Natürliche Baustoffe und ihre Relevanz auf dem Weg zu Netto-Null in der Schweiz

Masterarbeit in Nachhaltigem Bauen (EN Bau)

Frühlingssemester 2025

Esther Rusnak

Natürliche Baustoffe und ihre Relevanz auf dem Weg zu Netto-Null in der Schweiz

Autorin

Esther Rusnak

Delsbergerallee 38

4053 Basel

+41 76 406 81 38

e.rusnak@posteo.ch

Dozierende

Barbara Sintzel

INEB Fachhochschule Nordwestschweiz

barbara.sintzel@fhnw.ch

Experte

Daniel Kellenberger

INEB Fachhochschule Nordwestschweiz

daniel.kellenberger@fhnw.ch

Basel, Mai 2025

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit,

- dass ich sämtliche nicht von mir selbst stammenden Textstellen gemäss gängigen wissenschaftlichen Zitierregeln korrekt zitiert und die verwendeten Quellen gut sichtbar erwähnt habe;
- dass ich in einem Verzeichnis alle verwendeten Hilfsmittel (z.B. KI-Assistenzsysteme wie Chatbots [z.B. ChatGPT], Übersetzungs-, Paraphrasier-Tools) oder Programmierapplikationen [z.B. Github Copilot] deklariert und ihre Verwendung bei den entsprechenden Textstellen angegeben habe;
- dass ich sämtliche immateriellen Rechte an von mir allfällig verwendeten Materialien wie Bildern oder Grafiken erworben habe oder dass diese Materialien von mir selbst erstellt wurden;
- dass das Thema, die Arbeit oder Teile davon nicht bei einem Leistungsnachweis eines anderen Moduls verwendet wurden, sofern dies nicht ausdrücklich mit der Dozentin oder dem Dozenten im Voraus vereinbart wurde und in der Arbeit ausgewiesen wird;
- dass ich mir bewusst bin, dass meine Arbeit auf Plagiate und auf Drittautorschaft menschlichen oder technischen Ursprungs (künstliche Intelligenz) überprüft werden kann;
- dass ich mir bewusst bin, dass die Hochschule für Wirtschaft FHNW einen Verstoss gegen diese Eigenständigkeitserklärung bzw. die ihr zugrundeliegenden Pflichten der Studien- und Prüfungsordnung der Hochschule für Wirtschaft FHNW verfolgt. Zu den Pflichten gehört insbesondere die Wahrung von Urheberrechten und das Unterlassen von Plagiaten (§ 29 Abs. 1 lit. d StuPO). Ein diesbezüglicher Verstoss wird mit der Note 1 bewertet und es können zusätzlich disziplinarische Folgen (Verweis/Ausschluss aus dem Studiengang) resultieren.

Basel, 02. Mai 2025

Kurzzusammenfassung

Fragestellung

Die Ausgangslage der Arbeit ist das Netto-Null-Ziel der Schweiz. Durch die Unterzeichnung des Übereinkommens von Paris hat sich die Schweiz verpflichtet ihre Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) entsprechend zu reduzieren. Konkret wurden folgende Ziele festgelegt:

- Reduktionsziel bis 2030: 50% weniger THG-Emissionen gegenüber 1990 und 35% weniger THG-Emissionen im Durchschnitt über die Jahre 2021-2030 inkl. Massnahmen diesbezüglich im Ausland
- Reduktionsziel bis 2050: Netto-Null, d.h. die Quellen und Senken von THG-Emissionen sind im Gleichgewicht

Die „SIA 390/1 Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden“ schlägt auf dieser Grundlage konkrete Anforderungen für den Gebäudebereich vor, die es umzusetzen gilt, um im Jahr 2050 in diesem Sektor Netto-Null zu erreichen.

Die vorliegende Arbeit nimmt an, dass diese Anforderungen durch den Einsatz natürlicher Baustoffe in grösserem Umfang eingehalten werden können, als wenn weiterhin primär konventionelle Materialien verwendet werden.

Forschungshintergrund

Die wesentlichen Bestandteile der Thematik sind das Netto-Null-Ziel der Schweiz, die THG-Emissionen, die deutlich zurückgehen müssen, um das gestellte Ziel zu erreichen, und die Verwendung natürlicher Baustoffe, die im Rahmen dieser Arbeit als mögliche Massnahme gesehen werden, um die notwendige Reduktion der Emissionen zu bewirken. Auf dieser Grundlage werden vier Studien vorgestellt und erläutert, wie sich die vorliegende Arbeit darauf bezieht. Gleichzeitig wird anhand der Studien aufgezeigt, dass die Wahl der Materialien eine Rolle spielt, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen.

Lösungsansatz

Es wird ein Lösungsansatz definiert, mit dem belastbare Ergebnisse für einen Vergleich zwischen natürlichen und konventionellen Baustoffen ermittelt werden können. Dafür wird zunächst die gewählte Strategie genauer erläutert und neben anderen möglichen Strategien eingeordnet. Anschliessend werden die Eigenschaften der natürlichen Baustoffe, aufgrund derer bei ihnen die Möglichkeit zur THG-Reduktion gesehen wird, erläutert. Es wird eine Auswahl von biobasierten

Materialien getroffen, die genauer betrachtet werden sollen. Zudem wird festgelegt, dass sich die Methode auf die Untersuchung von Bauteilen beschränkt, da die so gewonnenen Ergebnisse stellvertretend für ein gesamtes Gebäude gelesen werden können. Eine Ökobilanzierung soll diese Resultate liefern. Anhand der DIN EN IS 14040 und 14044 wird festgelegt, wie die Ökobilanzierung aufgebaut ist. Die Rahmenbedingungen folgen dabei dem Merkblatt „SIA 2032 Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden“. Datengrundlage bilden die „Ökobilanzdaten im Baubereich“ von der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB), dem Verein ecobau und der Interessensgemeinschaft privater professioneller Bauherren (IPB). Die so gewonnenen Ergebnisse werden hinsichtlich der Anforderungen der SIA 390/1 eingeordnet. Gleichzeitig gibt es für alle Bauteile ein Referenzbauteil aus konventionellen Baustoffen, das ebenfalls bilanziert wird. So können die Ergebnisse der Konstruktionen mit natürlichen Materialien mit jenen der Referenzbauteile verglichen und abgeschätzt werden, wie hoch das Sparpotenzial an THG-Emissionen aufgrund von einer biobasierten Materialwahl ist.

Massnahmen

Dier Lösungsansatz wird stellvertretend an den Bauteilen Aussenwand und Geschossdecke durchgeführt. Dafür werden zunächst die zu bilanzierenden Aufbauten mit den ausgewählten natürlichen Baustoffen definiert. Die jeweiligen Referenzbauteile werden mit konventionellen Produkten konstruiert. Anschliessend wird für alle festgelegten Varianten eine Ökobilanzierung durchgeführt.

Resultate

Die gewonnenen Resultate zeigen, dass die Anforderungen der SIA 390/1 durch den Einsatz biobasierter Baustoffe deutlich besser eingehalten werden können, als wenn konventionelle Materialien verwendet werden. Gleichzeitig wird anhand des Vergleichs der Aussenwände und Geschossdecken mit ihrem jeweiligen Referenzbauteil deutlich, wie hoch das Sparpotenzial der gewählten Strategie ist. Die grösste Menge THG-Emissionen kann vermieden werden, wenn die Konstruktion mit natürlichen Baustoffen ausgeführt wird. Aber auch durch die Wahl natürlicher Dämmmaterialien und Varianten im Innenausbau können Sparpotenziale erzielt werden.

Fazit

Die Verwendung natürlicher Baustoffe ist eine relevante Methode, um das Netto-Null-Ziel erreichen zu können. Allerdings darf sie nicht alleinstehend verfolgt werden, sondern muss immer im

Zusammenhang mit weiteren Strategien umgesetzt werden. Daneben zeigt sich, dass natürliche Baustoffe nicht gleichzeitig emissionsarme Baustoffe sind. Daher ist auch bei biobasierten Materialien immer darauf zu achten, wie hoch die THG-Emissionen in ihrer Herstellung ausfallen.

Neben der Reduktion der THG-Emissionen zeigen sich weitere Vorteile bei der Verwendung biobasierter Produkte. Dazu gehört, dass durch ihren Einsatz ein temporärer biogener Kohlenstoffspeicher entsteht, welcher der Forschung Zeit verschafft, um Technologien zu entwickeln, mit denen die CO_2-Belastung in der Atmosphäre weiter reduziert werden kann.

Trotz diverser Vorteile ist der Anteil der Bauprojekte, die mit biogenen Baustoffen umgesetzt werden, weiterhin gering. Abschliessend werden daher Lösungsansätze vorgeschlagen, mit denen die Verwendung natürlicher Materialien gefördert werden kann. Dazu zählen die Förderung der verstärkten Produktion und Nutzung der natürlichen Produkte sowie verbindliche gesetzliche Grenzwerte für die verursachten THG-Emissionen eines Bauvorhabens.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG ... 8

1.1 AUSGANGSLAGE ... 8
1.1.1 Netto-Null-Ziel der Schweiz ... 8
1.1.2 Netto-Null im Gebäudebereich ... 9
1.1.3 Netto-Null und natürliche Baustoffe ... 11
1.2 AUFTRAG UND ZIEL DER ARBEIT ... 11
1.3 AUFBAU DER ARBEIT ... 12

2. ANALYSE UND BEZUG ZUM WISSENSCHAFTLICHEN DISKURS ... 12

2.1 ANALYSE DES THEMAS ... 12
2.2 FORSCHUNGSBEITRÄGE ZUM NETTO-NULL-ZIEL ... 13
2.2.1 Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich ... 14
2.2.2 Ökobilanz klimafreundlicher Baumaterialien ... 15
2.2.3 Zero Strat: Strategien für Neubauten mit Niedrigstemissionen in der Erstellung ... 15
2.2.4 Klimapositives Bauen: Ein Beitrag zum Pariser Absenkpfad ... 16

3. LÖSUNGSANSATZ ... 17

3.1 GEWÄHLTE STRATEGIE ... 17
3.2 NATÜRLICHE BAUSTOFFE ... 19
3.3 BAUTEILE ... 25
3.4 ÖKOBILANZIERUNG ... 25
3.4.1 Methode der Ökobilanzierung (DIN EN ISO 14040 und 14044) ... 26
3.4.2 Rahmenbedingungen (Merkblatt SIA 2032) ... 30
3.4.3 Datengrundlage der Ökobilanzierung ... 32

4. MASSNAHMEN UND RESULTATE ... 34

4.1 AUSWAHL DER BAUTEILE FÜR DIE ÖKOBILANZ ... 34
4.1.1 Aufbau Referenzbauteil und Varianten Aussenwand ... 34
4.1.2 Aufbau Referenzbauteil und Varianten Geschossdecke ... 36
4.2 FEHLENDE WERTE IN KBOB-LISTE ... 38
4.3 DARSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE ... 40
4.3.1 Ergebnisse Aussenwände ... 41
4.3.2 Ergebnisse Geschossdecken ... 46
4.3.3 Vergleich der Ergebnisse ... 53

5. FAZIT ... 55

5.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN ... 55
5.2 BEZUG ZUR PRAXIS ... 57
5.3 LÖSUNGSANSÄTZE ... 60

6. LITERATURVERZEICHNIS ... 63

7. ANHANG ... 67

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

1.1.1 Netto-Null-Ziel der Schweiz

An der Klimakonferenz in Paris im Jahr 2015 wurde das sogenannte Übereinkommen von Paris abgeschlossen, das für die Zeit nach 2020 gültig ist. Es handelt sich dabei um „ein rechtlich verbindliches Instrument unter dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Klimakonvention, UNFCCC)“ (BAFU, 2023). Unabhängig davon, ob Industrie- oder Entwicklungsland, sind alle dem Übereinkommen beigetretenen Staaten dazu verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zu reduzieren. Damit soll einerseits die weltweite Erwärmung auf max. 1.5° C begrenzt werden, andererseits sollen eine treibhausgasarme Entwicklung und eine verbesserte Anpassungsfähigkeit an das veränderte Klima in den Ländern gefördert werden. Für die Umsetzung des Übereinkommens wurden gemeinsame Grundsätze festgelegt (z.B. klar formulierte nationale Reduktionsziele, die alle fünf Jahre eingereicht und erläutert werden müssen), die es auch einzuhalten und umzusetzen gilt.

Die Schweiz hat das Übereinkommen unterzeichnet und gleichzeitig folgende Ziele festgelegt:

- Reduktionsziel bis 2030: 50% weniger THG-Emissionen gegenüber 1990 und 35% weniger THG-Emissionen im Durchschnitt über die Jahre 2021-2030 inkl. Massnahmen diesbezüglich im Ausland
- Reduktionsziel bis 2050: Netto-Null, d.h. die Quellen und Senken von THG-Emissionen sind im Gleichgewicht

Das Reduktionsziel bis 2030 wird im Bundesgesetz über die Reduktion der CO_2-Emissionen (CO_2-Gesetz) geregelt. Das Netto-Null-Ziel (Reduktionsziel bis 2050) ist im Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (Klima- und Innovationsgesetz, KIG) gesetzlich verankert und im Januar 2025 in Kraft getreten. Es behandelt die Zeit nach 2020 und soll im Folgenden genauer betrachtet werden, da hier konkrete Vorgaben zur Erreichung des Ziels gestellt werden. Das KIG sieht folgende gesamthafte Zwischenziele für die Schweiz vor (Fedlex, 2022, Art. 3):

- im Durchschnitt der Jahre 2031 – 2040: mind. 64% weniger THG-Emissionen gegenüber 1990
- bis zum Jahr 2040: mind. 75% weniger THG-Emissionen gegenüber 1990
- im Durchschnitt der Jahre 2041 – 2050: mind. 89% weniger THG-Emissionen gegenüber 1990

Zudem macht das KIG spezifische Zielvorgaben für die wichtigsten Sektoren (Gebäude, Verkehr und Industrie), bei denen „alle im Inland anfallenden direkten Emissionen berücksichtigt“ werden müssen (SIA, 2025, S.27). Daraus ergeben sich folgende Absenkpfade:

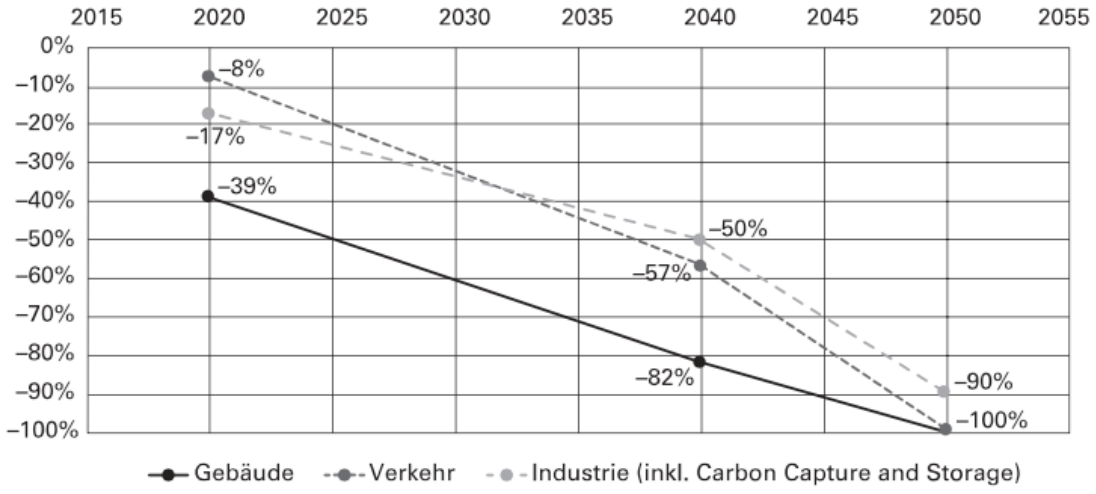

Abb. 1: Richtwerte zur Reduktion der THG-Emissionen gegenüber 1990 gemäss KIG, Art. 4, für die Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie mit Ausgangslage im Jahr 2020, Darstellung aus der SIA 390/1, Anhang A

Es wird deutlich, dass in der Schweiz für das Netto-Null-Ziel in allen Sektoren Handlungsbedarf besteht, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen. Was das konkret für den Sektor Gebäude bedeutet, wird im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

1.1.2 Netto-Null im Gebäudebereich

„Der Gebäudepark der Schweiz verursacht circa ein Drittel der inländischen Treibhausgasemissionen“ (BFE, 2023, S.4) und ist damit eine treibende Kraft des rasch voranschreitenden Klimawandels. Bauwerke verursachen über ihren gesamten Lebenszyklus (Herstellung inkl. allfälliger Ersatzinvestitionen, Errichtung, Nutzung und Entsorgung) THG-Emissionen. „Die betrieblichen Emissionen, die vor allem durch fossile Heizsysteme verursacht werden, werden in naher Zukunft stark abnehmen“ (BFE, 2024, S.6), da hier aufgrund „der gesetzlich verankerten Energiewende“ (Treeze Ltd.,

2020, S.1) kontinuierlich erneuerbare Energiesysteme eingesetzt werden müssen. Die Emissionen aus Herstellung und Entsorgung der Baumaterialien sind jedoch weiterhin hoch und schwieriger zu senken.

Die „SIA 390/1 Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden“ (nachfolgend SIA 390/1) leitet aus dem Absenkpfad des KIG (siehe Abb. 1) konkrete Anforderungen hinsichtlich der jährlichen zu erwartenden THG-Emissionen von Neu- und Umbauten in den Bereichen Erstellung, Betrieb und durch die Nutzung induzierte Alltagsmobilität (Mobilität) ab. Mit diesen Anforderungen verfolgt die SIA 390/1 einerseits das Netto-Null-Ziel der Schweiz im Bausektor und andererseits einen „sparsame[n] Einsatz von Ressourcen und de[n] Ausbau der Kreislaufwirtschaft“ (SIA, 2025, S.4). Die Anforderungen werden in folgenden zwei Zielwerten ausgedrückt:

- Zielwert B: Basis-Zielwert (ehemals Zielwerte SIA 20401)
- Zielwert A: ambitionierter Zielwert

Beide Zielwerte geben jeweils den Höchstwert für die Summe der THG-Emissionen pro m^2 Energiebezugsfläche und Jahr aus Erstellung, Betrieb und Mobilität an. Am Beispiel Nutzung Wohnen ergeben sich im Bereich Erstellung, welcher auch die THG-Emissionen der Entsorgung (siehe Kapitel 3.4.1) berücksichtigt, folgende Richtwerte:

	2020	**2025**	2030	2035	2040	2045	2050
Industrie: Reduktion gem. KIG (Jahr 1990 = 100 %)	83 %	75 %	67 %	58 %	50 %	30 %	10 %
Jährliche Treibhausgasemissionen in kg/m²							
Ø Erstellung Wohnen/Neubau mit Ist-Zustand 2020	12,2	11,0	9,8	8,6	7,3	4,4	1,5
Richtwert Erstellung Wohnen/Neubau für Zielwert B		**9,0**	8,0	7,0	6,0	3,5	1,0
Richtwert Erstellung Wohnen/Neubau für Zielwert A		**6,0**	3,8	1,5	± 0,0		
Ø Erstellung Wohnen/Umbau mit Istzustand 2020	7,5	6,8	6,0	5,3	4,5	2,7	0,9
Richtwert Erstellung Wohnen/Umbau für Zielwert B		**5,0**	4,0	3,5	3,0	1,5	0,5
Richtwert Erstellung Wohnen/Umbau für Zielwert A		**4,0**	2,5	1,0	± 0,0		

Abb. 2: Richtwerte Erstellung für Zielwerte A und B der Norm SIA 390/1 am Beispiel Wohnen mit Richtwerten zur Reduktion gemäss Bundesgesetz KIG, Sektor Industrie, Darstellung aus der SIA 390/1, Anhang A

[1] SIA. (2017, Mai 01). SIA 2040:2017 SIA-Effizienzpfad Energie

Abbildung 2 zeigt, dass der Absenkpfad des Sektors Industrie des KIG für die Herleitung der beiden Richtwerte herangezogen wird. Die Richtwerte werden alle fünf Jahre angepasst, d.h. gesenkt, so dass mit dem Jahr 2050 keine THG-Emissionen mehr verursacht werden dürfen. Das bedeutet konkret, dass jedes Bauprojekt (Neubau und Umbau), das heute geplant und umgesetzt werden soll, sich in der Erstellung mindestens am aktuell gültigen Richtwert für den Zielwert B orientieren muss, damit das Netto-Null-Ziel eingehalten werden kann. Gleichzeitig zeigt der Ist-Zustand bezogen auf das Jahr 2020, welcher sowohl bei Neubau wie auch Umbau höher ist als die zugeordneten Richtwerte B respektive A, dass das Netto-Null-Ziel im Gebäudebereich aktuell noch nicht erreichbar ist. Es sind weitere Strategien notwendig, um die THG-Emissionen in der Erstellung von Gebäuden zu senken.

