



Zwischenbericht vom 28. Oktober 2025

NKOPT

Nachhaltig bauen – Deckenkonstruktionen vergleichen und optimieren



Quelle: Deckenkonstruktionen, Ausstellung Werkstückhalle, Fotografie Lukas Murer.

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Kofinanzierung:

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
Fachkompetenzen Nachhaltigkeit
CH-8021 Zürich
stadt-zuerich.ch/hochbau

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW, Institut Konstruktives Entwerfen
CH-8401 Winterthur
www.zhaw.ch/de/archbau/institute/ike

Autor/in:

Stefanie Müller De Pedrini, ZHAW Institut Konstruktives Entwerfen, stefanie.mueller@zhaw.ch
Christian Meier, ZHAW Institut Konstruktives Entwerfen, christian.meier@zhaw.ch
Antonia Baumann, ZHAW Institut Bautechnologie und Prozesse, antonia.baumann@zhaw.ch
Patric Fischli-Boson, ZHAW Institut Bautechnologie und Prozesse, patric.fischli-boson@zhaw.ch

Mitarbeit

Manuel Jeck, ZHAW Institut Konstruktives Entwerfen
Charlotte Flotho, ZHAW Institut Konstruktives Entwerfen
Severin Marti, ZHAW Institut Konstruktives Entwerfen

BFE-Projektbegleitung:

Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch
Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502843-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren / Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Zur Erreichung des Netto-Null-Ziels ist eine weitgehende und schnelle Reduktion der inländischen Treibhausgasemissionen unumgänglich. Die Bauwirtschaft verursacht 20 bis 25 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz. In der Bewältigung der Klimakrise ist es deshalb sehr relevant, wie wir Gebäude bauen und betreiben. Während die Betriebsenergie in den letzten Jahren optimiert wurde und die damit zusammenhängenden Treibhausgasemissionen bei Neubauten stark gesunken sind, ist die Erstellung von Gebäuden nach wie vor sehr CO₂-intensiv. Im Bausektor werden deshalb leistungsfähige sowie material- und energieoptimierte Konstruktionen benötigt, die möglichst wenig Treibhausgasemissionen auslösen. Im Hochbau sind Geschossdecken die volumenaufwändigsten Bauteile. Ihre Anforderungen bezüglich Tragfähigkeit, Brandschutz, Bauphysik und Haustechnik sind in der Vergangenheit kontinuierlich gestiegen, was zu zunehmenden Aufbauhöhen bei Deckensystemen geführt hat, mit hohem Anteil an grauer Energie und entsprechendem Anteil an den CO₂-Emissionen bei der Herstellung. Bei der Wahl von Tragsystem und entsprechendem Bodenaufbau fehlt bis heute eine Grundlage, die die verschiedenen Anforderungen an die Konstruktion – wie Nutzung, Tragverhalten, Wärmespeicherkapazität, Schall- und Brandschutz – mit deren Ökobilanz sowie Dauerhaftigkeit in Beziehung setzt und unterschiedliche Deckensysteme vergleicht. Mit diesem Forschungsprojekt wird ein Leitfaden entwickelt, der Basiswissen zu Konstruktionsprinzipien und Materialeigenschaften sowie zur Ökobilanz des gesamten Aufbaus vermittelt und damit die Entwicklung von CO₂-armen Deckensystemen fördert. Durch die ganzheitliche Betrachtung der Tragkonstruktionen und deren Bodenaufbauten können entscheidende Aspekte wie die Leistungsfähigkeit verschiedener Systeme, Materialkombinationen und deren Abhängigkeiten sowie die benötigten Traganschlüsse an vertikale Bauteile mit einbezogen werden. Beispiele von heute gebräuchlichen wie auch prototypischen Deckensystemen erweitern die Untersuchung der Tragkonstruktionen und deren optimierten Bodenaufbauten um reale Anwendungen aus der Bau Praxis. Die Untersuchung und Auslegeordnung soll Architekturschaffende befähigen, nachhaltige Konstruktionen zu entwerfen und damit ökologische Verantwortung bei der Gebäudekonzeption wahrzunehmen. Der Vergleich soll zudem aufzeigen, welche Konsequenzen und Einschränkungen bestehende Normen momentan haben und wie mit entsprechenden Anpassungen Nachhaltiges Entwerfen und Konstruieren gefördert werden könnte.

Résumé

Pour atteindre l'objectif de zéro émission nette, une réduction importante et rapide des émissions nationales de gaz à effet de serre est indispensable. Le secteur de la construction est responsable de 20 à 25 % des émissions totales de CO₂ en Suisse. La manière dont nous construisons et exploitons les bâtiments est donc très importante pour lutter contre la crise climatique. Si l'énergie d'exploitation a été optimisée ces dernières années et que les émissions de gaz à effet de serre associées ont fortement diminué dans les nouvelles constructions, la construction de bâtiments reste très intensive en CO₂. Le secteur de la construction a donc besoin de constructions performantes, optimisées en termes de matériaux et d'énergie, qui génèrent le moins possible d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le bâtiment, les plafonds sont les éléments les plus volumineux. Leurs exigences en matière de capacité de charge, de protection contre l'incendie, de physique du bâtiment et de domotique n'ont cessé d'augmenter au fil du temps, ce qui a conduit à des systèmes de plafonds de plus en plus gourmands en matériaux, avec une part importante d'énergie grise et une part correspondante d'émissions de CO₂ lors de la fabrication. À ce jour, il n'existe aucune base permettant de comparer les différents systèmes de plafond et de mettre en relation les différentes exigences en matière de construction (telles que l'utilisation, la capacité de charge, la capacité de stockage thermique, l'isolation acoustique et la protection contre l'incendie) avec leur bilan écologique et leur durabilité. Ce projet de recherche vise à élaborer un guide fournissant des connaissances de base sur les principes de construction et les propriétés des matériaux ainsi que sur le bilan écologique de l'ensemble de la structure, afin de promouvoir le développement de systèmes de plafond à faible émission de CO₂. L'approche holistique des structures



porteuses et de leurs structures de sol permet de prendre en compte des aspects décisifs tels que les performances des différents systèmes, les combinaisons de matériaux et leurs interdépendances, ainsi que les raccords porteurs nécessaires aux éléments de construction verticaux. Des exemples de systèmes de plafond courants et prototypes élargissent l'étude des structures porteuses et de leurs structures de sol optimisées à des applications réelles issues de la pratique de la construction. L'étude et l'analyse doivent permettre aux architectes de concevoir des constructions durables et d'assumer ainsi leur responsabilité écologique dans la conception des bâtiments. La comparaison doit également montrer les conséquences et les restrictions actuelles des normes existantes et comment des adaptations appropriées pourraient promouvoir la conception et la construction durables.

Summary

To achieve the net-zero target, a significant and rapid reduction in domestic greenhouse gas emissions is essential. The construction industry accounts for 20 to 25 per cent of Switzerland's total CO₂ emissions. How we construct and operate buildings is therefore highly relevant in tackling the climate crisis. While operating energy has been optimised in recent years and the associated greenhouse gas emissions from new buildings have fallen sharply, the construction of buildings remains very CO₂-intensive. The construction-sector therefore needs efficient, material- and energy-optimised designs that generate as few greenhouse-gas-emissions as possible. In building construction, floor slabs are the most voluminous components. Their requirements in terms of load-bearing capacity, fire protection, building physics and building services have continuously increased in the past, leading to greater installation heights for ceiling systems, with a high proportion of grey energy and a corresponding share of CO₂-emissions during manufacture. When choosing a support system and the corresponding floor structure, there is still no basis for comparing different ceiling systems that takes into account the various design requirements – such as use, load-bearing behaviour, heat storage capacity, sound and fire protection – in relation to their life cycle assessment and durability. This research project is developing a guide that provides basic knowledge on construction principles and material properties as well as the life cycle assessment of the entire structure, thereby promoting the development of low-carbon ceiling systems. By taking a holistic view of the supporting structures and their floor constructions, decisive aspects such as the performance of different systems, material combinations and their interdependencies, as well as the required load-bearing connections to vertical components, can be taken into account. Examples of ceiling systems commonly used today, as well as prototypes, expand the investigation of supporting structures and their optimised floor structures to include real-world applications from construction practice. The investigation and analysis should enable architects to design sustainable structures and thus assume ecological responsibility in building design. The comparison should also highlight the consequences and limitations of existing standards and how sustainable design and construction could be promoted with appropriate adjustments.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Kontext und Motivation	8
1.2 Projektziele	9
1.3 Forschungsfragen	9
2 Vorgehen und Methode	10
2.1 Vorgehen Forschung	10
2.2 Projekt Abgrenzung	10
2.3 Methodik Ökobilanzierung	10
2.4 Bauteil Decke: Eigenschaften und Anforderungen	11
3 Untersuchung Tragkonstruktion	14
4 Untersuchung Boden- und Unterdeckenaufbau	17
5 Gebaute Beispiele aus der Praxis	20
6 Optimierung Deckensystem	29
7 Nachhaltige Konstruktionslogik entwickeln – systemische Betrachtung	30
8 Ausblick und Erkenntnisse	31
9 Literaturverzeichnis	32
10 Plan- und Bildmaterial Praxisbeispiele	33
11 Berechnungen Grundkonstruktionen am Beispiel Holz-Beton-Verbunddecke	39
12 Interne Kontrolle des Projekts (vertraulich)	44



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tragwerksbedingte Emissionen von Bauteilen eines dreistöckigen Gebäudes, Werner Sobek.....	8
Abbildung 2: Tragwerksskizzen der zwölf untersuchten Tragstrukturen	15
Abbildung 3: Gebräuchlicher Bodenaufbau bei Massiv- und Verbunddeckenkonstruktionen, bei Holzdecken in Kombination mit Unterdeckenaufbau	17
Abbildung 4: Optimierter Bodenaufbau Bürogebäude Hortus Allschwil, Mockup Tragkonstruktion, Werkstückhalle, Fotografie Lukas Murer	18
Abbildung 5: Übersichtsmatrix Praxisbeispiele nach Tragkonstruktionsarten	20
Abbildung 6: Deckenaxonometrie, Wohn- und Gewerbebau KIM, Winterthur.....	22
Abbildung 7: Ökobilanz, Wohn- und Gewerbebau KIM, Winterthur.....	24
Abbildung 8: Deckenaxonometrie, Wohnhochhaus Freihofstrasse, Zürich	26
Abbildung 9: Ökobilanz, Wohnhochhaus Freihofstrasse Zürich	28
Abbildung 10: Dimensionen der Nachhaltigkeit	30
Abbildung 11: Wohn- und Gewerbebau KIM, Winterthur, BDE Architekten, Fotografie Jusuf Supuk ..	33
Abbildung 12: Grundriss Regelgeschoss 2. OG	34
Abbildung 13: Querschnitt: A-A.....	35
Abbildung 14: Verlegung von Bewehrung und Haustechnikrohren, Fotografie BDE Architekten.....	35
Abbildung 15: Wohnhochhaus Freihofstrasse, Zürich, Pool Architekten, Fotografie Andrea Berger ...	36
Abbildung 16: Grundriss Regelgeschoss 6. OG	37
Abbildung 17: Querschnitt A-A.....	38
Abbildung 18: Schalung der Geschossdecke, Fotografie Andrea Berger	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schallschutzanforderungen (Projektierungswerte) nach SIA 181 für die Deckensysteme in Wohn- und Schulbauten[9].	13
--	----



Abkürzungsverzeichnis

AHB	Amt für Hochbauten, Stadt Zürich
BFE	Bundesamt für Energie
EPD	Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration)
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
THG	Treibhausgasemissionen



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Zur Erreichung des Netto-Null-Ziels [1] ist eine weitgehende und schnelle Reduktion der inländischen Treibhausgasemissionen unumgänglich. Die Bauwirtschaft verursacht 20 bis 25 Prozent [2] der gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz. In der Bewältigung der Klimakrise ist es deshalb sehr relevant, wie wir neue Gebäude bauen und betreiben. Während die Betriebsenergie in den letzten zwei Jahrzehnten optimiert wurde und die damit zusammenhängenden Treibhausgasemissionen bei Neubauten stark gesunken sind, ist die Erstellung von Gebäuden nach wie vor sehr CO₂-intensiv. Im Bausektor werden deshalb leistungsfähige sowie material- und energieoptimierte Konstruktionen benötigt, die möglichst wenig Treibhausgasemissionen auslösen. [3]

Im Hochbau sind Geschossdecken die volumenaufwändigsten Bauteile [4], vergleiche hierzu auch Abbildung 1. Ihre Anforderungen bezüglich Tragfähigkeit, Brandschutz, Bauphysik und Haustechnik sind in der Vergangenheit kontinuierlich gestiegen, was zu zunehmenden Aufbauhöhen bei Deckensystemen geführt hat, mit hohem Anteil an grauer Energie und entsprechendem Anteil an den CO₂-Emissionen bei der Herstellung. Bei der Wahl von Tragsystem und entsprechendem Bodenaufbau fehlt bis heute eine Grundlage, die die verschiedenen Anforderungen an die Konstruktion – wie Nutzung, Tragverhalten, Wärmespeicherkapazität, Schall- und Brandschutz – mit deren Ökobilanz sowie Dauerhaftigkeit in Beziehung setzt und unterschiedliche Deckensysteme vergleicht.

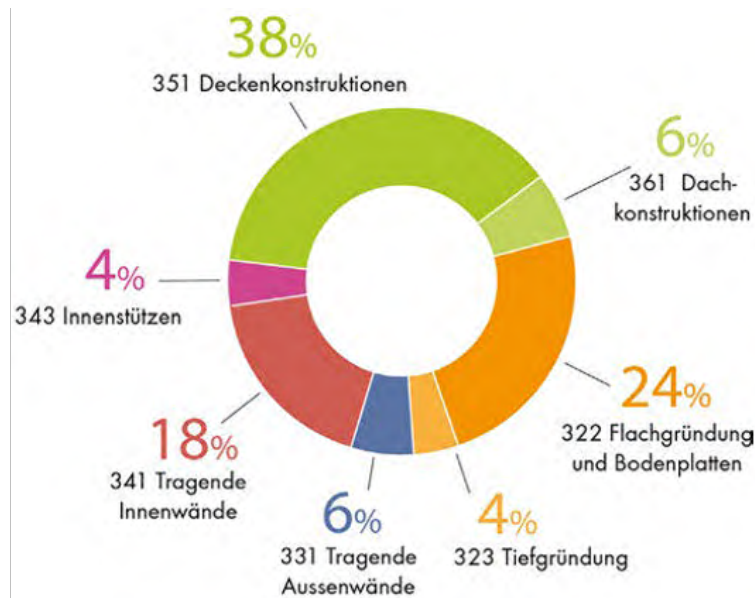


Abbildung 1: Tragwerksbedingte Emissionen von Bauteilen eines dreistöckigen Gebäudes, Werner Sobek



1.2 Projektziele

Mit diesem Forschungsprojekt soll ein Leitfaden entwickelt werden, der Basiswissen zu Konstruktionsprinzipien und Materialeigenschaften sowie zur Ökobilanz des gesamten Aufbaus vermittelt und damit die Entwicklung von CO₂-armen Deckensystemen fördert. Durch die ganzheitliche Betrachtung der Tragkonstruktionen und deren Bodenaufbauten können entscheidende Aspekte wie die Leistungsfähigkeit verschiedener Systeme, Materialkombinationen und deren Abhängigkeiten sowie die benötigten Traganschlüsse an vertikale Bauteile mit einbezogen werden. Beispiele von heute gebräuchlichen wie auch prototypischen Deckensystemen erweitern die Untersuchung der Tragkonstruktionen und deren optimierten Bodenaufbauten um reale Anwendungen aus der Baupraxis. Die Untersuchung und Auslegung soll Architekturschaffende befähigen, nachhaltige Konstruktionen zu verstehen, zu entwerfen und damit ökologische Verantwortung bei der Gebäudekonzeption wahrzunehmen. Der Vergleich soll zudem aufzeigen, welche Konsequenzen und Einschränkungen bestehende Normen momentan haben und wie mit entsprechenden Anpassungen Nachhaltiges Entwerfen und Konstruieren gefördert werden könnte.

