,00 cm =	1,32 kN/m <sup>2</sup>
Trittschalldämmung	0,01 kN/m <sup>2</sup> /cm × 4,00 cm =	0,04 kN/m <sup>2</sup>
Σ	-	1,53 kN/m <sup>2</sup>

Im Rahmen der Untersuchungen wird der gerundete Wert von 1,5 kN/m<sup>2</sup> angesetzt.

### Werkstoffe

Als Werkstoffe können mit dem Tool, wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, die Werkstoffe C20/25, C30/37, C24, C30, GL24h und GL28h untersucht werden. Es wurde sich im Rahmen der Berechnungen jedoch, auf Grund der praktischen Relevanz, auf die beiden Werkstoffe C20/25 und GL24h beschränkt.

### Verbindungsmittelsteifigkeit

Die Steifigkeit  $K_{ser}$  der VM hat wesentlichen Einfluss auf Bemessung und folglich die Dimensionen der HBV-Konstruktion. Als einer der wesentlichen Bemessungsparameter sollen innerhalb der Parameterstudie verschiedene VM-Steifigkeiten betrachtet werden. Anhand der in Kapitel 2.1.2 aufgelisteten Verbindungsmittel stellen sich die Grenzwerte wie folgt dar:

- $100 \text{ N/mm/mm}^*1 \leq K_{ser} \leq 1000 \text{ N/mm/mm}^*2$

\*1 z.B. Würth Assy 100 mm mit FT-Verbinder alle 10 cm -  $K_{ser} = 90 \text{ N/mm/mm}$

\*2 z.B. HBV-Verbinder Typ 90 -  $K_{ser} = 825 \text{ N/mm/mm}$  oder Tcc 12 × 210 mm alle 5 cm -  $K_{ser} = 920 \text{ N/mm/mm}$

Aufgrund des großen Aufwandes bei den Parameterstudien sollen lediglich die VM-Steifigkeiten von 200, 500 und 1000 N/mm/mm als Referenzwerte untersucht werden.

In den folgenden Parameterstudien werden Tabellen und Diagramme erarbeitet, anhand welcher optimierte Bauteilabmessungen abgeleitet werden können. Hierbei sind diese Tabellen wesentlich abhängig von den zuvor genannten verschiedenen VM-Steifigkeiten. Damit dem Anwender bewusst ist, welche VM er in welcher Anzahl und in welchem Abstand zur Erreichung der gewollten Steifigkeit anzuordnen hat, sind diese Informationen in **Fehler! V erweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelistet.

Soll eine gewünschte Steifigkeit in der Verbundfuge erreicht werden, muss sich lediglich nach den Werten aus der Tabelle gerichtet werden. Teilweise ist es auch möglich, VM zwei oder mehr Reihen anzuordnen. Hierbei muss die Mindestbreite des Balkens beachtet werden. Darüber hinaus muss bei einem sehr geringen VM-Abstand überprüft werden, ob dieser nach der jeweiligen Zulassung ausgeführt werden darf. Die Überprüfung, ob ein VM bei dem gewählten Abstand ausreichend tragfähig ist, muss hierbei im Rahmen der Ausführungsstatik untersucht werden.

**Tab.3.2: Berechnete VM-Abstände in Abhängigkeit des VM anhand von den grundsätzlichen Informationen aus [7]**

Verbindungsmittel	K <sub>ser</sub> je VM	K <sub>ser</sub>									
		[N/mm/mm]									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
		VM-Abstand									
	[N/mm]	[mm]									
HBV-Verbinder HBV Typ 90/200	-	825*									
HBV-Verbinder HBV Typ 105/200	-	395*									
HBV-Verbinder HBV Typ 120/200	-	331*									
Würth ASSY 10mm mit FT Verbinder	9000	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25	10,00	9,00
TCC 7,3 x 150 mm je Schraube	42423	424,23	212,12	141,41	106,06	84,85	70,71	60,60	53,03	47,14	42,42
TCC 8 x 180 mm je Schraube	47241	472,41	236,21	157,47	118,10	94,48	78,74	67,49	59,05	52,49	47,24
TCC 9 x 180 mm je Schraube	48368	483,68	241,84	161,23	120,92	96,74	80,61	69,10	60,46	53,74	48,37
TCC 12 x 210 mm je Schraube	55108	551,08	275,54	183,69	137,77	110,22	91,85	78,73	68,89	61,23	55,11
SFS VB 100 [je Paar]	22800	228,00	114,00	76,00	57,00	45,60	38,00	32,57	28,50	25,33	22,80
SFS VB 165 [je Paar]	32400	324,00	162,00	108,00	81,00	64,80	54,00	46,29	40,50	36,00	32,40
Würth ASSY 8mm je Schraube	20000	200,00	100,00	66,67	50,00	40,00	33,33	28,57	25,00	22,22	20,00
Würth ASSY 10mm je Schraube	9000	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25	10,00	9,00
TIMCO II je Schraube	12740	127,40	63,70	42,47	31,85	25,48	21,23	18,20	15,93	14,16	12,74
TIMCO III je Schraube	16900	169,00	84,50	56,33	42,25	33,80	28,17	24,14	21,13	18,78	16,90
Rapid T-Con 8 x 155 mm je Schraube	9000	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25	10,00	9,00
Rapid T-Con 8 x 205 mm je Schraube	9000	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25	10,00	9,00
StarDrive GPR je Schraube	9000	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25	10,00	9,00

\* es handelt sich um ein lineares VM

### 3.2 Parameterstudie I: Vergleich Zielgrößen

#### Randbedingungen

In einer ersten Parameterstudie sollen verschiedene Zielgrößen verglichen werden. Es soll hierbei untersucht werden, ob bei den verschiedenen Zielgrößen abweichende Querschnittsabmessungen auftreten. Des Weiteren soll im Anschluss eine Bewertung der Sinnhaftigkeit der einzelnen Zielgrößen stattfinden. Folgende Zielgrößen sollen untersucht werden:

- Global-Warming-Potential
- Materialkosten
- Baukosten
- Eigengewicht Tragkonstruktion

Es soll neben den Zielgrößen aus Kapitel 0 auch das Eigengewicht der Gesamtkonstruktion untersucht werden, um die leichteste Konstruktionsweise zu ermitteln.

In der Parameterstudie werden gleichbleibende Randbedingungen nach Kapitel 3.1 angesetzt. Es sollen noch keine Schlussfolgerungen für eine sinnvolle Konstruktionsweise von HBV-Decken gezogen werden, sondern es sollen die unterschiedlichen Zielgrößen hinsichtlich verschiedener Ergebnisse der Optimierung verglichen werden. Die Randbedingungen sind in Tab.3.3 dargestellt.

**Tab.3.3: Randbedingungen Parameterstudie I**

<b>Gebäudekategorie</b>	Wohngebäude	$q_k =$	3 kN/m <sup>2</sup>
<b>Last Bodenaufbau</b>		$g_k =$	1,5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Holzanteil</b>	GL24h		
<b>Betonanteil</b>	C20/25		
<b>Verbindungsmitelsteifigkeit</b>		$K_{ser} =$	200 N/mm/mm

### Optimierung

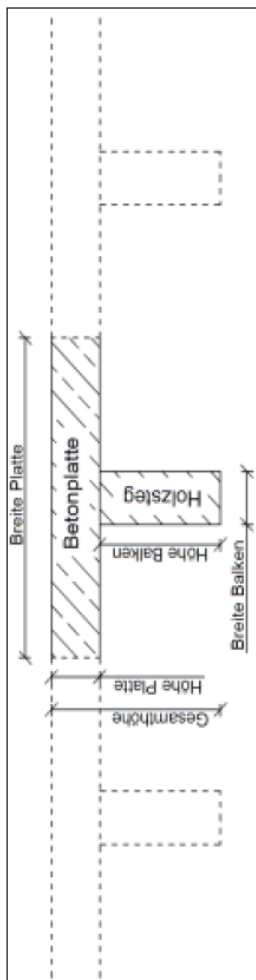
Bei der Optimierung der einzelnen Zielgrößen wurden die Spannweiten von 6, 6,5 und 7 m untersucht. Es ergaben sich für die Zielgrößen „Materialkosten“, „Baukosten“ und „Eigengewicht Tragkonstruktion“ die in Abb.3.2 dargestellten Systemabmessungen bei den 3 untersuchten Spannweiten.

Es lassen sich hierbei mehrere Dinge erkennen. Es ist zu sehen, dass bei den 3 betrachteten Spannweiten die optimierten Abmessungen der beiden Bestandteile Betonplatte und Holzbalken in Hinsicht auf die 3 Zielgrößen identisch sind. Darüber hinaus ist in allen 3 Fällen der Schubnachweis des Holzanteils maßgebend. Außerdem zeigt sich in Abb.3.2, dass die Materialkosten, unter den getroffenen Annahmen, ca. 30 % der Baukosten betragen.

Es lässt sich des Weiteren sehen, dass ein wesentlicher Teil der Optimierung über die Gesamthöhe des Tragwerks geschieht. Die Gesamthöhe der statischen Konstruktion von 51 bis 60 cm ist bei diesen mittelweiten Spannweiten für eine praktische Anwendung nicht geeignet. Es zeigt sich hieraus, dass bei der Optimierung weitere Restriktionen vorgegeben werden müssen, da die Systeme sonst immer über die Trägerhöhe optimiert werden. Auf diesen Punkt wird in den nachfolgenden Kapiteln noch weiter eingegangen.

Zuletzt wurde die Stärke der Betonplatte bei allen Untersuchungen mit 7 cm vom Tool festgelegt, sprich mit der minimal erforderlichen Plattendicke. Dieser Sachverhalt soll in den nachfolgenden Untersuchungen ebenfalls genauer untersucht werden.

Gebäudekategorie:	Wohngebäude	qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:		gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h		
Betonanteil:	C20/25		
Verbindungsmitelsteifigkeit:		kser =	200 N/mm/mm

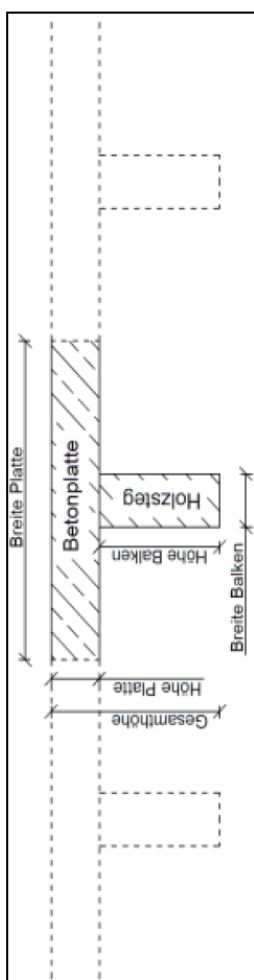


Zielgröße = Eigengewicht, Materialkosten, Baukosten

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	Materialk. [€/m <sup>2</sup> ]	Baukosten [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Eigengewicht [kg/m <sup>2</sup> ]
6	51	7	133	44	8	0,21	Schub-Holz	34,4	89,6	186,1
6,5	59	7	145	52	8	0,22	Schub-Holz	36,5	91,2	187,0
7	60	7	137	53	8	0,26	Schub-Holz	38,4	93,5	188,0

Abb. 3.2: Vergleich Zielgrößen I

Gebäudekategorie:	Wohngebäude	qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:		gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h		
Betonanteil:	C20/25		
Verbindungsmitelsteifigkeit:		kser =	200 N/mm/mm



Zielgröße = Umweltfolgekosten + Materialkosten, Umweltfolgekosten + Baukosten

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	Umweltfolgekosten + Materialkosten [€/m <sup>2</sup> ]	Umweltfolgekosten + Baukosten [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]
6	51	7	133	44	8	0,21	Schub-Holz	35,6	90,8
6,5	59	7	145	52	8	0,22	Schub-Holz	37,6	92,3
7	60	7	137	53	8	0,26	Schub-Holz	39,4	94,5

Abb.3.3: Vergleich Zielgrößen II



Die Optimierung anhand der Zielgröße GWP konnte nicht abgeschlossen werden. Das Programm versucht den Holzanteil immer weiter zu steigern, da dieser einen negativen CO<sub>2</sub>-Ausstoß vorweist und somit CO<sub>2</sub> bindet.

Dies zeigt eine wesentliche Schwachstelle der Ökobilanzierung zum jetzigen Zeitpunkt. Durch die negative Ökobilanz von Werkstoffen wie Holz kann bei einer Optimierung kein Minimum gefunden werden, da sich dieses durch die Steigerung des Holzanteils immer weiter verringern lässt. Die Optimierung anhand des GWP ist somit nicht zielführend und es kann damit kein sinnvolles Verhältnis zwischen Beton- und Holzanteil ermittelt werden. In der Praxis besteht hierbei die Gefahr des „Greenwashings“. Da das sinnvolle Verhältnis von beispielsweise Betonanteil zu Holzanteil nicht bekannt ist, kann letzterer so weit gesteigert werden, bis die Ökobilanz des Bauteils scheinbar äußerst günstig ausfällt.