1.1.3 Netto-Null und natürliche Baustoffe

Natürliche Baustoffe bestehen aus Rohstoffen, die direkt aus der Natur gewonnen werden. Dabei gilt es, zwischen nachwachsenden und nicht nachwachsenden Rohstoffen zu unterscheiden. Zu den nachwachsenden Rohstoffen zählen z.B. Holz, Stroh, Hanf, Flachs oder Kork. Zu den nicht nachwachsenden Rohstoffen gehört z.B. Lehm. Weil die Rohstoffe in der Natur existieren, können sie gewonnen bzw. geerntet und zu Baustoffen direkt weiterverarbeitet werden. Aufgrund dessen wird vermutet, dass mit der Verwendung natürlicher Baustoffe weniger THG-Emissionen bei ihrer Herstellung verursacht werden als bei mineralischen und metallischen Baustoffen sowie solchen aus Glas und Kunststoffen, die in einem oft aufwändigen industriellen Bearbeitungsprozess entstehen.

Dadurch ist anzunehmen, dass das Netto-Null-Ziel im Gebäudebereich durch den Einsatz natürlicher Baustoffe eher zu erreichen ist als durch die Verwendung industriell hergestellter Baustoffe.

1.2 **Auftrag und Ziel der Arbeit**

Ausgehend von der vorher formulierten Annahme soll mit dieser Arbeit untersucht werden, ob natürliche Baustoffe im Vergleich zu den am häufigsten verwendeten industriell hergestellten Baustoffen tatsächlich ein relevantes Sparpotenzial hinsichtlich der THG-Emissionen aufweisen und wenn ja, wie die Relevanz dieses Sparpotenzials einzuschätzen ist. Dafür wird eine Methode benötigt, mit der die verursachten THG-Emissionen der unterschiedlichen Baustoffe bilanziert werden können. Die daraus gewonnenen Ergebnisse sollen dann miteinander verglichen werden. Dies erfolgt anhand von zuvor definierten Referenzbauteilen. Auf diese Weise ist eine Aussage möglich, ob und in welchem

Ausmass durch den Einsatz natürlicher Materialien die THG-Emissionen reduziert werden können. Abschliessend sollen alle Ergebnisse hinsichtlich des Netto-Null-Ziels der Schweiz eingeordnet werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeitet beginnt mit einer Analyse des Themas, in der dessen einzelne Bestandteile dargestellt werden. Anschliessend werden vier für die Thematik relevante Studien vorgestellt, ihr jeweiliger Bezug zur vorliegenden Arbeit erläutert und mit ihnen die Bedeutung der in dieser Arbeit verfolgten Strategie zur Reduktion der THG-Emissionen belegt. Als nächstes wird ein Lösungsansatz definiert, mit dem anhand einer Ökobilanzierung belastbare Ergebnisse für den Vergleich zwischen natürlichen und konventionellen Baustoffen ermittelt werden können. Diese Methode wird anschliessend angewendet und deren Resultate dargestellt, ausgewertet und verglichen. Abschliessend wird ein Fazit gezogen, das sich auf die in der Ausganglage erhobene Annahme bezieht und diese unter Angabe von Begründungen bestätigt oder widerlegt.

2. Analyse und Bezug zum wissenschaftlichen Diskurs

2.1 Analyse des Themas

Die wesentlichen Bestandteile der Thematik sind das Netto-Null-Ziel der Schweiz, die THG-Emissionen, die deutlich zurückgehen müssen, um das gestellte Ziel zu erreichen, und die Verwendung natürlicher Baustoffe, die im Rahmen dieser Arbeit als mögliche Massnahme gesehen werden, um eine Reduktion der Emissionen zu bewirken.

Das Netto-Null-Ziel und die damit verbundenen Vorgaben für den Gebäudebereich wurden bereits in der Ausgangslage beschrieben. Hier wurde auch erläutert, dass in der vorliegenden Arbeit nur die THG-Emissionen betrachtet werden, die bei der Herstellung und der Entsorgung von Gebäuden verursacht werden.

Zu den wichtigsten Treibhausgasen zählen Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Schwefelhexafluorid, perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) (WWF, 2025). Die hohe und weiterhin wachsende Konzentration dieser Treibhausgase in der Atmosphäre ist auf den Menschen zurückzuführen und verursacht einen Anstieg der mittleren Temperatur auf der

Erdoberfläche. Diesen gilt es zu begrenzen, um die daraus resultierenden Folgen (z.B. extreme Wetterereignisse), welche bereits heute auftreten, einzudämmen.

Im Gebäudebereich wird in der Regel neben den THG-Emissionen auch eine Aussage zur verursachten Grauen Energie[2] eines Bauprojekts gemacht. In der SIA 390/1, die im Januar 2025 eingeführt wurde, wird der Fokus erstmals auf die THG-Emissionen gelegt. „Erfahrungen mit dem bisherigen SIA-Effizienzpfad[3] haben gezeigt, dass die Anforderungen bezüglich nicht erneuerbarer Primärenergie nur in Ausnahmefällen begrenzender wirken als die Anforderungen bei den THG-Emissionen“ (SIA, 2025, S.20). Aufgrund dessen und weil das Netto-Null-Ziel ebenfalls auf die THG-Emissionen orientiert ist, befasst sich die vorliegende Arbeit ausschliesslich mit der Reduktion dieser Emissionen.

Es existieren unterschiedliche Ansätze, um eine Reduktion der THG-Emissionen bei der Erstellung von Gebäuden zu bewirken. Eine Auswahl dieser Ansätze wird einerseits anhand der betrachteten Studien und andererseits anhand des Merkblatts SIA 2032 „Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden“ (nachfolgend SIA 2032) vorgestellt.

Die Arbeit setzt den Fokus auf die Strategie, natürliche Baustoffe zu verwenden, um eine Reduktion zu erzielen. In der Ausgangslage wurden die natürlichen Baustoffe bereits definiert und eine Annahme getroffen, warum hier ein Reduktionspotenzial vermutet wird. Im Verlauf der vorliegenden Arbeit soll diese Annahme verifiziert werden, so dass der Einfluss natürlicher Baustoffe auf die THG-Emissionen und damit auf das Netto-Null-Ziel der Schweiz deutlich wird.

2.2 Forschungsbeiträge zum Netto-Null-Ziel

Die aktuelle Forschung beschäftigt sich intensiv damit, Lösungsansätze zu finden, mit denen das gesetzte Netto-Null-Ziel im Gebäudebereich erreicht werden kann. In diesem Kapitel werden vier aktuelle Studien vorgestellt, die sich mit dieser Thematik beschäftigen und die dabei unterschiedliche Strategien verfolgen. Es wird jeweils die Essenz der Studie dargestellt und erläutert, inwieweit der Ansatz der vorliegenden Arbeit darauf Bezug nimmt.

[2] „Graue Energie ist der Energieaufwand, welcher für die Herstellung [und Entsorgung] von Gütern und Bereitstellung von Dienstleistungen aufgewendet wird.“ Gloor, Rolf. (2023, Februar 28). Graue Energie – Was ist graue Energie und wie wird sie berechnet? Abgerufen von https://energie.ch/graue-energie/

[3] SIA. (2017, Mai 01). SIA 2040:2017 SIA-Effizienzpfad Energie

2.2.1 Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich

In der vom Bundesamt für Energie veröffentlichten Studie „Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich (NN-THGG)“ ist das Teilziel „Netto-Null Treibhausgasemissionen (NN-THGE) in Gebäuden … [ein] unverzichtbares Mittel“ (BFE, 2024, S.6), um die Klimaziele, die mit dem Übereinkommen von Paris beschlossen wurden, zu erreichen. Wie oben beschrieben, gilt es vor allem Strategien zu finden, die eine Reduktion der THG-Emissionen bei der Herstellung und Entsorgung der Baumaterialien ermöglichen. Die Studie „NN-THGG“ entwickelt dazu anhand fünf verschiedener Strategien konkrete „Richtlinien, Benchmarks und Empfehlungen für Entscheidungsträger, Fachleute der Immobilien- und Bauwirtschaft sowie Akteure im Bereich Gebäudestandards und Labels“ (BFE, 2024, S.6). Die Strategien lauten wie folgt:

- F0: Methodik und Definition eines Netto-Null-Gebäudes[4]
- F1: Top-Down-Betrachtung des noch verbleibenden CO_2-Budgets
- F2: Bottom-Up-Betrachtung möglicher Strategien zur Emissionsreduktion
- F3: Übersicht möglicher Umsetzungswege
- F4: Grundlagen für die Grenz- und Zielwertsetzung

Eines der Ergebnisse der Strategie F2 fokussiert auf die „Berücksichtigung Grauer Emissionen“ (BFE, 2024, S.7). Die Beteiligten bei der Planung und Umsetzung eines Bauprojekts müssen sich demnach der Grauen Emissionen aus Herstellung und Entsorgung der Materialien bewusst sein. Nur so können konkrete Massnahmen getroffen werden, um diese zu reduzieren. Die Studie sieht eine dieser konkreten Massnahmen in der „Verwendung emissionsarm hergestellter Materialien“ (BFE, 2024, S.7). Wie in der Ausgangslage erläutert, werden bei natürlichen Baustoffen weniger Emissionen vermutet als bei industriell hergestellten Materialien.

Der Ansatz der vorliegenden Arbeit verfolgt diese Massnahme weiter.

[4] „Ein Gebäude mit netto null Treibhausgasemissionen (kurz «Netto-Null Gebäude») weist ein Minimum an THG-Emissionen für die Erstellung und im Betrieb über den gesamten Lebenszyklus auf und vermindert die verbleibenden THG-Emissionen durch anrechenbare Negativemissionen auf Ebene Baumaterialien und -Elemente. Anrechenbar sind Negativemissionen, wenn die dauerhafte Speicherung des biogenen CO_2 gesichert ist. Diese Möglichkeit ist heute de facto noch nicht vorhanden.“ (BFE, 2024, S.6)

2.2.2 Ökobilanz klimafreundlicher Baumaterialien

Auch die Studie „Ökobilanz klimafreundlicher Baumaterialien“ besagt, dass die THG-Emissionen aus Erstellung und Rückbau zurückgehen müssen, damit die Ziele des Übereinkommens von Paris erreicht werden können. Sie bezieht sich auf den Zeitraum zwischen 2030 und 2050 und untersucht, „was von den Baustoffherstellern in diesem Zusammenhang erwartet werden kann.“ (Treeze Ltd., 2020, S.1) Der Fokus liegt demnach auf der Primärproduktion von Baustoffen. Berücksichtigt wurden dabei „mineralische und metallische Werkstoffe, Holz und Kunststoffe, die in der Schweiz produziert und/oder verwendet werden“ (Treeze Ltd., 2020, S.1). Es wurden Ökobilanzen zum Herstellungsverfahren erstellt, in die Informationen zur technologischen Entwicklung des Herstellungsverfahrens, zu den notwendigen Transportdienstleistungen und zur Energieversorgung eingeflossen sind, die zukünftig erwartet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die THG-Emissionen der Baustoffproduktion verglichen mit dem heutigen Stand um bis zu 65% gesenkt werden können. Auf Gebäudeebene sind damit bei Bau und Rückbau THG-Reduktionen zwischen 50-60% möglich. Erreicht werden diese Ergebnisse bei den meisten Produktionen mit einer Umstellung auf erneuerbare Energiequellen oder einer Erhöhung des Anteils an recyceltem Ausgangsmaterial.

Die Studie fokussiert sich auf die Produktion der darin ausgewählten Materialien und lässt dabei bewusst weitere Aspekte ausser Betracht. Es wird jedoch vermutet, dass durch zusätzliche Massnahmen wie den „Einsatz von schadstoffarmen und umweltfreundlichen Baustoffen oder auch völlig andere Bauweisen (z.B. Holzbau, Lehm, Strohballen, alternative Dämmstoffe)“ (Treeze Ltd., 2020, S.4) noch umfassendere Reduktionen der THG-Emissionen möglich sind.

Diese beiden Aspekte werden in der vorliegenden Arbeit aufgrund der Fokussierung auf natürliche Baustoffe weiter untersucht, da diese Baustoffe in der Regel schadstoffarm und umweltfreundlich sind und die erwähnten anderen Bauweisen damit auch umgesetzt werden können.

2.2.3 Zero Strat: Strategien für Neubauten mit Niedrigstemissionen in der Erstellung

Die Studie „Zero Strat: Strategien für Neubauten mit Niedrigstemissionen in der Erstellung“ kombiniert den Einsatz innovativer Baustoffe und Bauteile mit materialübergreifenden Handlungsansätzen, um die THG-Emissionen bei der Erstellung von Gebäuden zu reduzieren. Ein grosser Teil der innovativen

Materialien basiert auf nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Dämmplatten aus Stroh, Hanf und Gras). Der andere Teil umfasst Materialien, die in innovativen Prozessen hergestellt werden (z.B. mit CO_2-begastem RC-Beton, CO_2-reduzierter Zement). Die materialübergreifenden Handlungsgrundsätze sind phasenspezifisch und müssen in der SIA Phase 1 (strategische Vorplanung) bzw. Phase 2 (Vorstudie) angewendet werden. Dazu zählen z.B. der Bau eines grossen anstelle von mehreren kleinen Gebäuden, eine möglichst kleine Gebäudehüllzahl, die Reduktion der Untergeschosse oder ein moderater Fensteranteil von ca. 35%. Anhand eines Testgebäudes wurden die möglichen Reduktionen an THG-Emissionen unter Verwendung der definierten Baumaterialien und Bauteile sowie der Handlungsansätze im Vergleich zur Verwendung konventioneller Materialien ermittelt.

In den Ergebnissen zeigt sich, dass durch eine Kombination aus innovativen Baumaterialien und materialübergreifenden Handlungsgrundsätzen eine ausreichende Reduktion der THG-Emissionen in Bezug auf das Netto-Null-Ziel erreicht wird. Die THG-Emissionen sinken, wenn ein Holzbau anstelle eines Betonbaus umgesetzt wird, und wenn eine Sanierung dem Neubau vorgezogen wird.
Die vorliegende Arbeit verfolgt den Ansatz der Studie, eine Reduktion der THG-Emissionen über die Materialwahl zu erreichen, wobei im Gegensatz zur Studie nur natürliche Baustoffe untersucht werden und der Aspekt materialübergreifender Handlungsansätze zwar erläutert wird, aber nicht in die vorgesehene Bilanzierung einfliessen soll.

Die Studie findet zudem heraus, dass für die Vergleichbarkeit der innovativen Baumaterialien deren Herkunft berücksichtigt werden muss. Bei manchen nachhaltigen Rohstoffen war eine regionale Verfügbarkeit zum Zeitpunkt der Studie (Juli 2023) nicht ausreichend gegeben. Daher wurden z.B. für Stroh und Gras Transportwege für den Import aus den Nachbarländer Deutschland, Frankreich und Italien berücksichtigt. Bei diesen kurzen Distanzen können für die daraus hergestellten Dämmstoffe trotzdem bessere THG-Bilanzen erzielt werden als bei in der Schweiz hergestellter Glaswolle. Bei längeren Transportwegen kann diese positive Bilanz der nachhaltigen Baustoffe jedoch verloren gehen. Der Aspekt der regionalen Verfügbarkeit wird daher bei der Auswahl der Baustoffe berücksichtigt.

2.2.4 Klimapositives Bauen: Ein Beitrag zum Pariser Absenkpfad

In der Studie „Klimapositives Bauen: Ein Beitrag zum Pariser Absenkpfad“ wird ebenfalls nach Möglichkeiten gesucht, um die THG-Emissionen bei der Erstellung von Gebäuden zu reduzieren. Die Studie bezieht sich dabei auf das Reduktionsziel 2030, also eine Reduktion der THG-Emissionen um 50% gegenüber 1990. Es werden einzelne Massnahmen für Neu- und Umbauten definiert, zu denen jeweils

die Reduktionspotenziale verglichen an einem heute üblichen Mehrfamilien-Referenzhaus angegeben werden.

Es zeigt sich, dass mit den in der Studie aufgeführten Massnahmen bis zu 16% THG-Emissionen gespart werden können. Die Reduktionspotenziale können auf bis zu 40% erhöht werden, wenn die Massnahmen zu Strategien zusammengeschlossen werden. Wird zusätzlich der im Gebäude gespeicherte Kohlenstoff angerechnet, werden bei den einzelnen Massnahmen bis zu 30% Reduktionspotenzial erreicht und bei den Strategien bis zu 50%. Gebäude, die ein Reduktionspotenzial von ca. 50% erreichen, werden in der Studie als klimapositiv bezeichnet, da sie damit das Reduktionsziel gemäss dem Übereinkommen von Paris erreichen.

Die Studie endet mit qualifizierten Empfehlungen, die bei jedem Bauvorhaben berücksichtigt und kombiniert werden sollten, um ein möglichst klimafreundliches Projekt zu realisieren. Zu den Empfehlungen gehört u.a. die Verwendung biogener und natürlicher Baustoffe, da diese oft weniger stark verarbeitet sind, also weniger THG bei ihrer Erstellung verursachen. Dieser Zusammenhang zwischen natürlichen Baustoffen und den emittierten THG für deren Erstellung wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls genauer betrachtet.

3. Lösungsansatz

3.1 Gewählte Strategie

Die in Kapitel 2.2 betrachteten Studien zeigen, dass es unterschiedliche Herangehensweisen gibt, um eine Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudebereich zu erreichen. Die verschiedenen Ansätze schliessen sich dabei nicht gegenseitig aus, sondern ergänzen sich.

Das Kombinieren unterschiedlicher Massnahmen wird auch in der SIA 2032 verfolgt. Hier werden „wichtige Erkenntnisse zur Optimierung bzw. Minimierung der nicht erneuerbaren Primärenergie und der Treibhausgasemissionen von Gebäuden“ (SIA, 2020, S.6) in Anhang B zusammengefasst. Die drei wichtigsten Strategien und ihre Massnahmen lauten dabei wie folgt:

- **Reduktion der Menge** durch Suffizienz, flächeneffiziente Konzepte, grosse und kompakte Baukörper, wenig Bauteile unter Terrain und einfache Tragsysteme

- **Ökobilanz pro Menge** durch die Art der Bauweise und die Materialwahl
- **Lange Nutzungsdauer** durch Berücksichtigung der Amortisationszeiten und einer darauf ausgelegten Systemtrennung der Bauteilschichten, Beständigkeit der Bauteile, Anpassbarkeit ohne grossen baulichen Aufwand und zurückhaltenden Einsatz von Gebäudetechnik

Die Strategie „Reduktion der Menge“ steht an erster Stelle und hat im Verhältnis zu den anderen beiden Strategien einen grösseren Einfluss, da hier über die tatsächlich verbaute Menge entschieden wird. Je weniger gebaut wird, desto weniger Energieaufwand in der Herstellung, desto besser die Bilanz der THG-Emissionen. Teil dieser Strategie ist die Entscheidung, ob der Bestand weiterverwendet und saniert bzw. umgebaut oder ein Ersatzneubau in Erwägung gezogen wird. Hinsichtlich der THG-Emissionen stellt eine Sanierung oder ein Umbau immer den besseren Fall dar, da bestehende Substanz weitergenutzt werden kann. Daher wird in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf Neubauten gelegt, da dies hinsichtlich des Netto-Null-Ziels die schlechtere Variante ist und hier dringender nach Lösungen gesucht werden muss. Das ist auch in Abbildung 2 zu sehen, in der neben den Richtwerten B und A der SIA 390/1 auch der Ist-Zustand 2020 für Neubauten und Umbauten der Nutzung Wohnen abgebildet ist. Die durchschnittlich verursachten THG-Emissionen von Umbauten liegen deutlich unter denen von Neubauten.

Die Wahl der Baustoffe lässt sich klar der zweiten Strategie „Ökobilanz pro Menge“ zuordnen. Idealerweise wurden bei der Planung eines Bauprojekts gemäss der ersten Strategie bereits Massnahmen getroffen, um die Ökobilanz zu optimieren. In einem zweiten Schritt wird nun durch die Wahl der Bauweise und Baustoffe die Bilanz weiter minimiert. Analog der oben getroffenen Entscheidung für die Betrachtung von Neubauten, werden hier neue Materialien eingesetzt. Der Aspekt der Wieder- oder Weiterverwendung wird nicht berücksichtigt, da dies hinsichtlich der THG-Bilanz - analog Sanierung bzw. Umbau - der bessere Fall wäre, hier aber nach Lösungen für den schlechteren Fall gesucht werden soll.

Je länger ein Bauteil genutzt wird, desto besser für die Ökobilanz. Darauf fokussiert die dritte Strategie der SIA 2032. Die vorliegende Arbeit nimmt auf diese, wie auch auf die erste Strategie keinen direkten Bezug. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass mit der getroffenen Materialwahl langlebige und beständige Bauteile und Gebäude erstellt werden können.