1.3 Forschungsfragen

- Wie gross sind die Treibhausgasemissionen der verschiedenen Konstruktionskomponenten eines Deckensystems (Tragwerkselemente, Boden- und Unterdeckenaufbau) absolut und innerhalb eines Deckensystems im Verhältnis zueinander?
- Mit welchen Parametern kann die Ökobilanz innerhalb von einem betrachteten Deckensystem optimiert werden?
- Gibt es ökobilanziell betrachtet optimale Deckensysteme für die Nutzungen Wohnen und Schule?
- Welche Anforderungen an die Geschossdecken haben verhältnismässig den grössten Einfluss auf die Ökobilanz?
- Welche Normen und Gebrauchsanforderungen schränken die ökobilanzielle Optimierung von Geschossdecken ein?
- Welche Einflüsse üben unterschiedliche Deckensysteme auf die Planung und Ausführung des ganzen Gebäudes aus?
- Gibt es eine Systematik, um ökologisch nachhaltige Geschossdecken zu entwerfen?
- Welche Rebound-Effekte entstehen bei der ökobilanziellen Optimierung von Deckenkonstruktionen?



2 Vorgehen und Methode

2.1 Vorgehen Forschung

Zu Beginn werden die Methode der Ökobilanzierung sowie die Anforderungen, die bei der Erstellung von Deckenkonstruktionen bestehen, definiert. Mit diesen Grundlagen werden in einem ersten Schritt Tragkonstruktionen untersucht. Die Gegenüberstellung von Tragverhalten, Gewicht, Abmessungen und Ökobilanz zeigt sinnvolle Spannweiten einzelner Konstruktionsarten auf. In einem zweiten Schritt gilt es Bodenaufbauten zu entwickeln, mit denen die Anforderungen an den Schallschutz eingelöst werden können. Ziel ist es, für Wohn- und Schulbauten eine Auslegeordnung von CO₂-optimierten Deckensystemen zu schaffen. Die Untersuchung von bestehenden Praxisbeispielen erweitert die Forschung um reale Anwendungen und deren Erkenntnisse bei der Umsetzung.

2.2 Projekt Abgrenzung

Im Rahmen dieser Untersuchung werden ausschliesslich neue Geschossdeckensysteme betrachtet. Eine Ertüchtigung oder Sanierung bestehender Deckenstrukturen ist nicht Gegenstand der Analyse. Die Betrachtung beschränkt sich auf Anwendungen im Wohnungsbau sowie im Schulbau. Diese Nutzungen machen mengenmässig den grössten Anteil bei Neubauten aus. Die Berechnung der Ökobilanz bezieht sich auf ein Referenz-Deckenfeld mit der Grösse von einem Quadratmeter. Horizontale Tragelemente, Verbindungsmittel sowie die notwendigen Befestigungen bei den Auflagerpunkten der Decke sind anteilmässig eingerechnet. Nicht in die Ökobilanzielle Berechnung eingeflossen sind vertikale Bauteile wie Stützen oder Wände.

2.3 Methodik Ökobilanzierung

Als Berechnungsbasis dienen die Empfehlungen für Bauteilwerte der KBOB-Ökobilanzdaten [5]. Zum Zeitpunkt der Untersuchung ist die Version 7.0 die aktuelle Grundlage für Ökobilanzdaten. Die Kennwerte in der KBOB-Ökobilanztabelle sind Standardwerte für eine Materialgruppe und selten produktspezifisch. Trotzdem lassen sich in der verwendeten Kennwerttabelle auch Angaben zu spezifischen neueren Baumaterialien wie Hanfbeton, Stabbuche und weitere finden. Die Bauteilwerteliste der KBOB-Ökobilanzdaten für den Baubereich liefert in der Schweiz Grunddaten für mehrere SIA-Normen (SIA 2031, 2032, 2039), welche wiederum die Basis für ökologische Baustandards (SNBS, Minergie Eco) bilden. Zwischen den Ökobilanzwerten der KBOB-Empfehlungen und EPD-Werten bestehen Unterschiede in der Berechnungsmethodik. Abweichungen lassen sich in den berücksichtigten Lebenszyklusphasen, dem verwendeten Wert für den Primärenergiebedarf, Aggregation der Indikatoren und bei weiteren Punkten feststellen. Gemäss der Untersuchung von Dr. Frank Werner und Dr. Rolf Frischknecht lassen sich EPD-Werte aus den KBOB-Werten ableiten. Für diesen Forschungsbericht werden die KBOB-Daten als Grundlage verwendet. Diese bilden die Schweizer Bauwirtschaft ab und berücksichtigen, dass alle untersuchten Gebäude in der Schweiz erstellt wurden.

Mit der Ökobilanzierung unterschiedlicher Deckenkonstruktionen besteht eine Möglichkeit, um die Nachhaltigkeit unterschiedlicher Konstruktionsaufbauten und -prinzipien zu bewerten. Die errechneten Ökobilanzwerte werden jeweils auf einen Quadratmeter Deckenkonstruktion reduziert. Dies ermöglicht eine bedingte Vergleichbarkeit von Treibhausgasemissionen in kg CO₂-eq/m², dem nicht erneuerbaren Primärenergieanteil (graue Energie) in kWh Oil-eq/m², den Umweltbelastungspunkten UBP /m² sowie dem Gewicht der Deckenkonstruktion in kg/m². Bedingt, auf Grund dessen, dass die objektbezogenen Deckenkonstruktionen auf die jeweilige Gebäudenutzung und -geometrie massgeschneidert sind. Somit kann die Hochhausdecke nicht direkt mit der Mehrfamilienhausdecke oder der Hallendecke verglichen werden. Spannweiten und Traglasten beeinflussen entscheidend die Dimensionierung der Tragelemente. Nichtsdestotrotz sind Vergleiche und Rückschlüsse möglich, um Tendenzen und Konzepte der



ökologischen Nachhaltigkeit aufzuzeigen. Die Detailanalyse deckt auf, wo die ökologisch vorteilhaften, sprich mit geringen Treibhausgasemissionen produzierten Schichten innerhalb der einzelnen Deckenaufbauten stecken. Auf diese Weise können die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Konstruktionen thematisiert werden.

Die ökobilanziellen Vergleiche der Tragkonstruktionen (vgl. Kapitel 3) wurden auf Basis funktional äquivalenter Systeme durchgeführt. Das bedeutet, dass alle betrachteten Systeme dieselben funktionalen Anforderungen erfüllen. Dazu zählen unter anderem identische Tragfähigkeiten (Nutzlast), vergleichbare Brandwiderstände sowie gleiche Anforderungen bei Schallschutz, Schwingungsverhalten und Verformung. Im Rahmen der Berechnungen wurde eine Optimierung der jeweiligen Systeme berücksichtigt. Die Analyse basiert auf real verfügbaren Bauteilen mit definierten Abmessungen, wie sie in der Praxis eingesetzt werden. Für jedes Bauteil ergibt sich dabei in Abhängigkeit des gewählten Querschnitts eine optimale Spannweite. In der vorliegenden Untersuchung wurde jedoch zunächst eine feste Spannweite vorgegeben, woraufhin der jeweils minimal passende Querschnitt bestimmt wurde. Diese Vorgehensweise kann dazu führen, dass es bei bestimmten Spannweiten zu einer leichten Überdimensionierung einzelner Systeme kommt. Zur Überprüfung und Einordnung dieses Effekts wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss dieser potenziellen Überdimensionierung auf die Gesamtergebnisse gering ist und die Aussagekraft sowie Interpretation der Resultate nicht wesentlich beeinträchtigt.

2.4 Bauteil Decke: Eigenschaften und Anforderungen

Geschossdecken sind lastabtragende und raumtrennende Bauteile. Einsatz und Nutzung bedingen verschiedene Eigenschaften und Anforderungen bezüglich Tragfähigkeit, Brandschutz, Bauphysik und Haustechnik, die nachfolgend definiert werden:

Gewicht

Das Gewicht beinhaltet die Tragkonstruktion, den Bodenaufbau sowie die Schichten der Deckenunterseite und wird in der Einheit (kg/m^2) angegeben. Üblicherweise wird das Gewicht der Tragstruktur als Eigengewicht bezeichnet und das Gewicht des Bodenaufbaus und der Deckenverkleidung als Auflast. Bei nicht homogenen Deckensystem (bspw. bei einer Balkendecke) wird das gesamte Gewicht auf einen Durchschnitts-Quadratmeter gemittelt. Das Gewicht ist ein wichtiger indirekter Parameter für die Gesamtbeurteilung von Gebäuden. Da die Decken einen massgebenden Anteil am Gebäudevolumen ausmachen, hat deren Gewicht grossen Einfluss auf die Fundation. Durch massivere Fundationen, gerade bei schwachen Baugrundverhältnissen, erhöhen sich die CO_2 -Emissionen. Zudem hat das Gewicht der Decke auch Einfluss auf den Schallschutz und die Wärmespeicherfähigkeit.

Aufbauhöhe

Die Aufbauhöhe umfasst das gesamte Deckensystem von Unterkante Verkleidung über Tragkonstruktion bis Oberkante Deckschicht Bodenaufbau und wird in der Einheit (mm) gemessen. Die Aufbauhöhe der Geschossdecken beeinflusst die gesamte Gebäudehöhe und damit auch die Hüllfläche von Gebäuden.

Spannweite

Die Spannweite definiert den Abstand zwischen zwei Auflagerpunkten eines Tragwerks. In der Untersuchung wird unter diesem Begriff jeweils die maximale Spannweite der untersuchten Tragkonstruktion in der Einheit (m) angegeben. Mit zunehmender Spannweite steigen der Materialbedarf sowie die Höhe der Tragkonstruktion. Untersucht wurden zwei Spannweitenbereiche: 4 bis 8 m für die Nutzung Wohnen sowie 8 bis 12 m für die Nutzung Schule.



Nutzlast

Die Nutzlast definiert die veränderliche Last, die das Gebäude zusätzlich zum eigenen Gewicht und den ständigen Auflasten aufnehmen kann und wird in der Einheit (kg/m^2) ausgewiesen. Bei den Deckensystemen wird mit einer Nutzlast von 200 kg/m^2 (Wohnen) und 300 kg/m^2 sowie 500 kg/m^2 (Schulen) gerechnet. Dies entspricht den Nutzlastkategorien nach Norm SIA 261.

Brandverhalten

Bauteile werden entsprechend des Brandverhaltens gem. SN EN 13501 nach Dauer ihres Feuerwiderstands beurteilt. Der Feuerwiderstand wird mit drei massgebenden Anforderungen beschrieben: der Tragfähigkeit R, dem Raumabschluss E und der Wärmedämmung I. Es wird unterschieden in rein tragende Bauteile (bspw. Stützen, Träger), raumabschliessende Bauteile (bspw. Abschottungen, Brandschutztore) oder mit Kombinationsanforderung tragende und raumabschliessende Bauteile (bspw. Decken und Wände). Zur Anforderung wird jeweils die Widerstandsdauer in Minuten angegeben (REI30, REI60, REI90, REI120). Dies ist die Mindestzeit in Minuten, während der ein Bauteil die gestellten Anforderungen erfüllen muss.

Tragsicherheit

Das Einhalten der Tragsicherheit ist eine Anforderung an die Tragwerksteile der Deckensysteme. Darunter versteht sich das Konstruieren nach Konzepten gem. Stand der Technik und Normvorgaben. Die zu führenden Nachweise der Tragsicherheit nach dem Partialsicherheitskonzept sind in den Tragwerksnormen des SIA für die jeweiligen Materialien vorgegeben. Dabei werden Unsicherheiten auf Material-, Geometrie- und Einwirkungsseite berücksichtigt.

Gebrauchstauglichkeit

Nebst der Tragsicherheit werden auch Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit von Tragstrukturen durch die SIA-Tragwerksnormen geregelt. Dabei müssen Deckentragwerke Grenzwerte für Schwingungsverhalten, Durchbiegungen und Rissbreiten einhalten, um die Gebrauchstauglichkeit unter der angestrebten Nutzung der Struktur sicherzustellen. Für die Berechnung des Schwingungsverhaltens von Stahlbetonverbunddecken wurden nutzungsspezifische Dämpfungswerte berücksichtigt. Dabei kamen für Wohnnutzung ein Dämpfungswert von 4 % und für Schulen ein Wert von 3 % zur Anwendung, basierend auf typischen Erfahrungswerten aus der Praxis [6]. Bei Holzdecken wurde das Schwingungsverhalten mit dem in der Holzbautabelle [7] beschriebenen Vorgehen nach Kreuzinger Mohr [8] bewertet. Typische Dämpfungswerte von 3 % wurden angenommen.

Schallschutzanforderung

Schallschutzanforderungen im Wohnungsbau beinhalten nach SIA 181 Mindestanforderungen wie auch erhöhte Anforderungen und werden auf die Bedürfnisse der Nutzenden abgestimmt. Es wird dabei zwischen Luft- und Trittschallschutz unterschieden, für die entsprechende Schallwerte in der Einheit Dezibel (dB) eingehalten werden müssen. Bei der ökobilanziellen Optimierung der Grundkonstruktionen mit angepasstem Bodenaufbau werden die Mindestanforderungen an den Schallschutz gemäss der Norm SIA 181 angestrebt. Weitere akustische Optimierungen über diese Anforderungen hinaus waren nicht Teil des Untersuchungsumfangs. Für raumabschliessende Decken gelten die Werte in Tabelle 1. Bei den erhöhten Anforderungen gilt ein Zuschlag von 4 dB für den Luftschallschutz und ein Abschlag von 4 dB für den Trittschallschutz. Bei den untersuchten Praxisbeispielen sind die vereinbarten Schallschutzanforderungen angegeben.



Tabelle 1: Schallschutzanforderungen (Projektierungswerte) nach SIA 181 für die Deckensysteme in Wohn- und Schulbauten [9].

	Wohnen	Schulen
Lärmempfindlichkeit	mittel	mittel
Lärmbelästigung	mässig	stark
Trittschallschutz	$L'_d \leq 53 \text{ dB}$	$L'_d \leq 48 \text{ dB}$
Luftschallschutz	$D_{i,d} \geq 52 \text{ dB}$ $(R'_w + C)_{\text{res}} \geq 47 \text{ dB}$	$D_{i,d} \geq 57 \text{ dB}$ $(R'_w + C)_{\text{res}} \geq 52 \text{ dB}$

Wärmespeicherfähigkeit

Die Wärmespeicherfähigkeit ist Teil der SIA-Normen 180 und 380/1. Die SIA-Norm 180 betrachtet den Wert Wärmespeicherfähigkeit C (kWh/K) raumbezogen mit der Bezeichnung C_R (Wh/m²K). Die Decke bildet nur ein, dafür ein wichtiges Element innerhalb der Raumflächen. Der Effekt, dass sich die wärmsten Luftschichten entlang der Deckenuntersicht stapeln, prädestiniert die Deckenkonstruktion als effektives und klimaregulierenden Bauteil in den Innenräumen. Die Wärmespeicherfähigkeit wird für die Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes benötigt. In der Berechnung des Heizwärmebedarfs (SIA 380/1) dient der Wert C_R zur Berechnung der Zeitkonstante (τ), welche für den Ausnutzungsgrad der Wärmereinträge benötigt wird. Für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität der Decke wird das SIA-energytool «Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit» verwendet. Auch wenn das Excel-Tool nicht mehr aktualisiert wird, entsprechen die Berechnungen nach wie vor der Norm.