Um trotzdem den Einfluss der Umweltschädigung in den Untersuchungen bewerten zu können, soll dieser durch die in Kapitel 0 genannten Umweltfolgekosten berücksichtigt werden. Um diese ins Verhältnis zu den Bau- bzw. Materialkosten zu setzen, werden diese ebenfalls betrachtet. Hieraus ergeben sich folgende weitere Zielgrößen:

- Umweltfolgekosten + Materialkosten
- Umweltfolgekosten + Baukosten

Durch diese beiden Untersuchungen kann eine ökologische und eine wirtschaftliche Betrachtung kombiniert werden.

Es zeigt sich in Abb.3.3, dass der Einfluss der Umweltfolgekosten keine Auswirkung auf die Querschnittsabmessungen hat. Des Weiteren zeigt sich, dass die Material- und Baukosten unter Berücksichtigung der Umweltfolgekosten gegenüber Abb.3.2 nur unwesentlich höher sind. Dies wirft die Frage auf, ob die Umweltfolgekosten zum jetzigen Zeitpunkt hoch genug beziffert werden und ob diese in einem sinnvollen Verhältnis zu den Material- bzw. Baukosten stehen.

### Auswertung

Es können in der ersten Parameterstudie zu den möglichen Zielgrößen mehrere Punkte festgehalten werden:

- das GWP eignet sich nicht zur Durchführung der Optimierung von HBV-Decken
- alle Zielgrößen führen zu gleichen Querschnittsabmessungen
- die Umweltfolgekosten sind im Rahmen der Optimierung unterrepräsentiert
- das Programm optimiert die Systeme vor allem über die Trägerhöhe

Aus diesen Punkten lassen sich mehrere Erkenntnisse für die folgenden Parameterstudien ableiten. Da die Systeme wesentlich über die Trägerhöhe optimiert werden, ist es sinnig dahingehend in den Untersuchungen Restriktionen einzuführen. Im Rahmen des Entwurfs von Deckensystemen ist die Deckenhöhe ein wesentlicher Entwurfsparameter, da diese wesentlichen Einfluss auf die nutzbare Raumhöhe hat. In den folgenden Studien sollen somit verschiedene maximale Deckenhöhen vorgegeben werden.

Die zweite wesentliche Erkenntnis ist, dass zwar alle untersuchten Zielgrößen die gleichen optimierten Systeme geliefert haben, jedoch wurde keine geeignete Zielgröße zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Systeme gefunden.

Es lässt sich jedoch durch weitere Überlegungen eine geeignete Zielgröße erschließen. Wie zuvor erwähnt ist es bei der Ökobilanz von HBV-Systemen aus den Werkstoffen Holz und Stahlbeton schwierig deren geeignetes Verhältnis zu finden. Es zeigt sich klar, dass der Werkstoff Holz eine bessere Ökobilanz besitzt als der Werkstoff Beton. Jedoch macht es keinen Sinn mehr Holz zu verbauen als statisch erforderlich. Die Ökobilanz berücksichtigt die günstige Wirkung des Werkstoffes Holz bei der Optimierung, jedoch nicht, dass der Werkstoff Holz nicht unbegrenzt zur Verfügung steht. Der Werkstoff Holz besitzt nämlich nicht nur eine günstige Ökobilanz, sondern besitzt auch Substitutionspotential hinsichtlich der Vermeidung anderer Werkstoffe. Für jeden Holzbalken, der bei der Konstruktion einer HBV-Decke eingespart werden kann, kann an anderer Stelle durch eben diesen Holzbalken eine gewisse Menge Beton und Stahl eingespart werden.

Des Weiteren könnte man auch die Frage aufwerfen, wieso man denn überhaupt eine HBV-Decke ausbilden sollte, wenn eine Holzbalkendecke vermeintlich eine günstigere Ökobilanz besitzt. In der Baupraxis sind jedoch Holzbalkendecken sehr schwindungsanfällig, dass in der Regel die Masse der Decke durch z.B. hohe Estrichschichten oder Schüttungen erhöht werden muss. Diese zusätzlichen Schichten verursachen größere Holzquerschnitte und erzeugen in der Regel ähnlich große Mengen an CO<sub>2</sub> wie der Plattenanteil der HBV-Decke. Bei der HBV-Decke hingegen sorgt der Betonanteil zum einen für ein größeres Eigengewicht und somit eine geringere Schwingungsanfälligkeit der Decke und zum anderen beteiligt sich die Betonplatte an der Lastabtragung, sodass eine geringere Menge an Holz bei gleicher Steifigkeit benötigt wird. Folglich haben HBV-Decken auch aus ökologischer Betrachtung eine Berechtigung. Zusammenfassend müssen somit bei der ökologischen Optimierung von HBV-Decken drei Zielgrößen berücksichtigt werden und diese 3 Punkte sind die Grundvoraussetzung der weiteren folgenden Parameterstudien:

- 1. die Decke sollte nach wie vor eine möglichst geringe Menge an CO<sub>2</sub> ausstoßen**
- 2. es sollte möglichst wenig Beton verbaut werden (ungünstigen Ökobilanz)**
- 3. es sollte möglichst wenig Holz verbaut werden (Substitutionswirkung)**

### **3.3 Parameterstudie II: Vergleich Betonstärke**

Die Grundlage der zweiten Parameterstudie sind die Erkenntnisse der vorangegangenen Studie. Es ist im Rahmen der Optimierung nicht möglich, mehrere Zielgrößen zu definieren. Infolgedessen wurde in der Studie die Betonstärke der Platte manuell angepasst und das System hinsichtlich eines minimalen Holzanteils optimiert. Anschließend lassen sich die verschiedenen Systeme auch hinsichtlich des GWP vergleichen. Durch diese Vorgehensweise können alle drei Zielgrößen bewertet werden.

#### Randbedingungen

Es wurden zur Durchführung der zweiten Parameterstudie die gleichen Randbedingungen angesetzt, wie in der ersten Studie.

#### Optimierung

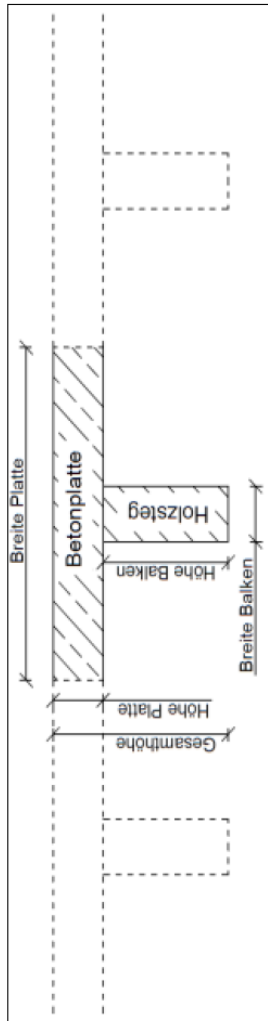
Die Ergebnisse der zweiten Parameterstudie sind in Abb.3.4 dargestellt. Untersucht wird eine Spannweite von 6 m. Es wird des Weiteren bei den Berechnungen, abweichend zur vorangegangenen Studie, die Betonstärke und die Deckenhöhe vorgegeben (gelbe Markierung). Bezüglich der Betonstärke wird hierbei die Stärke von 7, 9 und 11 cm untersucht. Als Deckenhöhen werden 30, 35, 40 und 45 cm betrachtet. Diese Deckenhöhen stellen realistische Grenzwerte für die praktische Anwendung dar.

Es lassen sich anhand der Ergebnisse mehrere Punkte festhalten. Es zeigt sich, dass eine Vergrößerung der Gesamtdeckenhöhe, wie zu erwarten, zu einem geringeren Gesamtgewicht und zu einem besser GWP führt. Das Tool optimiert die Systeme weiterhin über die Trägerhöhe und nutzt diese immer komplett aus. Des Weiteren zeigt sich, dass das GWP, die Gesamtmasse und die Masse der Einzelbestandteile, bei gleicher Gesamthöhe, am geringsten ist, wenn die Betonstärke lediglich den Mindestwert von 7 cm aufweist.

#### Auswertung

Die durchgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass bei den betrachteten Rechnungen eine größere Betonstärke keine weiteren Vorteile bietet. Es sind auch bei einer Stärke von 7 cm alle Nachweise eingehalten und zugleich kann das GWP und das Eigengewicht der Konstruktion minimiert werden. Aufgrund dieser Ergebnisse gibt es keine erkennbaren Gründe die Stärke der Betonplatte größer als 7 cm auszuführen. Ausnahmen bilden hierbei ggf. sehr große Spannweiten, welche im Rahmen der Untersuchungen nicht betrachtet wurden. Die Betonstärke von 7 cm soll hierbei den folgenden weiteren Untersuchungen zu Grunde gelegt werden.

Gebäudekategorie:	Wohngebäude	qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:		gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h		
Betonanteil:	C20/25		
Verbindungsmitelsteifigkeit:		Kser =	200 N/mm/mm



**Zielgröße = Holzverbrauch**

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	CO <sub>2</sub> -Äqu. [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamtmasse [kg/m <sup>2</sup> ]	Massen Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Massen Holz [kg/m <sup>2</sup> ]
6	30	7	76	23	21	0,31	Eigenfrequenz	-4,4	201,7	175,0	26,7
	35	7	78	28	11	0,31	Biegung Holz	2,3	191,6	175,0	16,6
	40	7	88	33	9	0,28	Biegung Holz	3,9	189,2	175,0	14,2
	45	7	102	38	8	0,25	Biegung Holz	5,0	187,5	175,0	12,5
6	30	9	63	21	23	0,30	Steifigkeit	-4,4	257,2	225,0	32,2
	35	9	71	26	11	0,28	Eigenfrequenz	5,8	241,9	225,0	16,9
	40	9	71	31	8	0,28	Biegung Holz	7,3	239,7	225,0	14,7
	45	9	92	36	8	0,23	Biegung Holz	8,3	238,1	225,0	13,1
6	30	11	70	19	29	0,24	Eigenfrequenz	-1,2	308,1	275,0	33,1
	35	11	64	24	11	0,26	Eigenfrequenz	9,3	292,3	275,0	17,3
	40	11	111	29	14	0,17	Biegung Holz	10,6	290,4	275,0	15,4
	45	11	85	34	8	0,21	Biegung Holz	11,9	288,4	275,0	13,4

Abb.3.4: Variation der Betonstärke

### 3.4 Parameterstudie III: Optimierte Systeme

Im Rahmen dieser Parameterstudie werden verschiedene Spannweiten und verschiedene Deckenabmessungen untersucht, wobei die Betonstärke, auf Grund der Nachweisführung aus der vergangenen Parameterstudie, konstant mit 7 cm festgelegt wird. Ziel dieser Parameterstudie ist es Empfehlungen für sinnvolle Abmessungen von HBV-Decken zu liefern. Die Zielgröße der Optimierung ist hierbei ein möglichst nachhaltiges Tragwerk.

#### Randbedingungen

Die Randbedingungen sind deckungsgleich mit denen der vorangegangenen Untersuchungen, mit dem Unterschied, dass in den folgenden Untersuchungen die Verbindungsmittelsteifigkeit in den in Kapitel 3.1 genannten Grenzen variiert wird.

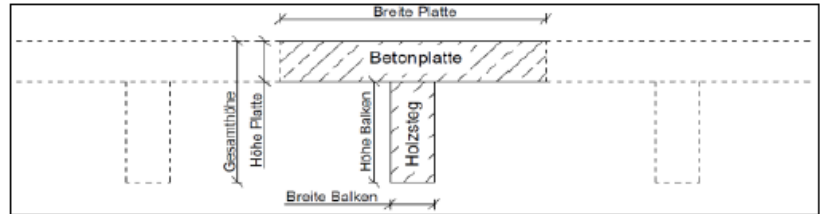
#### Optimierung

Die Optimierung wird repräsentativ für einen Betrachtungsfall erläutert, wobei die Ergebnisse in Abb.3.5 dargestellt sind. Die Grundlage der optimierten Abmessungen ist hierbei eine VM-Steifigkeit von 200 N/mm/mm, wobei Spannweiten zwischen 5-9 m untersucht werden. Diese Spannweiten decken den Anwendungsbereich von standardmäßigen Decken im Hochbau ab. Die festgelegten Werte sind erneut gelb hinterlegt. Die weiteren Auswertungen für die VM-Steifigkeiten von 500 und 1000 N/mm/mm sind im B-1 und B-2 zu finden.

#### Auswertung

Es lassen sich im Rahmen der Auswertung mehrere Schlussfolgerungen ziehen. Die Untersuchungen zeigen erneut, dass die Decke primär über die Trägerhöhe optimiert wird, da zu erkennen ist, dass der Holzanteil immer mit der maximal möglichen Trägerhöhe ausgeführt wird. Es zeigt sich des Weiteren, dass sich die sinnvollen Anwendungsgrenzen von HBV-Decken im Bereich eines Balkenabstands bewegen zwischen ca. 50-120 cm. Diese ergeben sich aus den untersuchten Gesamtdeckenhöhen. Es wurden Deckenhöhen zwischen  $L/13$  und  $L/20$  untersucht. Geringere Deckenhöhen führen zu einem wesentlich größeren Holzbedarf und größere Deckenhöhen führen nur zu einem unwesentlich geringerem Holzbedarf, wobei die Deckenhöhen sehr hoch ist, sodass diese starken Einfluss auf die Raumhöhe hat. Tendenziell wird der Holzträger immer schlanker und der Trägerabstand immer größer umso höher die Gesamtträgerhöhe wird.