3.2 Natürliche Baustoffe

Die in Kapitel 2.2 betrachteten Studien vermuten, dass es Möglichkeiten gibt, um die THG-Emissionen aufgrund der getroffenen Materialwahl zu reduzieren. Es wird angenommen, dass emissions- sowie schadstoffarme und umweltfreundliche Baustoffe dabei eine wichtige Rolle spielen. Es wird davon ausgegangen, dass die aufgeführten Eigenschaften alle in natürlichen Baustoffen zu finden sind. In der Ausgangslage wurde bereits definiert, welche Materialien als natürliche Baustoffe verstanden werden und worin ihr Vorteil hinsichtlich einer Reduktion der THG-Emissionen vermutet wird.

Bei der Definition wurde zwischen natürlichen Baustoffen aus nachwachsenden und solchen aus nicht nachwachsenden Rohstoffen unterschieden. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, nachfolgend auch biobasierte Baustoffe genannt. Ein Grund dafür ist, dass diese Baustoffe kreislauffähig sind, was sich gut am Beispiel der „Kaskadennutzung“ (Lignum, 2022, S.10) von Holz erklären lässt. Der Rohstoff Holz wird optimalerweise in seiner ersten Nutzungsphase langlebig eingesetzt, also z.B. beim Bau von Häusern, Möbeln oder Innenausbauten. Kommt diese erste Nutzungsphase an ihr Ende, kann das Holz in einer kurzlebigeren Nutzung (z.B. Papier, Zellulosedämmung) weiterverwendet werden. Am Ende dieser Phase kann es noch energetisch, also für die Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Das dabei freigesetzte CO_2 hilft wiederum neu gepflanzten Bäumen beim Wachsen. Dieser Kreislauf verhindert Umweltbelastungen durch nicht recyclingfähige Baustoffe, die als Abfall auf Deponien enden.

Gleichzeitig werden mit diesen Baustoffen die Ressourcen der Erde geschont, da die der Natur entnommenen Rohstoffe wieder nachwachsen. Die nachhaltige Bewirtschaftung der Rohstoffe, also eine gezielte Rohstoffgewinnung und ein kontinuierlicher Neuanbau, ist eine wichtige Voraussetzung für ihre Nutzung (KBOB, 2020, S.1). Schnell nachwachsende Rohstoffe, wie z.B. Stroh oder Hanf, haben hier den Vorteil, dass sie nach kurzer Zeit wieder verfügbar sind, also weniger Zeit zur Regeneration benötigen als langsamer wachsende Rohstoffe.

Ein weiterer Vorteil der biobasierten Baustoffe ist ihr biogener Kohlenstoffspeicher. In den Rohstoffen wird aufgrund ihrer Fähigkeit zur Photosynthese CO_2 gespeichert. Das so gebundene CO_2 belastet zumindest temporär nicht mehr die Atmosphäre. Die Speicherzeit kann „für die Entwicklung besserer Technologien zur Sequestrierung von CO_2 und zu effektiveren Reduktionen“ (NEBS, 2021, S.82) genutzt werden. Daher ist es wichtig und sinnvoll, einen möglichst grossen biogenen Kohlenstoffspeicher mithilfe von biobasierten Baustoffen anzulegen.

Die beschriebenen Aspekte zeigen deutlich, welches Potenzial biobasierte Baustoffe besitzen. Im Folgenden werden die natürlichen Baustoffe, die im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt werden, aufgeführt und kurz beschrieben. Entscheidend für die Wahl der Baustoffe war deren regionale Verfügbarkeit, d.h. die jeweiligen Rohstoffe der gewählten Materialien müssen in der Schweiz oder maximal den angrenzenden Nachbarländern, verfügbar sein. Wie oben anhand der Studie „Zero Strat“ beschrieben, führen zu lange Transportwege dazu, dass die dadurch verursachten Emissionen teilweise den Vorteil der emissionsarmen Baustoffe verspielen würden. Die regionale Verfügbarkeit wird daher vorausgesetzt.

Unter den regional verfügbaren Baustoffen wird die Auswahl weiter auf die gängigsten Materialien beschränkt. Insgesamt gibt es deutlich mehr natürliche Baustoffe als hier beschrieben. Zudem wächst die Anzahl weiter, da ständig neue Produkte auf den Markt kommen.

Weitere Aspekte, die je nach Funktion und Einbauort des verwendeten Materials auch zu berücksichtigen sind, werden hier nicht im Detail betrachtet. Es wird jedoch festgehalten, dass die ausgewählten Baustoffe in der hier vorgestellten Funktion verwendet werden dürfen.

Holz

Holz ist einer der wichtigsten natürlichen und nachwachsenden Rohstoffe der Schweiz (KBOB, 2020, S.1). Seine Verfügbarkeit ist auch für einen grösseren Verbrauch vorhanden. Eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung von Holz ist, dass dieses nachhaltig bewirtschaftet wird, d.h. Fläche und Verteilung des Waldes müssen genau wie seine Produktivität trotz Abholzung erhalten bleiben, alle Waldfunktionen müssen weiterhin erfüllt und die Diversität der Hölzer muss berücksichtigt werden. Hölzer, die diesen Anforderungen entsprechen, sind oft mit den Labeln Schweizer Holz, FSC oder PEFC gekennzeichnet (KBOB, 2020, S.10).

Holz ist ein sehr vielseitiger Rohstoff. Er ist tragend und kann daher für die Konstruktion eingesetzt werden. Daneben sind auch Dämmstoffe, Bodenbeläge, Verkleidungen und weitere Innenausbauten (inkl. Möbeln) aus Holz möglich. Holz wächst durch Sonnenstrahlung und Wasser aus der Natur, benötigt also keine zusätzliche Energie in der Herstellung.

Konstruktionsholz (Liedl und Rühm, 2019, S.61)

Wird Holz für die Konstruktion eingesetzt, kann das in Form von Vollholz oder Brettschichtholz erfolgen. Bei Vollholz ist kaum weitere Energie für dessen Verarbeitung notwendig. Es muss nach der Gewinnung des Rohstoffs nur getrocknet und entsprechend zugesägt werden. Anschliessend kann es verbaut werden. Bei Brettschichtholz handelt es sich um zugeschnittene Holzbretter, die „faserparallel miteinander verleimt“ (Liedl und Rühm, 2019, S.61) werden. Es werden zwischen zwei bis fünf Lagen aufeinandergeschichtet. Besonderes Augenmerk sollte hier auf den verwendeten Leim gelegt und ein gesundheitlich und ökologisch sinnvolles Produkt ausgewählt werden.

Holz als Dämmstoff (Liedl und Rühm, 2019, S.106)

Holzfasern werden aus Resthölzern ohne Rinde von Nadelbäumen gewonnen und entstehen somit aus einem Abfallprodukt, das bei der Verarbeitung von Holz anfällt. Die Holzreste werden zerfasert, mit Zusatzstoffen als Feuchte- und Brandschutz versehen und können dann als Einblasdämmung in Wand, Decke oder Dach verwendet werden. Alternativ können die Holzfasern zu Holzweich- oder Holzhartfaserplatten weiterverarbeitet werden. Der Unterschied liegt darin, dass bei den Hartfaserplatten Zement als Bindemittel beigefügt wird, während die Weichfaserplatten ohne dieses Bindemittel auskommen. Es wird die zementarme Variante verwendet. Auch die Holzfaserplatten sind als Dämmung in Wand, Decke oder Dach einsetzbar.

Lehm (Liedl und Rühm, 2019, S.74 und IG Lehm, 2025, Baustoff)

Lehm besteht aus Ton, Sand, Schluff und Kies in immer unterschiedlichen Zusammensetzungen. Sein natürliches Bindemittel ist der Ton. Lehm ist in der Schweiz vielerorts verfügbar, wie die Lehmkarte Schweiz zeigt:

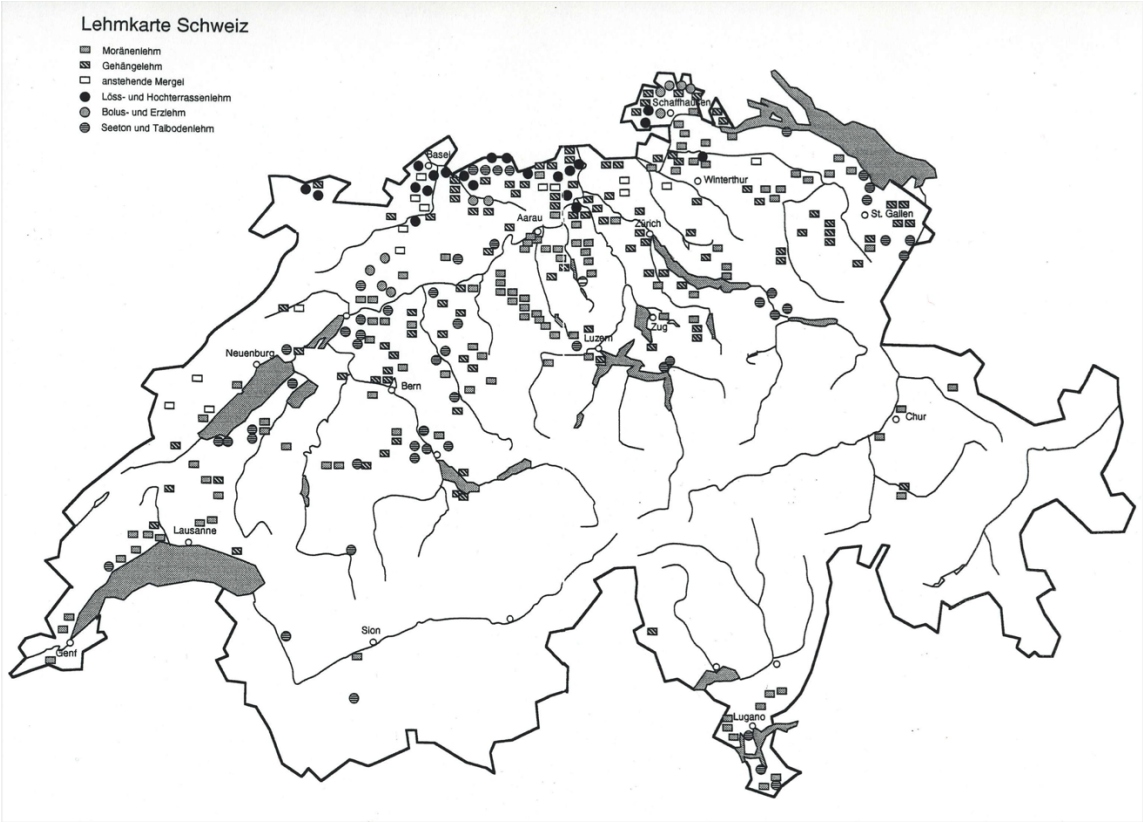

Abb. 3: Lehmkarte Schweiz, IG Lehm, abgerufen von https://www.iglehm.ch/application/files/7215/1656/5160/Lehmkarte_Schweiz.pdf

Lehm ist unter den gewählten Rohstoffen der Einzige, der nicht nachwachsend ist. Aufgrund seiner Verarbeitung wird er hier trotzdem berücksichtigt. Lehm ist nämlich komplett reversibel, wenn der Rohstoff für die Verarbeitung zu den jeweiligen Baustoffen nicht gebrannt, sondern nur getrocknet wird. Lehm ist durch die Zugabe von Wasser formbar. Wird er also in der Form, in der er für den Einsatz in einem Bauwerk getrocknet wurde, nicht mehr weiterverwendet, kann er entweder gemahlen und durch die erneute Beigabe von Wasser zu einer wieder nutzbaren Lehmmasse verarbeitet werden. Er kann alternativ in Erdlagerstätten, aus denen er gewonnen wurde, zurückgeführt werden. Somit ist Lehm ein kreislauffähiges Produkt. Durch die Herstellung in einem reinen Trocknungsverfahren ist deutlich weniger Energie notwendig als für gebrannte Mauerwerksteine.

Lehm für die Konstruktion (IG Lehm, 2025, Massivbau – Stampflehm)
Stampflehm ist eine steinige und magere Lehmvariante, die in Schalungen geschichtet, gut festgestampft und anschliessend getrocknet wird. Auf diese Weise können tragende Wände hergestellt werden. Die Wände können entweder direkt vor Ort gestampft oder vorfabriziert und anschliessend auf die Baustelle transportiert werden. Es ist zu berücksichtigen, dass Lehm, während er trocknet, um 1 - 2% schwindet.

Lehm hat ein relativ hohes Eigengewicht, das bei der statischen Planung berücksichtigt werden muss. Wände aus reinem Stampflehm sind somit sehr schwer, zumal in tragender Funktion Wandstärken von bis zu 0.80m notwendig sind. Aus diesen Gründen ist bei Gebäuden, die Lehm als Tragkonstruktion einsetzen, nur eine geringe Gebäudehöhe (bis zu 11m) möglich. Wie oben beschrieben, ist Lehm nicht resistent gegen Wasser. Daher müssen Aussenwände aus Stampflehm durch wasserfeste Sockel, Dachvorsprünge oder eine äussere Verkleidung vor der Witterung geschützt werden.

Lehm im Ausbau

Lehmbauplatte
Bei der Herstellung von Lehmbauplatten, welche analog zu Gipskartonplatten für die Beplankung im Innenausbau verwendet werden können, wird „ungebrannter Lehm mit Schilfrohrmatten oder alternativ mit Stroh oder Holzspänen stabilisiert“ (Liedl und Rühm, 2019, S.121) und zu Platten gepresst. Die Platten müssen anschliessend trocknen, bevor sie verbaut werden können. Sie „sind in unterschiedlichen Stärken erhältlich“ (Liedl und Rühm, 2019, S.121).

Lehmputz (Liedl und Rühm, 2019, S.124)
Lehm, Tonerde, Sand und Zellulosefasern werden zusammen mit Wasser zu Lehmputzen gemischt. Diese können für die Oberflächenbehandlung in Innenräumen (Wände und Decken) genutzt werden. Die Farbe der Putze ist von der Tonerde abhängig. Durch Beimischen von Pigmenten sind Farbänderungen möglich.

Stroh (Liedl und Rühm, 2019, S.82 und S.108)
Wird Getreide geerntet, bleibt Stroh in Form von langen und kurzen Halmen zurück. Die langen Halme werden zu Ballen gepresst und anschliessend getrocknet. Die Restfeuchte in den Ballen muss unter 18% liegen, wenn das Stroh verbaut wird. Die kurzen Halme dienen als Häckselstroh. Stroh ist somit

eigentlich ein „Abfallprodukt der Landwirtschaft“ (Liedl und Rühm, 2019, S.82), das jährlich nachwächst und eine sehr geringe Herstellungsenergie hat.

Stroh ist wie Holz ein sehr vielfältiger Rohstoff. Mit Strohballen können lastabtragende Wände erstellt werden. Gleichzeitig ist Stroh ein sehr gutes Dämmmaterial.

Strohballen (Liedl und Rühm, 2019, S.84 und Liese, 2023, S.77)
Beim lastabtragenden Strohballenbau sind ebenfalls nur Gebäude geringer Höhe möglich. Die Strohballen werden wie bei einem Mauerwerk im Versatz geschichtet und so zu Wänden zusammengefügt. Um die auftretenden Lasten tragen zu können, sind Wandstärken von bis zu 1m notwendig. Auch Wände aus Stroh setzen sich, d.h. sie schwinden etwas, nachdem sie errichtet wurden. Die Setzung erfolgt dabei oft nicht regelmässig, so dass mit Gewichten nachgeholfen werden muss, um die darauf liegenden Decken wieder ins Lot zu bringen.

Stroh als Dämmstoff (Liedl und Rühm, 2019, S.108)
Wie bereits geschildert, dient Stroh auch als Dämmstoff. Das Strohhäcksel wird als Einblasdämmung für Wand, Decke und Dach genutzt. Mit Strohballen können Rahmen- oder Ständerkonstruktionen gefüllt werden.

Flachs (Liedl und Rühm, 2019, S.104 und Rühm, 2023, S.85)
Flachs ist ein Abfallprodukt der Textilherstellung. Die für Textilien nicht nutzbaren Kurzfasern der Flachspflanze können zu einer Einblasdämmung, Dämmfilzen oder Dämmplatten verarbeitet werden. Die Dämmfilze werden als Trittschallschutz im Bodenaufbau eingesetzt. Die Verwendung der Einblasdämmung und Platten ist in Wand, Decke und Dach möglich. Die Einblasdämmung und die Dämmfilze benötigen keine Zusatzstoffe und sind daher kompostierbar. Bei der Herstellung der Platten werden die Flachsfasern mechanisch verfilzt, geschichtet und mit Brandschutz- sowie Bindemitteln versehen. Sie sind daher oft nicht mehr biologisch abbaubar.

Hanf (Liedl und Rühm, 2019, S.104 und Energie Experten, 2024)
Hanf ist ein schnell und dicht wachsender Rohstoff. Als Dämmstoff sind nur die Hanfsorten geeignet, die nicht als Rauschmittel dienen. Aus den Hanffasern können dünne Dämmmatten oder -vliese hergestellt werden, die für den Trittschallschutz verwendet werden. Die verholzten Anteile der Pflanze, sogenannte Hanfschäben, werden zu Schüttungen oder Dämmplatten verarbeitet. Bei den Platten

werden meistens Stützfasern und Brandschutzmittel zugesetzt. Die Schüttung wird im Bodenaufbau eingesetzt. Mit den Platten können Wand, Decke und Dach gedämmt werden.

Schilfrohr (Liedl und Rühm, 2019, S.107)
Schilfrohre werden geerntet, gepresst und mit Drähten zusammengebunden. Durch das Pressen wird die Luft in den Rohren eingeschlossen, wodurch die so entstandenen Matten eine gute Wärmedämmwirkung erhält. Sie werden zur Dämmung von Wänden und Dächern (sogenannte Reetdächer) verwendet. Dünne Schilfrohrmatten werden ausserdem als Putzträger eingesetzt.

Zellulose (Liedl und Rühm, 2019, S.110)
Für den Einblasdämmstoff aus Zellulose wird Altpapier zerfasert und mit Zusatzstoffen versehen, um es resistent gegen Feuer, Schimmel und Schädlinge zu machen. Anschliessend kann der Dämmstoff in Wand, Decke und Dach verwendet werden.

3.3 Bauteile

Den ausgewählten Materialien muss eine Funktion zugewiesen werden, damit die effektiv verursachten THG-Emissionen gemessen werden können. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei auf einzelne Bauteile, zu denen verschiedene Aufbauten definiert werden.

Der Fokus auf Bauteile wird darin begründet, dass dies die kleinste Einheit im Gebäude ist, die gemessen werden kann. „Ein Gebäude oder Gebäudeteil kann als Konglomerat von Bauteilen verstanden werden. Diese wiederum sind in der Regel aus unterschiedlichen Baustoffen zusammengesetzt“ (SIA, 2020, S.12). Anhand einzelner Bauteile können die verschiedenen Konstruktionen detaillierter untersucht werden, d.h. gezielt einzelne Baustoffe ausgewechselt und der damit verbundene Effekt auf die THG-Emissionen berechnet werden. Ist ein Effekt in dieser kleinen Einheit erkennbar, wird er auch im gesamten Gebäude wirksam. So gelingt es eine Aussage zu den gesamthaft zu erwartenden Emissionen zu machen.

3.4 Ökobilanzierung

Um die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (SNV, 2006, ISO 14040, S.6)

festzustellen, wird eine Ökobilanzierung durchgeführt. Der Aufbau und das Vorgehen der Bilanzierung, ihre Rahmenbedingungen sowie ihre zugrundeliegenden Daten werden in diesem Kapitel beschrieben.

3.4.1 Methode der Ökobilanzierung (DIN EN ISO 14040 und 14044)

Die Methode der Ökobilanzierung richtet sich nach der DIN EN ISO 14040: Grundsätze und Rahmenbedingungen einer Ökobilanzierung (nachfolgend DIN ISO 14040) und der DIN EN ISO 14044: Anleitung zur Durchführung von Ökobilanzen einzelner Produkte und Dienstleistungen (nachfolgend DIN ISO 14044). Gemäss den beiden Normen erfolgt eine Ökobilanz in folgenden vier Phasen:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die einzelnen Phasen werden im Folgenden beschrieben.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Rahmenbedingungen für den Aufbau der Ökobilanz richten sich nach der SIA 2032 und werden in Kapitel 3.4.2 festgelegt. Wie in Kapitel 3.4 geschrieben, ist das Ziel der Bilanz eine Aussage zur Umweltbelastung eines festgelegten Produktsystems im Verlauf seines gesamten Lebenswegs machen zu können. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Produktsysteme sind einzelne Bauteile, welche als messbare Einheit eines gesamten Bauwerks fungieren. Als funktionelle Einheit gelten Bauteilfläche und Jahr (siehe auch Kapitel 3.4.2).