CO₂-Emissionen

Der Fokus der ökobilanziellen Betrachtung liegt auf den Treibhausgasemissionen der einzelnen Bauteilschichten, aufgrund des massgebenden Einflusses auf die Klimaerwärmung. Die Treibhausgas-Emissionen, welche bei der Herstellungs- und Entsorgungsphase des Deckensystems entstehen, sind in der Einheit (kg CO₂-eq./m²) angegeben. CO₂-eq. steht für Kohlenstoffdioxid-Äquivalent und berücksichtigt sämtliche anthropogene klimarelevante Emissionen. Die wichtigsten Klimagase sind: Kohlendioxid CO₂, Methan CH₄, Lachgas N₂O und Schwefeldioxid SO₂ [10]. Berechnet wird entsprechend der Definition des SIA-Merkblattes 2032 «Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden. Die Werte werden absolut und pro Jahr angegeben. Gemäss SIA 480 werden die Amortisationszeiten mit den Nutzungsdauern von 60 Jahren für das Tragsystem und 30 Jahren für den Bodenbelag angenommen.

Graue Energie

Die Graue Energie umfasst den nicht erneuerbaren Anteil an der Primärenergie eines Baustoffes, welcher fossile und nukleare Energieträger sowie Holz aus Primärwäldern [5] beinhaltet. Die Graue Energie wird in (kWh-oil eq./m²) ausgewiesen [11].

Umweltbelastung

Die Methode der ökologischen Knappheit wird in Umweltbelastungspunkten (UBP) angegeben [12]. Diese Ökobilanz-Betrachtung untersucht ein breiteres Spektrum an Umwelteinflüssen. UBP orientieren sich an der schweizerischen Gesetzgebung. Die Punktzahl erhöht sich, je mehr die Umweltziele überschritten werden. Die Umweltbelastungspunkte werden periodisch ergänzt und angepasst. Dominierend ist nach wie vor der Klimaschutz. Zur Vervollständigung der unterschiedlichen ökologischen Betrachtungsgrössen werden die UBP in den Analysen aufgeführt.



3 Untersuchung Tragkonstruktion

Jede Deckenkonstruktion ist als komplexes System zu verstehen, in welchem die Kombination diverser Materialschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften ein leistungsfähiges Bauteil ergeben. Diese Materialschichten werden je nach Funktion zur Tragkonstruktion und zum Bodenaufbau gezählt. In den beiden Kapiteln 3 und 4 werden diese beiden Funktionen einzeln betrachtet, auch wenn zur Erreichung wichtiger Anforderungen bei Schallschutz und Behaglichkeit übergreifende Synergien beider Konstruktionsteile benötigt werden. Auf diesen Umstand wird in beiden Kapiteln eingegangen und die Optimierung des Systems in Kapitel 6 beschrieben.

Wesentliche Aufgabe der Tragkonstruktion ist der Lastabtrag sowie der Raumabschluss. Die Tragkonstruktionen der Decken übernehmen vielfach auch die Bauwerksaussteifung. Zur Erreichung dieser Aufgaben sind unterschiedliche Konstruktionsarten aus den Materialien Holz, Stahlbeton und Stahl entstanden. Nachfolgend werden Grundsysteme aktuell gebräuchlicher Deckentragwerke verglichen.

Für zwölf Grundkonstruktionen (siehe Abbildung 2) wurden Excel-Dokumente erarbeitet, um mehrere Anforderungen an verschiedenen Tragkonstruktionen zu vergleichen sowie deren Ökobilanz zu quantifizieren. Die Excel-Dokumente dienen als Instrument, um teilautomatisiert und effizient die erforderlichen Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise für verschiedene Konfigurationen bei allen Deckensystemen zu prüfen. Ein Beispiel aus einem solchen Berechnungsdokument ist in Kapitel 11 abgebildet. Nebst den Anforderungen an die Tragstruktur (vgl. Kapitel 2.4) können in den Excel-Dokumenten die Grundlegenden Parameter zur Geometrie und Materialität manuell variiert werden. Mit diesen Eingabeparametern werden die für das jeweilige Deckensystem notwendigen Nachweise zu Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit geführt und es ist direkt ersichtlich, ob die statischen Normbedingungen für einen manuell gewählten Konstruktionsaufbau unter den Anforderungen erfüllt sind. Falls ein oder mehrere Nachweise nicht erfüllt sind, können beispielsweise durch Vergrössern der Trägerabmessungen oder Wählen einer höheren Materialfestigkeit die Grundlagenparameter so lange angepasst werden, bis eine tragfähige Struktur zu der betrachteten Anforderungskonfiguration gefunden wurde.

Parallel zu den Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen werden in den Excel-Dokumenten die aktuell gültigen Ökobilanzdaten [5] durch Verlinkung zu den beteiligten Materialien berechnet. Daraus werden summierte Werte der UBP, grauen Energie und THG-Emissionen für die Tragstruktur des Deckensystems pro m^2 berechnet. In der Berechnung berücksichtigt sind sowohl die Bauteile (Geometrie und Material von Platten, Trägern etc.) wie auch die Verbindungsmittel (Anzahl und Material von Dübeln, Schrauben), jedoch keine Bauhilfsmassnahmen wie Schalungstafeln, Spriesse o.Ä.

Wichtig ist hier die Anmerkung, dass keine automatisierte Optimierung der Material- und Geometrieparameter stattfindet. Zur Benützung der Exceldokumente sind Fachwissen im Bauingenieurwesen und Kenntnis des gültigen Stands der Technik notwendig. Eine Optimierung durch automatisierte Prozesse wurde bewusst nicht implementiert, um die Komplexität aufzubrechen und durch starke Vereinfachungen und gerechtfertigte Annahmen die Betrachtung auf greifbare und auswertbare Datensätze zu reduzieren. Die Berechnungen entsprechen einer Vordimensionierung und nicht einer abschliessenden Dimensionierung der Decken, da die Komplexität von Bauprojekten eine individuelle Prüfung jedes Bauteils im Gesamtprojekt in Zusammenhang mit weiteren Bauteilen erfordert und dies in der hier vergleichenden Studie von Deckensystemen nicht möglich ist.

Obschon die Resultate für jedes Bauprojekt individuell untersucht werden müssen, können aus den hier untersuchten Grundkonstruktionen Tendenzen abgelesen werden. Für eine festgelegte Konfiguration z.B. Belastung 200 kg/m^2 (Wohnen), Brandschutz R60 werden vergleichende Diagramme mit den THG-Emissionen abhängig von der Deckenspannweite (4 bis 12 m) erstellt. Dies erlaubt einen direkten Vergleich der verschiedenen Grundkonstruktionen und Aussagen dazu, in welchen Konfigurationen welche Deckensysteme bezüglich Ökobilanz bessere Leistungen erbringen.

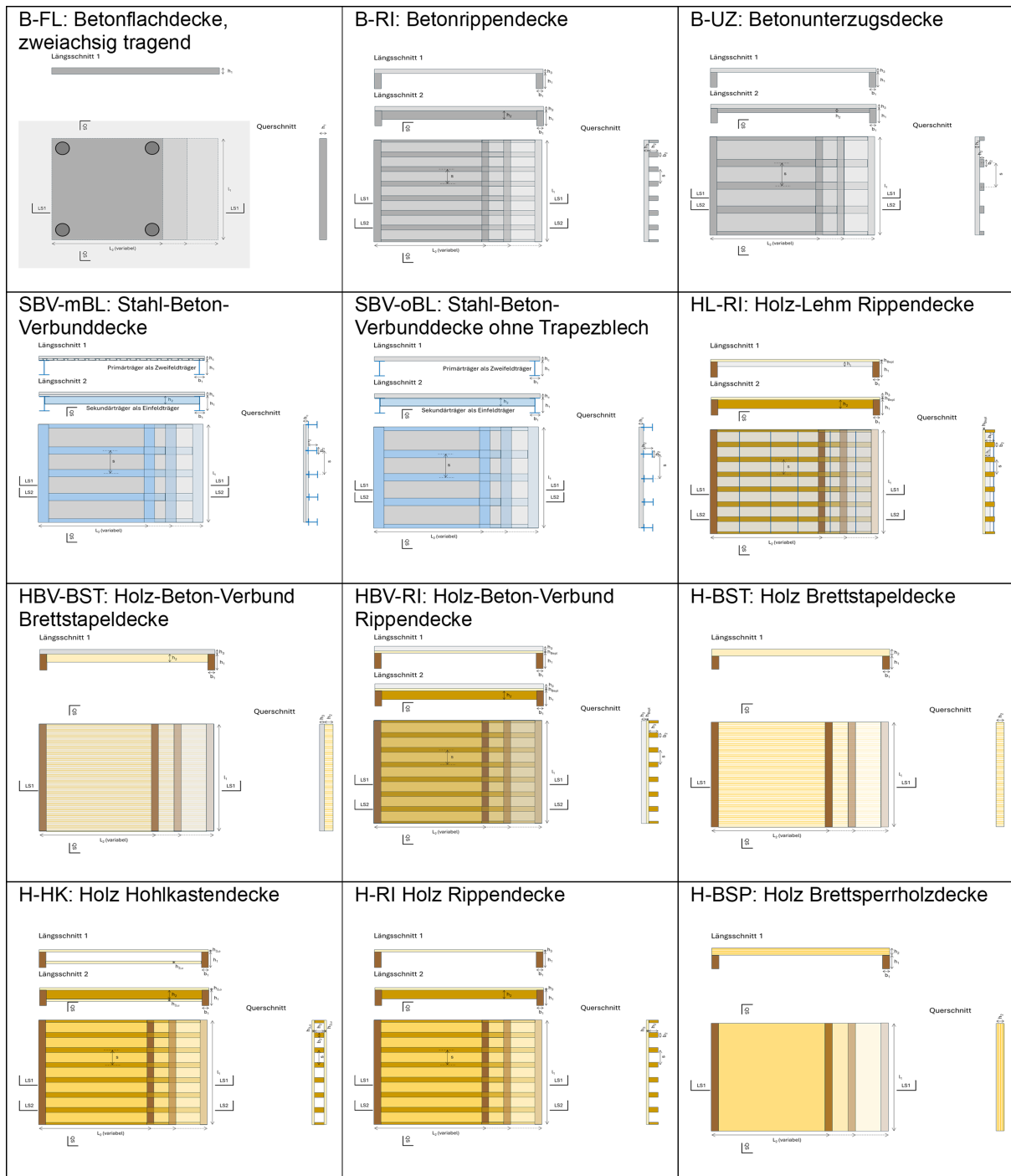


Abbildung 2: Tragwerksskizzen der zwölf untersuchten Tragstrukturen

Neben den Ökobilanzdaten sind die Parameter Gewicht und Aufbauhöhe der Tragstruktur für jede Anforderungskonfiguration wichtige Kennwerte. Als indirekte Faktoren beeinflussen sie die Gesamtökobilanz von Gebäuden [13]. Die Zusatzfunktionen der Deckentragwerke wie Anteile am Schallschutz und Brandschutz sind in dieser Forschungsarbeit berücksichtigt, da zusammen mit dem Tragwerk auch der Bodenaufbau und damit das gesamte Deckensystem betrachtet wird. Nicht quantitativ berücksichtigt sind in dieser Untersuchung aber die indirekten Einflüsse des Gewichts und der Aufbauhöhe der Decke,



welche gerade bei mehrgeschossigen Gebäuden die Gesamtgebäudehöhe und das totale Gewicht signifikant beeinflussen können. Mehr Gebäudehöhe und Gewicht bei gleicher Stockwerkanzahl erfordert stärkere horizontale Aussteifungssysteme, eine leistungsfähigere Fundation und vergrössert zudem die weiteren Ausbaubestandteile wie Erschliessung, und Fassaden. Deshalb ist es essenziell zumindest qualitativ die Parameter Gewicht und Aufbauhöhe zusammen mit den Ökobilanzvergleichen abzubilden und zu diskutieren.

Der erste Teil der Untersuchung vergleicht Deckensysteme bezüglich der Ökobilanz basierend auf ihren Materialien in verschiedenen Anforderungskonfigurationen. Neben dem intersystemischen Vergleich (zwischen unterschiedlichen Deckentypen) erfolgte auch eine detaillierte intrasystemische Analyse. Innerhalb jedes Deckensystems wurden verschiedene Ausführungsvarianten untersucht, um Optimierungspotenziale zu identifizieren. Diese Optimierungsvektoren umfassen unter anderem Querschnittsreduktionen, alternative Materialkombinationen, effizientere Verbindungstechniken sowie die gezielte Anpassung an spezifische Spannweiten und Nutzungsszenarien. Dies soll den Planenden aufzeigen mit welchen Parametern bei einem gesetzten Deckensystem die Treibhausgasemission reduziert werden können. Bei Betondecken sind das beispielsweise die Zementwahl, die Mindestanforderungen an Gebrauchstauglichkeit und davon abhängig die Bewehrungsgehalte und die Geometrie (Flachdecke oder gerichtete Systeme mit Rippen).

Durch diese zweistufige Vorgehensweise – systemübergreifender Vergleich und systeminterne Optimierung – kann nicht nur eine Bewertung der relativen Umweltwirkung der Deckensysteme vorgenommen werden, sondern es lassen sich auch konkrete technische Hebel zur Verbesserung der ökologischen Performance einzelner Typen aufzeigen. Die Analysen liefern somit fundierte Entscheidungsgrundlagen für eine nachhaltigere Materialwahl sowie Konstruktionsweise von Deckenkonstruktionen.



4 Untersuchung Boden- und Unterdeckenaufbau

Die Schichten des Bodenaufbaus ergänzen die Tragkonstruktion, um Anforderungen des Wärme-, Brand- und Schallschutzes sowie der Behaglichkeit umzusetzen. Bei leichten Holzdecken wird die Tragkonstruktion neben dem Bodenaufbau zusätzlich durch eine abgehängte Deckenuntersicht ergänzt, um Schall- und Brandschutzanforderungen einhalten zu können.

Trotz variierender Einsatzgebiete und Anforderungen hat sich bei Tragkonstruktion aus unterschiedlichen Materialien und Konstruktionsarten ein Typ Bodenaufbau etabliert: zwei Lagen Dämmstoff für Wärme- und Trittschallschutz, Trennfolie, mineralischer Unterlagsboden sowie Bodenbelag.