Gebäudekategorie:	Wohngebäude: qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:	gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h	
Betonanteil:	C20/25	
Verbindungsmitelsteifigkeit:	K <sub>ser</sub> =	200 N/mm/mm



Zielgröße = Holzverbrauch												
Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	CO2-Äqu. [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamtm. [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Holz [kg/m <sup>2</sup> ]	
5	25	7	87	18	22	0,22	wfin,n	0,6	194,1	175,0	19,1	
	30	7	75	23	10	0,24	Biegung Holz	4,8	187,9	175,0	12,9	
	35	7	86	28	8	0,22	Biegung Holz	6,1	185,9	175,0	10,9	
	40	7	116	33	8	0,17	Biegung Holz	7,0	184,6	175,0	9,6	
5,5	30	7	85	23	15	0,26	Eigenfr.	2,0	192,0	175,0	17,0	
	35	7	90	26	12	0,24	Biegung Holz	3,7	189,6	175,0	14,6	
	40	7	94	33	8	0,24	Biegung Holz	5,5	186,8	175,0	11,8	
	45	7	122	38	8	0,19	Biegung Holz	6,4	185,5	175,0	10,5	
6	30	7	76	23	21	0,31	Eigenfr.	-4,4	201,7	175,0	26,7	
	35	7	78	28	11	0,31	Biegung Holz	2,3	191,6	175,0	16,6	
	40	7	88	33	9	0,28	Biegung Holz	3,9	189,2	175,0	14,2	
	45	7	102	38	8	0,25	Biegung Holz	5,0	187,5	175,0	12,5	
6,5	35	7	71	28	15	0,36	Eigenfr.	-3,2	199,8	175,0	24,8	
	40	7	75	33	9	0,35	Biegung Holz	2,3	191,6	175,0	16,6	
	45	7	87	38	8	0,32	Biegung Holz	3,6	189,7	175,0	14,7	
	50	7	110	43	8	0,27	Biegung Holz	4,6	188,1	175,0	13,1	
7	40	7	68	33	12	0,41	Eigenfr.	-2,9	199,5	175,0	24,5	
	45	7	74	38	8	0,39	Biegung Holz	1,9	192,3	175,0	17,3	
	50	7	94	43	8	0,33	Biegung Holz	3,1	190,4	175,0	15,4	
	55	7	116	48	8	0,29	Biegung Holz	4,1	188,9	175,0	13,9	
7,5	40	7	61	33	16	0,47	Eigenfr.	-10,9	211,4	175,0	36,4	
	45	7	65	38	10	0,46	Eigenfr.	-3,0	199,6	175,0	24,6	
	50	7	79	43	8	0,41	Eigenfr.	1,2	193,3	175,0	18,3	
	55	7	99	48	8	0,35	Biegung Holz	2,5	191,3	175,0	16,3	
8	45	7	58	38	13	0,52	Eigenfr.	-10,5	210,8	175,0	35,8	
	50	7	58	43	8	0,52	Eigenfr.	-3,2	199,9	175,0	24,9	
	55	7	82	48	8	0,43	Eigenfr.	0,3	194,7	175,0	19,7	
	60	7	105	53	8	0,37	Biegung Holz	2,1	192,0	175,0	17,0	
8,5	50	7	56	43	11	0,55	Eigenfr.	-10,3	210,5	175,0	35,5	
	55	7	61	48	8	0,53	Eigenfr.	-4,2	201,4	175,0	26,4	
	60	7	84	53	8	0,45	Eigenfr.	-0,8	196,2	175,0	21,2	
	65	7	107	58	8	0,39	Eigenfr.	1,2	193,2	175,0	18,2	
9	55	7	50	48	9	0,61	Eigenfr.	-10,8	211,3	175,0	36,3	
	60	7	63	53	8	0,55	Eigenfr.	-5,5	203,3	175,0	28,3	
	65	7	85	58	8	0,48	Eigenfr.	-1,9	197,9	175,0	22,9	
	70	7	109	63	8	0,42	Eigenfr.	0,4	194,4	175,0	19,4	

Abb.3.5: Optimierung (K<sub>ser</sub> = 200 N/mm/mm)

Darüber hinaus ist in Abb.3.5 ein Diagramm zur Querschnittsoptimierung dargestellt. Das Diagramm bezieht sich auf eine Spannweite von 6 m und eine VM-Steifigkeit von 200 N/mm/mm. Das Diagramm ermöglicht zwei wesentliche Punkte. Zum einen zeigt es, dass anfänglich durch die Steigerung der Gesamthöhe die Holzmasse wesentlich verringert wird, wobei dieser Effekt bei einer gewissen Höhe geringer wird. Grob liegt der Grenzwert, ab welchem eine weitere Erhöhung nur noch einen geringen Einfluss hat, bei einem Wert von L/16. Es zeigt sich in Kombination mit Abb.3.6, dass ab diesem Grenzwert in der Regel Tragfähigkeitsnachweise und nicht Gebrauchstauglichkeitsnachweise maßgebend sind. Zum anderen zeigt das Diagramm einen kontinuierlichen Verlauf der Einzelkurven, sodass anhand des Diagramms Werte zwischen den untersuchten Deckenhöhen dimensioniert werden können.

Die Diagramme zu den restlichen Spannweiten sind im Anhang und Anhang zu sehen. Die Diagramme zu den VM-Steifigkeiten von 500 und 1000 N/mm/mm sind im Anhang bis Anhang zu sehen.

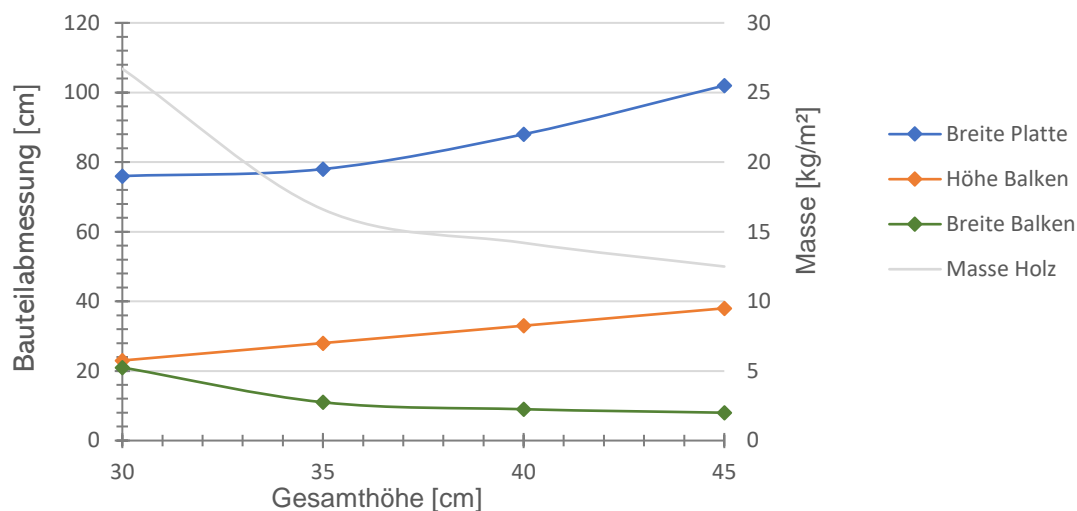


Abb.3.6: Querschnittsabmessungen ( $K_{ser} = 200 \text{ N/mm/mm}$ ) mit Spannweite 6 m

### 3.5 Parameterstudie IV: Vergleich Balkenabstand

Anhand der in der vorangegangenen Studie erarbeiteten Tabellen und Diagramme können HBV-Decken in Abhängigkeit der VM-Steifigkeit vordimensioniert werden. Hierbei wurden lediglich in Bezug auf die Gesamthöhe und die Stärke des Betonanteils Restriktionen gewählt. Jedoch ist es bei der Planung oft unerlässlich den Balkenabstand an die Gegebenheiten vor Ort anzupassen. Im Folgenden soll hierbei der Einfluss des Balkenabstandes auf das Eigengewicht des Holzanteils untersucht werden.

#### Randbedingungen

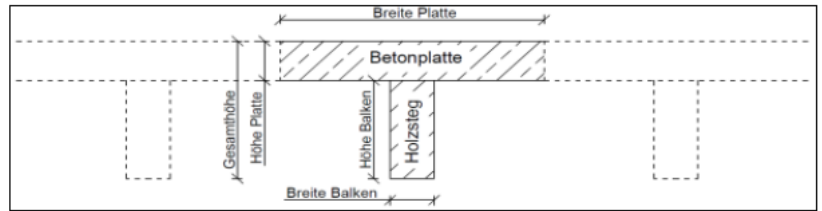
Die Randbedingungen sind deckungsgleich mit denen der vorangegangenen Untersuchungen. Die Gesamthöhe und die VM-Steifigkeit von  $200 \text{ N/mm/mm}$  wurde bei allen Berechnungen konstant angesetzt.

#### Optimierung

Die Optimierung ist in Abb.3.7 zu sehen. Es werden Spannweiten von 5,7 und 9 m untersucht. Darüber hinaus wird der Balkenabstand mit einer Schrittweite von 25 cm in den Grenzen von 50-150 cm untersucht. Es zeigt sich, dass der Balkenabstand mittleren bis großen Einfluss auf die Größe der Holzmasse hat. Zudem zeigt sich, dass bei geringeren Balkenabständen eher Gebrauchstauglichkeitsnachweise und bei größeren Abständen eher Tragfähigkeitsnachweise maßgebend werden.

## Ökologische und technische Optimierung durch ganzheitliche Betrachtung der HBV-Decke

Gebäudekategorie:	Wohngebäude qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:	gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h	
Betonanteil:	C20/25	
Verbindungsmitelsteifigkeit:	Kser =	200 N/mm/mm



### Zielgröße = Holzverbrauch

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	CO2-Äqu. [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamt m. [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Holz [kg/m <sup>2</sup> ]
5	25	7	87	18	22	0,22	wfin,n	0,6	194,1	175,0	19,1
	30	7	75	23	10	0,24	Biegung Holz	4,8	187,9	175,0	12,9
	35	7	86	28	8	0,22	Biegung Holz	6,1	185,9	175,0	10,9
	40	7	116	33	8	0,17	Biegung Holz	7,0	184,6	175,0	9,6
7	40	7	68	33	12	0,41	Eigenfr.	-2,9	199,5	175,0	24,5
	45	7	74	38	8	0,39	Biegung Holz	1,9	192,3	175,0	17,3
	50	7	94	43	8	0,33	Biegung Holz	3,1	190,4	175,0	15,4
	55	7	116	48	8	0,29	Biegung Holz	4,1	188,9	175,0	13,9
9	55	7	50	48	9	0,61	Eigenfr.	-10,8	211,3	175,0	36,3
	60	7	63	53	8	0,55	Eigenfr.	-5,5	203,3	175,0	28,3
	65	7	85	58	8	0,48	Eigenfr.	-1,9	197,9	175,0	22,9
	70	7	109	63	8	0,42	Eigenfr.	0,4	194,4	175,0	19,4

### Zielgröße = Holzverbrauch

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	CO2-Äquivalen [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamtmasse [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Holz [kg/m <sup>2</sup> ]
5	30	7	50	23	11	0,33	Steifigkeit	-0,8	196,3	175,0	21,3
	30	7	75	23	10	0,24	Biegung Holz	4,8	187,9	175,0	12,9
	30	7	100	23	14	0,19	Biegung Holz	4,4	188,5	175,0	13,5
	30	7	125	23	18	0,16	Biegung Holz	4,1	188,9	175,0	13,9
	30	7	150	23	22	0,16	Biegung Holz	4,0	189,2	175,0	14,2
7	45	7	50	38	8	0,49	Steifigkeit	-3,6	200,5	175,0	25,5
	45	7	75	37	9	0,39	Eigenfr.	0,9	193,6	175,0	18,6
	45	7	100	38	12	0,32	Eigenfr.	0,6	194,2	175,0	19,2
	45	7	125	38	16	0,27	Eigenfr.	-0,2	195,4	175,0	20,4
9	45	7	150	38	21	0,24	Eigenfr.	-1,4	197,3	175,0	22,3
	60	7	50	50	8	0,61	Eigenfr.	-9,0	208,6	175,0	33,6
	60	7	75	53	10	0,51	Eigenfr.	-6,4	204,7	175,0	29,7
	60	7	100	53	14	0,44	Eigenfr.	-7,4	206,2	175,0	31,2
9	60	7	125	53	19	0,38	Eigenfr.	-9,2	208,8	175,0	33,8
	60	7	150	53	25	0,34	Eigenfr.	-11,3	212,1	175,0	37,1

**Abb.3.7: Variation des Balkenabstandes**

### Auswertung

Im Rahmen der Auswertung sollen, wie im vorangegangenen Kapitel, die Effekte der Optimierung anhand von Diagrammen bewertet werden. Die Diagramme sind hierbei in Abb.3.8 zu sehen. Es zeigt sich, dass die Balkenhöhe bei allen Untersuchungen annähernd gleichbleibend ist. Die Tragfähigkeit wird hierbei über die Balkenbreite angepasst. Es lässt sich, wie zuvor erläutert, klar erkennen, dass die Kurve zur benötigten Holzmasse immer einen klar definierbaren Tiefpunkt aufweist. Der Tiefpunkt liegt hierbei beim Balkenabstand, welcher sich bei der vorangegangenen Parameterstudie ergeben hat. Umso weiter man sich vom idealen Abstand entfernt, desto größer wird die Holzmasse. In den Untersuchungen konnten Abweichungen in Bezug auf die Holzmasse von bis zu 40 % ermittelt werden.