Sachbilanz

Die Sachbilanz ist die „Zusammenstellung und Quantifizierung von Umweltaspekten als Inputs und Outputs“ (Wikipedia, 2022) eines ausgewählten Produktsystems über seine gesamte Lebensdauer. Als Input gelten dabei laut DIN ISO 14040 alle Produkt-, Stoff- und Energieflüsse, die einem Prozess im Rahmen des Produktsystems zugeführt werden. Als Output werden hingegen alle Produkt-, Stoff- und Energieflüsse gesehen, die durch einen solchen Prozess abgegeben werden.

Die Systemgrenzen dieser Sachbilanz, also die „Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind“ (SNV, 2006, ISO 14040, S.10), sind der Bereich der Erstellung gemäss SIA

2032 (siehe auch Kapitel 3.4.2). Es werden also folgende Prozesse gemäss Phasenbezeichnung der SN EN 15804 berechnet:

- Rohstoffbereitstellung (A1)
- Transport (A2)
- Herstellung (A3)
- Ersatz während der Nutzungsphase (B4)
- Rückbau oder Abriss (C1)
- Transport (C2)
- Abfallbehandlung (C3)
- Beseitigung (C4)

Zur Herstellung gehören die Phasen A1 - A3, zur Entsorgung die Phasen C1 – C4. Die Nutzungsphase wird bis auf den Ersatz (B4) nicht berücksichtigt. Ebenso spielt die Errichtungsphase keine Rolle.

Da hier, wie oben beschrieben, von neu erstellten Bauteilen und -materialien ausgegangen wird und somit keine Input- und Outputflüsse wiederverwerteter Produkte berücksichtigt werden, kommt das Allokationsverfahren[5] nicht zur Anwendung.

Für die Berechnung der Sachbilanz werden die „Ökobilanzdaten im Baubereich“ der KBOB verwendet. Weitere Informationen zu dieser Datengrundlage sind im Kapitel 3.4.3 zu finden.

Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung ist ein relativer Ansatz, der auf der oben festgelegten funktionellen Einheit basiert. Wirkungskategorie ist der Klimawandel. Die Sachbilanz wird demnach bzgl. ihrer Auswirkungen auf das Klima bewertet. Wie in der Analyse des Themas (siehe Kapitel 2.1) beschrieben, werden diese Auswirkungen am Anstieg der mittleren Temperatur auf der Erdoberfläche spürbar, der durch die wachsende Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre verursacht wird. Der Wirkungsindikator dafür ist somit die Summe aller THG-Emissionen des Produktsystems bezogen auf die funktionelle Einheit ($kgCO_2eq/m^2a$).

[5] Eine Allokation ist eine „Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen“ (SNV, 2006, ISO 14040, S.8)

Die Wirkungsabschätzung soll anhand der Richtwerte B und A für die Erstellung von Neubauten der Nutzung Wohnen im Jahr 2025 laut SIA 390/1 erfolgen. Gleichzeitig wird zu jedem Bauteil eine Einordnung hinsichtlich seines Referenzbauteils gemacht und der jeweilige biogene CO_2-Speicher ausgewiesen werden. Die Fokussierung auf die Nutzung Wohnen ist darin begründet, dass sie einerseits das grösste Bauvolumen in der Schweiz darstellt. Andererseits ist ihre Relevanz besonders hoch, da hier zukünftig eine starke Verdichtung gefordert ist (NEBS, 2021, S.79). Wie in Kapitel 1.1.2 geschrieben, gibt die SIA 390/1 konkrete Anforderungen hinsichtlich der jährlich einzuhaltenden maximalen THG-Emissionen in kg/m^2a vor. Die beiden Richtwerte sind am Absenkpfad des KIG orientiert und werden alle fünf Jahre gesenkt.

Die Richtwerte gelten für die Erstellung ganzer Gebäude und geben daher an, wie viel kg THG-Emissionen pro m^2 Energiebezugsfläche (EBF) und Jahr maximal ausgestossen werden sollten. Die Werte müssen so umgerechnet werden, dass ein Referenzwert für die zu bilanzierenden Bauteile vorliegt.

Für die Berechnung dieser Referenzwerte wird die Studie „Klimapositives Bauen“ (NEBS, 2021, Kapitel 5.3.3 Bestimmung des Istzustandes als Referenzwert) herangezogen. In der Studie wurden neun Fallbeispiele eines Standard-MFH analysiert, um daraus einen Referenzwert für den Istzustand hinsichtlich der durchschnittlich verursachten THG-Emissionen bei einem Neubauprojekt abzubilden. Für jedes Gebäude wurden die THG-Emissionen der einzelnen Bauteile und ein Mittelwert der THG-Emissionen aller neun Gebäude gemäss SIA 2032 ermittelt. Der Mittelwert der Fallbeispiele diente als Referenzwert des Istzustandes und lag etwas unter 11 kg CO_2eq pro m^2 EBF und Jahr. Er stimmte mit vergleichbaren Angaben aus anderen Quellen und der Analyse von anderen Fallbeispielen überein.

Um die Verteilung der THG-Emissionen analysieren zu können, wurden die Bauteile in die entsprechenden Kategorien des Baukostenplans im Hochbau (eBKP-H) aufgeteilt. Es wurden folgende Beiträge der Bauteile für den Mittelwert festgestellt:

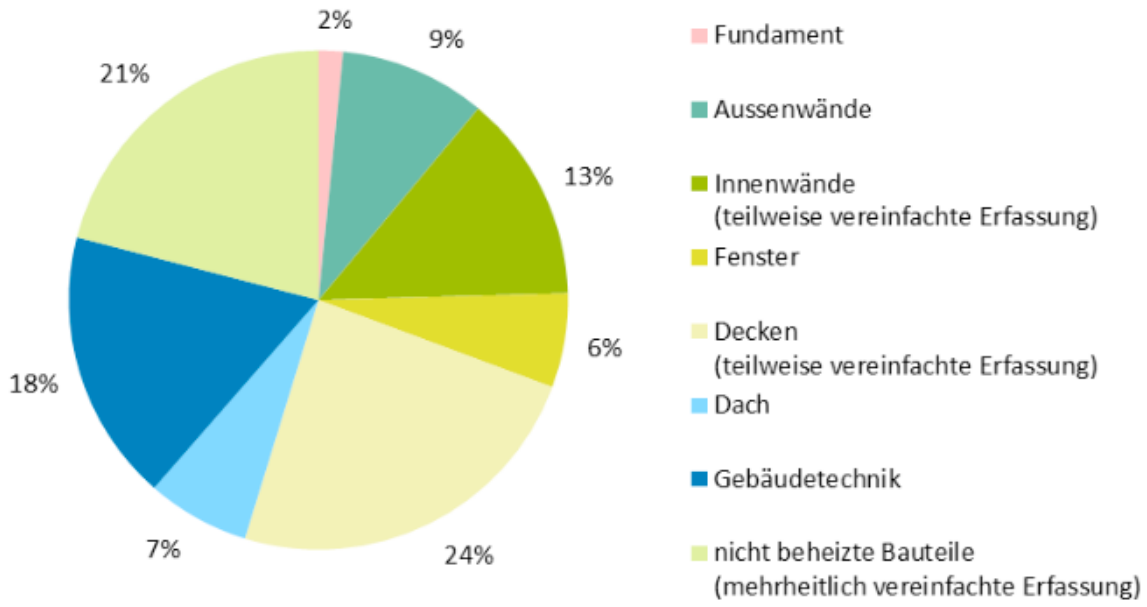

Abb. 4: Darstellung zur Analyse der Beiträge von Baumaterialien und Bauteilen anhand der Auswertung der MFH-Fallbeispiele aus der Studie „Klimapositives Bauen“, NEBS, 2021, S.80

Mit diesen prozentualen Anteilen der Bauteile an den gesamthaft verursachten THG-Emissionen können folgende Referenzwerte zu den Richtwerten B und A der SIA 390/1 für die Erstellung hergeleitet werden:

	2025
Jährliche THG-Emissionen in kg/m²	
Richtwert Erstellung Wohnen/Neubau für Zielwert B (SIA 390/1)	**9,00**
Fundament 2%	0,18
Aussenwände 9%	0,81
Innenwände 13%	1,17
Fenster 6%	0,54
Decken 24%	2,16
Dach 7%	0,63
Gebäudetechnik 18%	1,62
Nicht beheizte Bauteile 21%	1,89

Abb. 5: Richtwert B der THG-Emissionen in kg/m²a für die einzelnen Bauteile, eigene Darstellung

	2025
Jährliche THG-Emissionen in kg/m²	
Richtwert Erstellung Wohnen/Neubau für Zielwert A (SIA 390/1)	**6,00**
Fundament 2%	0,12
Aussenwände 9%	0,54
Innenwände 13%	0,78
Fenster 6%	0,36
Decken 24%	1,44
Dach 7%	0,42
Gebäudetechnik 18%	1,08
Nicht beheizte Bauteile 21%	1,26

Abb. 6: Richtwert A der THG-Emissionen in kg/m²a für die einzelnen Bauteile, eigene Darstellung

Es zeigt sich, dass ein grosser Anteil der THG-Emissionen aufgrund der Gebäudetechnik verursacht wird. Da sich die Arbeit auf Bauteile fokussiert, wird dieser Anteil nicht weiter untersucht.

Zu jedem Bauteil, das bilanziert werden soll, wird ein Referenzbauteil aus gängigen konventionellen Baustoffen erstellt. An diesem Referenzbauteil werden nach und nach die konventionellen Baustoffe durch eine natürliche Variante ersetzt. Begonnen wird mit den Baustoffen der Konstruktion, es folgen jene der Dämmung und abschliessend ausgewählte Teile des Ausbaus.

Der Gehalt an biogenem CO_2 in den natürlichen Baustoffen wird anhand der „Ökobilanzdaten im Baubereich“ der KBOB erfasst (siehe Kapitel 3.4.3). Für jedes Bauteil wird der gesamte CO_2-Speicher in kg C pro kg Bauteil angegeben. Der Speicher wird nicht als Senke angerechnet.

Auswertung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung basieren auf einem relativen Ansatz (siehe oben). Sie zeigen mögliche Umweltwirkungen und sagen „keine tatsächlichen Wirkungen auf Wirkungsendpunkte, Grenzwertüberschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitspannen oder Gefahren“ (SNV, 2006, ISO 14040, S.22) voraus.

Anhand der Einordnung der Ergebnisse der bilanzierten Bauteile zu ihren jeweiligen Richtwerten und zu den berechneten THG-Emissionen ihrer Referenzbauteile werden Vergleiche gezogen und anschliessend Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur verfolgten Strategie gemacht. So ist eine Aussage möglich, ob mit dem Einsatz natürlicher Baustoffe das Netto-Null-Ziel der Schweiz erreicht werden kann. Gleichzeitig kann mithilfe des Vergleichs der Ergebnisse der Bauteile zu jenen der Referenzbauteile angegeben werden, wie effizient mithilfe biobasierter Baustoffe THG-Emissionen eingespart werden können.

3.4.2 Rahmenbedingungen (Merkblatt SIA 2032)

Die Rahmenbedingungen für die Ökobilanzierung werden anhand der SIA 2032 gesetzt. Wie bereits geschrieben, beschränkt sich die Bilanzierung auf die Erstellung von einzelnen Bauteilen eines Gebäudes. Es wird also kein gesamtes Gebäude bilanziert und somit Umgebung, Betrieb und Mobilität nicht beachtet. Zudem werden, wie in Kapitel 3.1 erläutert, Aspekte zur Reduktion der Menge, zur Verlängerung der Nutzungsdauer und zur Wieder- oder Weiterverwendung nicht berücksichtigt und nur ein Neubau betrachtet. Zum Bereich der Erstellung gehören gemäss SIA 2032 folgende mit x markierten Phasen des Lebenszyklus der Bauteile:

Phasen gemäss SN EN 15804	Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase			
	Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Errichtung, Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Betrieblicher Energieeinsatz	Betrieblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Bereich Erstellung gemäss SIA 2032	x	x	x	(x)	(x)				x				x	x	x	x

Abb. 7: Darstellung zu den Phasen des Bereichs Erstellung gemäss Merkblatt SIA 2032, S.12. Phasen, die mit (x) markiert sind, werden in der Bilanzierung vernachlässigt.

Die Lebensdauer eines Gebäudes ist gemäss SIA 2032 auf 60 Jahre festgelegt. Daran orientieren sich die Amortisationszeiten, welche der jeweiligen Nutzungsdauer der Bauteile gemäss Anhang C der SIA 2032 entsprechen. Konkret bedeutet das am Beispiel des Bauteils Aussenwand über Terrain, dass seine Konstruktion eine Nutzungsdauer von 60 Jahren hat, also über den Lebenszyklus des Gebäudes nicht ersetzt werden muss. Die äussere Wandbekleidung der Aussenwand (z.B. Putz) hat dagegen eine Lebensdauer von 30 Jahren, wird also nach der Hälfte der Lebensdauer des Gebäudes ersetzt. Die Sachbilanz für die äussere Wandbekleidung fliesst demnach zweifach in die Gesamtbilanzierung ein.

Die wichtigsten Treibhausgase, die bilanziert werden sollen, wurden bereits in Kapitel 3.1 genannt. Die „kumulierte Menge verschiedener Treibhausgase“ wird als THG-Emission bezeichnet und „als äquivalente CO_2-Emissionsmenge (CO_2eq) ausgedrückt“ (SIA, 2020, S.10).

Die räumliche Bezugsgrösse der Bilanzierung ist die Bauteilfläche in m^2. Die zeitliche Bezugsgrösse ist 1 Jahr. Es werden also die THG-Emissionen in kg pro Bauteilfläche und Jahr (kg CO_2eq/m^2a) angegeben. Bezogen auf die gesamte Lebensdauer des Bauteils entspricht der berechnete Wert somit „einem Sechzigstel aller absoluten Emissionen“ (NEBS, 2021, S.32).

Der Detaillierungsgrad der Berechnung entspricht der Phase Bauprojekt, d.h. es werden „differenzierte Werte bezüglich der Materialisierung“ (SIA, 2020, S.20) eingesetzt.

Gemäss der SIA 390/1 werden „Negativemissionen[6] notwendig sein, um verbleibende, schlecht vermeidbare Emissionen auszugleichen“ (SIA, 2025, S.4). Die Studie „Klimapositives Bauen“ macht einen Vorschlag, wie die CO_2-Speicherfähigkeit biogener Baustoffe berücksichtigt werden kann. Der Vorteil davon ist, dass dem biogen eingelagerten Kohlenstoff eine Senkenwirkung zugesprochen wird, die sich positiv auf die Gesamtbilanz der THG-Emissionen auswirkt. In der vorliegenden Arbeit ist eine Anrechnung von biogenem CO_2 nicht vorgesehen, da dies nur möglich ist, „wenn die dauerhafte Speicherung des biogenen CO_2 gesichert ist. Diese Möglichkeit ist heute de facto noch nicht vorhanden“ (BFE, 2024, S.6). Wie in Kapitel 3.4.1 geschrieben, wird daher nur der gewonnene CO_2-Speicher ausgewiesen.

3.4.3 Datengrundlage der Ökobilanzierung

Die Liste der „Ökobilanzdaten im Baubereich“ wurde von der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB), dem Verein ecobau und der Interessensgemeinschaft privater professioneller Bauherren (IPB) herausgegeben. Nachfolgend wird vereinfacht die KBOB als Herausgeberin genannt. Die Liste enthält Ökobilanzdaten zu Baumaterialien, Gebäudetechnik, Energiebereitstellung, Transporten und Entsorgungsprozessen.

Mit den Ökobilanzdaten ist eine Bewertung von Bauprodukten anhand ihrer Umweltbelastungspunkte möglich. Die Umweltbelastungspunkte geben „die durchschnittliche Umweltbelastung der auf dem Schweizer Markt abgesetzten Baumaterialien“ (KBOB, 2024) an und stellen eine Gesamtbewertung dar, die aus den ebenfalls aufgeführten Teilbewertungen zu Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar), THG-Emissionen und biogenem Kohlenstoffgehalt resultiert. Der biogene Kohlenstoffgehalt wird auch hier nur ausgewiesen und nicht als Negativemission auf die Gesamtbewertung angerechnet.

Relevant für die vorliegende Arbeit sind die Ökobilanzdaten der Baumaterialien. Berücksichtigt werden dabei deren Emissionen über ihre gesamte Versorgungskette, d.h. aus Scope 1 bis 3, die wie folgt definiert sind[7]:

[6] Negativemission bedeutet, dass CO2 der Atmosphäre entzogen und dauerhaft gespeichert wird. Da es sich hierbei um das Gegenteil von Emissionen handelt, werden diese Verfahren oder Technologien oft als „negative Emissionen“ oder „Senken“ bezeichnet. (**MyClimate.** (2024, Oktober 28). *Was sind „Negativemissionen“?* Abgerufen von https://www.myclimate.org/de-ch/informieren/faq/faq-detail/was-sind-negativemissionen/)

[7] Quelle für Definition Scope 1,2 und 3: **Climate Partner.** (2022, Mai 19). *Was sind Scope-1-, -2- und -3-Emissionen?.* Abgerufen von https://www.climatepartner.com/de/wissen/insights/scope-emissionen-reduzieren

- Scope 1: Direkte standortgebundene THG-Emissionen, die direkt vom Unternehmen, das die Materialien herstellt, verursacht werden. Dazu gehören Emissionen aus Energieträgern und durch den Betrieb verursachte Emissionen.
- Scope 2: Indirekte THG-Emissionen aus eingekaufter Energie, die ausserhalb des Unternehmens erzeugt wird, aber von ihm verbraucht wird.
- Scope 3: Indirekte THG-Emissionen innerhalb der Wertschöpfungskette. Hier wird zwischen vorgelagerten, d.h. jenen aus eingekauften Waren und Dienstleistungen, und nachgelagerten THG-Emissionen, d.h. jenen, die nach dem Verkauf der im Unternehmen produzierten Waren oder Dienstleistungen entstehen, unterschieden.

Die Ökobilanzdaten berücksichtigen somit alle Prozesse der Herstellung und Entsorgung und erfüllen die Anforderungen, die im Kapitel 3.4.1 zur Sachbilanz definiert wurden.

Die Menge der THG-Emissionen der einzelnen Materialien, die bei deren Herstellung und Entsorgung, sowie im Totalen anfallen, wird in kg CO_2eq aufgeführt. Der jeweilige biogene Kohlenstoff wird, wie bereits erwähnt, in kg C angegeben. Damit kann der gesamte CO_2-Speicher eines Bauteils in Abhängigkeit von seinem Gewicht pro kg berechnet werden. Das Gewicht wird über die Dichte jedes Materials ermittelt. Sie wird in der KBOB-Liste ebenfalls ausgewiesen. Es gilt, je dichter ein Baustoff ist, desto höher ist seine Menge an THG-Emissionen.

Es wird die Version 6.2 2009/1:2022 der Ökobilanzdaten verwendet.

4. Massnahmen und Resultate

4.1 Auswahl der Bauteile für die Ökobilanz

Gemäss SIA 2032 müssen alle Bauteile des elementbasierten Baukostenplan Hochbau (eBKP-H) bei der Ökobilanzierung eines gesamten Gebäudes berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf Aussenwand und Geschossdecke gelegt. Wie die Herleitung der Referenzwerte wird diese Auswahl mit der Abbildung 4, die aus der Studie „Klimapositives Bauen“ stammt, begründet. In Kapitel 3.4.1 (Wirkungsabschätzung) wurde erklärt, dass hier die Beiträge der Bauteile an den gesamthaften THG-Emissionen eines Gebäudes aufgeführt sind. Es sollen die Bauteile bilanziert werden, die eine besonders treibende Kraft hinsichtlich der THG-Emissionen haben. Gemäss der Darstellung liegt der grösste Anteil mit 24% bei den Decken. Als weiteres Bauteil soll eines der Gebäudehülle (Fundament, Aussenwände, Fenster und Dach) untersucht werden. Hier fällt der grösste Anteil mit 9% den Aussenwänden zu.

Gemäss Elementgruppen nach eBKP-H werden somit die Ökobilanzen folgender Bauteile ermittelt:

- C02.01 (B) Aussenwandkonstruktion (über Terrain)
- C04.01 Geschossdecke
- E02 Äussere Wandbekleidung über Terrain
- G02 Bodenbelag
- G03 Wandbekleidung
- G04 Deckenbekleidung

4.1.1 Aufbau Referenzbauteil und Varianten Aussenwand

Damit die Varianten des Bauteils Aussenwand vergleichbar sind, müssen alle Aufbauten folgenden Grenzwert für den flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) gemäss SIA 380/1:2016 Tabelle 2 für Neubauten einhalten: 0.17 W/(m^2*K).

Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, dass lastabtragende Konstruktionen aus Lehm und Stroh nur für Gebäude geringer Höhe möglich sind. Daher wird zwischen folgenden statischen Kategorien unterschieden:

- Kategorie 1: Gebäude geringer Höhe: bis 11m Gesamthöhe
- Kategorie 2: Gebäude mittlerer Höhe: bis 30m Gesamthöhe

Referenzbauteil

Auch der Aufbau des Referenzbauteils muss den geforderten U-Wert einhalten und für die beiden statischen Kategorien anwendbar sein. Wie bereits geschrieben, werden hierfür gängige konventionelle Baustoffe verwendet. In der „Studie über das verbaute Material in der Schweiz“, welche im Jahr 2021 vom Schweizerischen Baumeisterverband (SBV) herausgegeben wurde, wurde eindeutig festgestellt, dass Beton das am meisten gebrauchte Material ist. Daher wird dieser Baustoff für die Konstruktion eingesetzt. Gängige Materialien für die Dämmung sind Steinwolle, Glaswolle oder Polysterol. Aufgrund seiner brandschutztechnischen Eigenschaften kann eine Dämmung aus Steinwolle homogen als Fassadendämmung in beiden Kategorien eingesetzt werden. Daher wird ein Dämmstoff aus Steinwolle gewählt. Der äussere Abschluss wird mit einem mineralischen Putz ausgebildet und der innere mit Gipsfaserplatten und/oder einem Gipsputz.

Varianten

Neben der lastabtragenden Strohballenwand und der Stampflehmwand sollen für die oben definierten Kategorien gängige Holzkonstruktionen bilanziert werden. Dazu gehören eine massive Holzwand und eine Holzständerwand. Beide Konstruktionen sind sowohl in Kategorie 1 als auch 2 anwendbar. Die massive Holzwand wird aus Brettschichtholz konstruiert. Bei den Holzständerkonstruktionen gibt es eine Variante mit Balken aus Vollholz und eine mit Balken aus Brettschichtholz. Alle Varianten werden zunächst wie das Referenzbauteil gedämmt und innen verkleidet. Anschliessend werden die in Kapitel 3.2 vorgestellten Dämmmaterialien eingesetzt und in einem weiteren Schritt die definierten Verkleidungen im Innenraum.

Bei der Stampflehmwand wird innen eine Konstruktion aus Holzständern (Vollholz und Brettschichtholz) errichtet und deren Zwischenräume zunächst mit der konventionellen Dämmung und dann mit den natürlichen Dämmmaterialien gefüllt. Die Dämmschicht ist innenliegend, da die Stampflehmwand aussen sichtbar sein soll. Die Herstellung der Lehmwand ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Aufwand aus ästhetischen Gründen in Kauf genommen wird und die Wand somit nach der Fertigstellung weiterhin sichtbar sein soll (siehe auch Erfahrungsbericht Rainer Hettenbach im Anhang, Kapitel 7.3). Der innere Abschluss der Wand wird zunächst auch mit einer Gipsfaserplatte und einem Gipsputz ausgeführt, damit das Bauteil mit den

anderen Aussenwänden vergleichbar ist. Grundsätzlich ist jedoch eher davon auszugehen, dass bei einer Stampflehmwand konsequenterweise auch im Innenraum Lehmbauplatten und Lehmputz eingesetzt werden.

Bei der Strohballenwand gibt es nur eine Variante, da das Stroh Dämmung und Tragkonstruktion in einem ist. Aussen wird die Wand mit einer dicken Schicht Kalkputz verkleidet, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. An der Innenseite wird eine ebenfalls dicke Schicht Lehmputz aufgetragen. Die Innenputze einer Strohballenwand „bilden den Raumabschluss und regulieren idealerweise das Raumklima. Dafür eignen sich Lehmputze besonders gut, da sie die Trockenheit des Strohs ausgleichen. Je wärmer das Aussenklima ist, umso wichtiger ist es, im Inneren eine dicke Schicht Lehmputz, anstatt z.B. einer Verkleidung aus Gipskarton- oder Gipsfaserplatten, zu verwenden, damit im Sommer die Bauteile Wärme besser abpuffern“ (Liedl und Rühm, 2019, S.87). Daher wird bei dieser Konstruktion kein Gipsputz angewendet. Diese Variante kann somit nur mit dem Endzustand der anderen Varianten, also wenn auch hier der Lehmputz aufgetragen wurde, verglichen werden.

Der genaue Aufbau der einzelnen Konstruktionen inklusive Angaben zu den erreichten U-Werten sind im Anhang (Kapitel 7.1) zu finden.

4.1.2 Aufbau Referenzbauteil und Varianten Geschossdecke

Die Bauteilvarianten zur Geschossdecke müssen folgende Mindestanforderung an Luft- und Trittschall einhalten:

- Mindestanforderung D_l an den Luftschallschutz gegenüber internen Lärmquellen gem. SIA 181:2020 Tabelle 4: 52 dB (Lärmbelastung mässig, Nutzung normal, Lärmempfindlichkeit mittel) und
- Mindestanforderung L‘ an den Trittschallschutz gegenüber internen Lärmquellen gem. SIA 181:2020 Tabelle 5: 53 dB (Lärmbelastung mässig, Lärmempfindlichkeit mittel)

Für beide Mindestanforderungen wird eine mässige Lärmbelastung und mittlere Lärmempfindlichkeit bei normaler Nutzung angenommen. Es ist zu beachten, dass der Luftschallschutz umso besser eingehalten wird, je höher der Projektwert im Vergleich zum Anforderungswert ausfällt. Beim Trittschall ist es genau andersherum, d.h. je tiefer der Projektwert im Vergleich zum Anforderungswert ausfällt, desto besser ist der Trittschallschutz.

Gleichzeitig müssen mit allen Konstruktionen die für den Wohnungsbau gängigen Spannweiten von 5 – 6 Metern möglich sein.

Referenzbauteil

Diese Vorgaben gelten auch für den Aufbau des Referenzbauteils zur Geschossdecke. Die Baustoffe werden analog zum Referenzbauteil der Aussenwand gewählt, d.h. Beton für die Konstruktion, Steinwolle oder Glaswolle als Trittschalldämmung sowie Gipsfaserplatten und/oder Gipsputz für den unteren Deckenabschluss. Für den Bodenaufbau wird jeweils ein Unterlagsboden aus Zement und Parkett als Bodenbelag gewählt.

Varianten

Auch bei den Geschossdecken werden für die definierten Spannweiten gängige Konstruktionen eingesetzt. Dazu gehören eine Holz-Beton-Verbunddecke, eine Holz-Lehm-Decke, eine massive Brettstapeldecke, eine Holzbalkendecke mit aufliegender Schüttung und eine Hohlkastendecke mit verschiedenen Füllungen. Die Holz-Beton-Verbunddecke gibt es in zwei Varianten. Einmal wird sie mit einer vollflächigen Brettschichtplatte konstruiert und einmal mit Brettschichtbalken. Die Holz-Lehmdecke wird ebenfalls mit Brettschichtbalken, zwischen denen Lehmausfachung eingespannt werden, aufgebaut. Bei der Holzbalkendecke wird als konventionelle Schüttung Kalksplitt verwendet, welche dann durch eine Holz-Lehm-Schüttung ersetzt wird. Aufgrund der definierten Spannweiten müssen Balken bzw. Platten aus Brettschichtholz verwendet werden. Bei allen Varianten werden ebenfalls als erstes die in Kapitel 3.2 vorgestellten Dämmmaterialien und in einem nächsten Schritt die natürliche Verkleidung der Deckenuntersicht eingesetzt.

Als Orientierung für die Schallschutzwerte, die mit den unterschiedlichen Deckenkonstruktionen erreicht werden können, wurden vergleichbare Bauteile von Lignum verwendet. Genaue Angaben, welche Werte für Luft- und Trittschallschutz mit den jeweiligen Konstruktionen erzielt werden, sind im Anhang (Kapitel 7.2) zu finden. Hier ist auch vermerkt, welches Bauteil von Lignum als Grundlage zur Verfügung stand.

4.2 Fehlende Werte in KBOB-Liste

Für folgende Materialien sind keine Daten in der KBOB-Liste vorhanden:

- Lehmbauplatte
- Hanf als lose Dämmfasern
- Hanfschäben
- Schilfmatte als Dämmung
- Kalksplitt-Schüttung
- Holz-Lehm-Schüttung

Die Herleitung dieser fehlenden Werte orientiert sich weiterhin an Werten der KBOB-Liste. So wird sichergestellt, dass alle Daten auf einer identischen Quelle beruhen und die gleichen Rahmenbedingungen besitzen. Es werden folgende Daten angenommen:

Lehmbauplatte (Liedl und Rühm, 2019, S.121 und Haga AG, 2024)
Lehmbauplatten bestehen in der Regel aus Lehm, Ton, unbehandelten natürlichen Holz- oder anderen Pflanzenfasern und Stärke (z.B. HAGA 498.0 Lehmbauplatte). Die Holzfasern dienen als Stabilisierung. Die Stärke wird aus pflanzlichen Fasern gewonnen. Bei ihrer Herstellung werden die Rohstoffe vermengt, gepresst und anschliessend getrocknet. Sie müssen nicht mit Wärme behandelt werden. Die Dichte der Platten ist aufgrund der beigemischten Holz- oder Pflanzenfasern geringer als die von Lehmputz.

Die Hauptbestandteile der Platten sind Lehm, Ton und Holzfasern. Die Stärke nimmt meist nur einen geringen Anteil (unter 1%) ein und soll daher vernachlässigt werden. In den Berechnungen werden daher die Werte von Lehmputz und Holzfasern zu gleichen Anteilen aus der KBOB eingesetzt.

Die Platte gibt es in unterschiedlichen Stärken. Mit einer Stärke von 16mm oder weniger ist bei der Verkleidung von Wänden eine flächige Unterkonstruktion (z.B. OSB-Platten) notwendig. Bei Decken und Dachschrägen können die dünnen Platten direkt auf die Unterkonstruktion montiert werden. Mit einer Stärke von 22mm ist bei Wänden, Decken und Dachschrägen eine direkte Montage auf den Ständern möglich.

Hanf als lose Dämmfasern

Hanf ist wie Flachs ein Dämmstoff, der aus den Fasern der Pflanzen gewonnen wird. Für Dämmmatten aus Hanf und Flachs werden in der KBOB die gleichen Werte für die THG-Emissionen in der Herstellung und Entsorgung angenommen bei einer Dichte von 50kg/m^3. Für lose Hanffasern gibt es in der KBOB keinen Wert, für lose Flachsfasern hingegen schon. Daher werden hier für Hanf die Werte der Flachsfasern eingesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit ist mit 0.043 W/(m*K) ebenfalls identisch.

Gemäss den Ausführungen oben kann davon ausgegangen werden, dass bei Dämmungen aus Hanf oder Flachs die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Daher werden die beiden Dämmvarianten zusammengeführt und nur einmal berechnet.

Hanfschäben

Als Hanfschäben werden die verholzten Teile der Hanfstängel bezeichnet. Sie fallen bei der Gewinnung der Hanffasern an. Im Unterschied zu den Hanffasern, müssen sie nicht weiterverarbeitet werden. Ihr Aufwand in der Herstellung ist somit deutlich geringer (Energie Experten, 2024). Wie auch bei den Hanffasern (siehe oben), werden hier trotzdem die Werte der losen Flachsfasern aus der KBOB eingesetzt, da der gleiche Rohstoff zugrunde liegt. Um den Hanfschäben eine bessere Bilanz bei den THG-Emissionen zu ermöglichen, im Vergleich zu den Flachsfasern, wird die Dichte reduziert. Dadurch wird das Total der THG-Emissionen geringer. Werden Hanfschäben als Schüttung in einer Hohlkastendecke verwendet, haben sie eigentlich eine Dichte von ca. 100kg/m^3 (z.B. Hanfschäben der Firma Cannabric). Diese Dichte wird bei der Berechnung des biogenen Kohlenstoffspeichers berücksichtigt. Für die Bilanzierung der THG-Emissionen wird die Dichte der Flachsfasern (50kg/m^3) halbiert.

Schilfrohrplatten

Wie in Kapitel 3.2 geschrieben, werden bei der Herstellung der Schilfplatten die Schilfrohre geerntet, gepresst und mit Drähten zusammengebunden. Der Prozess wie auch der Rohstoff des Dämmstoffs gleichen einer Dämmung aus Strohballen. Daher werden hier die Werte einer Strohballenwand der KBOB eingesetzt. Die Dichte von Schilfrohrmatten liegt bei ca. 190 kg/m^3 (z.B. Schilfrohrmatten der Firma Conluto). Sie ist somit etwas weniger dicht als ein Strohballen. Die Dichte wird bei den Berechnungen entsprechend angepasst.

Kalksplitt-Schüttung

Kalksplitt ist zerkleinerter Kalkstein. Daher werden hierfür die Werte einer Kalksteinplatte aus der KBOB übernommen. Die Dichte der Kalksplitt-Schüttung ist mit ca. 1‘400 kg/m^3 (z.B. Kalksplitt KS1400 der Firma H&F AG) geringer als die der Kalksteinplatte. Dies wird bei der Berechnung entsprechend berücksichtigt.

Holz-Lehm-Schüttung

Eine Holz-Lehm-Schüttung besteht aus Holzspänen, die mit Lehm umschlossen sind. Für den Lehm werden die Werte des Lehmputz der KBOB eingesetzt. Da sie aus dem gleichen Rohstoff bestehen, werden für die Holzspäne die Werte der Holzfasern verwendet. Jedoch wird auch hier, analog zu den Hanfschäben (siehe oben), die Dichte angepasst. Holzspäne sind ein Abfallprodukt, das bei holzverarbeitenden Betrieben entsteht (Liedl und Rühm, 2019, S.106). Sie müssen im Gegensatz zu den Holzfasern nicht weiterverarbeitet werden. Auch hier wird die Dichte der Holzfasern (80 kg/m^3) halbiert und so die Bilanz der THG-Emissionen verbessert. Die eigentliche Dichte dieser Schüttung liegt bei ca. 500 kg/m^3 (z.B. Nature Floor der Firma OES GmbH) und wird für die Berechnung des Kohlenstoffspeichers berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Schüttung zu zwei Dritteln aus Holzspänen und zu einem Drittel aus Lehmputz besteht.

4.3 Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

Im Anhang (Kapitel 7.1 und 7.2) werden die Ergebnisse zu den Umweltbelastungspunkten, zur Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) und zu den THG-Emissionen inklusive der dazugehörigen Berechnungen aufgeführt. Ausgewertet werden nur die Ergebnisse zu den THG-Emissionen, da, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, die Wirkung der umgesetzten Massnahmen hier stellvertretend für die anderen Ergebnisse eingeschätzt und ein Bezug zum Netto-Null-Ziel hergestellt werden kann.

Die Ergebnisse werden zunächst separat für die Varianten der Aussenwände und der Geschossdecken ausgewertet. Zu Beginn wird für beide Bauteile das Ergebnis des jeweiligen Referenzbauteils angeschaut. Danach wird der erste Schritt analysiert, d.h. wie sich das Total der THG-Emissionen verändert, wenn die Konstruktion mit natürlichen Materialien anstelle von Beton ausgeführt wird. Es folgt eine Auswertung der Ergebnisse des zweiten Schritts, also der Einsatz biobasierter Dämmmaterialien anstelle von Steinwolle. Als letztes werden die Auswirkungen auf die THG-Emissionen betrachtet, wenn die Verkleidung im Innenraum bzw. an der Unterseite der Geschossdecke

mit natürlichen Baustoffen erfolgt. Gleichzeitig erfolgt bei jedem Schritt ein Bezug zu den beiden Referenzwerten der Richtwerte B und A, die in Kapitel 3.4.1 hergeleitet wurden.

Neben einer Einordnung zu den THG-Emissionen wird auch der biogene Kohlenstoffspeicher aller Varianten ausgewiesen und ausgewertet. Ausserdem wird die jeweilige Gesamtdicke der einzelnen Konstruktionen angegeben und auch hierzu eine Einordnung in Bezug auf das Referenzbauteil gemacht.

Abschliessend wird ein Bezug zwischen den Ergebnissen der Aussenwände und der Geschossdecken hergestellt.

4.3.1 Ergebnisse Aussenwände

Der Zielwert B für Aussenwände liegt gemäss der Herleitung in Kapitel 3.4.1 bei 0.81 kg/m^{2}a, der Zielwert A bei 0.54 kg/m^{2}a.

Referenzbauteil

	Bauteil	Dicke	Biogener Kohlenstoffspeicher	TGHE Herstellung	TGHE Entsorgung	TGHE Total
	Nr.	m	[kg/kg]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	[kg/m2a]
Referenzbauteil	00	0,46	0,00	1,84	0,17	2,00

Abb. 8: Ergebnisse Referenzbauteil Aussenwand, eigene Darstellung

Wie in Kapitel 4.1.1 festgelegt, wird die Referenz zu den Aussenwänden aus Beton konstruiert, mit Steinwolle gedämmt und aussen mit einem Kalkputz sowie innen mit einem Gipsputz verkleidet. Die beiden Zielwerte können mit dieser Konstruktion nicht eingehalten werden. Im Gegenteil, es besteht eine sehr grosse Diskrepanz zwischen Ist- und Soll-Zustand. Zudem kann mit diesem Bauteil kein biogener CO_2-Speicher zur Verfügung gestellt werden.

Änderung der Konstruktion (Schritt 1)

	Bauteil	Dicke	Biogener Kohlenstoffspeicher	TGHE Herstellung	TGHE Entsorgung	TGHE Total	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil
	Nr.	m	[kg/kg]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	
Massive Brettschichtwand	01.1	0,33	25,75	0,95	0,10	1,05	47,58%
Holzständer Vollholz	01.2	0,32	4,58	0,83	0,07	0,90	54,86%
Holzständer Brettschicht	01.3	0,32	4,63	0,86	0,08	0,93	53,36%
Stampflehmwand Vollholz	01.4	0,72	1,21	0,83	0,07	0,90	54,93%
Stampflehmwand Brettschicht	01.5	0,72	1,26	0,82	0,07	0,90	55,28%
Strohballenwand	01.6	0,88	63,30	0,75	0,05	0,81	59,71%

Abb. 9: Ergebnisse Aussenwände mit angepasster Konstruktion, eigene Darstellung

Alle berechneten Varianten wirken sich positiv auf die THG-Emissionen aus. Bei den Stampflehmwänden (Nr. 01.4 und 01.5) und den Holzständerkonstruktionen (Nr. 01.2 und 01.3) liegt das Sparpotenzial bei ca. 55 %. Da das Total der THG-Emissionen bei beiden Lehmvarianten gleich ist, wird im Folgenden nur die Variante mit Vollholz weiter berechnet. Bei den Holzständervarianten erzielt die Ausführung mit Vollholz ein leicht besseres Ergebnis als jene aus Brettschichtholz. Die massive Holzwand (Nr. 01.1) erreicht ein Sparpotenzial von 47%. Die Strohballenwand kann, wie erwähnt, erst in Bezug zu den anderen Varianten gesetzt werden, wenn auch bei ihnen der innere Abschluss mit natürlichen Baustoffen ausgeführt wird.

Es entsteht ein biogener Kohlenstoffspeicher. Da Lehm keinen biogenen Speicher besitzt, kann bei den Stampflehmwänden (Nr. 01.4 und 01.5) nur wenig Kohlenstoff in den jeweiligen Holzkonstruktionen eingelagert werden. Die Varianten mit Holz als tragendem Element haben einen höheren Speicher, wobei die massive Brettschichtwand (Nr. 01.1) einen deutlich grösseren Speicher besitzt. Die Strohballenwand (Nr. 01.6) hat eindeutig den grössten CO_2-Speicher und kann bereits in diesem Schritt mit den anderen Varianten verglichen werden, da der Lehmputz hier keinen Vorteil bietet.

Die Aussenwände mit einer massiven Holzwand und mit den beiden Ständerkonstruktionen sind weniger dick als das Referenzbauteil. Bei den Stampflehmwänden und der Strohballenwand steigt die Wandstärke dagegen deutlich an. Diese Stärken sind, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, notwendig, um die auftretenden Lasten abtragen zu können.

Die beiden Zielwerte B (0.81 kg/m^{2}a) und A (0.54 kg/m^{2}a) für die Aussenwandaufbauten 01.1 - 01.5 können nicht eingehalten werden.