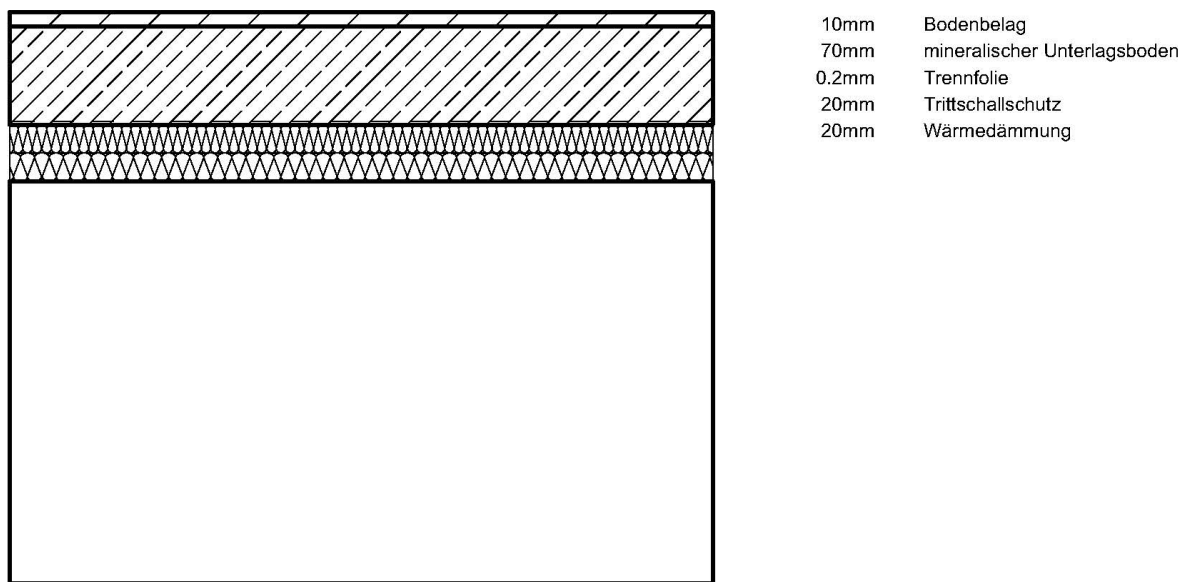


Abbildung 3: Gebräuchlicher Bodenaufbau bei Massiv- und Verbunddeckenkonstruktionen, bei Holzdecken in Kombination mit Unterdeckenaufbau

Dieser Schichtaufbau hat sich bei Aufenthalts- und Nassräumen bewährt; er wird heute rationell und ökonomisch ausgeführt. Jede Materialschicht löst nicht zu vernachlässigende CO₂-Emissionen aus, weshalb die einzelnen Schichten im Sinne einer ökobilanziellen Optimierung hinterfragt werden müssen – hinsichtlich ihrer Materialisierung wie auch ihrem konstruktiven Nutzen innerhalb des gesamten Deckensystems.

Aktuelle Beispiele wie das Deckensystem des Bürogebäudes Hortus zeigen, dass bei konsequenter Wahl von CO₂-armen Materialien, einer Konstruktion, die Synergien nutzt sowie reduzierten Schallschutzanforderungen grosses Potential bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen vorhanden ist. Durch den Verzicht auf einen mineralischen Unterlagsboden können etwa 40% der CO₂-Emissionen des Bodenaufbaus eingespart werden. Der Schall- und Brandschutz wird hier über Lehmfüllungen in den Deckenfeldern gelöst, die Schallanforderungen sind durch die Büronutzung reduziert.



Abbildung 4: Optimierter Bodenaufbau Bürogebäude Hortus Allschwil, Mockup Tragkonstruktion, Werkstückhalle, Fotografie Lukas Murer

In der Untersuchung von unterschiedlichen Bodenaufbauten zeigt sich, dass nicht nur die Substitution konventioneller Baumaterialien durch nachhaltige, sondern auch die systemischen Zusammenhänge der Konstruktionsaufbauten und die konzeptionellen Konsequenzen, welche ökologische und nachhaltige Bodenaufbauten vorgeben, bei der Optimierung eine wichtige Rolle spielen.

Die messbare Zunahme der Hitzesommer geben der Wärmespeicherung immer mehr Gewicht. Diesbezüglich spielen die wärmepuffernden Fähigkeiten von Deckenkonstruktionen eine zentrale Rolle. Die Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes ist nur über die Betrachtung des ganzen Raumes möglich. Massgebend sind die Fensterflächen, welche die solaren Gewinne vorgeben, die Personenbelegung, technischen Installationen und Geräte, welche interne Wärmequellen definieren sowie die Raumgeometrie mit den Bauteiloberflächen und Materialien, welche die Speicherfähigkeit des Raumes beschreiben. Aufgrund des archimedischen Prinzips schichten sich die wärmsten Luftschichten in Innenräumen unterhalb der Decke. Die angrenzenden Bauteilschichten absorbieren die in der Raumluft enthaltene Wärme – diese wird im Material zwischengespeichert. Je massereicher die Deckenuntersichten und Bodenbeläge dimensioniert sind, desto effektiver wirken diese klimatisierend. Die absorbierte Wärme bleibt so lange im Material gespeichert, bis die Raumlufttemperatur ca. 3° bis 5°C unter der Oberflächentemperatur liegt. Die Temperaturdifferenz zwischen Bauteiloberfläche und Raumlufttemperatur ist Voraussetzung, dass ein Wärmetransport zwischen Luft und Masse in beide Richtungen funktionieren kann. Die Raumtemperaturen ändern sich während eines Tagesverlaufs. Üblicherweise steigen die Raumtemperaturen bis in den Nachmittag an, um danach langsam bis in die frühen Morgenstunden wieder zu sinken. Über längere Hitzeperioden kann sich die Raumtemperatur ohne geeignete aussenliegende Beschattung und Nachtauskühlung kontinuierlich hochschaukeln. Bei der Untersuchung der Deckensysteme wird ausschliesslich die Wärmespeicherfähigkeit beziehungsweise die Wärmeträgheit [14] des Bauteils C (kWh/K) bzw. C_R (Wh/m²K) untersucht. Die Werte der Decken werden mit dem Hilfstool «Berechnung der Speicherfähigkeit» berechnet, welches auf dem Verfahren der SIA 180.073 (EN 13786) basiert.



Der dominierende Parameter bei der Untersuchung des Bodenaufbaus ist der Schallschutz. Die Bauakustik ist wie auch die Wärmespeicherfähigkeit nicht isoliert für das Bauteil Decke analysierbar. Raumvolumen und die Grösse der Begrenzungsflächen spielen im Sende- und Empfängerraum eine massgebende Rolle. Die Projektierungswerte für den Schallschutz werden analog dem Nachweisverfahren der SIA-Norm 181 berechnet. Beim Luftschallnachweis wird der Bauteilkennwert, das bewertete Schalldämmmass R_w (dB), durch eine bewertete Verbesserung aufgrund des mehrschaligen Systems erhöht und durch Beiwerte für Raumgrösse, Flankenübertragung, Projektierungssicherheit und Spektrum-Anpassung korrigiert. Für den Trittschallnachweis wird vom Bauteilkennwert, Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ (dB), eine bewertete Trittschallminderung durch das mehrschalige System abgezogen und analog der Projektierungswert durch Beiwerte für Raumgrösse, Flankenübertragung, Projektierungssicherheit und Spektrum-Anpassung korrigiert. Die Bauteilkennwerte R_w und $L_{n,w}$ werden mit empirischen Formeln berechnet oder als gemessene Referenzwerte, welche in Bauteilkatalogen oder Akustikrechnern gesammelt sind, angenommen.

Für den Trittschallschutz ist die vollständige akustische Trennung von den angrenzenden Stützen und Wänden und der begehbaren Nutzschiicht inklusive deren Tragschiicht sowie eine zusätzliche Masse oberhalb der Federlage massgebend. Dies kann konstruktiv durch eine durchlaufende Trittschalldämmung mit aufliegender Beschwerung umgesetzt werden. Luftschall wird über die Bauteilmasse gedämpft. Zu beachten sind aber auch die zahlreichen Nebenwege. Schallwellen regen die einzelnen Bauteilschichten zur Schwingung an. Der Luftschallschutz steht in direkter Abhängigkeit zur schalldämpfenden Leistungsfähigkeit der gewählten Tragkonstruktion. Bei leichten Deckenkonstruktionen wird die fehlende Bauteilmasse im Bodenaufbau ergänzt. Bei leichten Holzkonstruktionen wirkt eine abgehängte Deckenunterkonstruktion zusätzlich schalldämpfend.

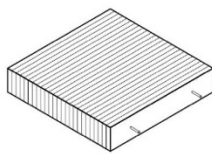
Die zwölf untersuchten Tragkonstruktionen sind bei Gewicht und Schwingungsverhalten sehr unterschiedlich. Im weiteren Verlauf soll untersucht werden, wieviel Masse die verschiedenen Tragkonstruktionen bei unterschiedlichen Spannweiten im Boden- und gegebenenfalls Deckenaufbau benötigen, um die Mindestanforderungen beim Schallschutz einzuhalten und wie gleichzeitig, durch Massereduktion und Einsatz von CO₂-Armen Materialien, das ganze Deckensystem ökobilanziell optimiert werden kann.



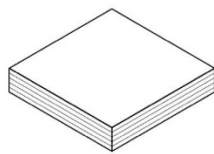
5 Gebaute Beispiele aus der Praxis

Die Untersuchung bestehender Praxisbeispiele von Wohnungs- und Schulbauten erweitert die Forschung um reale Anwendungen und deren Erkenntnisse bei der Umsetzung. Die unterschiedlichen Deckensysteme werden anhand der definierten Kennwerte, Konstruktionszeichnungen sowie Beschreibungen zu Nutzung und Aufbau eingehend betrachtet und deren Material- und Konstruktionslogik beschrieben. Es werden drei Grundarten von Deckenkonstruktionen – Holz-, Stahlbeton- und Hybridkonstruktionen - unterschieden. Zu den in Abbildung 5 ersichtlichen Tragkonstruktionen wird eine Auswahl von gebauten Beispielen inklusive deren zugehörigen Bodenaufbauten untersucht.

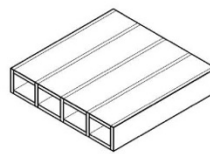
Holzkonstruktionen



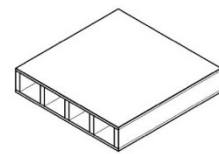
Brettstapel



Brettsperrholz

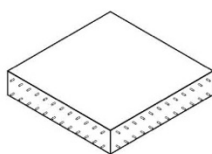


Hohlkasten

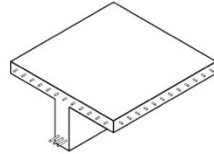


Balken beidseitig beplankt

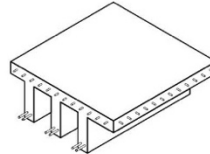
Stahlbetonkonstruktionen



Platte

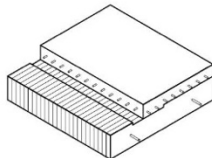


Platte mit Unterzug

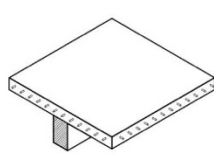


Rippen

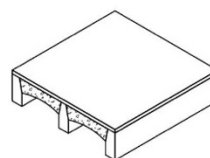
Hybridkonstruktionen



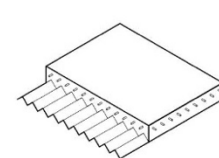
Brettstapel - Beton



Holzunterzug - Beton



Holz - Lehm



Stahlblech - Beton

Abbildung 5: Übersichtsmatrix Praxisbeispiele nach Tragkonstruktionsarten

Aufbau und Umfang der Untersuchung zeigen die nachfolgenden Praxisbeispiele einer konventionellen Betonflachdecke und einer optimierten Betonflachdecke mit Unterzügen.



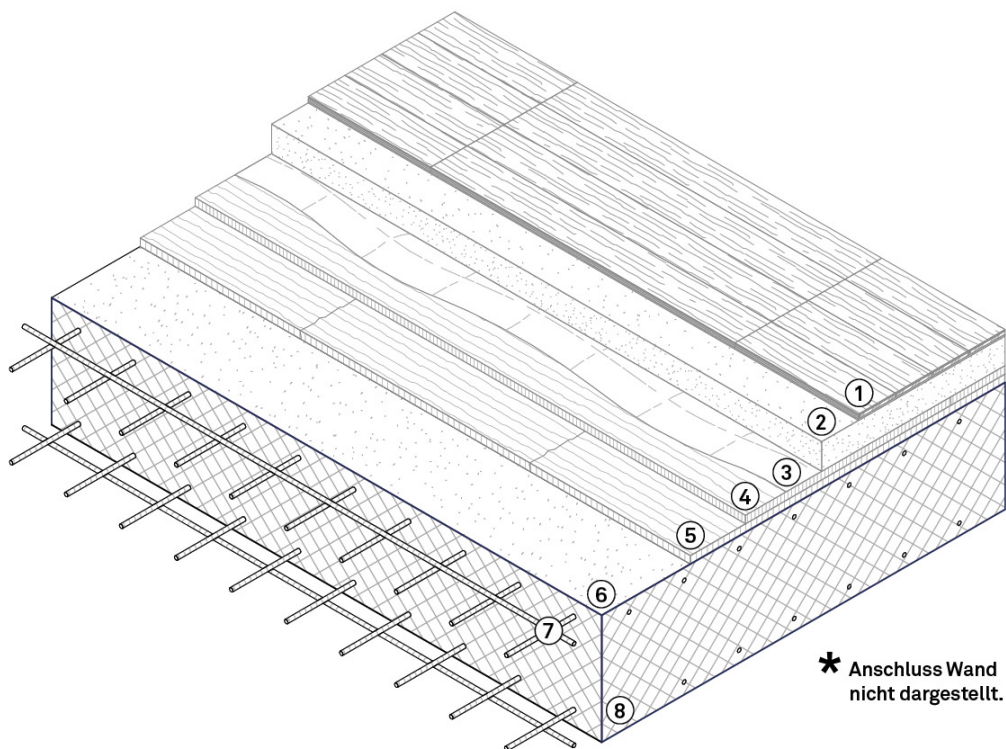
Betonflachdecke konventionell I

Wohn- und Gewerbebau KIM
Winterthur
2024

Gewicht	kg/m ²	823
Aufbauhöhe	mm	405
Spannweite	m	3.40 - 6.80
Nutzlast	kg/m ²	200
Feuerwiderstand	REI	60
Anforderungen Luftschall	D _{i,d} in db	>52
Anforderungen Trittschall	L _d [‘] in db	<53
Wärmespeicherfähigkeit	Wh/m ² K	39.9
CO ₂ -Emissionen	kgCO ₂ -eq/m ²	116



Das Wohnhaus besetzt die Südostecke des Baufeldes KIM in Winterthur-Neuhegi. Die Gebäudefigur öffnet sich mit einem Gartenhof nach Westen. Seine siebengeschossige Tragstruktur ist in Massivbauweise erstellt, mit betonierten Untergeschossen, Treppenhäusern, Wohnungstrennwänden und Decken. Zwischen- und Aussenwände bestehen aus Backstein.



1 Klebeparkett	11mm
2 Unterlagsboden Anhydrit mit Bodenheizung	70mm
3 Polyethylenfolie (PE)	0.2mm
4 Trittschalldämmung Glaswolle	20mm
5 Wärmedämmung EPS	20mm
6 Hochbaubeton	280mm
7 Bewehrung	
8 Anstriche	
<u>Aufbauhöhe</u>	401 mm

Abbildung 6: Deckenaxonometrie, Wohn- und Gewerbebau KIM, Winterthur



Tragkonstruktion Decke

Die Decke ist als konventionelle Stahlbetonflachdecke konzipiert und besitzt im Bereich der Wohngehosse eine Spannweite von 3.40 m - 6.70 m und eine Nutzlast von 200 kg/m². Das Material Beton übernimmt die anfallenden Druckkräfte, die eingelegte Stahlbewehrung die Zugkräfte. Durch die Einlage von Elektro- und Wasserleitungen sowie Lüftungsrohren besitzt die Decke eine Stärke von 28 cm.

Bodenaufbau

Die Untersicht der Stahlbetondecke ist zweifach gestrichen. Beim Bodenaufbau kommen als Wärmedämmung EPS-Platten und als Trittschalldämmung Glaswolle-Platten zum Einsatz. Darauf wird als Trennlage eine PE-Folie ausgelegt. Ein Anhydrit-Fliessestrich fungiert als steife Unterlage für den Bodenbelag und nimmt die Bodenheizung auf. Ein zweischichtiger Stabparkett aus Eiche bildet den Bodenbelag. Er ist mit einem 1-Komponentenkleber vollflächig verklebt, seine Oberfläche ist geschliffen und versiegelt.