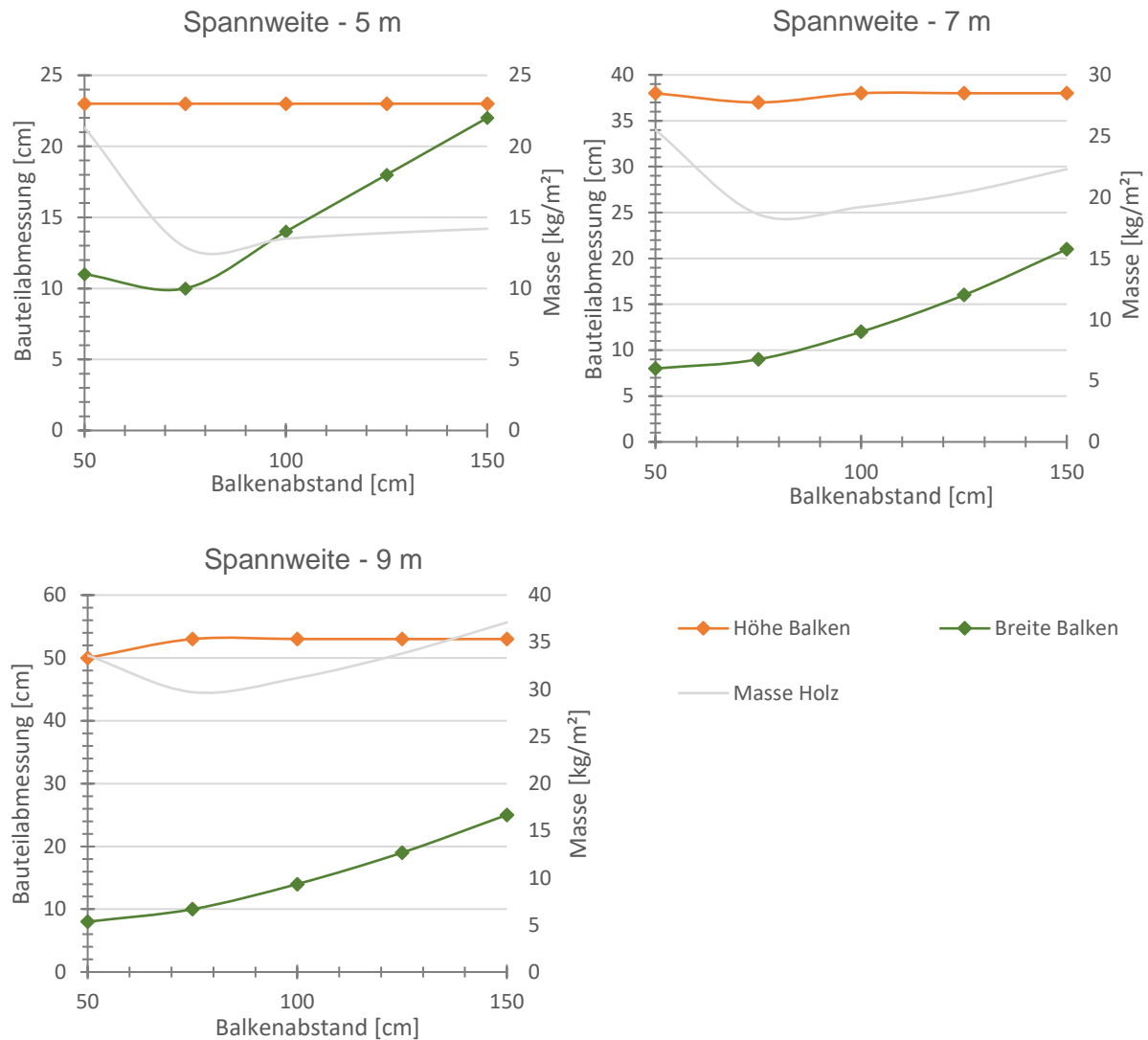


Abb.3.8: Variation des Balkenabstandes – Diagramme

### 3.6 Parameterstudie V: Vergleich mit konventionellem System

Im Rahmen dieser letzten abschließenden Parameterstudie sollen die optimierten Tragwerke einem konventionellen Tragwerk gegenübergestellt werden. Als Vergleichstragwerk wird hierbei eine Plattenbalkendecke aus Stahlbeton gewählt. Der Unterschied zu einer Flachdecke wäre noch größer. Es wurde sich jedoch für die Plattenbalkendecke entschieden um vergleichbare Systeme gegenüberstellen zu können.

#### Randbedingungen

Die Randbedingungen in Bezug auf die Belastung bleiben gleich. Es werden hinsichtlich der HBV-Decke die gleichen Materialien betrachtet, wie in den vorangegangenen Parameterstudien. Bezüglich des Plattenbalkens wird angenommen, dass dieser aus einem C20/25 gefertigt wird.

## Optimierung

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abb.3.9 dargestellt. Es sind die Abmessungen der Einzelbestandteile des Gesamtquerschnitts dargestellt. Darüber hinaus werden der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Systems, die Gesamtmasse, die Betonmasse und die Holzmasse aufgelistet. Es wurden im Rahmen der Berechnungen die 3 Spannweiten von 5,7 und 9 m betrachtet. Hierbei wurden als maximale Deckenhöhen 30, 45 und 60 cm angesetzt. Diese Werte haben sich als günstig in Parameterstudie III herausgestellt. Darüber hinaus wurde die Höhe der Platte bei der HBV-Decke weiterhin auf 7 cm begrenzt. Die Zielgröße der Optimierung war bei der HBV-Decke die Minimierung des Holzanteils und die Zielgröße bei der Stahlbeton-Plattenbalken-Decke die Minimierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, was gleichbedeutend mit der Minimierung des Eigengewichtes der Konstruktion ist (direkte Abhängigkeit von Betonmenge und CO<sub>2</sub>-Ausstoß). Es zeigt sich hierbei, dass wie schon in den vorangegangenen Parameterstudien in allen Fällen die maximal mögliche Deckenhöhe bei beiden Konstruktionsweisen voll ausgenutzt wird. In Bezug auf die geometrischen Abmessungen sind die wesentlichen Unterschiede, dass das System der STB-PB-Decke bei den beiden größeren Spannweiten mit einer größeren Plattenstärke ausgeführt wird als 7 cm und dass der Balkenabstand weitaus größer ist als bei der HBV-Decke.

Gebäudekategorie:	Wohng.	qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:		gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzwerkstoff:	GL24h		
Betonfestigkeitsklasse:	C20/25		

	Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Steg [cm]	Breite Steg [cm]	CO <sub>2</sub> -Äqu. [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamt m. [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Holz [kg/m <sup>2</sup> ]
HBV-Decke	5	30	7	75	23	10	4,8	187,9	175,0	12,9
	7	45	7	74	38	8	1,9	192,3	175,0	17,3
	9	60	7	63	53	8	-5,5	203,3	175,0	28,3
STB-PB-Decke	5	30	7	136	23	8	16,5	208,8	208,8	-
	7	45	8	184	37	8	19,2	240,2	240,2	-
	9	60	16	234	44	8	34,4	437,6	437,6	-

**Abb.3.9: Vergleich HBV-Decke und STB-PB-Decke**

## Auswertung

Es zeigt sich in der Untersuchung, dass vor allem bei größeren Spannweiten große Mengen an Beton eingespart werden können. Die Betonmenge bei den Spannweiten von 5, 7 und 9 m verringert sich um jeweils 16, 27 und 60 %. Hierbei werden, durch die Verwendung von Holz für den Steg, bei den einzelnen Spannweiten pro kg zusätzlichem Holz 2,62, 3,77 und 9,28 kg Beton eingespart. In Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß wirkt der Holzanteil ausgleichend, sodass die HBV-Systeme einen sehr geringen und teilweise negativen Wert in Bezug auf das GWP aufweisen.

## Kapitel 4 Fazit

Es konnte im Rahmen der Parameterstudie verschiedenste Empfehlungen und Ergebnisse erarbeiten werden.

Als erste wesentliche Erkenntnis hat sich aus Parameterstudie I ergeben, dass es sich unter den jetzigen Randbedingungen schwierig darstellt ökologische Optimierungen durchzuführen. Die Ökobilanzierung bietet zwar bei gegebenen Randbedingungen (Abmessungen usw.) die Möglichkeit verschiedene Systeme zu vergleichen aber nur eingeschränkt die Möglichkeit Optimierungen hinsichtlich einzelner Zielgrößen durchzuführen. Es hat sich gezeigt, dass sich die Optimierung in Bezug auf das GWP schwierig gestaltet. So bald einzelne Bestandteile des zu optimierenden Bauteils eine günstige Ökobilanz aufweisen (negativer Wert), ist es nicht mehr möglich ein Optimum des Systems zu finden. Die Optimierungssoftware wird in diesen Fällen den Anteil des ökologisch günstigsten Materials ohne Grenzwert optimieren wollen. Grundlegend ist das Problem der Ökobilanz zum jetzigen Zeitpunkt, dass diese in sich abgeschlossen ist und verschiedene äußere wesentliche Einflussparameter nicht berücksichtigt. Bei der Optimierung von Systemen kann nicht der begrenzte Zugang zu verschiedenen Werkstoffen berücksichtigt werden. Es steht z.B. nur eine definierte Menge Bauholz pro Jahr in Deutschland zur Verfügung, sodass es alleine schon aus praktischen Gründen nicht möglich wäre sämtliche Bauwerke aus Holz zu bauen, geschweige denn Holzbauwerke größer zu dimensionieren als statisch nötig (um mehr CO<sub>2</sub> zu binden). Darüber hinaus wird in der Ökobilanz nicht die Substitutionswirkung berücksichtigt, welche sich ergibt, wenn durch eingespartes ökologisch günstiges Material an anderer Stelle ökologisch ungünstiges Material minimiert werden kann. Um diese Problemstellung zu lösen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein spezifisches Vorgehen erarbeitet, um dennoch das nachhaltigste System ermitteln zu können. Wenn bei der ökologischen Optimierung von HBV-Systemen das GWP minimiert werden soll, muss auf Grund der zuvor erläuterten Erkenntnisse neben dem GWP der Holzanteil klein gehalten werden (Substitutionswirkung an anderer Stelle). Auf der einen Seite besitzt der Beton auf Grund seines großen Eigengewichtes einen günstigen Einfluss auf den Schwingungsnachweis und auf der anderen Seite hat dieser einen negativen Einfluss auf das GWP. Folglich sollte der Anteil des Betons so geringgehalten werden, dass lediglich alle wesentlichen Nachweise eingehalten sind. Zudem muss noch untersucht werden, ob eine Steigerung des Betonanteils zu einer Verringerung des Holzanteils führt. Hierbei müssten in der Folge die Substitutionswirkung des fehlenden Holzes den zusätzlichen Emissionen des Betons gegenübergestellt werden. Parameterstudie II hat gezeigt, dass eine Steigerung des Betonanteils in den betrachteten Anwendungsgrenzen bei keiner Untersuchung zu einer Verringerung des Holzanteils geführt hat. In der Folge ergibt sich, dass klar gesagt werden kann, dass der Betonanteil auf die kleinstmögliche Stärke minimiert werden sollte. Diese beträgt bei einer konventionellen Fertigung und unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen der Zulassungen der VM 7 cm.

In Parameterstudie III wurden verschiedene Systeme unter Variation der Spannweite und der Verbundfugensteifigkeiten optimiert. Hierbei wurden als Randbedingung für die Untersuchungen ein gängiger Deckenaufbau und Nutzlasten von Wohnhäusern angesetzt. Anhand der Ergebnisse der Parameterstudie können hierbei HBV-Systeme in der Praxis vordimensioniert werden. Es hat sich gezeigt, dass HBV-Systeme im Idealfall so ausgeführt werden, dass der GZT maßgebend wird. Besonders bei sehr schlanken Abmessungen hat

sich gezeigt, dass der Schwingungsnachweis bemessungsrelevant wurde und die benötigte Holzmasse relativ stark ansteigt. Wird das Tragwerk mit einer größeren Höhe als L/16 ausgeführt, wird in der Regel der GZT maßgebend, wobei höhere Deckenaufbauten stets zu einem nachhaltigeren Tragwerk führen. Beim GZT war in der Regel der Biegenachweis des Holzquerschnittes maßgebend.

In Parameterstudie IV wurde der Einfluss des Balkenabstandes auf den Holzverbrauch des Systems untersucht. Der Balkenabstand ist bei einer HBV-Decke gleich wie bei einer Holzbalkendecke ein wesentlicher Planungsparameter. Dieser hat Einfluss auf das Erscheinungsbild des Tragwerks, die Leitungsführung usw. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Variation des Balkenabstandes bei größeren Abweichungen vom Idealabstand, relativ großen Einfluss auf die benötigte Holzmasse hat. Die Abweichungen in Bezug auf die Massen sind bei verschiedenen Balkenabständen ähnlich groß wie bei verschiedenen Gesamtdeckenhöhen. Folglich kann gesagt werden, dass der Balkenabstand ein ebenso wichtiger Konstruktionsparameter in Bezug auf die Nachhaltigkeit einer HBV-Decke ist wie die Gesamtdeckenhöhe. Um ein möglichst nachhaltiges System zu erhalten, sollte sich an den Tabellen und Diagrammen aus Parameterstudie III orientiert werden.