Änderung der Dämmung (Schritt 2)

	Bauteil Nr.	Dicke m	Biogener Kohlenstoffspeicher [kg/kg]	TGHE Herstellung [kg/m2a]	TGHE Entsorgung [kg/m2a]	TGHE Total [kg/m2a]	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Bauteil aus Schritt 1
Massive Brettschichtwand Holzfaserplatte	02.11	0,35	34,38	1,11	0,13	1,24	38,15%	-18,00%
Holzständer Vollholz Holzfaserplatte	02.12	0,32	13,46	0,93	0,10	1,03	48,58%	-13,92%
Holzständer Brettschicht Holzfaserplatte	02.13	0,32	13,51	0,96	0,10	1,06	47,08%	-13,48%
Stampflehmwand Vollholz Holzfaserplatte	02.14	0,74	10,72	1,22	0,13	1,35	32,49%	-49,80%
Holzständer Vollholz Holzfaser lose	02.15	0,32	9,46	0,82	0,08	0,90	55,17%	0,68%
Holzständer Brettschicht Holzfaser lose	02.16	0,32	9,51	0,85	0,08	0,93	53,67%	0,66%
Massive Brettschichtwand Flachs-/Hanfdämmplatte	02.21	0,37	30,15	0,95	0,15	1,10	45,20%	-4,54%
Holzständer Vollholz Flachs-/Hanfdämmplatte	02.22	0,34	8,98	0,81	0,11	0,92	53,88%	-2,17%
Holzständer Brettschicht Flachs-/Hanfdämmplatte	02.23	0,34	9,03	0,84	0,11	0,95	52,38%	-2,10%
Stampflehmwand Vollholz Flachs-/Hanfdämmplatte	02.24	0,76	6,02	1,03	0,15	1,18	41,09%	-30,73%
Holzständer Vollholz Flachs-/Hanffaser lose	02.25	0,34	7,73	0,80	0,10	0,90	54,85%	-0,02%
Holzständer Brettschicht Flachs-/Hanffaser lose	02.26	0,32	7,46	0,81	0,09	0,90	55,04%	3,60%
Holzständer Vollholz Zellulose	02.31	0,32	10,11	0,77	0,08	0,85	57,38%	5,58%
Holzständer Brettschicht Zellulose	02.32	0,32	10,16	0,80	0,08	0,88	55,88%	5,40%
Holzständer Vollholz Stroh	02.41	0,34	12,84	0,81	0,08	0,89	55,67%	1,79%
Holzständer Brettschicht Stroh	02.42	0,34	12,89	0,84	0,08	0,92	54,17%	1,73%
Stampflehmwand Vollholz Stroh	02.43	0,76	9,54	0,79	0,06	0,84	57,94%	6,67%
Massive Brettschichtwand Schilfrohrmatte	02.51	0,47	46,73	0,87	0,07	0,94	52,98%	10,29%
Holzständer Vollholz Zellulose + Schilfrohrmatte	02.52	0,34	12,11	0,68	0,06	0,74	62,88%	17,76%
Holzständer Brettschicht Zellulose + Schilfrohrmatte	02.53	0,34	12,16	0,71	0,06	0,77	61,38%	17,19%
Holzständer Vollholz Stroh + Schilfrohrmatte	02.54	0,38	14,95	0,64	0,05	0,69	65,31%	23,15%
Holzständer Brettschicht Stroh + Schilfrohrmatte	02.55	0,36	15,22	0,72	0,05	0,77	61,71%	17,89%

Abb. 10: Ergebnisse Aussenwände mit angepasster Dämmung, eigene Darstellung

Mit einer Änderung der Dämmung werden nicht automatisch zusätzliche THG-Emissionen gespart. Im Gegenteil, mit dem Einsatz einer Holzfaser- oder Flachs-/Hanfdämmplatte wird das Ergebnis aus dem ersten Schritt sogar teilweise wieder schlechter (siehe rot markierte Zellen in Abb. 10). Die THG-Emissionen, die für die Herstellung und Entsorgung dieser Dämmplatten benötigt werden, sind höher als jene der Dämmplatte aus Steinwolle. Hinzu kommt, dass dickere Dämmschichten notwendig sind, da die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaser- bzw. Flachs-/Hanfdämmplatten höher ist als die von Steinwolle. Somit ist mehr Dämmmaterial notwendig, um den geforderten U-Wert einhalten zu können. Eine Verbesserung zeigt sich, wenn lose Holz- und Flachs-/Hanffasern eingesetzt werden. Der Aufwand in der Herstellung ist hier geringer, daher ist die THG-Bilanz dieser Dämmstoffe besser.

Trotzdem steigt das Sparpotenzial der Bauteile mit dieser Dämmung (Nr. 02.15, 02.16, 02.25 und 02.26), wenn überhaupt, nur geringfügig an. Ebenso verhält es sich, wenn für die Dämmung zwischen den Holzbalken Zellulose oder Stroh (Nr. 02.31 bis 02.43) eingesetzt werden. Eine grössere Reduktion der THG-Emissionen im Vergleich zum vorherigen Schritt ist bei den Holzständerkonstruktionen mit Zellulose bzw. Stroh zwischen den Balken und Schilfrohrmatten als äusserem Abschluss (Nr. 02.52 bis 02.55) möglich. Gegenüber dem Referenzbauteil lassen sich damit Sparpotenziale von bis zu 65% generieren. Auch die massive Brettschichtwand erzielt eine deutlich höhere Reduktion, wenn sie aussen mit einer Schilfrohrmatte (Nr. 02.51) gedämmt wird. Insgesamt bleibt das Portenzial dieser Variante jedoch hinter dem der Holzständerkonstruktionen mit einer aussenliegenden Schilfrohrdämmung zurück.

Der biogene CO_2-Speicher steigt konsequent weiter an, da der Anteil der biobasierten Baustoffe zunimmt. Der Anstieg ist, wie im ersten Schritt, bei den Konstruktionen mit Holz in der Tragfunktion höher als bei den Stampflehmwänden. Die massive Brettschichtwand hat in allen Varianten (Nr. 02.11, 02.21, 02.51) weiterhin den grössten Speicher.

Die Wandstärken bei den Holzständerwänden bewegen sich immer noch unter jener des Referenzbauteils. Die Stampflehmwand ist mit allen Dämmvarianten deutlich dicker als das Referenzbauteil. Die massive Brettschichtwand wird in Kombination mit einer Dämmung ausschliesslich aus Schilfrohrmatten ebenfalls deutlich stärker. Das liegt daran, dass die Wärmeleitfähigkeit des Schilfrohrs mit 0.55 W/mK eher hoch ist und daher eine dickere Dämmschicht notwendig ist, um den geforderten U-Wert zu erhalten.

Der Zielwert A kann mit keiner der Varianten eingehalten werden. Auch der Zielwert B wird mit fast allen Varianten verfehlt. Einzig die Ständerkonstruktionen mit einer Dämmung aus Stroh oder Zellulose zwischen den Balken sowie einer äusseren Dämmschicht aus Schilfrohrmatten (Nr. 02.52 bis 02.55) unterschreiten den Zielwert von maximal 0.81 kg/m^{2}a THG-Emissionen.

Die Holzständerkonstruktionen mit den Holz- und Flachs-/Hanffaserplatten (Nr. 02.12, 02.13, 02.22, 02.23) werden im Folgenden nicht weiter berechnet. Es wird anhand der massiven Brettschichtwand (Nr. 02.11, 02.21) und der Stampflehmwand (Nr. 02.14, 02.24) untersucht, wie sich die THG-Emissionen unter Verwendung dieser Dämmmaterialien weiterentwickeln. Ebenso werden die Ständerkonstruktionen mit einer Strohdämmung (Nr. 02.41, 02.42) bzw. einer Zellulose- und

Schilfrohrdämmung (Nr. 02.52, 02.53) nicht weiterverfolgt, weil deren Ergebnisse in etwa denen der Ständerkonstruktionen mit einer Zellulosedämmung (Nr. 02.31, 02.32) bzw. Stroh- und Schilfrohrdämmung (Nr. 02.54, 02.55) entsprechen. Die Auswertung der Ergebnisse des nächsten Schritts dieser Varianten lässt sich somit auf die Varianten, die nicht weiter bilanziert werden, übertragen.

Änderung am Ausbau (Schritt 3)

	Bauteil	Dicke	Biogener Kohlenstoffspeicher	TGHE Herstellung	TGHE Entsorgung	TGHE Total	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Bauteil aus Schritt 2
	Nr.	m	[kg/kg]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	[kg/m2a]		
Massive Brettschichtwand Holzfaserplatte Lehmputz	03.11	0,35	34,12	0,88	0,14	1,02	49,17%	17,81%
Stampflehmwand Vollholz Holzfaserplatte Lehmputz	03.12	0,75	10,60	1,01	0,14	1,14	42,93%	15,46%
Holzständer Vollholz Holzfaser lose Lehmputz	03.13	0,33	9,27	0,59	0,08	0,68	66,18%	24,57%
Holzständer Brettschicht Holzfaser lose Lehmputz	03.14	0,33	9,32	0,62	0,09	0,71	64,69%	23,78%
Massive Brettschichtwand Flachs-/Hanfdämmplatte Lehmputz	03.21	0,37	29,89	0,72	0,15	0,88	56,22%	20,11%
Stampflehmwand Vollholz Flachs-/Hanfdämmplatte Lehmputz	03.22	0,77	5,90	0,81	0,16	0,97	51,53%	17,72%
Holzständer Vollholz Flachs-/Hanffaser lose Lehmputz	03.23	0,33	7,22	0,55	0,10	0,65	67,56%	28,14%
Holzständer Brettschicht Flachs-/Hanffaser lose Lehmputz	03.24	0,33	7,27	0,58	0,10	0,68	66,06%	24,51%
Holzständer Vollholz Zellulose Lehmputz	03.31	0,35	11,92	0,46	0,06	0,52	73,89%	38,75%
Holzständer Brettschicht Zellulose Lehmputz	03.32	0,35	11,97	0,49	0,07	0,55	72,40%	37,43%
Stampflehmwand Vollholz Stroh Lehmputz	03.41	0,77	9,42	0,57	0,06	0,63	68,38%	24,82%
Massive Brettschichtwand Schilfrohrmatte Lehmputz	03.51	0,47	46,47	0,65	0,08	0,72	64,00%	23,43%
Holzständer Vollholz Stroh + Schilfrohrmatte Lehmputz	03.52	0,37	14,98	0,46	0,05	0,52	74,22%	25,69%
Holzständer Brettschicht Stroh + Schilfrohrmatte Lehmputz	03.53	0,37	15,03	0,49	0,05	0,55	72,72%	28,77%

Abb. 11: Ergebnisse Aussenwände mit angepasstem Ausbau, eigene Darstellung

Dieser letzte Schritt ermöglicht bei allen Varianten ein zusätzliches Sparpotenzial im Vergleich zum vorherigen Schritt. Zudem können bei der massiven Brettschichtwand, gedämmt mit einer Holzfaser- bzw. Flachs-/Hanfdämmplatte, aufgrund einer Verkleidung mit Lehmbauplatte und Lehmputz (Nr. 03.11, 03.21) auch die Ergebnisse aus dem ersten Schritt verbessert werden. Bei der Stampflehmwand

(Nr. 03.21, 03.22) ist das nicht möglich. Gedämmt mit einer Holzfaser- bzw. Flachs-/Hanfdämmplatte bleiben die Ergebnisse hier auch mit den Anpassungen im Ausbau hinter Schritt 1 zurück. Bei den vier Varianten, die mit diese Dämmplatten ausgeführt werden, ist das Sparpotenzial am geringsten und der Zielwert B weiterhin nicht einzuhalten. Alle anderen Varianten erreichen mit diesem Schritt den Zielwert B und ermöglichen Sparpotenziale zwischen 64% und 74%. Der Zielwert A wird von den beiden Holzständerkonstruktion mit Vollholz und einer Zellulosedämmung zwischen den Balken (Nr. 03.31 und 03.52) erfüllt. Die beiden Ständerkonstruktionen mit Brettschichtholz und Zellulosedämmung (Nr. 03.32 und 03.53) verfehlen den Zielwert A nur knapp.

Die Wandstärken der Holzständerwände sind mit denen aus dem zweiten Schritt vergleichbar, sie sind also weiterhin geringer als jene des Referenzbauteils. Ausnahmen bilden immer noch die Stampflehmwände und die massive Brettschichtwand mit der Schilfrohrdämmung.

Der biogene Kohlenstoffspeicher bleibt in etwa gleich, da sowohl die Gipsfaserplatte als auch die Lehmbauplatte einen kleinen Speicher besitzen.

4.3.2 Ergebnisse Geschossdecken

Der Zielwert B für Geschossdecken liegt gemäss der Herleitung in Kapitel 3.4.1 bei 2.16 kg/m^{2}a, der Zielwert A bei 1.44 kg/m^{2}a.

Referenzbauteil

	Bauteil	Dicke	Biogener Kohlenstoffspeicher	TGHE Herstellung	TGHE Entsorgung	TGHE Total
	Nr.	m	[kg/kg]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	[kg/m2a]
Referenzbauteil	11	0,35	0,42	1,92	0,20	2,12

Abb. 12: Ergebnisse Referenzbauteil Geschossdecke, eigene Darstellung

Wie in Kapitel 4.1.2 festgelegt, wird die Referenz zu den Geschossdecken mit Beton konstruiert, ihr Trittschallschutz mit Steinwolle gewährleistet, darüber ein Unterlagsboden aus Zement sowie Parkett als Bodenbelag eingesetzt und die Deckenuntersicht mit einer verputzten Gipsfaserplatte verkleidet. Der Zielwert B kann mit dieser Konstruktion eingehalten werden, der Zielwert A hingegen nicht. Der kleine biogene Kohlenstoffspeicher entsteht aufgrund des gewählten Bodenbelags (Parkett).

Änderung der Konstruktion (Schritt 1)

	Bauteil	Dicke	Biogener Kohlenstoffspeicher	TGHE Herstellung	TGHE Entsorgung	TGHE Total	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil
	Nr.	m	[kg/kg]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte	11.1	0,43	26,17	1,84	0,21	2,06	2,87%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken	11.2	0,51	3,11	1,68	0,17	1,85	12,61%
Holz-Lehmdecke	11.3	0,53	6,03	1,41	0,19	1,59	24,71%
Massivdecke Brettschicht	11.4	0,36	42,98	1,49	0,18	1,67	21,18%
Holzbalkendecke Kalksplittschüttung	11.51	0,47	6,41	1,61	0,17	1,78	16,00%
Holzbalkendecke Holz-Lehm-Schüttung	11.52	0,46	6,98	1,39	0,15	1,54	27,31%
Hohlkastendecke	11.6	0,37	9,19	1,41	0,14	1,55	26,73%

Abb. 13: Ergebnisse Geschossdecken mit angepasster Konstruktion, eigene Darstellung

Auch bei den Geschossdecken wirken sich alle bilanzierten Anpassungen der Konstruktion positiv auf die THG-Emissionen aus. Die Holz-Beton-Verbunddecke, konstruiert mit einer Brettschichtplatte (Nr. 11.1), kann gegenüber dem Referenzbauteil nur knapp 3% THG-Emissionen einsparen. Wird diese Decke mit Brettschichtbalken (Nr. 11.2) aufgebaut, bei der weniger Beton notwendig ist, ist das Sparpotenzial mit 12% deutlich höher. Alle anderen Varianten neben den beiden Holz-Beton-Verbunddecken haben Sparpotenziale von über 20%. Eine Ausnahme bildet hier die Holzbalkendecke mit der Kalksplittschüttung (Nr. 11.51), welche nur 16% weniger THG-Emissionen erzielt. Wird die Kalksplittschüttung mit einer Holz-Lehm-Schüttung (Nr. 11.52) ersetzt, kann das Sparpotenzial dieser Variante um ca. 10% erhöht werden.

Der biogene Kohlenstoffspeicher steigt an. Der grösste Speicher entsteht bei den beiden Varianten mit den massiven Brettschichtplatten in der Konstruktion, wobei der Speicher der reinen Holzkonstruktion (Nr. 11.4) deutlich höher ist als jener der Holz-Beton-Verbunddecke mit Brettschichtplatte (Nr. 11.1). Bei allen Varianten der Holzbalkendecken bleibt der Speicher eher gering. Etwas höher ist er bei der Hohlkastendecke.

Die massive Brettschichtdecke und die Hohlkastendecke haben in etwa die gleiche Stärke wie das Referenzbauteil. Die Holz-Beton-Verbunddecke mit Brettschichtplatte ist mit 0.43m ein wenig stärker als die Referenz. Alle Holzbalkendecken haben mit ca. 0.50m einen um mehr als 0.10m dickeren Aufbau.

Mit einer Anpassung in der Konstruktion können alle Varianten den Zielwert B gut einhalten. Der Zielwert A wird mit dieser Massnahme nicht erreicht.

Änderung der Dämmung (Schritt 2)

	Bauteil Nr.	Dicke m	Biogener Kohlenstoffspeicher [kg/kg]	TGHE Herstellung [kg/m2a]	TGHE Entsorgung [kg/m2a]	TGHE Total [kg/m2a]	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Bauteil aus Schritt 1
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte Holzfaserplatte	12.11	0,45	31,75	1,97	0,24	2,20	-4,16%	-7,24%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken Holzfaserplatte	12.12	0,53	6,77	1,80	0,19	2,00	5,57%	-8,05%
Holz-Lehmdecke Holzfaserplatte	12.13	0,53	7,85	1,45	0,20	1,65	22,11%	-3,46%
Massivdecke Brettschicht Holzfaserplatte	12.14	0,37	45,77	1,55	0,19	1,74	17,66%	-4,46%
Holzbalkendecke Holz-Lehm-Schüttung Holzfaserplatte	12.15	0,47	8,70	1,45	0,16	1,61	23,79%	-4,84%
Hohlkastendecke Holzfaserplatte + Holzfasern	12.16	0,38	13,73	1,49	0,15	1,65	22,21%	-6,18%
Hohlkastendecke Holzfaserplatte + Zellulose	12.17	0,38	14,29	1,46	0,15	1,61	23,94%	-3,80%
Hohlkastendecke Holzfaserplatte + Stroh	12.18	0,38	16,03	1,45	0,14	1,59	24,69%	-2,79%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte Flachs-/Hanffaserplatte	12.21	0,45	27,93	1,80	0,23	2,03	4,08%	1,24%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken Flachs-/Hanffaserplatte	12.22	0,53	4,26	1,64	0,19	1,82	13,81%	1,38%
Holz-Lehmdecke Flachs-/Hanffaserplatte	12.23	0,53	6,60	1,37	0,19	1,56	26,23%	2,02%
Massivdecke Brettschicht Flachs-/Hanffaserplatte	12.24	0,37	43,86	1,47	0,19	1,66	21,78%	0,77%
Holzbalkendecke Holz-Lehm-Schüttung Flachs-/Hanffaserplatte	12.25	0,47	7,45	1,37	0,16	1,53	27,91%	0,83%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Flachs-/Hanfasern	12.26	0,38	11,47	1,43	0,16	1,58	25,12%	-2,20%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Zellulose	12.27	0,38	12,81	1,37	0,15	1,52	28,07%	1,82%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Stroh	12.28	0,38	14,55	1,37	0,14	1,51	28,81%	2,83%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Hanfschäben	12.29	0,38	15,20	1,39	0,15	1,54	27,13%	3,21%

Abb. 14: Ergebnisse Geschossdecken mit angepasster Dämmung, eigene Darstellung

Es zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den bilanzierten Aussenwänden: mit einer Änderung der Dämmung wird nicht automatisch eine zusätzliche Einsparung an THG-Emissionen erreicht. Auch hier werden die Ergebnisse aus dem ersten Schritt teilweise wieder schlechter (siehe rot markierte Zellen in Abb. 14). Die Holz-Beton-Verbunddecke mit einer Holzfaserplatte (Nr. 12.11) fällt sogar unter den Zielwert B. Die THG-Emissionen sind bei allen Geschossdecken mit einer Holzfaserplatte als Trittschalldämmung höher als wenn eine Dämmung aus Steinwolle eingesetzt wird. Das gleiche gilt für die Hohlkastendecke mit einer Trittschalldämmung aus einer Flachs-/Hanffaserplatte und einer Füllung in der Decke aus Flachs-/Hanffasern (Nr. 12.26). Alle anderen Varianten haben nur ein leicht höheres Sparpotenzial zwischen 1% und 3% gegenüber dem vorherigen Schritt.

Der biogene CO_2-Speicher steigt leicht an, da auch der Anteil der biobasierten Baustoffe zunimmt. Das grösste Potenzial liegt hier weiterhin bei den beiden Varianten mit den massiven Brettschichtplatten in der Konstruktion, wobei die reinen Holzvarianten (Nr. 12.14, 12.24) weiterhin deutlich vorne liegen.

Die Aufbauhöhen der Decken sind mit denen aus dem ersten Schritt vergleichbar.

Der Zielwert A kann auch mit diesem Schritt von keiner der Varianten erfüllt werden. Der Zielwert B wird von allen Decken unterschritten. Eine Ausnahme ist hier, wie oben beschrieben, das Bauteil Nr. 12.11.