Bauphysikalische Eigenschaften

Die Untersicht der Stahlbetondecke ist nicht weiter verkleidet und wird raumseitig als thermische Speichermasse genutzt. Die massive Tragkonstruktion der Decke ergibt einen ausgezeichneten Luftschallschutz. Der Trittschall wird mit einer schwimmend verlegten Glaswoll-Dämmung auf die nach Norm erlaubten Werte reduziert.

Brandverhalten

Die nicht brennbaren Betondecken übernehmen die gesamte Traglast und gewährleisten Raumabschluss (REI60) und Fluchtweg.

Material- und Konstruktionslogik

Die vor Ort ausgeführte Betonflachdecke nutzt die Materialeigenschaften von druck- und feuerfestem Beton sowie zugfestem Stahl. Über die Anpassung von Querschnitt und Bewehrungsgehalt kann auf unterschiedliche Spannweiten reagiert werden. Durch die Betonummantelung der Stahlbewehrung gilt die Konstruktion als feuerfest. Die Herstellung mittels Giessverfahren erlaubt die einfache Ausbildung verschiedenster Geometrien und ermöglicht zudem schnelle und effiziente Einlagen von Haustechnikleitungen. Die Konstruktion ist enorm dauerhaft, kann durch vergossene Anschlüsse aber nur schwer wiederverwendet werden. Die Decken der Wohnüberbauung KIM spannen von Wand zu Wand – jede Mauerwerkswand ist tragend. Das Tragsystem ist bei Änderungen der Raumeinteilung nicht flexibel. Der durch die Haustechnikeinlagen bedingte grosse Materialaufwand der dicken Betondecke schenkt bei der Ökobilanz entsprechend ein. Ihre hohe Masse bringt hingegen ausgezeichnete Eigenschaften für Schalldämmung und Wärmeabsorption mit sich.

→ Projektspezifische Anhänge, wie Plan- und Bildmaterial, am Ende des Dokuments



Ökobilanz

	Nr.	Material	Gewicht (kg/m²)	TGE/a (kgCO ₂ -eq/m²)	TGE (kgCO ₂ -eq/m²)	Graue Energie (kWh oil-eq/m²)	Umweltbelastung (UBP 21/m²)
Bodenaufbau	1.	Parkett	6.1	0.26	7.8	42.3	16090
	2.	Unterlagsboden Anhydrit	140.0	0.43	12.8	60.0	30030
	3.	Polyethylenfolie (PE)	0.2	0.03	1.0	4.6	1275
	4.	Glaswolle	1.6	0.06	1.6	8.2	2922
	5.	Polystyrol	0.4	0.10	3.0	12.0	3920
Tragkonstruktion	6.	Konstruktionsbeton	644.6	1.09	65.5	113.6	99280
	7.	Bewehrung	29.8	0.39	23.4	102.6	47396
	8.	Anstriche	0.3	0.02	0.7	4.2	1221
Bodenaufbau			148	0.88	26	127	54237
Tragkonstruktion			675	1.50	90	220	147897
Deckensystem TOTAL			823	2.38	116	347	202133

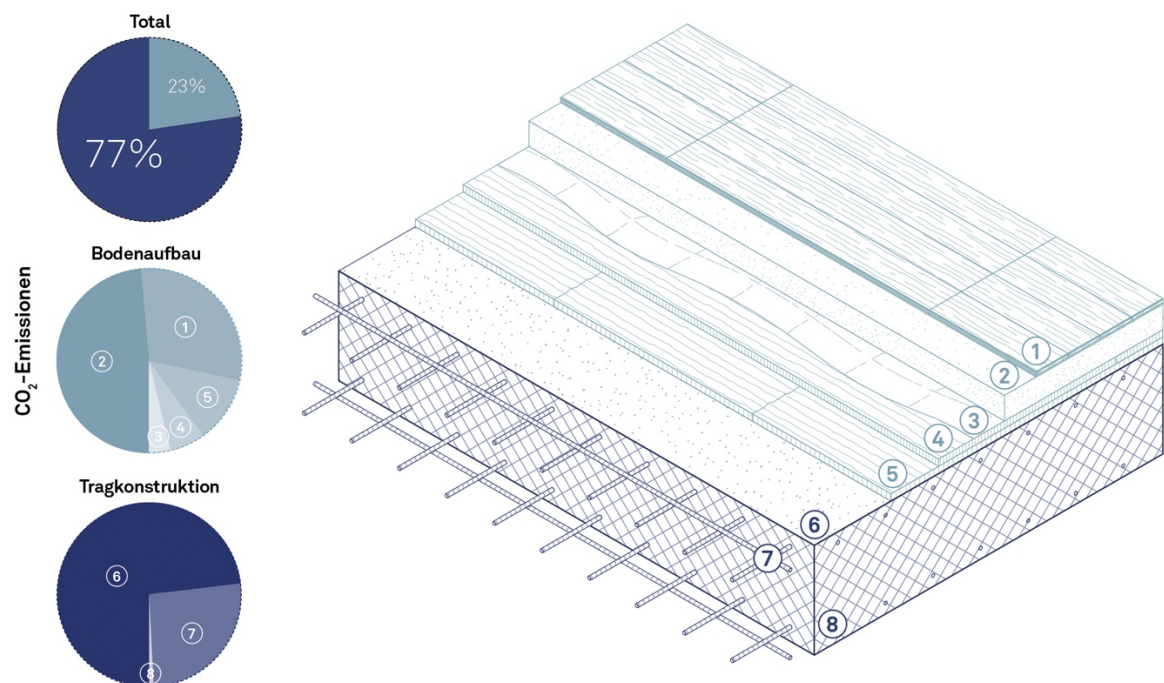


Abbildung 7: Ökobilanz, Wohn- und Gewerbebau KIM, Winterthur



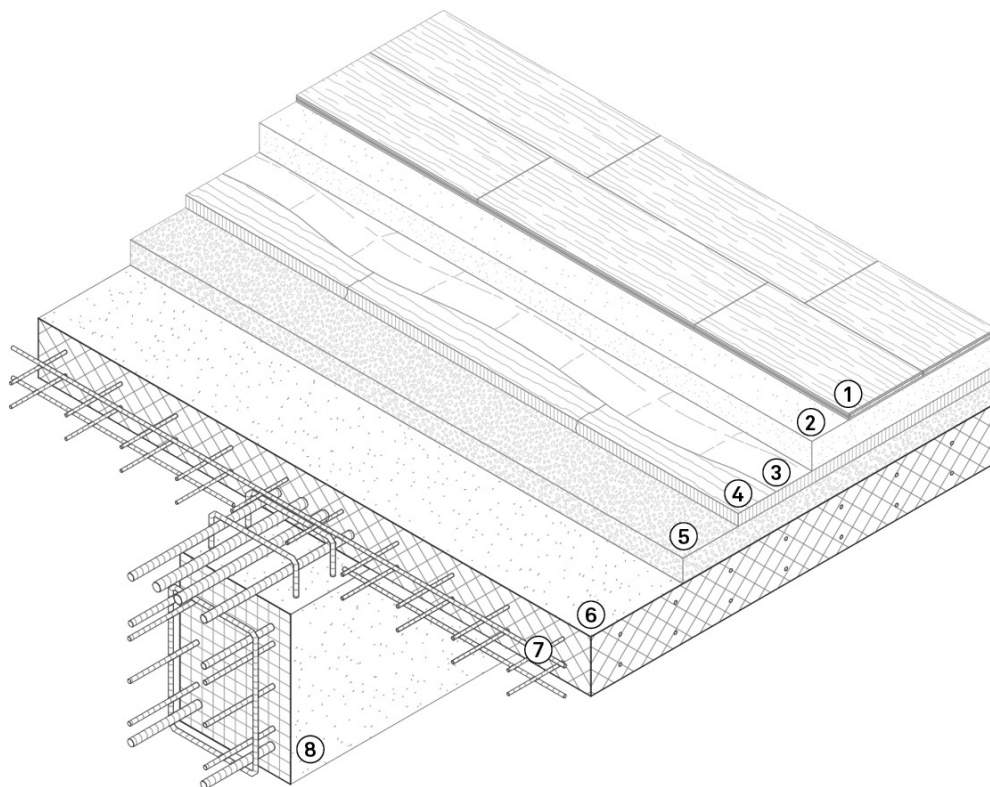
Betonflachdecke optimiert

Wohnhochhaus Freihofstrasse
Zürich
2026

Gewicht	kg/m ²	683
Aufbauhöhe	mm	312
Spannweite	m	3.60 - 8.00
Nutzlast	kg/m ²	200
Feuerwiderstand	REI	60
Anforderungen Luftschall	D _{i,d} in db	>52
Anforderungen Trittschall	L _d ^t in db	<53
Wärmespeicherfähigkeit	Wh/m ² K	40.5
CO ₂ -Emissionen	kgCO ₂ -eq/m ²	102



An der Freihofstrasse verdichtet ein knapp 80m hohes Wohnhochhaus mit 26 Geschossen die Bebauung des Quartiers. Es ermöglicht den Erhalt und die Wiederverwendung der bestehenden, eingeschossigen Shedhalle aus den 1950er Jahren, ehemaliger Ausstellungs- und Montageraum der Fiat-Garage. Durch Inspiration des filigranen Betonbestandes und aus Nachhaltigkeitsüberlegungen ist eine optimierte Betonkonstruktion mit kleinen Spannweiten und schlanken Querschnitten bei Stützen und Decken entstanden. Innenwände und Fassaden sind in Leichtbauweise erstellt.



1	Klebeparkett Formpark	11mm
2	Unterlagsboden Anhydrit mit Bodenheizung	70mm
3	Polyethylenfolie (PE)	0.2mm
4	Trittschalldämmung Glaswolle	30mm
5	Schüttung gebunden	60mm
6	Ortbetondecke	140mm
7	Bewehrung	
8	Vorfabrizierter Betonunterzug	300/400mm
<u>Aufbauhöhe</u>		311mm (ohne Unterzug)

Abbildung 8: Deckenaxonometrie, Wohnhochhaus Freihofstrasse, Zürich



Tragkonstruktion Decke

Die Decke ist als massenoptimierte Betonflachdecke konzipiert. Durch den Einsatz von vorfabrizierten Unterzügen im Abstand von 3.60m konnte die Spannweite der Deckenplatten minimiert und deren Stärke auf 14cm reduziert werden. Über den monolithischen Verbund von vorfabrizierten Unterzügen und vor Ort gegossenen Deckenflächen wird eine Spannweite von 8m bewältigt. Ihre Nutzlast beträgt 200 kg/m².

Bodenaufbau

Auf der abtalschierten Stahlbetondecke wird eine zementgebundene Splitt-Schüttung aufgebracht und darauf eine mit Folie kaschierte Trittschalldämmung aus Glaswolle ausgerollt. Ein Anhydrit-Fliessestrich bildet die steife Unterlage für den Bodenbelag und nimmt die Bodenheizung auf. Darauf wurde zweischichtiges Parkett aus Eiche verlegt. Er ist mit einem 1-Komponentenkleber vollflächig verklebt. Seine Oberfläche ist tiefgebürstet und matt versiegelt.

Bauphysikalische Eigenschaften

Die Untersicht der Stahlbetondecke ist nicht weiter verkleidet und wird raumseitig als thermische Speichermasse genutzt. Die Schallschutzanforderungen werden bei der Körperschallübertragung durch die Masse der Betondecke sowie durch eine zementgebundene Splitt-Schüttung eingehalten und der Trittschall durch eine entsprechende Dämmung aus Glaswolle reduziert.

Brandverhalten

Die nicht brennbaren Decken und Unterzüge aus Beton übernehmen die gesamte Traglast und gewährleisten Raumabschluss und Fluchtweg.

Material- und Konstruktionslogik

Mit dieser aufgelösten Deckenkonstruktion kann ein Betonäquivalent von knapp 18cm erreicht werden, während bei einer konventionellen Skelettkonstruktion mit vergleichbaren Spannweiten 28cm dicke Flachdecken erforderlich wären. Die Reduktion des Betonanteils reduziert die CO₂-Emissionen bei der Produktion entscheidend. Durch die strikte Systemtrennung gibt es keine Haustechnik-Einlagen in der Tragkonstruktion. Da der Körperschall nicht ausschliesslich mit der Masse der Betonkonstruktion gedämpft werden kann, ergänzt eine Splitt-Schüttung bis zur benötigten Masse und nimmt zugleich horizontal verlaufende Elektroleitungen auf. Durch die Verwendung von Recyclingbeton bei den Ortbetondecken sowie einer Trittschalldämmung aus Recyclingglas werden zudem primäre Materialressourcen geschont. Diese Materialentscheide verbessern die verursachten Treibhausgasemissionen jedoch nicht.

→ Projektspezifische Anhänge, wie Plan- und Bildmaterial, am Ende des Dokuments



Ökobilanz

	Nr.	Material	Gewicht (kg/m²)	TGE/a (kgCO ₂ -eq/m²)	TGE (kgCO ₂ -eq/m²)	Graue Energie (kWh oil-eq/m²)	Umweltbelastung (UBP 21/m²)
Bodenaufbau	1.	Parkett	6.1	0.26	7.8	42.3	16090
	2.	Unterlagsboden Anhydrit	140.0	0.43	12.8	60.0	30030
	3.	Polyethylenfolie (PE)	0.2	0.03	1.0	4.6	1275
	4.	Glaswolle	2.4	0.09	2.6	13.1	4718
	5.	Schüttung gebunden	87.5	0.10	3.0	10.8	7623
Tragkonstruktion	6.	Hochbaubeton	337.6	0.57	34.4	60.0	52250
	7.	Bewehrung	17.7	0.23	13.9	60.8	28098
	8.	Vorfabrizierter Beton*	95.8	0.44	26.4	66.8	42142
Bodenaufbau			236	0.91	27	131	59736
Tragkonstruktion			450	1.24	75	188	122490
Deckensystem TOTAL			687	2.15	102	318	182226