In weiterführenden Parameterstudien könnten noch andere Systeme und Randbedingungen untersucht und bewertet werden. Flächige HBV-Konstruktionen mit Kernen als VM finden in der Baupraxis immer häufiger Anwendung. Dieses System könnte in weiteren Untersuchungen mit den angefertigten Parameterstudien verglichen werden. Des Weiteren wurden in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit ausschließlich gängige normalfeste Betone und Holzwerkstoffe untersucht. Die Betrachtung der hochfesten Betonen und Hölzern wie Buchenfurnierschichtholz besitzt weiteres Forschungspotential. Zur Dimensionierung von HBV-Decken unter grundlegend anderen Randbedingungen (z.B. Nutzungsklasse des Gebäudes) müssten weitere Auswertungen durchgeführt werden.

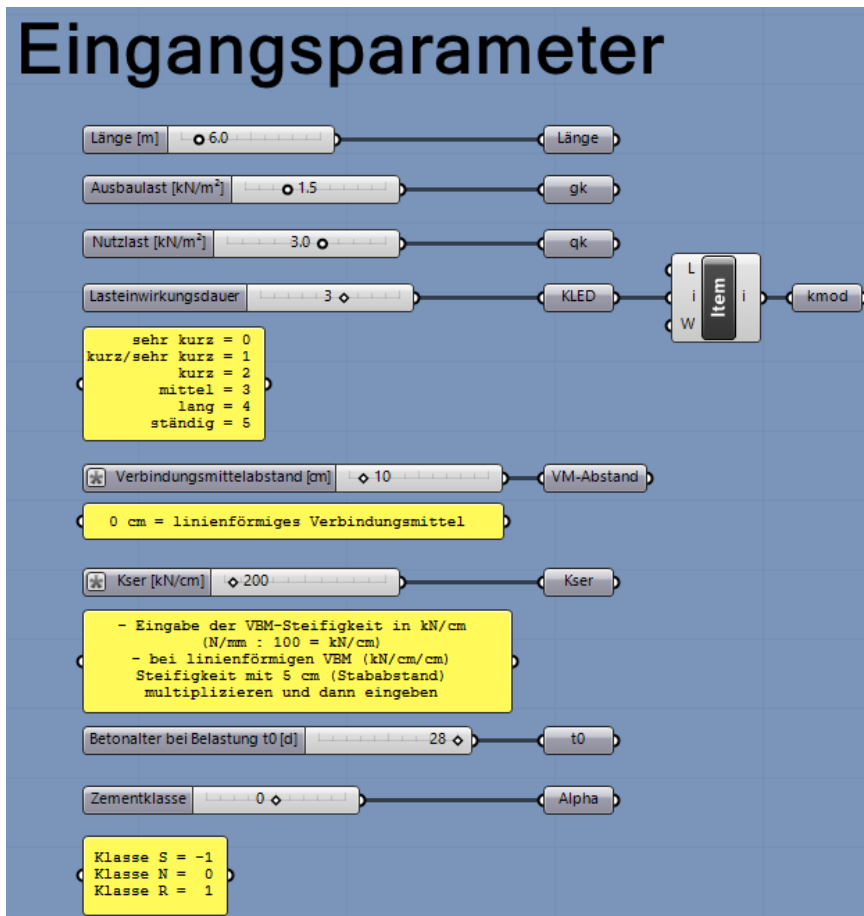
Abschließend lässt sich sagen, dass anhand der durchgeführten Untersuchungen eine Vielzahl von optimierten Systemen entwickelt werden konnte, wobei sich bei der Dimensionierung von HBV-Decken an den vorliegenden Ergebnissen orientiert werden kann. Da jedoch die Ausgangssituation vor Ort in der Baupraxis häufig vom hier untersuchten Ideal (gleichbleibende Spannweiten, frei wählbarer Balkenabstand, festgelegte Höhe des Gesamtaufbaus usw.) abweicht, bietet es sich gerade bei HBV-Systemen an, auf Grund der großen Komplexität in der Bemessung, Konstruktion und Ausführung, eine zunehmende Standardisierung voranzutreiben.

## Literaturverzeichnis

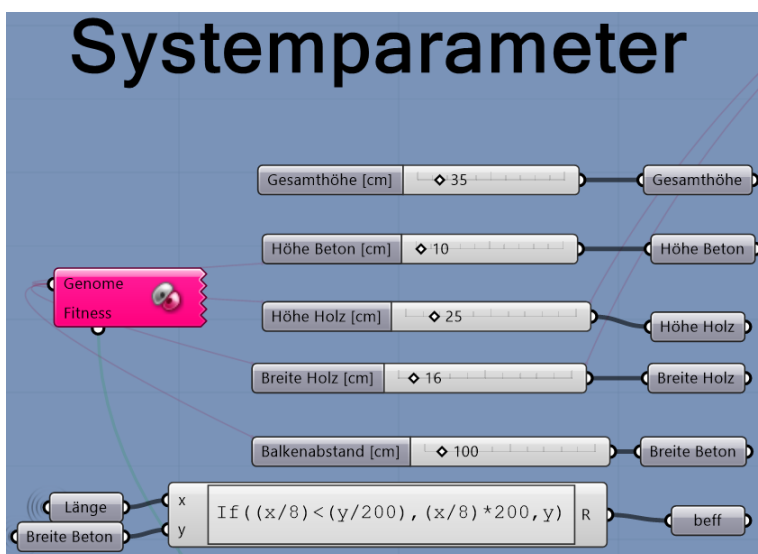
- [1] Schänzlin, J.: *Eurocode 5:2022 – Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken*. In: Karlsruher Tage 2018 – Holzbau – Forschung für die Praxis. 2018.
- [2] DIN EN 1995-1-1, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2010.
- [3] Kuhlmann, U., Schänzlin, J., & Michelfelder, B.: *Berechnung von Holz-Beton-Verbunddecken*. *Beton-und Stahlbetonbau*, 99(4), 262-271. 2004
- [4] Bender, M.; Lambert, T.; Fahl, N.: *Computergestützte Bemessung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit Stabwerkmodellen*. In: *Konstruktiver Ingenieur – 02.2021*. 2021.
- [5] König, G.; Holschemacher, K.; Dehn: *Holz-Beton-Verbund – Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*. 2004.
- [6] DIN EN 1992-1-1, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2011.
- [7] Bahmer, R.; Hock, S.: *Holz-Beton-Verbund – Aktueller Vergleich der Verbindungsmittel*. 2015.
- [8] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: *Ökobaudat*. <https://www.oekobaudat.de/> (29.08.2022)
- [9] Bünger, B.; Matthey, A.: *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Methodische Grundlagen*. 2018.
- [10] Müller, R.: *BKI Baukosten Neubau - Statistische Kostenkennwerte für Positionen*. 2020.
- [11] DIN EN 1991-1-1, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. 2010.
- [12] CEN/TS 19103: Eurocode 5: Design of Timber Structures. Structural design of timber-concrete composite structures. Common rules and rules for buildings; CEN European Committee for Standardization
- [13] DIN EN 1994-1-1:2010-12, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau*. 2010
- [14] TBG Transportbeton Westpfalz GmbH & Co. KG: *Preisliste Stand 01.01.2022*. [https://www.trapobet.de/assets/files/pdf/Preisliste\\_TBG\\_komplett\\_Jan\\_2022.pdf](https://www.trapobet.de/assets/files/pdf/Preisliste_TBG_komplett_Jan_2022.pdf). 2022 (Eintritt: 31.10.2022)
- [15] Müller-Beton GmbH & Co.KG: *Preisliste für Transportbeton gültig ab 01.01.2022*. [http://www.muellerkg.de/download/Preisliste\\_Beton.pdf](http://www.muellerkg.de/download/Preisliste_Beton.pdf). 2022 (Eintritt: 31.10.2022)