Die Hohlkastendecken mit einer Holzfaserplatte als Trittschallschutz und Holzfasern bzw. Zellulose (Nr. 12.16, 12.17) als Füllung in der Decke werden nicht weiter bilanziert. Ihre Ergebnisse sind mit dem der Hohlkastendecke mit Holzfaserplatte und Stroh-Füllung (Nr. 12.18) vergleichbar und können im Folgenden an diesem Beispiel beurteilt werden. Ebenso verhält es sich bei der Hohlkastendecken mit einer Flachs-/Hanffaserplatte als Trittschallschutz und Flachs-/Hanffasern bzw. Zellulose (Nr. 12.26, 12.27) als Füllung in der Decke. Sie werden ab sofort anhand der Bauteile Nr. 12.28 und 12.29 berücksichtigt.

Änderung am Ausbau (Schritt 3)

	Bauteil Nr.	Dicke m	Biogener Kohlenstoffspeicher [kg/kg]	TGHE Herstellung [kg/m2a]	TGHE Entsorgung [kg/m2a]	TGHE Total [kg/m2a]	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Bauteil aus Schritt 2
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte Holzfaserplatte Lehmputz	13.11	0,45	31,49	1,74	0,24	1,98	6,26%	10,01%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken Holzfaserplatte Lehmputz	13.12	0,53	6,59	1,58	0,20	1,78	15,99%	11,04%
Holz-Lehmdecke Holzfaserplatte Lehmputz	13.13	0,54	7,95	1,23	0,20	1,43	32,53%	13,38%
Massivdecke Brettschicht Holzfaserplatte Lehmputz	13.14	0,37	45,51	1,33	0,20	1,52	28,09%	12,66%
Holzbalkendecke Holzfaserplatte Lehmputz	13.15	0,48	8,80	1,22	0,17	1,39	34,22%	13,68%
Hohlkastendecke Holzfaserplatte + Stroh Lehmputz	13.16	0,38	15,83	1,23	0,15	1,37	35,11%	13,84%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte Flachs-/Hanffaserplatte Lehmputz	13.21	0,45	27,67	1,58	0,23	1,81	14,50%	10,87%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken Flachs-/Hanffaserplatte Lehmputz	13.22	0,53	4,09	1,41	0,19	1,60	24,24%	12,10%
Holz-Lehmdecke Flachs-/Hanffaserplatte Lehmputz	13.23	0,54	6,70	1,14	0,20	1,34	36,66%	14,13%
Massivdecke Brettschicht Flachs-/Hanffaserplatte Lehmputz	13.24	0,37	43,60	1,24	0,19	1,43	32,21%	13,33%
Holzbalkendecke Flachs-/Hanffaserplatte Lehmputz	13.25	0,48	7,55	1,14	0,16	1,31	38,34%	14,46%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Stroh Lehmputz	13.26	0,38	14,35	1,14	0,14	1,29	39,23%	14,64%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Hanfschäben Lehmputz	13.27	0,38	15,00	1,16	0,16	1,32	37,56%	14,31%

Abb. 15: Ergebnisse Geschossdecken mit angepasstem Ausbau, eigene Darstellung

Die Verwendung einer Lehmbauplatte mit Lehmputz anstelle einer Gipsfaserplatte mit Gipsputz ermöglicht bei allen Varianten ein zusätzliches Sparpotenzial im Vergleich zum vorherigen Schritt. Zudem können bei allen Decken, die im vorherigen Schritt ein schlechteres Ergebnis als im Schritt 1 erzielt haben (Bauteil Nr. 12.11 bis 12.18), aufgrund der neuen Verkleidung die Resultate aus dem ersten Schritt verbessert werden. Das geringste Sparpotenzial besitzt weiterhin die Holz-Beton-Verbunddecke mit Brettschichtplatte (Nr. 13.11, 13.21), unabhängig davon, welches Material als Trittschallschutz eingesetzt wird. Auch die Holz-Beton-Verbunddecke mit Brettschichtbalken und einer Holzfaserplatte (Nr. 13.12) bringt mit 16% ein eher schlechtes Resultat. Diese Variante wird unter Verwendung einer Flachs-/Hanffaserdämmplatte (Nr. 13.22) mit 24% zwar besser, bleibt jedoch

insgesamt hinter den anderen Varianten zurück. Alle anderen Varianten erreichen Sparpotenziale zwischen 28% und 39%.

Wie bei den Aussenwänden bleibt der biogene Kohlenstoffspeicher in diesem Schritt in etwa gleich, da sowohl die Gipsfaserplatte als auch die Lehmbauplatte einen kleinen Speicher besitzen.

Die Aufbauhöhen der Decken sind wieder mit denen aus dem ersten bzw. zweiten Schritt vergleichbar.

Der Zielwert B wird mit allen Varianten eingehalten. Mit Ausnahme aller Holz-Beton-Verbunddecken und der massiven Holzdecke mit einer Holzfaserplatte als Trittschallschutz (Nr. 13.14) kann sogar der Zielwert A erreicht werden.

Erneute Änderung am Ausbau (Schritt 4)

Bei den Geschossdecken wird ein weiterer Schritt unternommen: auf die Verkleidung mit Lehmbauplatte und Lehmputz wird verzichtet, so dass die Deckenbalken, die massive Holzplatte, der Lehm oder der Beton sichtbar bleiben.

	Bauteil	Dicke	Biogener Kohlenstoffspeicher	TGHE Herstellung	TGHE Entsorgung	TGHE Total	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Referenzbauteil	Sparpotenzial THG-Emissionen gegenüber Bauteil aus Schritt 3
	Nr.	m	[kg/kg]	[kg/m2a]	[kg/m2a]	[kg/m2a]		
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte Holzfaserplatte Keine Verkleidung	14.11	0,42	31,21	1,69	0,22	1,91	9,74%	3,71%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken Holzfaserplatte Keine Verkleidung	14.12	0,50	6,41	1,52	0,18	1,70	19,47%	4,14%
Holz-Lehmdecke Holzfaserplatte Keine Verkleidung	14.13	0,51	7,77	1,17	0,18	1,35	36,01%	5,16%
Massivdecke Brettschicht Holzfaserplatte Keine Verkleidung	14.14	0,34	45,23	1,27	0,18	1,45	31,57%	4,84%
Holzbalkendecke Holzfaserplatte Keine Verkleidung	14.15	0,45	8,62	1,17	0,15	1,32	37,70%	5,29%
Hohlkastendecke Holzfaserplatte + Stroh Keine Verkleidung	14.16	0,35	15,62	1,17	0,13	1,30	38,59%	5,36%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtplatte Flachs-/Hanffaserplatte Keine Verkleidung	14.21	0,42	27,39	1,52	0,22	1,74	17,98%	4,07%
Holz-Beton-Verbunddecke Brettschichtbalken Flachs-/Hanffaserplatte Keine Verkleidung	14.22	0,50	3,00	1,36	0,17	1,53	27,72%	4,59%
Holz-Lehmdecke Flachs-/Hanffaserplatte Keine Verkleidung	14.23	0,51	6,52	1,09	0,18	1,27	40,13%	5,49%
Massivdecke Brettschicht Flachs-/Hanffaserplatte Keine Verkleidung	14.24	0,34	43,32	1,19	0,17	1,36	35,69%	5,13%
Holzbalkendecke Flachs-/Hanffaserplatte Keine Verkleidung	14.25	0,45	7,37	1,08	0,15	1,23	41,82%	5,64%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Stroh Keine Verkleidung	14.26	0,35	14,14	1,09	0,13	1,21	42,71%	5,72%
Hohlkastendecke Flachs-/Hanffaserplatte + Hanfschäben Keine Verkleidung	14.27	0,35	14,79	1,11	0,14	1,25	41,03%	5,57%

Abb. 16: Ergebnisse Geschossdecken ohne Ausbau, eigene Darstellung

Dieser Schritt führt zu einem erneut höheren Sparpotenzial. Bis auf die Holz-Beton-Verbunddecken bewegt sich das gesamte Potenzial der Decken zwischen 35% und knapp 43% gegenüber dem Referenzbauteil. Die Holz-Beton-Verbunddecken bleiben hinter diesen Resultaten deutlich zurück. Die massive Brettschichtdecke mit Holzfaserplatte (Nr. 14.14) zeigt mit einem Sparpotenzial von 31% ein ebenfalls etwas schlechteres Ergebnis.

Durch den Wegfall der Lehmbauplatte wird der biogene Kohlenstoffspeicher im Vergleich zum vorherigen Schritt etwas kleiner. Dieser Verlust ist jedoch sehr gering.

Alle Aufbauten werden aufgrund der fehlenden Verkleidung um ca. 0.03m dünner.

Wie im vorherigen Schritt kann mit allen Deckenvarianten der Zielwert B gut eingehalten werden. Auch der Zielwert A wird von allen Aufbauten erfüllt. Ausnahmen bilden weiterhin die Holz-Beton-Verbunddecken und die massive Holzdecke mit Holzfaserplatte (Nr. 14.14), welche das Ziel nur noch sehr knapp verfehlt.

4.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Nur das Referenzbauteil der Geschossdecke kann den Zielwert B knapp einhalten. Der Zielwert A wird deutlich verfehlt. Das Referenzbauteil der Aussenwand erreicht keinen der Zielwerte.

Eine Änderung der Konstruktion, also kein bzw. weniger Einsatz von Beton, bringt sofort ein besseres Ergebnis. Mit dieser Massnahme ist bei beiden Bauteilen die höchste Steigerung des Sparpotenzials an THG-Emissionen möglich. Bei der Aussenwand werden Potenziale von 47% bei der massiven Brettschichtwand und ca. 55% bei den anderen Konstruktionsvarianten erreicht. Bei den Geschossdecken sind es zwischen 20% und 30%. Die beiden Holz-Beton-Verbundvarianten bilden Ausnahmen und weisen mit nur 3% bzw. 12% ein deutlich geringeres Sparpotenzial auf.

Bei beiden Bauteilen zeigt sich, dass Holz- bzw. Flachs-/Hanffaserplatten anstelle einer Dämmung aus Steinwolle kein höheres Sparpotenzial liefern, sondern das durch die Anpassung der Konstruktion gewonnene Potenzial sogar wieder schmälern. Etwas besser verhält sich das Ergebnis, wenn diese Dämmmaterialien als lose Fasern eingesetzt werden. Abgesehen von dieser Besonderheit steigert sich das Sparpotenzial weiter, wenn eine biobasierte Dämmvariante eingesetzt wird. Bei der Aussenwand sind grössere Steigerungen zu sehen, wenn die äussere Dammschicht mit Schilf gebildet wird. Wie bereits in Kapitel 5.3.1 geschrieben, ergibt sich bei Schilf der Nachteil, dass die Wand durch die notwendigen Dämmstärken relativ dick wird.

Die Änderung am Ausbau, also der Einsatz einer Lehmbauplatte mit Lehmputz anstelle einer Gipsfaserplatte mit Gipsputz, bringt beiden Bauteilen einen erneuten Anstieg des Sparpotenzials. Die negativen Bilanzen der Holz- bzw. Flachs-/Hanffaserplatten können durch diese Massnahme zumindest

teilweise wieder ausgeglichen werden. Für die Aussenwände sind damit insgesamt Sparpotenziale zwischen 43% und 74% gegenüber dem Referenzbauteil möglich.

Bei der Geschossdecke wird als letzte Massnahme auf die Verkleidung der Deckenuntersicht verzichtet, da das Sichtbarlassen der Deckenbalken bzw. Holzdecken hinsichtlich des Aspekts der Suffizienz sinnvoll ist und die daraus resultierende Effizienz untersucht werden soll. Mit dieser Anpassung lassen sich nochmals ca. 5% THG-Emissionen einsparen. So sind bei der Geschossdecke insgesamt Sparpotenziale zwischen 31% und knappr 43% gegenüber dem Referenzbauteil möglich. Die Holz-Beton-Verbunddecken erzielen Reduktionen zwischen 9% und 28% und bleiben damit hinter den anderen Bauteilvarianten zurück.

Insgesamt ist das Potenzial an THG-Emissionen, die eingespart werden können, bei den Aussenwänden deutlich höher. Das ist darin begründet, dass die Ausgangslage hier schlechter ist, also das Referenzbauteil sehr weit vom Zielwert B entfernt liegt, wohingegen das Referenzbauteil der Geschossdecken den Zielwert B bereits knapp erfüllt. Gleichzeitig verhält es sich so, dass mit den Geschossdecken bereits durch eine Anpassung in der Konstruktion der Zielwert B bei allen Varianten unterschritten wird, wohingegen dieser bei den Aussenwänden selbst mit dem letzten Schritt nicht überall erreicht wird. Der Zielwert A kann bei den Wänden mit nur zwei Variante erfüllt werden. Die Geschossdecken erreichen mit fast allen Konstruktionen auch ohne Weglassen der Verkleidung an der Deckenuntersicht den tieferen Richtwert.

Der biogene CO_2-Speicher ist bei den massiven Holzkonstruktionen und der Strohballenwand am höchsten. Er steigt bei den Aussenwänden durch den Ersatz der Dämmung nochmals deutlich an, da eine grosse Masse biobasierter Materialien hinzugefügt wird, die Kohlenstoff speichern kann. Bei den Geschossdecken ist dieser Sprung kleiner, da weniger Masse für die Trittschalldämmung notwendig ist. Die Hohlkastendecke stellt eine Ausnahme dar. Der Speicher wächst stärker an, da die Füllung in der Decke ebenfalls eine grosse Masse bietet. Mit den letzten Schritten, also einer Änderung am Ausbau bzw. dem Verzicht auf den Ausbau, sind keine relevanten Auswirkungen auf den biogenen Kohlenstoffspeicher zu sehen, da die Masse an natürlichen Baustoffen nicht oder nur kaum verändert wird.

Die Aussenwände sind bis auf die Stampflehmwände und die Strohballenwand alle weniger stark als ihr Referenzbauteil. Die massive Brettschichtwand wird ebenfalls stärker als die Referenz, wenn sie mit

einer Schilfrohrmatte gedämmt wird. Bis auf die erwähnten Ausnahmen lässt sich somit festhalten, dass die Wände durch die natürlichen Aufbauten dünner werden. Bei den Geschossdecken verhält es sich eher andersrum, die natürlichen Aufbauten führen zu tendenziell höheren Deckenstärken. Ausnahmen bilden hier die massive Brettschichtdecke und die Hohlkastendecke, welche beide in etwa die gleiche Stärke haben wie das Referenzbauteil.

5. Fazit

5.1 Schlussfolgerungen

Die in der Ausgangslage definierte Annahme, dass das Netto-Null-Ziel im Gebäudebereich durch den Einsatz natürlicher Baustoffe eher zu erreichen ist als durch die Verwendung industriell hergestellter Produkte, bestätigt sich. Mit dieser Strategie der Produktwahl können THG-Emissionen vermieden werden. Der Effekt dieser Methode ist jedoch begrenzt. Das zeigt sich am Beispiel der Aussenwände: selbst wenn der gesamte Aufbau mit biobasierten Baustoffen erfolgt, kann der Richtwert A nur bei zwei Varianten erreicht werden. Wie in Kapitel 3.3 erläutert, können die Ergebnisse der Bauteile auf ein gesamtes Gebäude übertragen werden. Daher reicht diese Massnahme allein nicht aus, um das Netto-Null-Ziel zuverlässig zu verfolgen.

Durch die Analyse der Sparpotenziale der einzelnen Funktionen – Konstruktion, Dämmung, Ausbau - wird deutlich, dass diese in allen Bereichen vorhanden sind. Es sollte hier folglich kein Bereich völlig ausser Acht gelassen werden.

Konstruktion

Die grösste Reduktion an THG-Emissionen ist zu erreichen, wenn die Konstruktion mit biobasierten Baustoffen ausgeführt wird. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass auf den Einsatz von Beton, hier stellvertretend für andere konventionelle tragende Materialien genannt, komplett verzichtet werden sollte, um einen besonders grossen Hebel bedienen zu können. Da es jedoch Bereiche gibt, in denen der Einsatz von Beton notwendig ist (z.B. Bauteile unter Terrain), sollte der Umfang auf das unbedingt Notwendige reduziert werden. Dass die Verwendung von Beton auch in geringem Mass zu einem schlechteren Ergebnis bei den THG-Emissionen führt, zeigt sich bei den Holz-Beton-Verbunddecken: diese Varianten sind zwar besser als ihr Referenzbauteil, sie liefern im Vergleich mit allen anderen Varianten ohne Beton jedoch immer ein geringeres Sparpotenzial.

Bei den untersuchten biobasierten Materialien für die Konstruktion kann nur Holz als wirkliche Alternative zu den konventionellen Baustoffen gezählt werden. Die Stampflehm- bzw. Strohballenwände sind jeweils nur bei Bauten geringer Höhe eine Variante. Für alle Bauten über 11m Gesamthöhe kommt nur Holz als tragendes Element in Betracht.

Neben der Begrenzung in der Gesamthöhe ist die Wandstärke ein weiterer Nachteil der Stampflehm- und Strohballenkonstruktionen. Die Wände werden mehr als doppelt so dick wie ihr Referenzbauteil und die Varianten aus Holz. Dadurch wird wertvolle Raumfläche an die Konstruktion verschenkt. Bei den Stampflehmwänden kommt hinzu, dass deren Aufwand in der Erstellung im Vergleich mit allen Alternativen sehr hoch ist, wodurch auch die Kosten ansteigen (siehe auch Erfahrungsbericht Rainer Hettenbach, Anhang, Kapitel 7.3).

Bei den Geschossdecken ist die Holz-Lehmdecke jedoch unbedingt zu berücksichtigen, da der Lehm hier als wichtige Speichermasse für den sommerlichen Wärmeschutz angerechnet werden kann.

Dämmung

Wie oben erwähnt, werden auch mit natürlichen anstelle von konventionellen Dämmmaterialien THG-Emissionen eingespart. Die Untersuchung der Dämmmaterialien brachte eine weitere Erkenntnis: der Einsatz eines biobasierten Baustoffs bedeutet nicht automatisch, dass die dadurch verursachten THG-Emissionen geringer sind als jene eines vergleichbaren konventionellen Baustoffs. Das zeigt sich bei den Holz- bzw. Flachs-/Hanffaserdämmplatten, durch deren Verwendung die Gesamtbilanz der THG-Emissionen nach oben getrieben wird, obwohl eine nachhaltige Konstruktionsvariante verwendet wird. Entscheidend ist daher auch, wie stark der ursprüngliche Rohstoff verarbeitet werden muss, bis das finale Material zur Verfügung steht. Ein emissionsarmer Rohstoff kann somit durch einen aufwendigen und energieintensiven Verarbeitungsprozesses zu einem emissionsreichen Baustoff werden. Bei der Auswahl natürlicher Baustoffe ist daher darauf zu achten, wie die jeweiligen THG-Emissionen in der Herstellung ausfallen. Die Vermutung, dass mit emissionsarm hergestellten Materialien die THG-Emissionen reduziert werden können, welche in der Studie NN-THGG aufgestellt wurde (siehe Kapitel 2.2.1), bestätigt sich demnach. Ein natürlicher Baustoff ist nicht immer mit einem emissionsarmen Baustoff gleichzusetzen.

Wie im Kapitel 4.3.3 festgestellt wurde, sind die beiden Zielwerte B und A bei den Geschossdecken leichter einzuhalten als bei den Aussenwänden. Das liegt am höheren Anteil der Dämmung, der bei den Aussenwänden eingesetzt werden muss, um den U-Wert einzuhalten. Wie gerade erläutert, verursacht

die Herstellung von Dämmmaterialien oft hohe THG-Emissionen. Je mehr Dämmung notwendig ist, desto schlechter fällt somit die THG-Bilanz aus. Dieser Effekt lässt sich jedoch vermeiden, wenn möglichst wenig bearbeitete Dämmstoffe wie Stroh, Zellulose und Schilfrohrmatten eingesetzt werden.

Dass das Ausmass der Verarbeitung bei den verursachten THG-Emissionen eine wichtige Rolle spielt, zeigt sich auch im Vergleich der Holzständerkonstruktionen. Die Variante mit Vollholzbalken schneidet im Schnitt immer besser ab als jene mit den Balken aus Brettschichtholz. In Kapitel 3.2 (Abschnitt zu Holz) wurde erläutert, inwiefern der Verarbeitungsprozess des Brettschichtholzes jenen des Vollholzes übersteigt. Trotzdem haben auch Brettschichtbalken eine Berechtigung, da mit ihnen höhere Spannweiten überbrückt werden können. Ohne Brettschichtholz könnten die in dieser Arbeit geforderten Spannweiten der Geschossdecken von 5 - 6 Metern nicht ausgeführt werden.

Biogener CO_2-Speicher

Mit der Verwendung natürlicher Baustoffe entsteht ein biogener Kohlenstoffspeicher. Das zeigt sich ausnahmslos in allen Ergebnissen. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird durch diesen temporären Speicher Zeit gewonnen, in der notwendige Technologien entwickelt werden können, mit denen dauerhafte Reduktionen der CO_2-Belastung in der Atmosphäre möglich sind. Ohne diesen temporären Speicher, der nur durch den Einsatz biobasierter Materialien gewonnen wird, ist diese Zeit nicht gegeben. Auch daher müssen diese Baustoffe in der Planung immer berücksichtigt werden. An den Ergebnissen der Ökobilanzierungen wird deutlich, dass Holz den besten biogenen CO_2-Speicher besitzt. Kombiniert mit weiteren natürlichen Materialien kann der Speicher zusätzlich vergrössert werden.