* inkl. Bewehrung

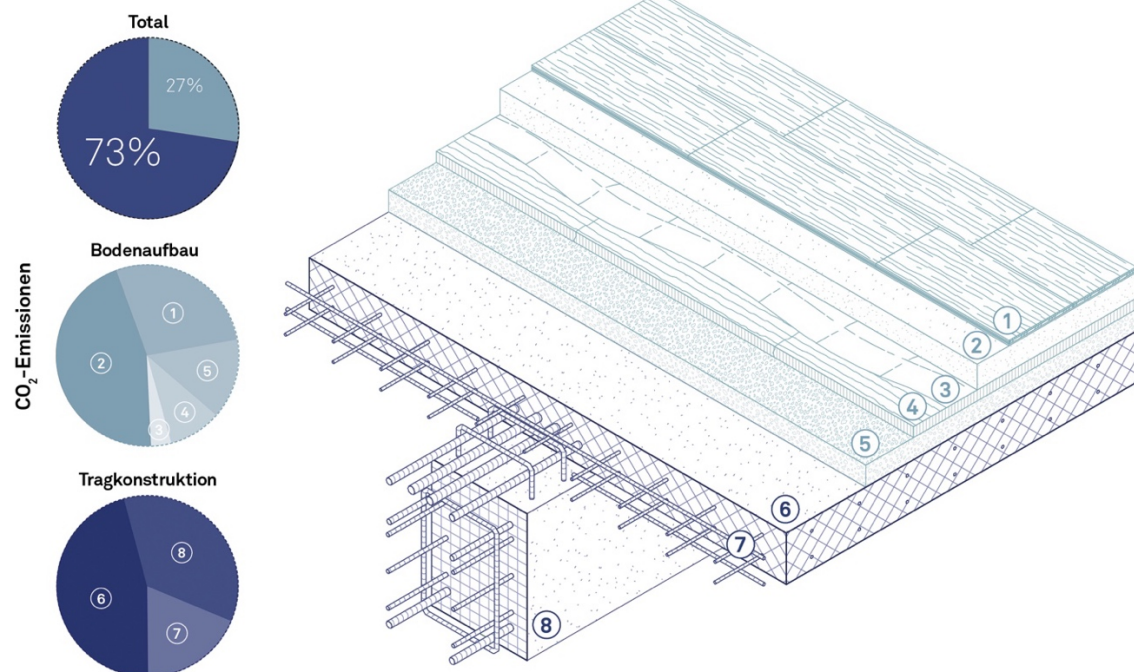


Abbildung 9: Ökobilanz, Wohnhochhaus Freihofstrasse Zürich



6 Optimierung Deckensystem

Die Tragstruktur eines Deckensystems muss einerseits die in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungen an Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit im Sinne der Statik erfüllen. Andererseits ist die Tragstruktur zusammen mit dem Bodenaufbau relevant für die Erfüllung der normativen Anforderungen von Schallschutz und Wärmespeicherung. Speziell beim Schallschutz muss das gesamte Deckensystem betrachtet werden. Die strengen Anforderungen bei Neubauten sind heute in der Praxis oftmals entscheidend für gewählte Bauteilstärken bei Tragwerk und Bodenaufbau. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die beiden Komponenten Tragwerk und Bodenaufbau hinsichtlich der Ökobilanz als gesamthafte Konstruktion zu optimieren. Im weiteren Verlauf der Forschung wird untersucht, welche Kombinationen von ökologisch optimierten Tragkonstruktionen und Bodenaufbauten die Anforderungen erfüllen. Dabei werden Ökobilanzen der gesamten Deckensysteme verglichen, um eine realistische Abbildung der Optimierungsmöglichkeiten für Geschossdecken aufzuzeigen, ohne eine der in Kapitel 2.4 beschriebenen Anforderungen an Decken zu vernachlässigen. Es ist zu erwarten, dass innerhalb eines Deckensystems die erforderlichen Bodenaufbauten variieren, da mit zunehmender Spannweite beispielsweise die Bauteilstärke der Tragstruktur statisch bedingt zunimmt und durch die grössere Aufbauhöhe weniger Schallschutzleistung durch den Bodenaufbau erforderlich wird.



7 Nachhaltige Konstruktionslogik entwickeln – systemische Betrachtung

Wie in der isolierten Betrachtung von Tragkonstruktion und Bodenaufbau aufgezeigt wurde, sind Deckensysteme Bauteile, die mit ihren Schichten eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Neben dieser reinen Betrachtung von Funktion und Leistungsfähigkeit betrifft die Wahl und der Aufbau des Deckensystems aber auch Faktoren, die für das ganze Bauprojekt relevant sind.

So sind Geschossdecken die Bauteile, die im Hochbau volumenmässig die grösste Masse ausmachen. Ihr Gewicht bestimmt die lastabtragenden vertikalen Bauteile sowie die Fundation des Gebäudes. Mit ihrer Aufbauhöhe beeinflussen Geschossdecken daneben die Geschoss- und Gebäudehöhe und damit die Abwicklung der Fassade. Boden- und Deckenflächen sind grosse raumumschliessende Flächen, deren Oberflächen über ihre Wärmespeicherfähigkeit und die oft integrierte Wärmeverteilung sich auf die Behaglichkeit der Räume massgeblich auswirkt. Im Bauprozess haben sich gewisse Systeme wie auch Abläufe etabliert, welche den Aufwand und auch die Kosten beeinflussen. Wenn wir die Dauerhaftigkeit von Gebäuden betrachten, sind Deckensysteme als Teil der Tragstruktur eine wichtige Komponente. Wie altern die verschiedenen Schichten, können einzelne Schichten erneuert werden und können diese gut ausgebaut, wiederverwendet oder das Material recycelt werden? Sind die verwendeten Materialien dauerhaft verfügbar? Was kosten sie und wie gut ist Ihre Ökobilanz?

In der Praxis wird projektabhängig beurteilt, welche Kriterien am stärksten gewichtet werden. Zusätzlich spielen lokale Gegebenheiten eine grosse Rolle. In diesem Kapitel werden Optimierungsmöglichkeiten sowie ihre Abhängigkeiten im Bauprojekt erörtert und hinsichtlich der Faktoren Gewicht, Aufbauhöhe, Haustechnik, Behaglichkeit, Bauprozess, Kosten, Material, Dauerhaftigkeit und einschränkende Normen beschrieben.

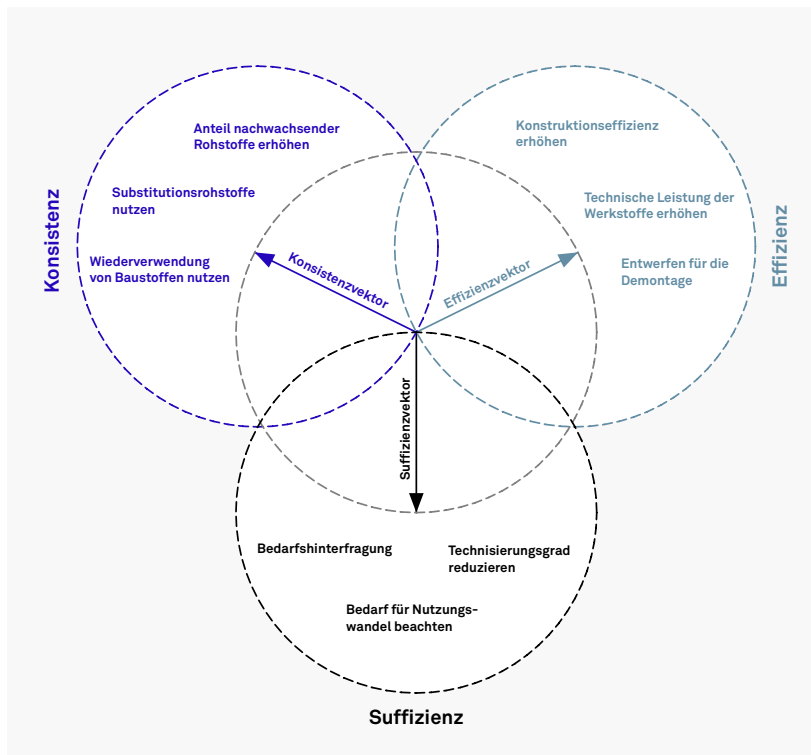


Abbildung 10: Dimensionen der Nachhaltigkeit



8 Ausblick und Erkenntnisse

Rein in Bezug auf das Tragwerk zeigt sich: Leichtere Decken führen generell zu weniger THG-Emissionen. Dies kann durch materialeffiziente Deckentragwerke erreicht und durch Verwendung von CO₂-armen Materialien verbessert werden. Rippendecken sind statisch effizienter als vollflächige Systeme, erfordern aber mehr verfügbare Raumhöhe. Bei sehr leichten Deckensystemen führt die Einhaltung der erlaubten Eigenschwingung bei grossen Spannweiten allerdings zu Tragwerkshöhen, die nicht mehr ökonomisch sind und in der Baupraxis so wohl nicht umgesetzt werden. Einen grossen Einfluss auf die Optimierung der Ökobilanz haben die Reduktion von Spannweite sowie Anforderungen an Nutzung und Gebrauchstauglichkeitskriterien. Die Optimierungspotentiale innerhalb von Deckensystemen durch Materialgütevariationen und Berücksichtigung von speziell ökologischen Materialtypen werden im laufenden Forschungsprojekt untersucht werden. Auch das Thema Schallschutz ist noch in Bearbeitung. Sobald Bodenaufbauten zu den einzelnen Tragkonstruktionen entwickelt sind, können Deckensysteme hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit sowie Ökobilanz verglichen werden.



9 Literaturverzeichnis

- [1] Der Bundesrat, „Langfristige Klimastrategie der Schweiz“. Schweizerische Eidgenossenschaft, 27. Januar 2021.
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Klima: Das Wichtigste in Kürze“. 15. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/inkuerze.html>
- [3] Bundesamt für Energie BFE, „Netto-Null-Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich“. 2024.
- [4] S. Weidner, A. Mrzigod, R. Bechmann, und W. Sobek, „Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien“. Juni 2021.
- [5] KBOB / ecobau / IPB, „Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022, Version 7.0“. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, 23. Juni 2025.
- [6] Hivoss Human induced Vibrations of Steel Structures, „Schwingungsbemessung von Decken - Leitfaden“. 9. Dezember 2008.
- [7] Lignum, „Holzbautabellen HBT 1 | – Handbuch für die Bemessung“. 2021.
- [8] H. Kreuzinger und B. Mohr, „Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz“. Forschungsbericht DGfH E-98/04; TU München, Januar 1999.
- [9] SIA 181, *Schallschutz im Hochbau*, SN 520181:2020 de, Zürich., 1. November 2020.
- [10] IPCC, „Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen“. 2021.
- [11] SIA 2032, *Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden*, SNR 592032:2020 de, 1. August 2020.
- [12] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Methode der ökologischen Knappheit (UBP-Methode)“. 1. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/oekobilanzen/methode-der-oekologischen-knappheit.html>
- [13] Prof. Dr. W. Kaufmann, „Ökologisch nachhaltige Geschossdecken“. White Paper Betonsuisse, November 2024.
- [14] SIA Dokumentation 4001, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden – Wegleitung zur Norm SIA 180:2014*, SNG 594001:2022 de, Zürich., 1. August 2022.



10 Plan- und Bildmaterial Praxisbeispiele

Wohn- und Gewerbebau KIM
Winterthur
2024



Abbildung 11: Wohn- und Gewerbebau KIM, Winterthur, BDE Architekten, Fotografie Jusuf Supuk

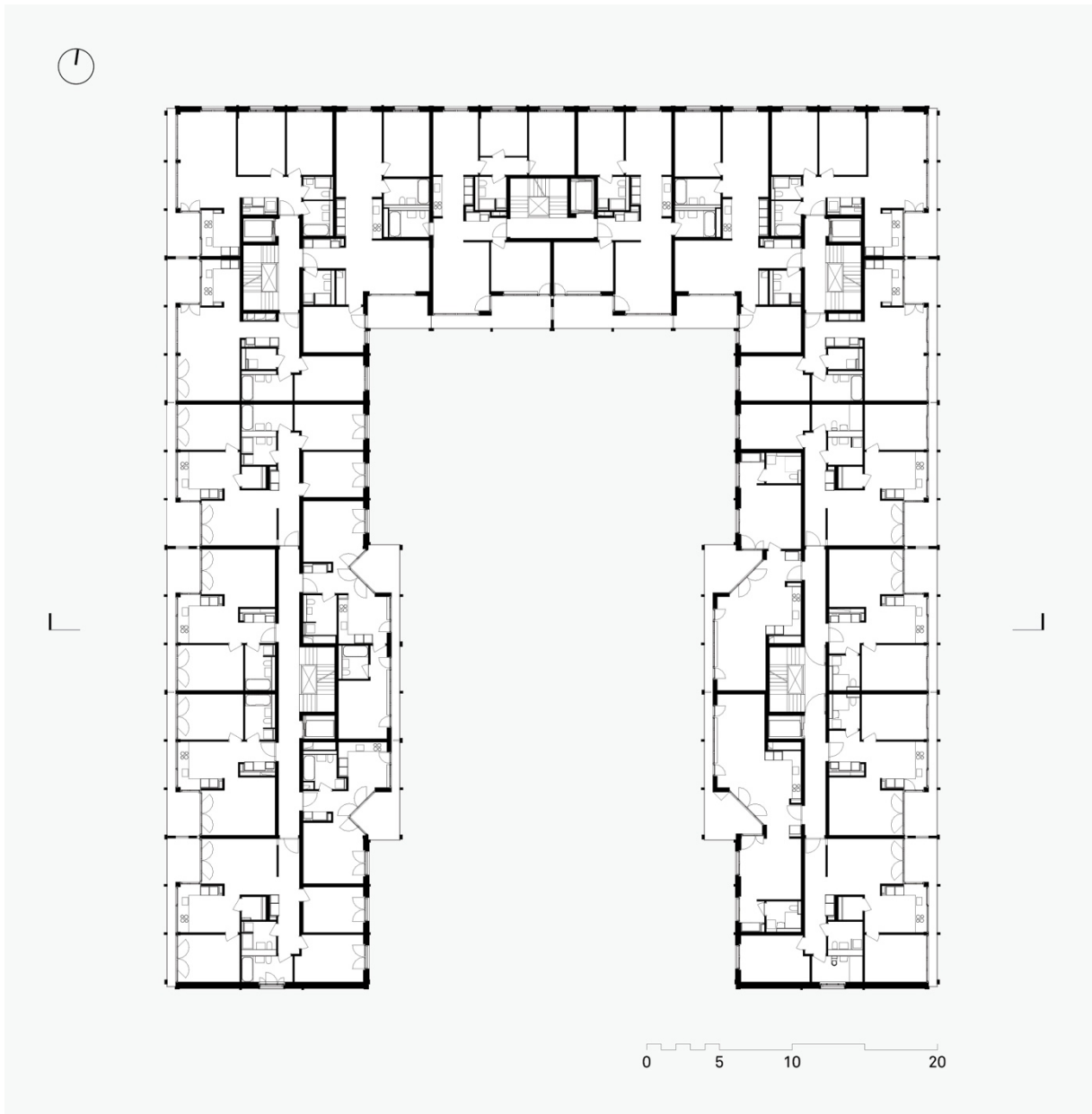


Abbildung 12: Grundriss Regelgeschoss 2. OG

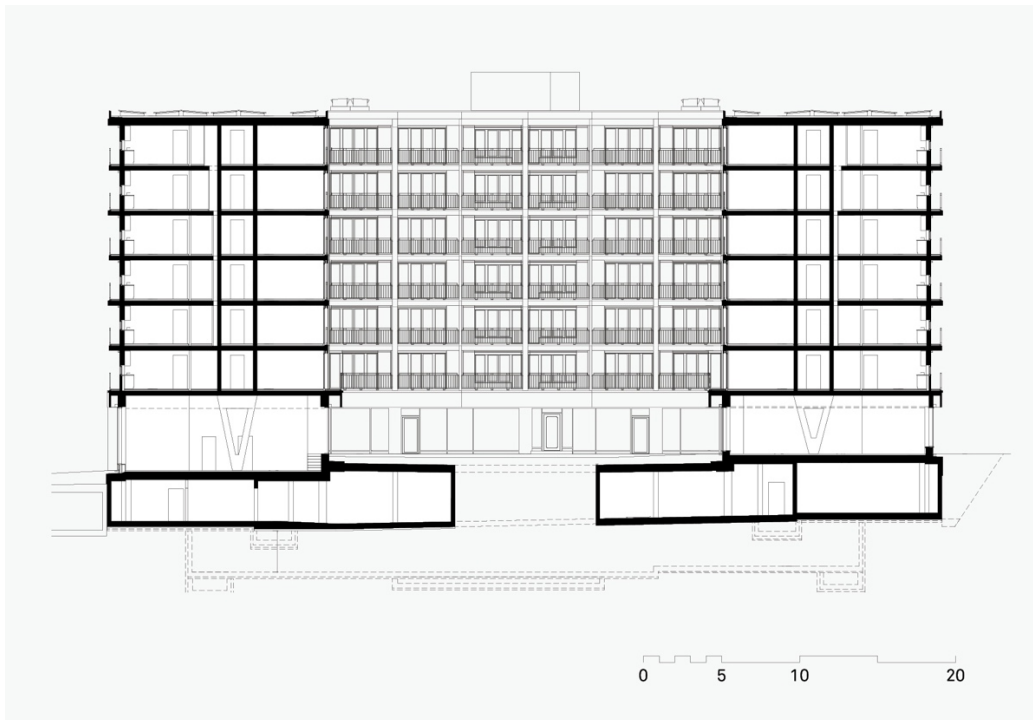


Abbildung 13: Querschnitt: A-A



Abbildung 14: Verlegung von Bewehrung und Haustechnikrohren, Fotografie BDE Architekten