## Anhang A Optimierungstool

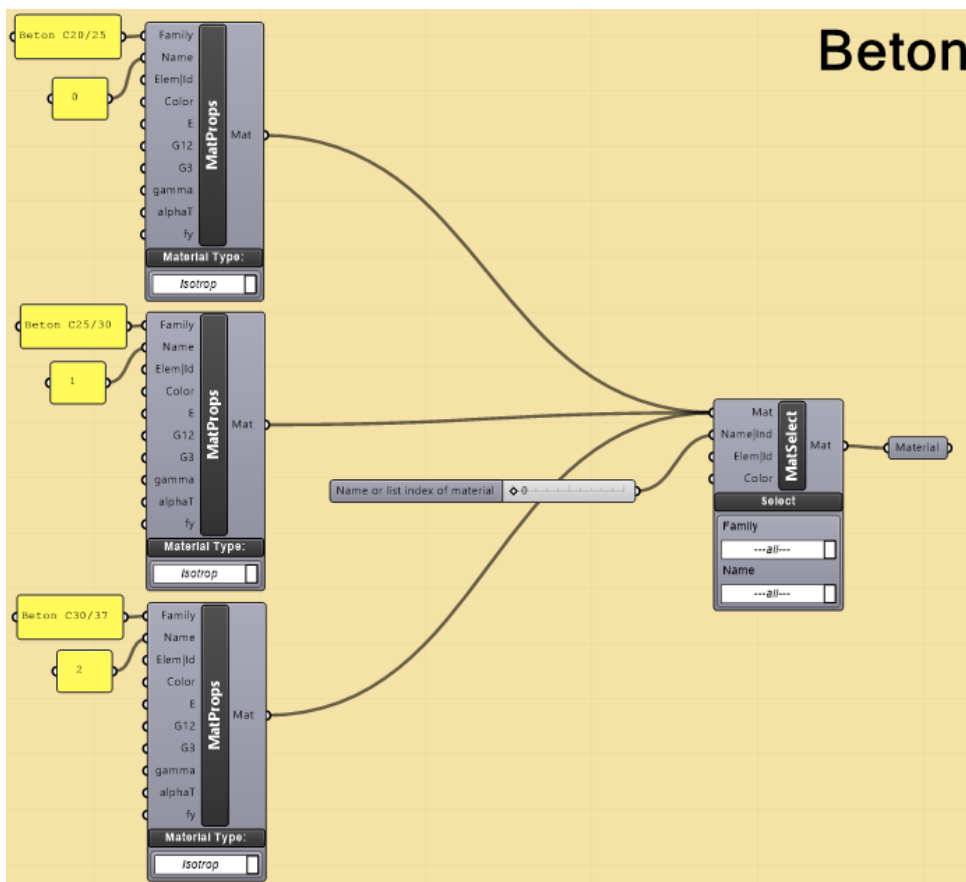
### Anhang A-1: Eingangsparameter



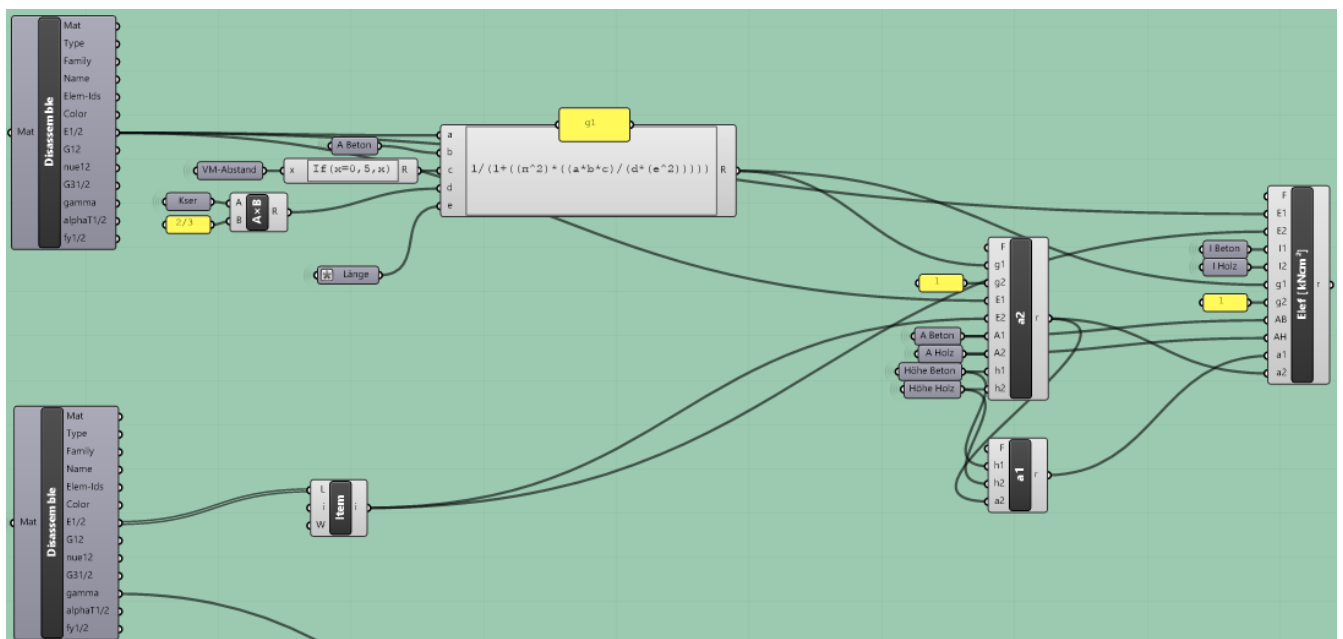
### Anhang A-1: Systemparameter



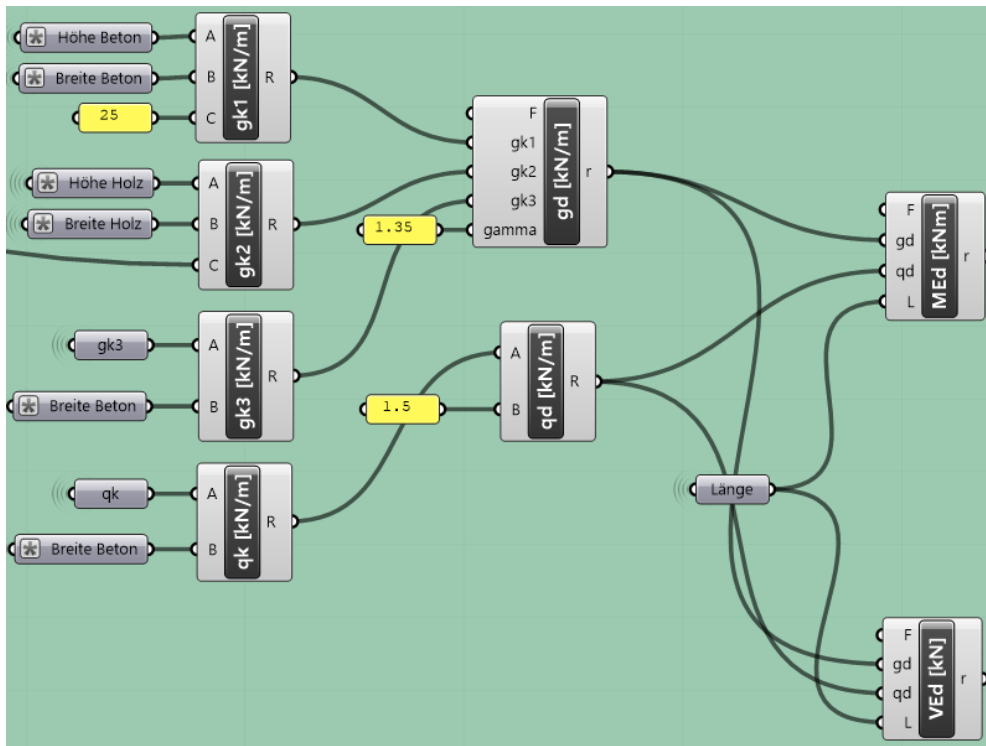
Anhang A-2: Materialeingabe



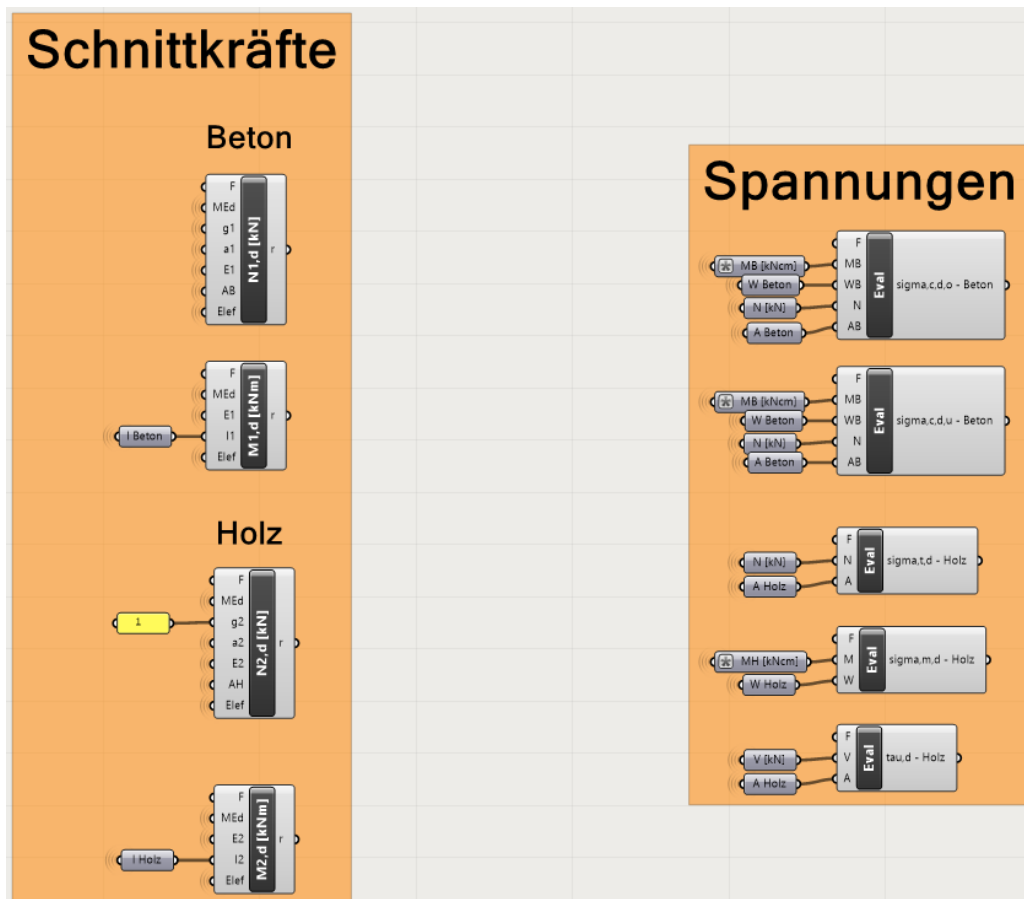
Anhang A-3: Berechnung effektive Steifigkeit



Anhang A-4: Berechnung Einwirkung

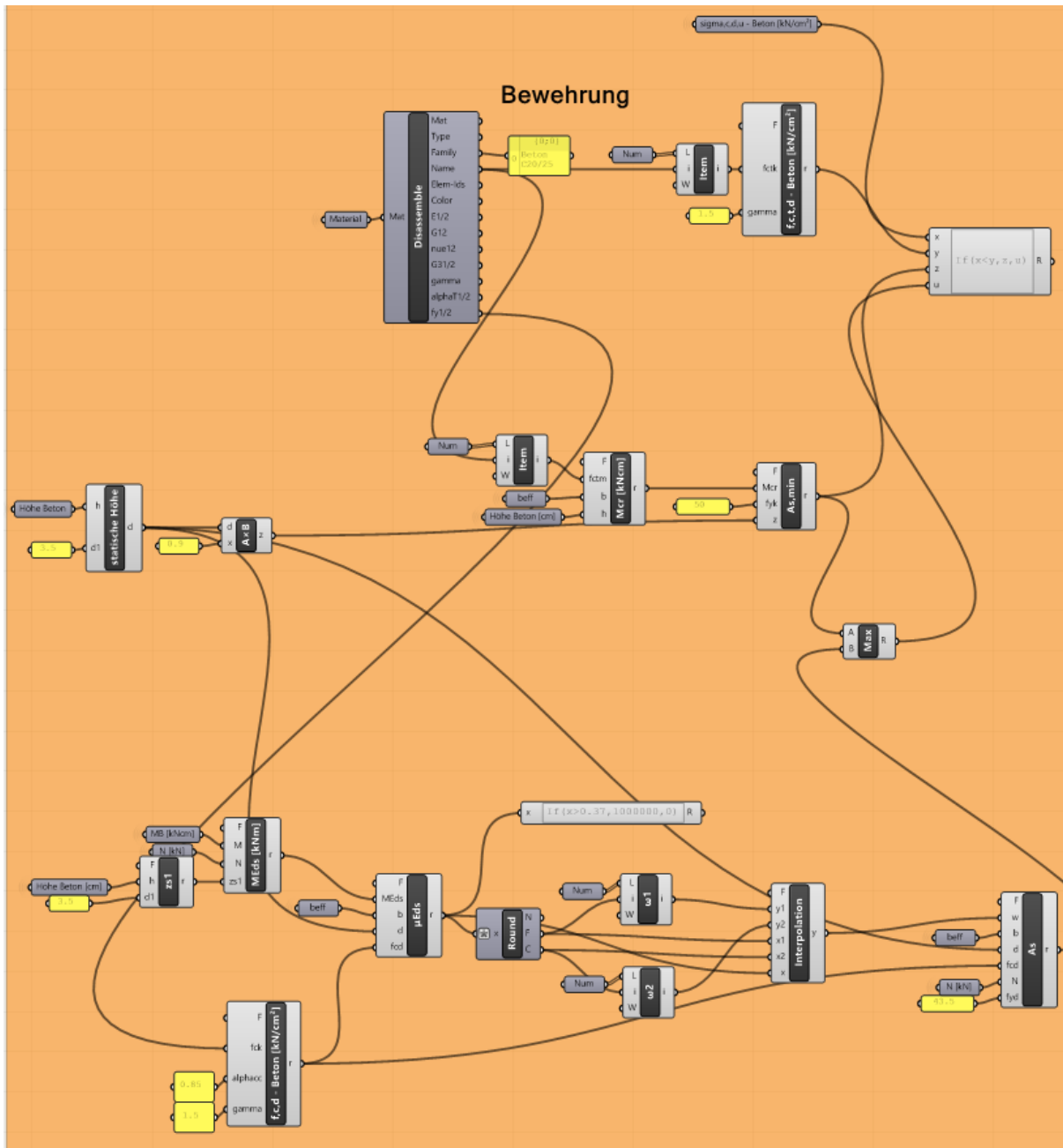


Anhang A-5: Berechnung Schnittkräfte und Spannungen

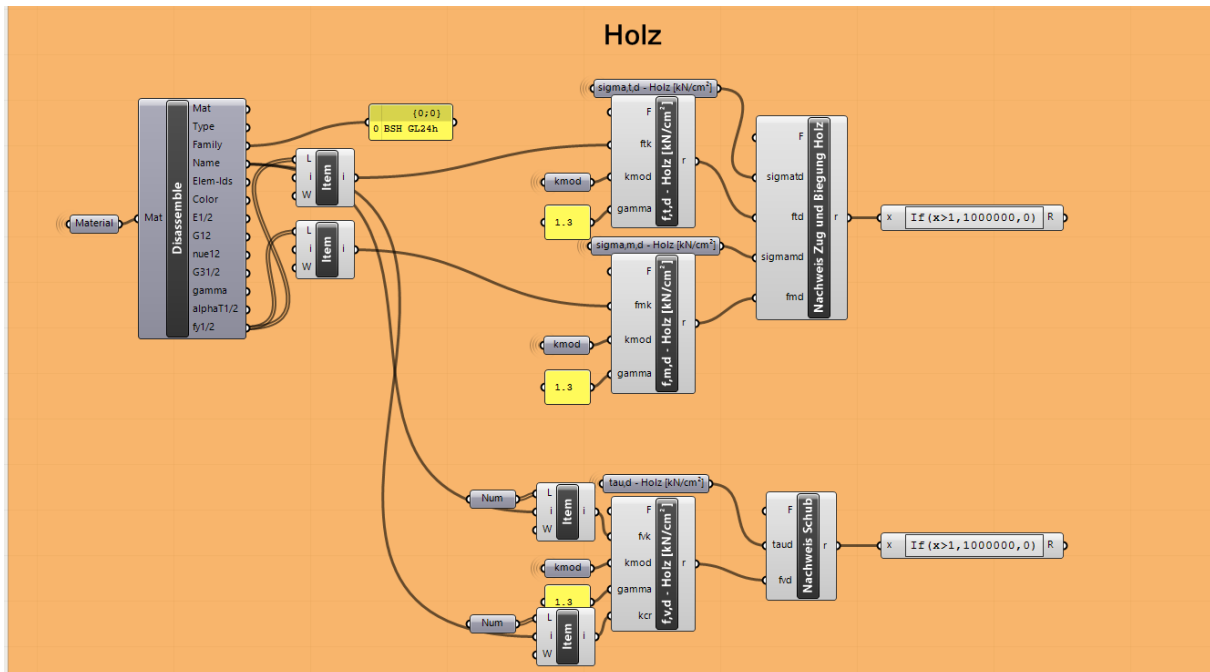




Anhang A-6: Nachweis Betonquerschnitt



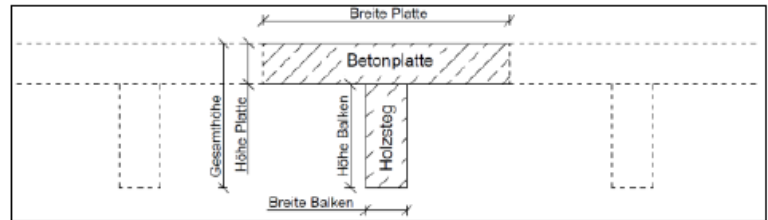
Anhang A-7: Nachweis Holzquerschnitt



## Anhang B Parameterstudie

### Anhang B-1: Optimierung (Kser = 500 N/mm/mm)

Gebäudekategorie:	Wohngebäude: qk =	3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:	gk =	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h	
Betonanteil:	C20/25	
Verbindungsmitelsteifigkeit:	Kser =	500 N/mm/mm

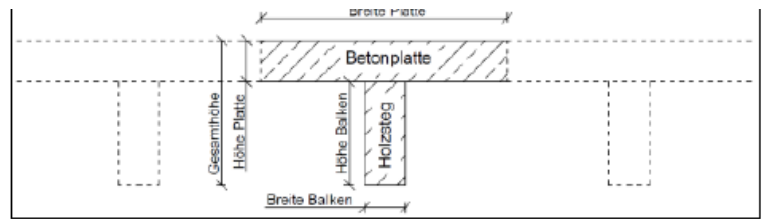


#### Zielgröße = Holzverbrauch

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	CO2-Äqu. [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamtmasse [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Holz [kg/m <sup>2</sup> ]
5	25	7	80	18	17	0,43	w fin,n	2,7	191,1	175,0	16,1
	30	7	79	23	10	0,43	Biegung Holz	5,2	187,2	175,0	12,2
	35	7	90	28	8	0,40	Biegung Holz	6,4	185,5	175,0	10,5
	40	7	120	33	8	0,33	Schubn. Holz	7,2	184,2	175,0	9,2
5,5	30	7	76	23	12	0,49	Biegung Holz	3,2	190,3	175,0	15,3
	35	7	73	28	8	0,5	Biegung Holz	4,8	187,9	175,0	12,9
	40	7	98	33	8	0,43	Biegung Holz	5,8	186,3	175,0	11,3
	45	7	141	38	9	0,35	Schubn. Holz	6,6	185,2	175,0	10,2
6	30	7	80	23	17	0,52	Eigenf.	-0,3	195,5	175,0	20,5
	35	7	75	28	10	0,54	Biegung Holz	2,9	190,7	175,0	15,7
	40	7	81	33	8	0,52	Biegung Holz	4,3	188,7	175,0	13,7
	45	7	106	38	8	0,45	Biegung Holz	5,3	187,0	175,0	12,0
6,5	35	7	76	28	13	0,57	Eigenf.	0,0	195,1	175,0	20,1
	40	7	77	33	9	0,57	Biegung Holz	2,6	191,2	175,0	16,2
	45	7	89	38	8	0,53	Biegung Holz	3,8	189,3	175,0	14,3
	50	7	113	43	8	0,47	Biegung Holz	4,9	187,8	175,0	12,8
7	35	7	66	28	16	0,78	Eigenf.	-5,6	203,5	175,0	28,5
	40	7	68	33	10	0,63	Eigenf.	-0,2	195,4	175,0	20,4
	45	7	76	38	8	0,61	Biegung Holz	2,2	191,8	175,0	16,8
	50	7	108	43	9	0,52	Biegung Holz	3,3	190,1	175,0	15,1
7,5	40	7	64	33	14	0,68	Eigenf.	-6,8	205,3	175,0	30,3
	45	7	68	38	7	0,67	Eigenf.	-0,7	196,1	175,0	21,1
	50	7	83	43	8	0,62	Biegung Holz	1,8	192,4	175,0	17,4
	55	7	103	48	8	0,57	Biegung Holz	2,9	190,7	175,0	15,7
8	45	7	58	38	11	0,73	Eigenf.	-6,8	205,3	175,0	30,3
	50	7	65	43	8	0,70	Eigenf.	-1,4	197,2	175,0	22,2
	55	7	89	48	8	0,63	Biegung Holz	1,3	193,1	175,0	18,1
	60	7	108	53	8	0,59	Biegung Holz	2,4	191,5	175,0	16,5
8,5	50	7	69	43	12	0,72	Eigenf.	-7,6	206,4	175,0	31,4
	55	7	68	48	8	0,72	Eigenf.	-2,4	198,7	175,0	23,7
	60	7	94	53	8	0,65	Eigenf.	0,8	193,9	175,0	18,9
	65	7	113	58	8	0,61	Biegung Holz	1,9	192,2	175,0	17,2
9	50	7	52	43	12	0,88	Eigenf.	-14,4	216,7	175,0	41,7
	55	7	50	48	8	0,80	Eigenf.	-8,1	207,3	175,0	32,3
	60	7	71	53	8	0,73	Eigenf.	-3,3	200,1	175,0	25,1
	65	7	95	58	8	0,67	Eigenf.	-0,3	195,5	175,0	20,5

Anhang B-2: Optimierung (Kser = 1000 N/mm/mm)

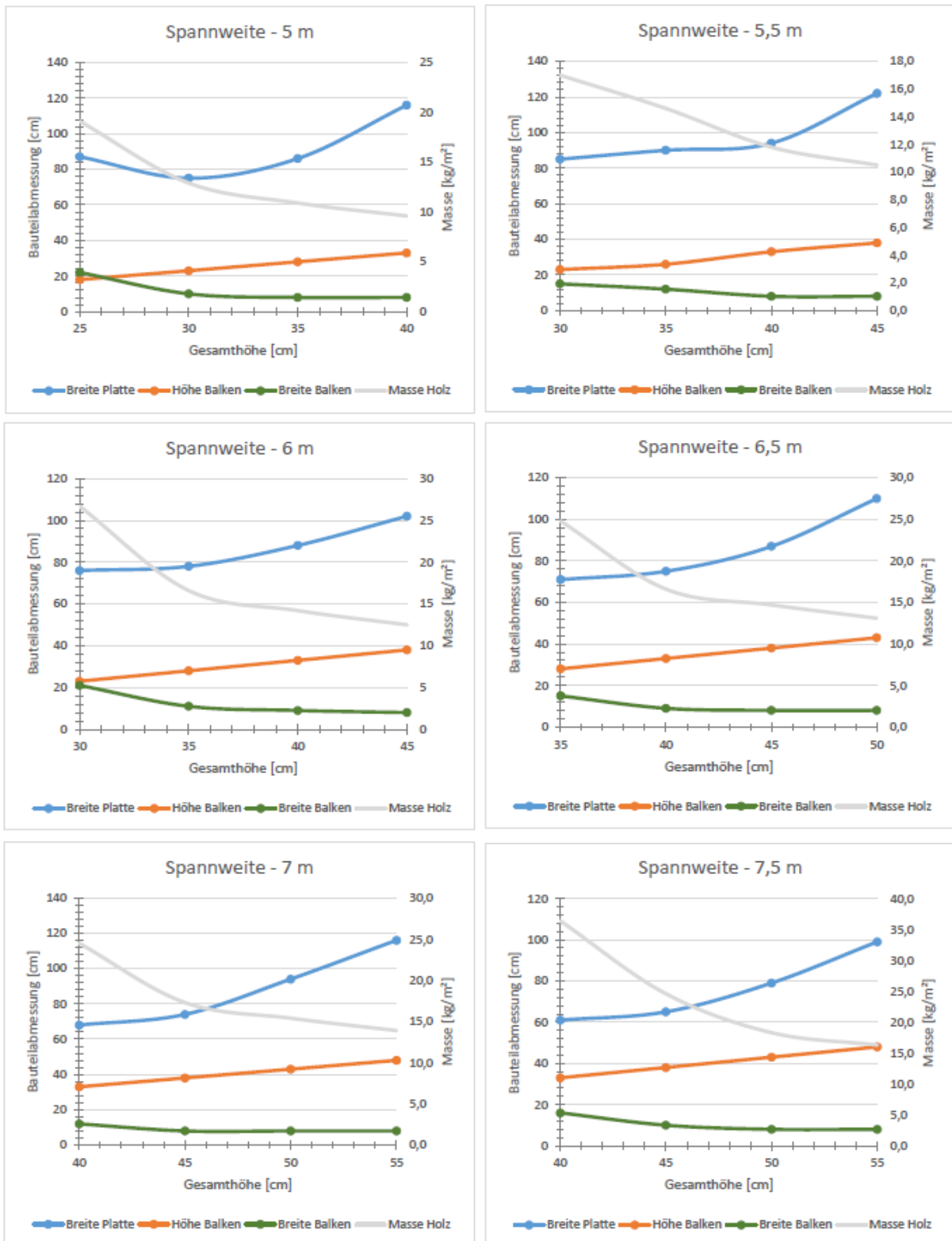
Gebäudekategorie:	Wohngebäude	qk = 3 kN/m <sup>2</sup>
Last Bodenaufbau:		gk = 1,5 kN/m <sup>2</sup>
Holzanteil:	GL24h	
Betonanteil:	C20/25	
Verbindungsmittelsteifigkeit:	Kser = 1000 N/mm/mm	



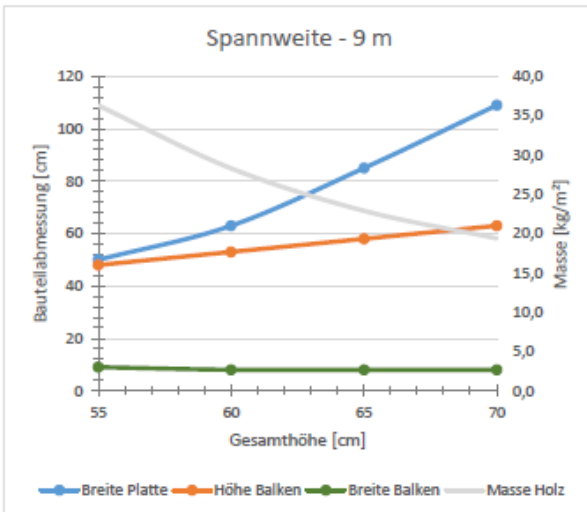
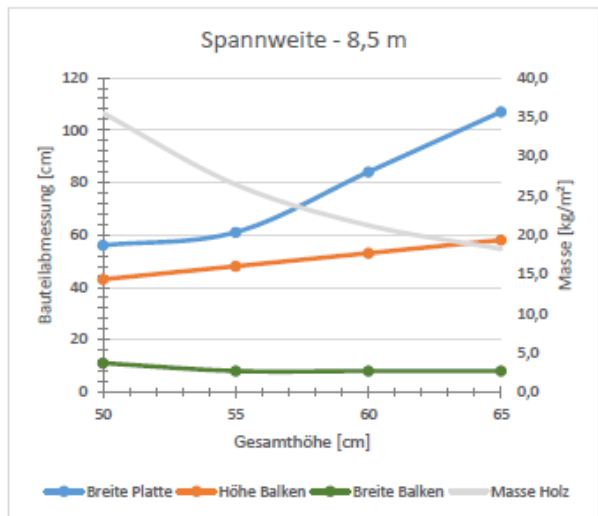
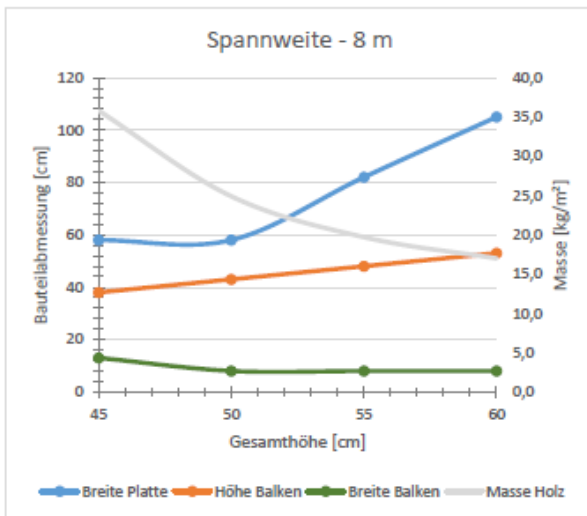
Zielgröße = Holzverbrauch