**Wohnhochhaus Freihofstrasse
Zürich
2026**



Abbildung 15: Wohnhochhaus Freihofstrasse, Zürich, Pool Architekten, Fotografie Andrea Berger

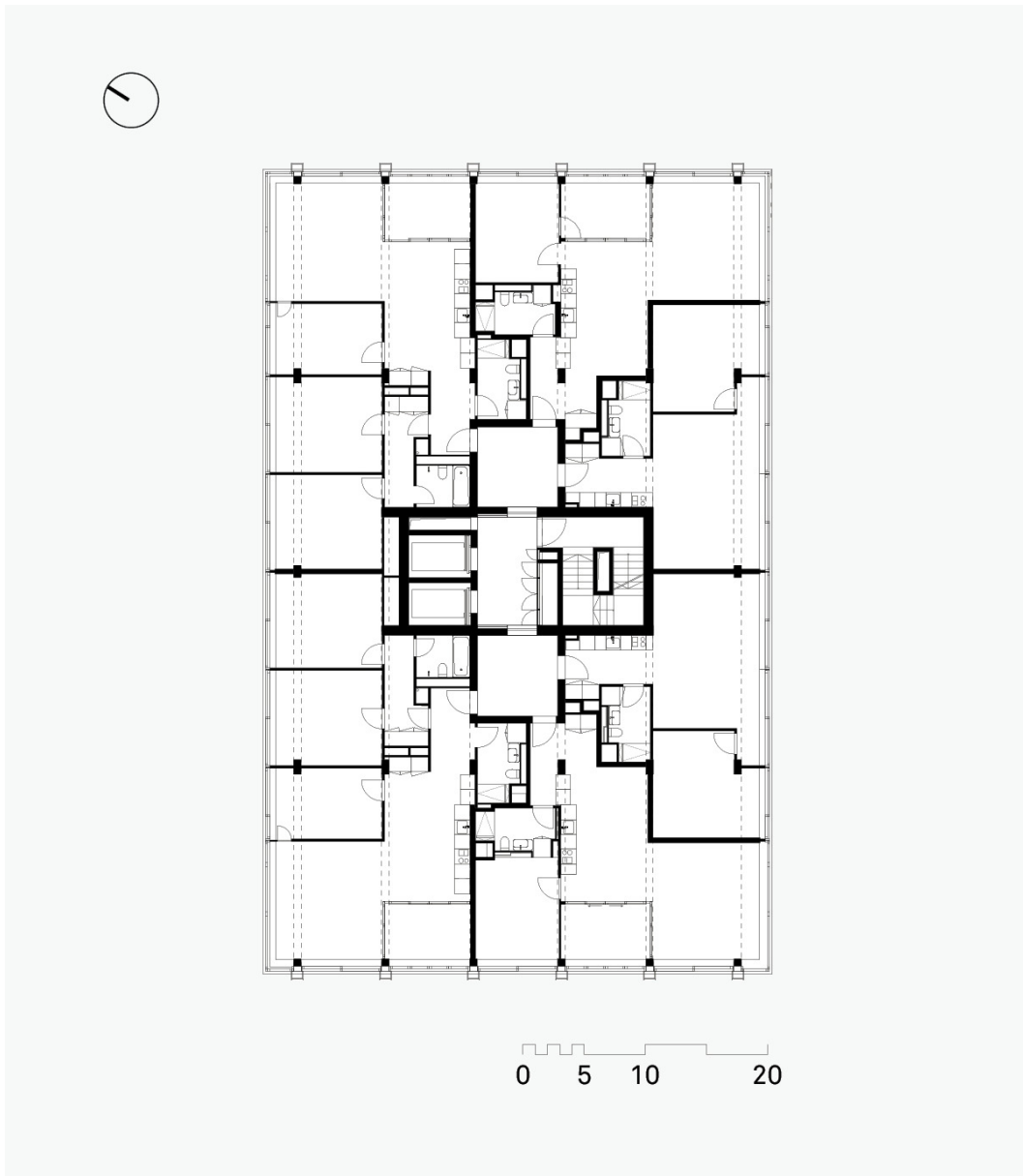


Abbildung 16: Grundriss Regelgeschoss 6. OG

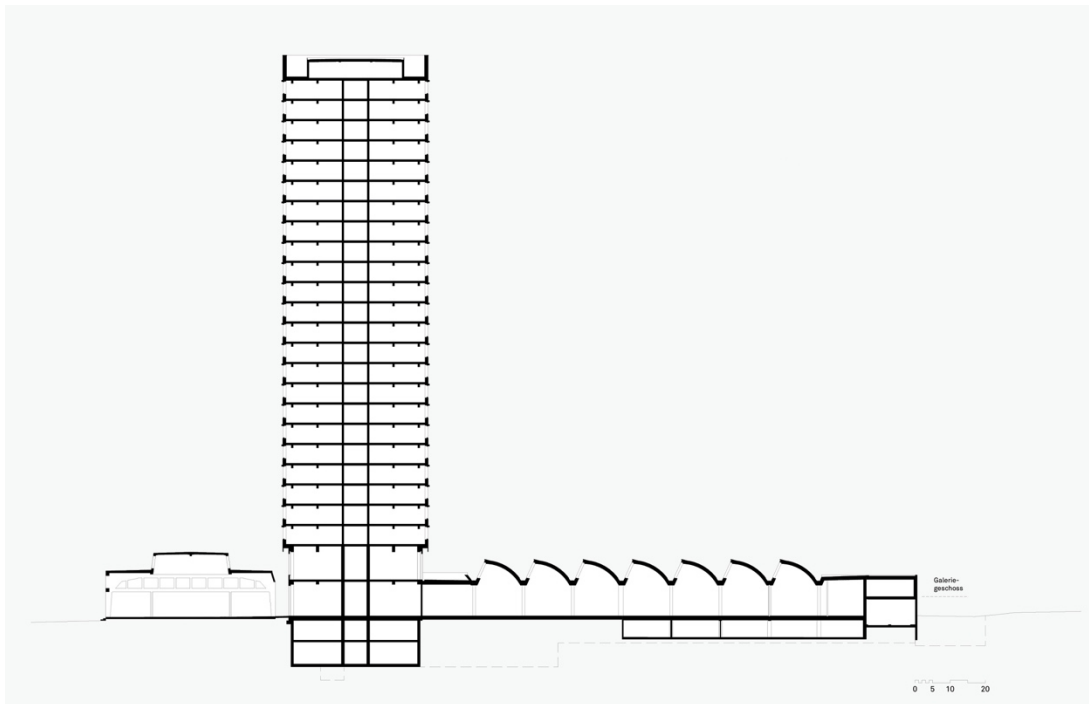


Abbildung 17: Querschnitt A-A



Abbildung 18: Schalung der Geschossdecke, Fotografie Andrea Berger



11 Berechnungen Grundkonstruktionen am Beispiel Holz-Beton-Verbunddecke

Holz-Beton-Verbunddecke (Brettstapel mit Kernen)									
Bemerkungen:		Verschiebungsmodul und Verbund über Mikrokerven wie bei Sidler Shark https://www.sidlerholz.ch/de/hbvgeschossdecken/sidler-shark-mikrokerven				Datum:		14.10.2025	
		Obschon dieses Dokument mit der grösstmöglichen Sorgfalt erstellt wurde, übernehmen die Autoren keine Haftung für allfällige Fehlinformationen oder fehlerhafte Interpretation des Inhaltes. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind ausgeschlossen. Änderungen der Grundlagenwerte der aktuell gültigen Normen bleiben vorbehalten. Die Anwendung entspricht einer Vordimensionierung und die notwendigen Nachweise der Statik für eine Ausführung sind sorgfältig nach den gültigen Normvorgaben zu führen.							
		Zellen sind mit Werten zu füllen Werte aus Drop-down-Menu auswählen							
Einschränkungen				Zusammenfassung Umweltauswirkungen (ganze Decke)					
Es wird auf die Breite des Sprungmasses gerechnet. Im Brandfall wird der Widerstand automatisch um Faktor 1.8 erhöht. Die Faktoren k_h und k_{sys} werden nicht eingerechnet. Es wird nur in Feuchtigkeitsklasse 1 gerechnet --> Kriechfaktor 0.6. einseitiger Abbrand der Brettstapelplatte				UBP		1'739'193.5	UBP		
				Graue Energie		2'637.9	kWh oil-eq.		
				CO ₂ -eq		860.1	kg CO ₂ -eq		
				Alle Nachweise erfüllt!					
Eingabe				Systemskizze					
System und Anforderungen									
Spannweite Primärträger		l_1	4.00	m					
Spannweite Brettstapel		l_2	6.00	m					
Nutzlast			Kat. A - Wohnfläche						
		$q_{NL,k}$	2.00	kN/m ²					
Auflast			Bodenaufbau mittelschwer						
		$q_{A,k}$	2.00	kN/m ²					
		$q_{A,k}$	Abhangdecke leicht						
		$q_{A,k}$	0.50	kN/m ²					
Feuerwiderstandsklasse			R30						
Gebrauchsanforderungen			Einbauten mit duktilem Verhalten						



				Bemessungslasten					
Materialangaben Holz - Primärträger				Charakteristische Lasten					
Festigkeitsklasse		GI24h		Brettstapel				Gewicht Tragwerk	
				EG Träger Beton&Holz Platten		g_k	2.65	kN/m	265 kg/m²
Trägerhöhe		h_1	360 mm	Auflast		$q_{A,k}$	2.50	kN/m	
(Mögl. Werte abh. von Holzwahl, bspw. GL24h, b = 200 mm --> h = 200...1000 mm)				Nutzlast		$q_{N,k}$	2.00	kN/m	
Trägerbreite		b_1	200 mm						
Rippen-Mindestbreite = 80 mm !				Primärträger					
Materialangaben Holz - Brettstapel				Eigengewicht Träger		g_k	0.36	kN/m	
Festigkeitsklasse		C24		Auflast aus Brettstapel		$q_{A,k}$	15.45	kN/m	
Trägerhöhe		h_2	130 mm	Nutzlast aus Brettstapel		$q_{N,k}$	6.00	kN/m	
(Mögl. Werte abh. von Holzwahl, bspw. C24, b = 200 mm --> h = 200...300 mm)				Lastbeiwerte Nutzlast:					
Trägerbreite		b_2	1000 mm	ψ_0	0.7	ψ_1	0.5	ψ_2	0.3
Rippen-Mindestbreite = 80 mm !				Designlasten					
				Brettstapel					
Materialangaben Beton				GZT		$q_{E,d}$	9.95	kN/m	
Betonstärke		h_3	80 mm	GZT aussergew. (Brand)		$q_{ausserg}$	5.75	kN/m	
Betonfestigkeitsklasse		C 25/30		GZG t = 0:					
Beiwert Grösstkorn		D_{max}	16 mm	Funktion Einbauten mit duktilen		$q_{ser,F,0}$	6.15	kN/m	
				Komfort		$q_{ser,K,0}$	1.00	kN/m	
Beiwert Gesteinskörnung			10'000	Aussehen		$q_{ser,A,0}$	5.75	kN/m	
				GZG t = fin: (Kriechwirksame Lasten)					
Materialangaben Betonstahl				Funktion Einbauten mit duktilen		$q_{ser,F,fin}$	5.75	kN/m	
Stahlgüte		B500B		Aussehen		$q_{ser,A,fin}$	5.75	kN/m	
Bewehrung oben (Matte)		Φ	8 mm						
		s_o	150 mm	Primärträger					
				GZT		$q_{E,d}$	30.34	kN/m	
Materialangaben Holz - Beplankung				GZT aussergew. (Brand)		$q_{ausserg}$	17.61	kN/m	
Dicke der Beplankung		h_{Bepl}	0 mm	GZG t = 0:					
Beplankung ist nicht tragend!				Funktion Einbauten mit duktilen		$q_{ser,F,0}$	18.81	kN/m	
Verbindung Mikrokerven				Komfort		$q_{ser,K,0}$	3.00	kN/m	
Verschiebungsmodul / Kerfe		K	110.0 kN/mm/m	Aussehen		$q_{ser,A,0}$	17.61	kN/m	
Kerfenzahl pro Steifen		#	8 Stk.						
Steifenlänge		l	240.0 mm	GZG t = fin: (Kriechwirksame Lasten)					
(Länge je Kerfe 30 mm)				Funktion Einbauten mit duktilen		$q_{ser,F,fin}$	17.61	kN/m	
		s_{min}	515 mm	Aussehen		$q_{ser,A,fin}$	17.61	kN/m	
		s_{max}	1375 mm						
Abstand Verbindungsmittel		s_{eff}	730 mm						
Kriechfaktor Holz		φ	0.6						
Dämpfungsmass		ξ	0.03						
Höhe Unterlagsboden		h_{UB}	0 mm						
E-Modul Unterlagsboden		E_{UB}	25'000 N/mm²						