Spannweite [m]	Deckenhöhe [cm]	Höhe Platte [cm]	Breite Platte [cm]	Höhe Balken [cm]	Breite Balken [cm]	gamma-Wert [-]	maß. Nachw. [-]	CO <sub>2</sub> -Äqu. [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	Gesamtmasse [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Beton [kg/m <sup>2</sup> ]	Masse Holz [kg/m <sup>2</sup> ]
5	25	7	81	18	16	0,60	w fin,n	3,4	189,9	175,0	14,9
	30	7	88	23	11	0,58	Biegung Holz	5,3	187,1	175,0	12,1
	35	7	92	28	8	0,57	Biegung Holz	6,6	185,2	175,0	10,2
	40	7	131	32	9	0,49	Biegung Holz	7,2	184,2	175,0	9,2
5,5	30	7	84	23	13	0,63	Biegung Holz	3,4	190,0	175,0	15,0
	35	7	74	28	8	0,66	Biegung Holz	4,9	187,7	175,0	12,7
	40	7	113	33	9	0,56	Biegung Holz	6,0	186,0	175,0	11,0
	45	7	141	38	9	0,51	Schubn. Holz	6,6	185,2	175,0	10,2
6	30	7	78	23	15	0,69	Eigenf.	1,0	193,6	175,0	18,6
	35	7	75	28	10	0,70	Biegung Holz	2,9	190,7	175,0	15,7
	40	7	83	33	8	0,68	Biegung Holz	4,5	188,4	175,0	13,4
	45	7	108	38	8	0,62	Biegung Holz	5,5	186,8	175,0	11,8
6,5	35	7	75	28	12	0,73	Eigenf.	0,8	193,8	175,0	18,8
	40	7	87	33	10	0,7	Biegung Holz	2,8	190,9	175,0	15,9
	45	7	91	38	8	0,69	Biegung Holz	4,0	189,0	175,0	14,0
	50	7	115	43	8	0,64	Biegung Holz	5,0	187,6	175,0	12,6
7	40	7	72	33	10	0,77	Eigenf.	0,6	194,3	175,0	19,3
	45	7	87	38	9	0,73	Biegung Holz	2,4	191,5	175,0	16,5
	50	7	98	43	8	0,71	Biegung Holz	3,6	189,7	175,0	14,7
	55	7	130	48	10	0,68	Biegung Holz	3,0	190,5	175,0	15,5
7,5	40	7	64	33	13	0,81	Eigenf.	-5,4	203,2	175,0	28,2
	45	7	64	38	8	0,81	Eigenf.	0,1	195,0	175,0	20,0
	50	7	84	43	8	0,76	Biegung Holz	1,9	192,2	175,0	17,2
	55	7	103	48	8	0,72	Biegung Holz	2,9	190,7	175,0	15,7
8	45	7	87	38	16	0,78	Eigenf.	-6,2	204,4	175,0	29,4
	50	7	68	43	8	0,82	Eigenf.	-0,8	196,2	175,0	21,2
	55	7	102	48	9	0,75	Biegung Holz	1,5	192,8	175,0	17,8
	60	7	110	53	8	0,74	Biegung Holz	2,6	191,2	175,0	16,2
8,5	50	7	133	43	23	0,72	Eigenf.	-7,4	206,2	175,0	31,2
	55	7	80	48	9	0,81	Eigenf.	-1,7	197,7	175,0	22,7
	60	7	96	53	8	0,78	Biegung Holz	1,0	193,6	175,0	18,6
	65	7	115	58	8	0,75	Biegung Holz	2,1	191,9	175,0	16,9
9	55	7	59	48	9	0,87	Eigenf.	-7,1	205,8	175,0	30,8
	60	7	74	53	8	0,84	Eigenf.	-2,7	199,1	175,0	24,1
	65	7	99	58	8	0,80	Eigenf.	0,3	194,7	175,0	19,7
	70	7	120	63	8	0,77	Biegung Holz	1,6	192,6	175,0	17,6

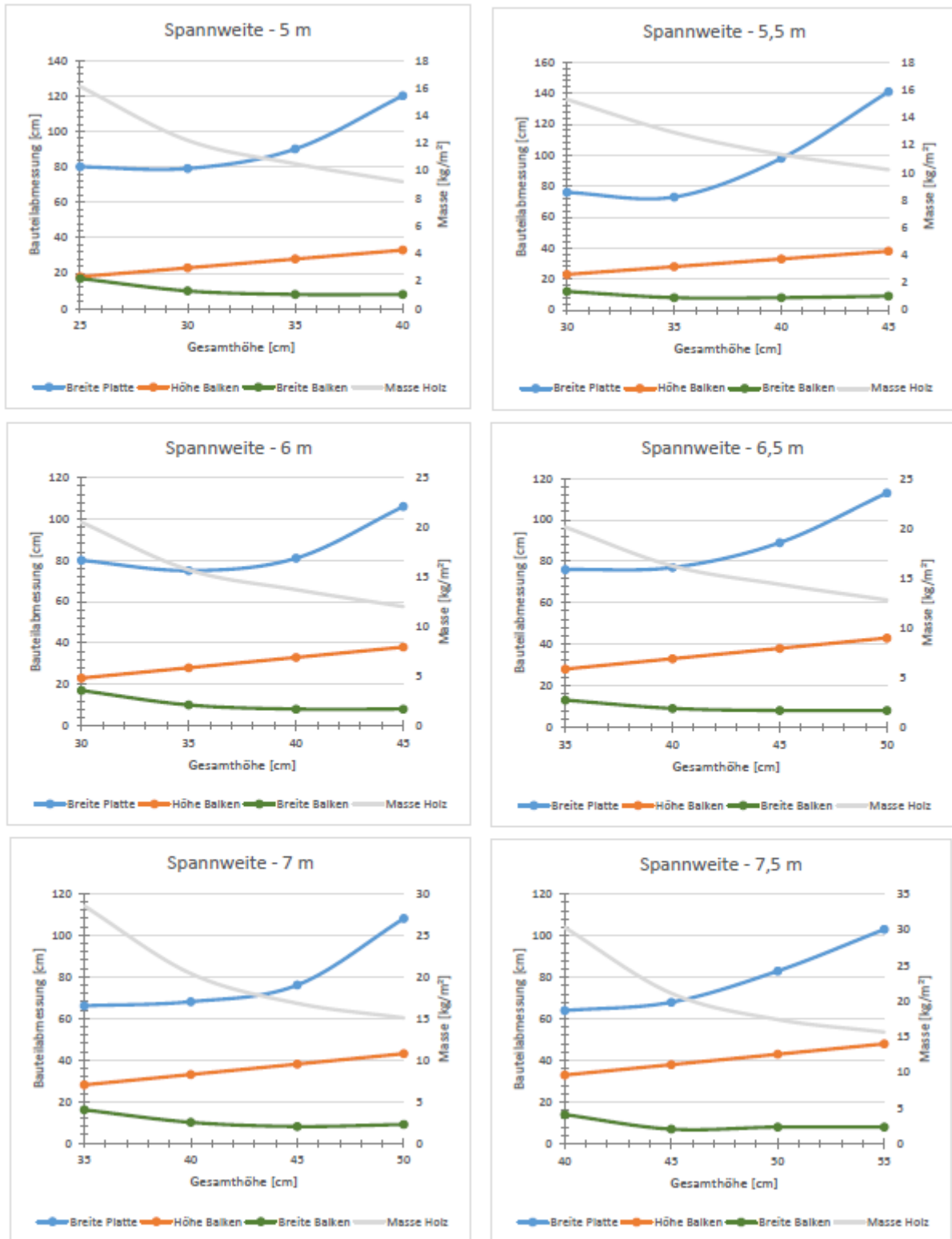
Anhang B-3: Querschnittsabmessungen (Kser = 200 N/mm/mm) – Teil I



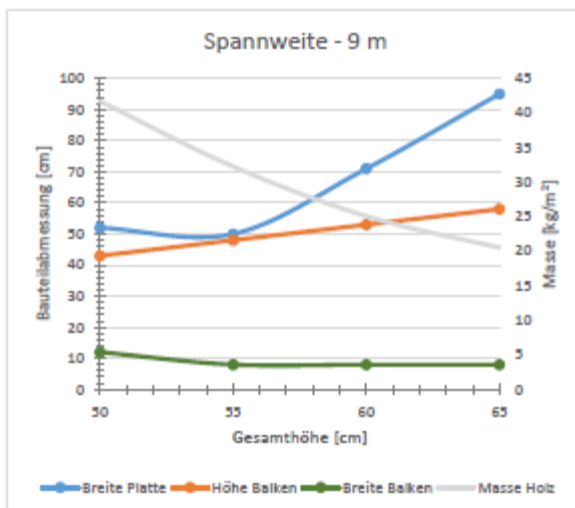
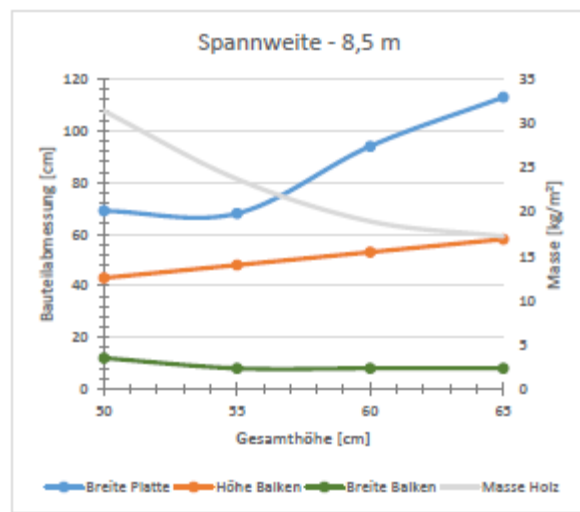
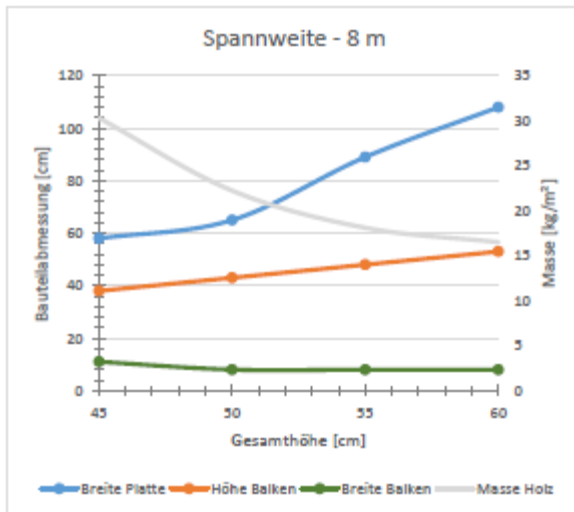
Anhang B-4: Querschnittsabmessungen (Kser = 200 N/mm/mm) - Teil II



Anhang B-5: Querschnittsabmessungen (Kser = 500 N/mm/mm) - Teil I

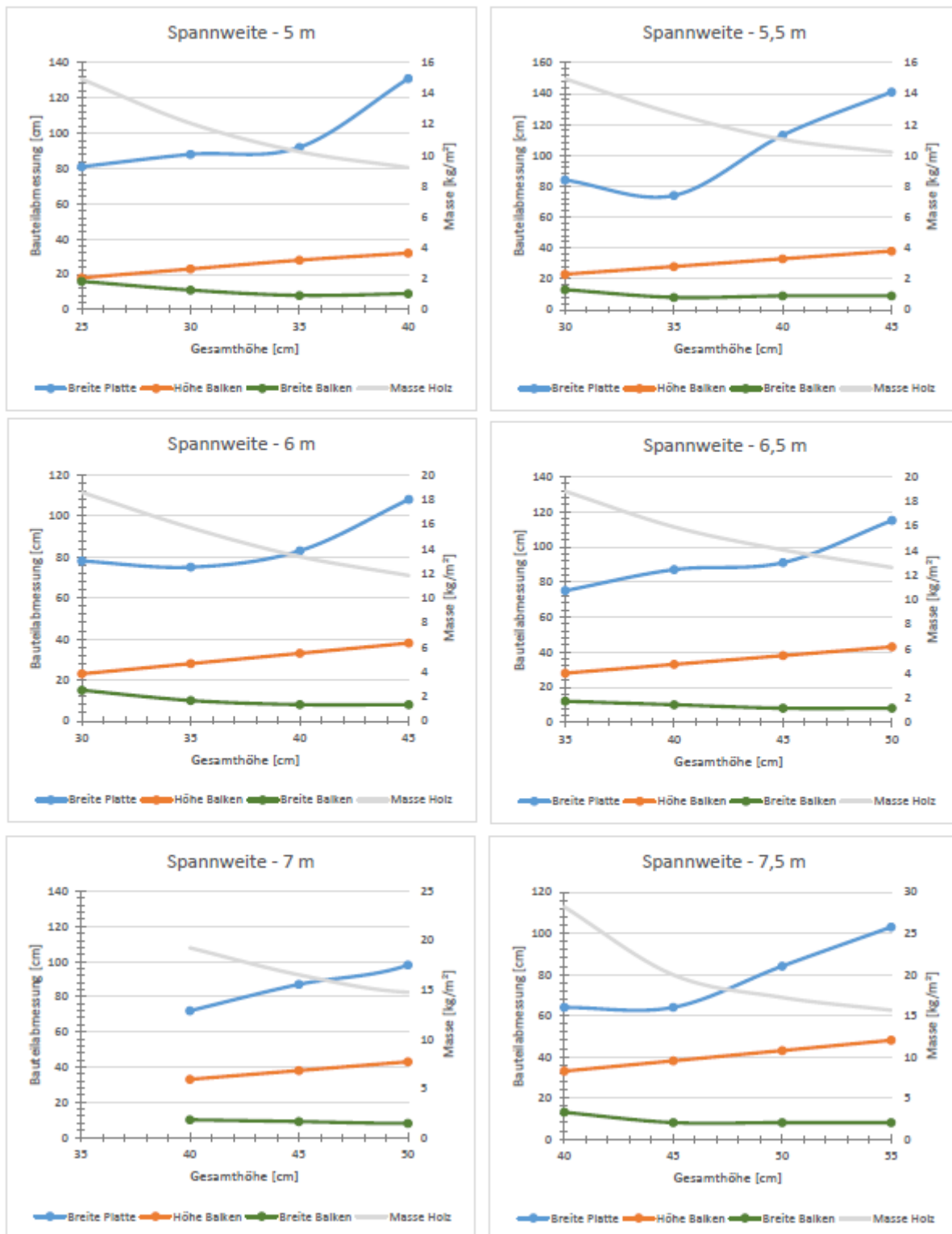


Anhang B-6: Querschnittsabmessungen (Kser = 500 N/mm/mm) - Teil II





Anhang B-7: Querschnittsabmessungen (Kser = 1000 N/mm/mm) - Teil I



Anhang B-8: Querschnittsabmessungen (Kser = 1000 N/mm/mm) - Teil II