Rechenwerte																								
Kaltbemessung										Brandbemessung					(Erhöhung der Holzbau Tragwiderstände um Faktor 1.8)									
<u>Materialkennwerte Holz - Primärträger:</u>										<u>Materialkennwerte Holz - Primärträger:</u>														
$f_{m,d,1}$	16.0	$f_{v,d,1}$	1.8	$E_{m,mean,fin,1}$	7187.5	$f_{m,d,1}$	28.8	$f_{v,d,1}$	3.2	$E_{m,mean,fin,1}$	7187.5	$f_{c,d,1}$	16.0	$f_{t,d,1}$	12.8	$E_{m,mean,1}$	11500.0	$f_{c,d,1}$	28.8	$f_{t,d,1}$	23.0	$E_{m,mean,1}$	11500.0	
<u>Materialkennwerte Holz - Brettstapel:</u>										<u>Materialkennwerte Holz - Brettstapel:</u>														
$f_{m,d,2}$	14.1	$f_{v,d,2}$	1.5	$E_{m,mean,fin,2}$	6875.0	$f_{m,d,2}$	25.4	$f_{v,d,2}$	2.7	$E_{m,mean,fin,2}$	6875.0	$f_{c,d,2}$	12.4	$f_{t,d,2}$	8.5	$E_{m,mean,2}$	11000.0	$f_{c,d,2}$	22.3	$f_{t,d,2}$	15.3	$E_{m,mean,2}$	11000.0	
<u>Materialkennwerte Beton:</u>										<u>Materialkennwerte Holz - Beton:</u>														
$f_{c,d}$	16.5	τ_{cd}	1.0	E_{lang}	10691.8	$f_{c,d}$	16.5	τ_{cd}	1.0	E_{kurz}	10691.8	f_{ctm}	2.6	f_{cm}	33.00	E_{kurz}	32075.3	f_{ctm}	2.6	f_{cm}	33.0	E_{lang}	32075.3	
<u>Querschnittswerte Primärträger:</u>										<u>Querschnittswerte Primärträger:</u>														
		h_1	360	mm																				
		b_1	200	mm																				
		$A_{eff,1}$	72000.00	mm ²																				
		$I_{y,1}$	7.78E+08	mm ⁴																				
<u>Querschnittswerte Brettstapel:</u>										<u>Querschnittswerte Brettstapel:</u>														
		h_2	130	mm																				
		b_2	1000	mm																				
		$A_{eff,2}$	130000.00	mm ²																				
		$I_{y,2}$	1.83E+08	mm ⁴																				
<u>Querschnittswerte Beton:</u>										<u>Querschnittswerte Beton:</u>														
		h_3	80	mm																				
		b_{eff}	1000	mm																				
		$A_{eff,3}$	80000.00	mm ²																				
		$I_{y,3}$	4.27E+07	mm ⁴																				
<u>Gamma-Verfahren t = fin:</u>										<u>Gamma-Verfahren t = fin:</u>														
GZG Endzustand:		γ_{ser}	0.8372			GZG Endzustand:		γ_{ser}	0.8372			GZT Endzustand:		γ_u	0.7741			GZT Endzustand:		γ_u	0.7741			
GZT Endzustand:		γ_u	0.7741																					
<u>Geometrische Werte:</u> (nach HBT zsm.gesetzte QS)										<u>Geometrische Werte:</u>														
Schwerpunktsabstand:	$h_3 + h_2 + h_{Bapl}$		105.0	mm		Schwerpunktsabstand:	$a_3 + a_2 + h_{Bapl}$		89.5	mm														
(zw. Beplankung und Holz)										(zw. Beplankung und Holz)														
Abstand Schwereachse Holz, GZT		$a_{2,GZT}$	44.68	mm		Abstand Schwereachse Holzträger, GZT		$a_{2,GZT}$	44.13	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZT		$a_{3,GZT}$	45.37	mm		Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	45.89	mm		
Abstand Schwereachse Beton, GZT		$a_{3,GZT}$	60.32	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZT		$a_{3,GZT}$	45.37	mm		Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	45.89	mm		Abstand Schwereachse Beton, GZG		$a_{3,GZG}$	58.30	mm		
Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	46.70	mm		Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	45.89	mm		Abstand Schwereachse Beton, GZG		$a_{3,GZG}$	58.30	mm								
Abstand Schwereachse Beton, GZG		$a_{3,GZG}$	58.30	mm		Abstand Schwereachse Beton, GZG		$a_{3,GZG}$	43.61	mm														
<u>Wirksame Biegesteifigkeit:</u>										<u>Wirksame Biegesteifigkeit:</u>														
GZT:		$EI_{y,eff,GZT,fin}$	5.91E+12	Nmm ²		GZT:		$EI_{y,eff,GZT,fin}$	3.70E+12	mm ⁴		GZG:		$EI_{y,eff,GZG,fin}$	6.10E+12	Nmm ²		GZG:		$EI_{y,eff,GZG,fin}$	3.81E+12	mm ⁴		
GZG:		$EI_{y,eff,GZG,fin}$	6.10E+12	Nmm ²		GZG:		$EI_{y,eff,GZG,fin}$	3.81E+12	mm ⁴														
<u>Gamma-Verfahren t = 0:</u>										<u>Gamma-Verfahren t = 0:</u>														
GZG Endzustand:		γ_{ser}	0.6315			GZG Endzustand:		γ_{ser}	0.63			GZT Endzustand:		γ_u	0.5332			GZT Endzustand:		γ_u	0.5332			
GZT Endzustand:		γ_u	0.5332																					
<u>Geometrische Werte:</u> (nach HBT zsm.gesetzte QS)										<u>Geometrische Werte:</u>														
Schwerpunktsabstand:	$a_3 + a_2$		105.0	mm		Schwerpunktsabstand:	$a_3 + a_2$		89.5	mm														
(zw. Beplankung und Holz)										(zw. Beplankung und Holz)														
Abstand Schwereachse Holzträger, GZT		$a_{2,GZT}$	42.05	mm		Abstand Schwereachse Holzträger, GZT		$a_{2,GZT}$	49.84	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZT		$a_{3,GZT}$	39.66	mm		Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	53.53	mm		
Abstand Schwereachse Beplankung, GZT		$a_{3,GZT}$	62.95	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZT		$a_{3,GZT}$	39.66	mm		Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	53.53	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZG		$a_{3,GZG}$	49.22	mm		
Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	55.78	mm		Abstand Schwereachse Holz, GZG		$a_{2,GZG}$	53.53	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZG		$a_{3,GZG}$	35.97	mm								
Abstand Schwereachse Beplankung, GZG		$a_{3,GZG}$	49.22	mm		Abstand Schwereachse Beplankung, GZG		$a_{3,GZG}$	35.97	mm														
<u>Wirksame Biegesteifigkeit:</u>										<u>Wirksame Biegesteifigkeit:</u>														
GZT:		$EI_{y,eff,GZT,0}$	1.13E+13	Nmm ²		GZT:		$EI_{y,eff,GZT,0}$	7.12E+12	mm ⁴		GZG:		$EI_{y,eff,GZG,0}$	1.18E+13	Nmm ²		GZG:		$EI_{y,eff,GZG,0}$	7.48E+12	mm ⁴		
GZG:		$EI_{y,eff,GZG,0}$	1.18E+13	Nmm ²		GZG:		$EI_{y,eff,GZG,0}$	7.48E+12	mm ⁴														
<u>Widerstand Verbindungsmittel (Mikrokerven:</u>										<u>Widerstand Verbindungsmittel (Mikrokerven:</u>														
Verschiebungsmodul je Kervensteifen	$K_{ser,0}$	880000	N/mm	gem. Sidler Holz																				
Scherfestigkeit Mikrokerven	$f_{MN,v,d}$	0.5	N/mm ²																					

Nachweise											
Tragsicherheit											
Kaltbemessung						Brandbemessung					
Biegemoment Brettstapel		M _{E,d}	44.79	kNm		Biegemoment Brettstapel		M _{E,d,Brand}	25.88	kNm	
Querkraft Brettstapel		V _{E,d}	29.86	kN		Querkraft Brettstapel		V _{E,d,Brand}	17.25	kN	
Primärträger											
Biegerandspannung im Holz						Biegerandspannung im Holz					
σ _{m,d,1}	14.05	N/mm²	f _{m,d,1}	16.0	N/mm²	σ _{m,d,1}	13.31	N/mm²	f _{m,d,1}	28.8	N/mm²
Nachweis erfüllt!					88%	Nachweis erfüllt!					46%
Schubspannung in Primärträger						Schubspannung in Primärträger					
τ _{max,1,d}	1.26	N/mm²	f _{v,d,1}	1.8	N/mm²	τ _{max,1,d}	1.11	N/mm²	f _{v,d,1}	3.2	N/mm²
Nachweis erfüllt!					70%	Nachweis erfüllt!					34%
Beton											
Biegerandspannung in Beton						Biegerandspannung in Beton					
σ _{m,3,d}	7.03	N/mm²	f _{m,3,d}	16.5	N/mm²	σ _{m,3,d}	5.62	N/mm²	f _{m,3,d}	16.5	N/mm²
Nachweis erfüllt!					43%	Nachweis erfüllt!					34%
Druckspannung im Schwerpunkt des Betons						Druckspannung im Schwerpunkt des Betons					
σ _{f,c,3,d}	3.78	N/mm²	f _{c,0,3,d}	16.5	N/mm²	σ _{f,c,3,d}	2.63	N/mm²	f _{c,0,3,d}	16.5	N/mm²
Nachweis erfüllt!					23%	Nachweis erfüllt!					16%
Brettstapel											
Biegerandspannung in Brettstapel						Biegerandspannung in Brettstapel					
σ _{m,2,d}	5.72	N/mm²	kombinierter Nachweis			σ _{m,2,d}	4.50	N/mm²	kombinierter Nachweis		
Schwerpunktspannung in Brettstapel			0.51	<=	1.0	Schwerpunktspannung in Brettstapel			0.23	<=	1.0
σ _{f,t,d}	2.33	N/mm²				σ _{f,t,d}	2.12	N/mm²			
Nachweis erfüllt!					51%	Nachweis erfüllt!					23%
Schubspannung in Brettstapel						Schubspannung in der y Achse					
τ _{max,2,d}	0.21	N/mm²	f _{v,d,2}	1.5	N/mm²	τ _{max,2,d}	0.14	N/mm²	f _{v,d,2}	2.7	N/mm²
Nachweis erfüllt!					14%	Nachweis erfüllt!					5%
Verbindungsmittel											
Einwirkende Kraft auf Verbindungsmittel						Einwirkende Kraft auf Verbindungsmittel					
τ _{Fuge}	0.20	N/mm²	f _{MN,v,d}	0.5	N/mm²	τ _{Fuge}	0.14	N/mm²	f _{MN,v,d}	0.9	N/mm²
Nachweis erfüllt!					40%	Nachweis erfüllt!					16%
Gebrauchstauglichkeit (nur bei Kaltbemessung erforderlich)											
Verformungen											
Primärträger						Brettstapel					
t = 0						t = 0					
W _{Funktion,0}	7.0	mm	w _{Zul}	11.4	mm	W _{Funktion,0}	8.8	mm	w _{Zul}	17.1	mm
W _{Komfort,0}	1.1	mm	w _{Zul}	11.4	mm	W _{Komfort,0}	1.4	mm	w _{Zul}	17.1	mm
W _{Ausssehen,0}	6.6	mm	w _{Zul}	13.3	mm	W _{Ausssehen,0}	8.3	mm	w _{Zul}	20.0	mm
t = fin						t = fin					
W _{Funktion,fin}	11.0	mm	w _{Zul}	11.4	mm	W _{Funktion,fin}	16.5	mm	w _{Zul}	17.1	mm
W _{Ausssehen,fin}	10.5	mm	w _{Zul}	13.3	mm	W _{Ausssehen,fin}	15.9	mm	w _{Zul}	20.0	mm
Alle Nachweise erfüllt!					96%	Alle Nachweise erfüllt!					96%
Schwingungen											
1. Eigenfrequenz											
mitwirkende Breite		b _{m,rechn}	2.398	m	mit	El _{b,Unterlagsboden}	0.00E+00	Nmm²			
Ständige Auflast		q _{d,quasiständig}	5.750	kN/m²		El _{b,Betonplatte}	4.56E+11	Nmm²			
Masse		m	575.0	kg/m²							
Erste Eigenfrequenz		f ₁	6.359	Hz		f _{min}	8.00	Hz	126%	Nachweis nicht erfüllt!	
					mit El t = 0 gerechnet	Nachweis der Schwingbeschleunigung erforderlich!					
Schwingungsbeschleunigung											
Fourier Koeffizient		α _f	0.06								
Anregungsfrequenz		f _f	6.36	Hz							
generalisierte Masse		M _{gen}	4136.4	kg							
Schwingbeschleunigung		a _{Ed}	0.068	m/s²		a _{Cd}	0.1	m/s²	68%	Nachweis erfüllt!	
Steifigkeitsanforderung											
Durchbiegung		W _{F,Ed}	0.154	mm		W _{F,Cd}	1.25	mm	12%	Nachweis erfüllt!	
Masseanforderung											
Schwinggeschw.		V _{E,Ed}	0.692	mm/s/Ns		V _{E,Cd}	8.025	mm/s/Ns	9%	Nachweis erfüllt!	



Zusammenfassung Material					Umweltauswirkungen				
Fläche ganze Decke		A_{tot}	24.00	m ²	Rohdichte Beton nach Ökobilanz-Liste		2300	kg/m ³	
					Rohdichte Betonstahl nach Ökobilanz-Liste		7850	kg/m ³	
					Rohdichte Holz Primärträger nach Ökobilanz-Liste		439	kg/m ³	
					Rohdichte Holz Brettstapel nach Ökobilanz-Liste		465	kg/m ³	
					Rohdichte Holzplatte nach Ökobilanz-Liste		453	kg/m ³	
					Rohdichte Stahl nach Ökobilanz-Liste		7'850	kg/m ³	
Beton									
Plattenstärke		h_3	80	mm	Masse pro m ²		184.00	kg/m ²	
Volumen pro m ²		V_3	0.080	m ³ /m ²	UBP pro m ²		28'152.0	UBP/m ²	
Volumen Total (ganze Decke)		$V_{3,\text{tot}}$	1.920	m ³	Graue Energie pro m ²		32.20	kWh oil-eq./m ²	
					CO ₂ -eq pro m ²		18.58	kg CO ₂ -eq/m ²	
Betonstahl									
Bewehrung in beide Richtungen		$a_{s,\text{eff}}$	670	mm ² /m	Masse pro m ²		5.26	kg/m ²	
Volumen pro m ²		V_s	0.00067	m ³ /m ²	UBP pro m ²		8'365.2	UBP/m ²	
Volumen Total (ganze Decke)		$V_{s,\text{tot}}$	0.016	m ³	Graue Energie pro m ²		18.10	kWh oil-eq./m ²	
					CO ₂ -eq pro m ²		4.13	kg CO ₂ -eq/m ²	
Holz-Primärträger									
Festigkeitsklasse			GI24h		Masse pro m ²		10.54	kg/m ²	
Trägerhöhe		h_1	360	mm	UBP pro m ²		7'175.0	UBP/m ²	
Trägerbreite		b_1	200	mm	Graue Energie pro m ²		12.64	kWh oil-eq./m ²	
Volumen pro m ²		V_1	0.024	m ³ /m ²	CO ₂ -eq pro m ²		2.67	kg CO ₂ -eq/m ²	
Volumen Träger (ganze Decke)		$V_{1,\text{tot}}$	0.576	m ³					
Holz-Brettstapel									
Festigkeitsklasse			C24		Masse pro m ²		60.45	kg/m ²	
Höhe		h_2	130	mm	UBP pro m ²		28'774.2	UBP/m ²	
Streifenbreite		b_2	1000	mm	Graue Energie pro m ²		46.97	kWh oil-eq./m ²	
Volumen pro m ²		V_2	0.130	m ³ /m ²	CO ₂ -eq pro m ²		10.46	kg CO ₂ -eq/m ²	
Volumen Träger (ganze Decke)		$V_{2,\text{tot}}$	3.120	m ³					
Holz-Massivholzplatte 3S									
Plattenstärke		h_{bapl}	0	mm	Masse pro m ²		0.00	kg/m ²	
		V_{bapl}	0	m ³ /m ²	UBP pro m ²		-	UBP/m ²	
		$V_{\text{bapl,tot}}$	0.000	m ³	Graue Energie pro m ²		-	kWh oil-eq./m ²	
					CO ₂ -eq pro m ²		-	kg CO ₂ -eq/m ²	
Verbindungsmittel									
Kerven					Masse pro m ²		0.00	kg/m ²	
		$V_{\text{VM/m}^2}$		m ³ /m ²	UBP pro m ²		-	UBP/m ²	
		$V_{\text{Zugstangen,tot}}$	0.000000	m ³	Graue Energie pro m ²		-	kWh oil-eq./m ²	
		$m_{\text{Zugstangen,tot}}$	0.000	kg	CO ₂ -eq pro m ²		-	kg CO ₂ -eq/m ²	
					Masse TOTAL pro m ²		260.25	kg/m ²	
					UBP TOTAL pro m ²		72'466.4	UBP/m ²	
					Graue Energie TOTAL pro m ²		109.91	kWh oil-eq./m ²	
					CO ₂ -eq TOTAL pro m ²		35.84	kg CO ₂ -eq/m ²	
					Masse ganze Decke		6245.93	kg	
					UBP ganze Decke		1'739'194	UBP	
					Graue Energie ganze Decke		2'637.87	kWh oil-eq.	
					CO ₂ -eq ganze Decke		860.10	kg CO ₂ -eq	
					Bemerkung: Ökobilanzdaten beziehen sich nur auf das Tragwerk!				

100.00

kg CO₂-eq/m²

■ Beton
■ Holz-Primärträger
■ Holz-Brettstapel
■ Holz-Massivholzplatte 3S
■ CO₂-eq TOTAL pro m²

■ Verbindungsmittel