5.2 Bezug zur Praxis

Natürliche Baustoffe haben gegenüber konventionellen Baustoffen deutliche Vorteile hinsichtlich der Reduktion von THG-Emissionen und der temporären Kohlenstoffspeicherung. Im folgenden Abschnitt soll daher die Baupraxis mit biobasierten Produkten genauer betrachtet werden. Der Fokus wird dabei auf Holzbauten gelegt, da diese, wie in Kapitel 5.1 erläutert, als vergleichbare Alternativen zu konventionellen Bauten gesehen werden können. Für diesen Exkurs in die Praxis wurde Rainer Hettenbach interviewt, der seit 1995 mit seinem Büro „Degen Hettenbach & Partner“ Holzbauten realisiert, welche mit natürlichen Materialien gedämmt und im Innenraum mit Lehm verputzt werden. Er konnte sich im Laufe der Jahre ein grosses Wissen zur ökologischen Bauweise aneignen. Das Gespräch wird im Anhang (Kapitel 7.3) dokumentiert und im Folgenden nur in Ausschnitten wiedergegeben.

Bauen mit ökologisch sinnvollen Bauprodukten bringt diverse Vorteile mit sich, wie Rainer Hettenbach betont. Einige der Vorteile dieser Baustoffe, wie deren Kreislauffähigkeit und die damit verbundene Ressourcenschonung, das vorhandene Sparpotenzial hinsichtlich der THG-Emissionen sowie der gewonnene biogene Kohlenstoffspeicher, wurden in der vorliegenden Arbeit bereits behandelt. Zudem können kürzere Bauzeiten als weiterer positiver Aspekt aufgeführt werden. Mit den meisten Holzkonstruktionen sind Vorfabrikationen möglich, so dass die Bauteile bereits fertig auf die Baustelle geliefert und direkt montiert werden können. Es sind vor Ort keine Trocknungszeiten notwendig. Zudem sind nachträgliche Änderungen, z.B. neue Öffnungen für Türen oder Fenster, problemlos möglich, da Holzkonstruktionen auf einem statischen System beruhen, das gezielt geändert werden kann. Für biobasierte Baustoffe gelten des Weiteren die gleichen Lebenserwartungen wie für konventionelle Produkte. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die natürlichen Materialien korrekt verbaut werden.

Auch im Innenraum ergeben sich besondere Qualitäten, wenn natürliche Materialien eingesetzt werden. Lehmputz oder offenporiges Holz tragen aufgrund ihrer „Fähigkeit, Feuchtigkeit aufzunehmen und abzugeben“ (Liedl und Rühm, 2019, S.60), zu einer guten Raumluftqualität bei. Daneben speichert vor allem Lehm Wärme sehr gut, so dass die „Räume im Sommer angenehm kühl und im Winter warm“ bleiben (Liedl und Rühm, 2019, S.124). Zudem sind natürliche Produkte schadstofffrei und sorgen neben einem angenehmen auch für ein gesundes Raumklima. Diesbezüglich ist zu beachten, dass die Produkte nicht mit gesundheitsschädlichen Zusätzen (z.B. Formaldehyd, Lösemitteln) verarbeitet wurden.

Als Nachteil dieser Bauweise lassen sich die höheren Kosten nennen. Diese resultieren einerseits aus den teureren Materialien und andererseits aus einem höheren Detaillierungsgrad und Aufwand in der Planung. Es muss also mehr Geld und Zeit in ein nachhaltiges Bauprojekt investiert werden.
Der höhere Planungsaufwand kann jedoch mit einer höheren Kosten- und Terminsicherheit in der Ausführung gerechtfertigt werden. Ein weiterer Mehraufwand steckt im Unterhalt dieser Gebäude, der höher sein kann als jener von konventionell erstellten Bauten. Wie gross der Unterschied tatsächlich ausfällt, ist von der individuellen Ausführung abhängig.

Bauwerke mit biobasierten Materialien zu realisieren ist möglich und Teil der heutigen Praxis. Das zeigt eine Vielzahl an bereits ausgeführten Beispielen. Rainer Hettenbach hat bereits im Jahr 2011 in Therwil (BL) ein Mehrfamilienhaus (Degen Hettenbach & Partner, 2011) gebaut, das mit Strohballen gedämmt

wird, welche aus der Nachbargemeinde Biel-Benken stammen. Der Holzbau umfasst drei oberirdische Geschosse und bietet insgesamt fünf Wohneinheiten. Ein weiteres Projekt von Degen Hettenbach & Partner ist der Neubau eines Einfamilienhauses in Wahlen (BL), dessen Wände mit Strohballen konstruiert wurden (Degen Hettenbach & Partner, 2005). Der Entwurf dieses Projekts aus dem Jahr 2005 stammt vom Architekturbüro Atelier Schmid in Trun (GB), das sich ebenfalls auf ein nachhaltiges und ökologisches Bauen mit dem Schwerpunkt Strohballenbau spezialisiert hat. Rainer Hettenbach war hier für die Ausführung vor Ort zuständig. Mit Holzkonstruktionen sind auch Hochhäuser und anspruchsvolle Bauten möglich. Ein Beispiel dafür ist das 75 Meter hohe Hybrid-Holzhochhaus beim Bahnhof Regensdorf (ZH). „Die unteren drei Stockwerke sowie das Treppenhaus mit den Liften sind aus Beton und Stahl. Das Tragwerk der 21 Stockwerke darüber … wird aus Holz erstellt – die Balken werden in den Wohnungen sichtbar sein“ (Bérard, 2023).

Trotz der vorhandenen Möglichkeiten und der offensichtlichen Vorteile der Bauweise mit natürlichen Materialien, werden die meisten Bauwerke jedoch weiterhin mit konventionellen Baustoffen geplant und ausgeführt. Warum ist das so?

Um diese Frage zu beantworten, hilft ein Blick zurück in die Zeit nach dem zweiten Weltkrieg. Rainer Hettenbach sieht hier die Entstehung der heutigen Baupraxis. In dieser Zeit war es von zentraler Bedeutung, möglichst schnell und möglichst viel zu bauen, sollten doch die im Krieg zerstörten Gebäude rasch wiederhergestellt werden. Auf den ökologischen Fussabdruck wurde damals nicht geachtet. Diese Art von Bauen wird heute gleichermassen verfolgt. Es geht weiterhin darum, schnelle und einfach Lösungen umzusetzen. Der zentrale Unterschied ist aber, dass der Klimawandel bereits Realität ist und die gängige Praxis daher nicht mehr unüberlegt weiterverfolgt werden kann.

Es ist demnach ein Umdenken notwendig, das die Baubranche von den zwar einfachen und schnellen, dafür aber emissionsintensiven Baustoffen wegführt und ihr gleichwertige Alternativen mit natürlichen Materialien aufzeigt. Wie oben beschrieben, ist dafür ein höherer Planungsaufwand notwendig, da das Verhalten der biobasierten Baustoffe ein überlegteres Vorgehen verlangt. Die Lösungen sind am Ende nicht komplizierter als jene der konventionellen Baustoffe. Sie erfordern jedoch, dass die Planenden wissen, welche Parameter beim Entwerfen zu beachten sind. Stroh muss z.B. weniger als 18% Restfeuchte haben, bevor es in einer Holzständerkonstruktion verbaut wird. Wenn das nicht bekannt ist und missachtet wird, dann kommt es zur Schimmelbildung im Stroh. Daher muss das Stroh auch direkt nach dem Einbau vor Feuchtigkeit von aussen geschützt werden (Liedl und Rühm, 2019, S.83).

Die Schnittstellen zwischen den Gewerken müssen genau abgestimmt und eingehalten, das Stroh sofort verputzt oder mit einer Holzkonstruktion vor der Witterung geschützt werden. Dass dieses Wissen oft fehlt, ist auch darin begründet, dass natürliche Baustoffe in der heutigen Baupraxis deutlich weniger eingesetzt werden, wodurch die Routine im Umgang mit ihnen fehlt. Aufgrund dessen ist ein Entwurf mit konventionellen Bauprodukten schneller erstellt und seine Realisierung kann nach dem bereits bekannten Bauablauf vollzogen werden.

Wie kann es also gelingen, dass die Baubranche sich von den bekannten Entwurfsmechanismen wegbewegt und nachhaltigeren Alternativen zuwendet?

5.3 Lösungsansätze

Natürliche Baustoffe, allen voran Holz in der Konstruktion, müssen bei jedem Bauvorhaben als wirkliche Alternative in Betracht gezogen werden. Trotz vieler Vorteile liegt der Marktanteil von Holzbauten bei nur knapp 16% (Lignum, 2022, S.8). Das ist deutlich zu wenig, um das Netto-Null-Ziel tatsächlich zu erreichen. In der Schweiz ist der Rohstoff Holz in ausreichendem Mass vorhanden. Es wird ein jährlicher Zuwachs von 10 Mio. m^3 Holz verzeichnet, wovon ca. 8 Mio. m^3 nachhaltig nutzbar wären. Tatsächlich werden aber nur ca. 5 Mio. m^3 für Holzkonstruktionen, Innenausbau und Energiezwecke verwendet (Boyhadzhieva, 2022 und KBOB, BAFU, Lignum, 2024, S.10). Der Anteil kann somit noch deutlich gesteigert werden.

Wie in Kapitel 5.1 erläutert, muss beim Planen und Bauen ausserdem darauf geachtet werden, dass emissionsarm hergestellte Baustoffe verwendet werden. Damit das gelingt, ist gemäss dem Forschungsprojekt NN-THGG einerseits die „Zusammenarbeit der Gebäude- und Immobilienwirtschaft mit … [der] Industrie (Produktion von Materialien und Bauelementen)“ (BFE, 2024, S.7) von Bedeutung. Hier werden die Baumaterialien produziert und somit entschieden, welche Produkte auf den Markt gelangen. Andererseits nimmt die Studie auch die Politik in Verantwortung und spricht sich für eine „Förderung … der verstärkten Nutzung biobasierter Materialien (insbesondere Holz)“ (BFE, 2024, S.8) aus.

Gleichzeitig wären verbindliche Vorgaben seitens der Politik ein wichtiges Instrument, das angewendet werden sollte. Ein Blick in den Betrieb von Gebäuden zeigt, dass die gesetzlich vorgeschriebene Energiewende dazu führt, dass die Emissionen hier deutlich sinken. Analog dazu könnten auch für die Erstellung von Gebäuden Vorgaben gemacht werden. Die SIA 390/1 ist bisher eine freiwillige Ergänzung

zum Energievollzug und „muss zwischen Auftraggebenden und Auftragnehmenden explizit vereinbart werden“ (SIA, 2025, S.6). Selbst wenn nur der Richtwert B bei jedem Bauvorhaben verbindlich eingehalten werden müsste, würden viel grössere Mengen an THG-Emissionen eingespart werden, als es im Moment der Fall ist. Weitergehende Einsparungen wären möglich, wenn sogar der Richtwert A verpflichtend wäre.

Ein weiterer Hebel wäre, die Grenzwerte, welche die gängigen Gebäudestandards Minergie, der Zusatz ECO sowie der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) vorgeben, den Richtwerten der SIA 390/1 anzupassen. Derzeit liegen diese Grenzwerte über den Richtwerten der SIA 390/1. In Kapitel 1.1.2 wurde erläutert, dass die Richtwerte B und A der SIA 390/1 mithilfe des Absenkpfads aus dem Übereinkommen von Paris hergeleitet wurden, welcher wiederum auf das Netto-Null-Ziel ausgerichtet ist. Das bedeutet demnach, dass alle Projekte, die gemäss den aufgeführten Gebäudestandards heute realisiert werden, das Netto-Null-Ziel verfehlen. Und in der Schweiz wird eine Vielzahl an Projekten nach diesen Standards geplant und gebaut. Eine Harmonisierung der Werte, wie es auch in der Studie NN-THGG vorgeschlagen wird, würde daher einen nicht unerheblichen und positiven Effekt auf die THG-Emissionen haben.

Zudem führt eine Kombination mehrerer Massnahmen zuverlässiger zum Netto-Null-Ziel als eine alleinstehende Massnahme. Das bestätigen auch die Studien „Zero Strat“ und „Klimapositives Bauen“. Eine nachhaltige Materialwahl steht dabei nicht an erster Stelle. Es müssen bereits vorab sinnvolle Strategien angewendet worden sein, um möglichst viel THG-Emissionen einzusparen. Nur dann kann die Materialwahl als weiteres Element das Sparpotenzial nochmals erhöhen. Daher sollten jeweils alle Strategien analog der SIA 2032 (siehe Kapitel 3.1) verfolgt werden, um ein möglichst grosses Reduktionspotenzial zu erreichen.

Es gibt noch weitere Ansätze zur Reduktion der THG-Emissionen über die Materialwahl, die in dieser Arbeit nicht untersucht wurden. So wurden längst nicht alle natürlichen Materialien betrachtet. Vor allem im Ausbau sind diverse Möglichkeiten und die daraus resultierenden Sparpotenziale offengeblieben. Auch die Effizienz völlig neu entwickelter emissionsarmer Materialien, wie z.B. mit CO_2 begaster Beton, wurde nicht berücksichtigt. Ebenso wurde der Aspekt der Wiederverwendung und die Gebäudetechnik, durch deren Erstellung gemäss Abbildung 4 ein hoher Anteil an THG-Emissionen verursacht wird, nicht betrachtet.

Ein ganzheitlicher Blick ist das wesentliche Element des nachhaltigen Bauens, das von Beginn an vorhanden sein muss. In den frühen Phasen jedes Projekts werden grundlegende und richtungsweisende Strategien erstellt, bei denen eine natürliche und emissionsarme Materialwahl eine wichtige Rolle spielt. Fehlt hier das Wissen, welche Massnahmen für ein nachhaltiges Projekt entscheidend sind, so wird es schwierig, diese im Nachhinein zu integrieren. Je umfangreicher der ganzheitliche Ansatz verwirklicht wird, desto ressourcenschonender und emissionsarmer können Bauprojekte realisiert werden.

6. Literaturverzeichnis

BAFU (Bundesamt für Umwelt). (2023, Juni 23). *Das Übereinkommen von Paris.* Abgerufen von https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klima--internationales/das-uebereinkommen-von-paris.html

Bérard, Anna. (2023, August 08). *Jetzt wächst das erste Holzhochhaus im Kanton in die Höhe.* Abgerufen von https://www.tagesanzeiger.ch/jetzt-waechst-das-erste-holzhochhaus-im-kanton-in-die-hoehe-582963073179

BFE (Bundesamt für Energie). (2022, April 12). *Energieperspektiven 2050+ - Kurzbericht.* Abgerufen von https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html

BFE (Bundesamt für Energie). (2024, November 30). *Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich (NN-THGG).* Abgerufen von https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=72635&Load=true

BFE (Bundesamt für Energie). (2023, September 08). *Zero Strat – Strategien für Neubauten mit Niedrigstemissionen in der Erstellung.* Abgerufen von https://intep.com/wp-content/uploads/2024/08/ZeroStrat_intep-ETH-Zurich_Schlussbericht_Strategien-Neubauten-Niedrigemissionen.pdf

Boyadzhieva, Rayna. (2022, April 27). *Ist Bauen mit Holz wirklich nachhaltig?* Abgerufen von https://www.energie-experten.ch/de/wohnen/detail/ist-bauen-mit-holz-wirklich-nachhaltig.html

Bundesrat. (2024, Juni 06). *Bundesrat eröffnet Vernehmlassung zur CO_2-Verordnung.* Abgerufen von https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-101588.html

Degen Hettenbach & Partner. (2011). *Grösstes Strohballen gedämmtes Wohnhaus der Schweiz.* Abgerufen von https://www.degenhettenbach.ch/projekte#Therwil

Degen Hettenbach & Partner. (2005). *Neubau, lastabtragendes Strohballen-Passivhaus.* Abgerufen von https://www.degenhettenbach.ch/projekte#Therwil

Energie Experten. (2024, September 09). *Dämmung mit Hanf: Herstellung, Dämmwerte und Verarbeitung.* Abgerufen von https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/daemmstoffe/hanfdaemmung

Fedlex. Die Publikationsplattform des Bundesrechts. (2022, September 30). *Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit.* Abgerufen von https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2022/2403/de

Haga AG. (2024, Juni). *Haga 498.0 Lehmbauplatte D16, D22 – Die Lehmputzträgerplatte mit Speichermasse für innen.* Abgerufen von https://www.haganatur.ch/wp-content/uploads/2016/02/HAGA_Lehmbauplatte_D16_D22.pdf

IG Lehm. (2025). *Baustoff.* Abgerufen von https://www.iglehm.ch/lehmbau/baustoff

IG Lehm. (2025). *Massivbau - Stampflehm.* Abgerufen von https://www.iglehm.ch/lehmbau/anwendung/massivbau

KBOB, BAFU, Lignum. (2020, Januar). *Nachhaltiges Bauen mit Holz 2020/1 – Empfehlung.* Abgerufen von https://www.holz-bois-legno.ch/lignum/downloads/diverses/kbob-2020-1-d-nachhaltiges-bauen-mit-holz.pdf

KBOB (Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren). (2024, September 03). *Ökobilanzdaten im Baubereich.* Abgerufen von https://www.kbob.admin.ch/de/oekobilanzdaten-im-baubereich

Liedl, Petra und Rühm, Bettina. (2019). *Gesundes Bauen und Wohnen – Baubiologie für Bauherren und Architekten* (1.Auflage). Veröffentlichungsort: Deutsche Verlags-Anstalt (DVA)

Liese, Julia. (2023). *Bauen mit Stroh.* Detail, 11.2023, S. 76 – 79

Lignum. (2016). Bauteil A0225. Abgerufen von https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&output=html&uuid=697998A6-BB0B-32C4-8BA4-6C622DA7CFCE&bauteilgruppe=decke

Lignum. (2016). Bauteil A0231. Abgerufen von https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&output=html&uuid=05449B0C-35FD-3004-A502-6F13F157A988&bauteilgruppe=decke

Lignum. (2016). Bauteil A0298. Abgerufen von https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&output=html&uuid=62BC0A8D-53C8-3ED9-9892-3DE89A726059&bauteilgruppe=decke

Lignum. (2016). Bauteil A0837. Abgerufen von https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&output=html&uuid=DA28E1D3-9645-3011-93F1-F5DCF4D04E14&bauteilgruppe=decke

Lignum. (2016). Bauteil A1347. Abgerufen von https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&output=html&uuid=98BBC733-9C80-3574-83F6-203FDC8F7702&bauteilgruppe=decke

Lignum. (2022). Netto null – Zeit für Holz. Abgerufen von https://www.lignum.ch/files/images/Downloads_deutsch/Lignum_Holz_CO2_d.pdf

NEBS (Nova Energie Basel AG). (2021, Dezember 12). *Klimapositives Bauen – Ein Beitrag zum Pariser Absenkpfad.* Abgerufen von https://novaenergie.ch/basel/referenzen/download-faktenblatt-daten

Rühm, Bettina. (2023). *Wärmeschutz aus der Natur.* Detail, 11.2023, S. 80 - 89

SBV (Schweizerischer Baumeisterverband). (2021, Mai). *Studie über das vebaute Material in der Schweiz.* Abgerufen von https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/studie_projekt_match_bau.pdf.download.pdf/2016_10_17_MatCH_Bericht_Bau_v8_161017.pdf

SIA. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. (2020, August 01). *SIA 2032:2020 Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden* (1. Auflage).

SIA. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. (2025, Februar 01). *SIA 390/1:2005 Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden* (1. Auflage).

SNV (Schweizerische Normen-Vereinigung). (2006, Oktober 01). *EN ISO 14040 :2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*

SNV (Schweizerische Normen-Vereinigung). (2006, November 01). *EN ISO 14044 :2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen* (2.Auflage)

Treeze Ltd. (2020). *LCA of climate friendly construction materials (Kurzfassung).* Abgerufen von https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Building_and_Construction/ExecSummary_CliMat.pdf

WWF. (2025, März 21). Treibhauseffekt – Wie Treibhausgase unser Klima verändern. Abgerufen von: https://www.wwf.ch/de/unsere-ziele/treibhauseffekt-wie-treibhausgase-unser-klima-veraendern

Wikipedia. (2022, August 31). Sachbilanz. Abgerufen von: https://de.wikipedia.org/wiki/Sachbilanz

7. Anhang

Der Anhang beinhaltet folgende Unterlagen:

- Berechnungen und Ergebnisse der Ökobilanzierungen aller Aussenwände inkl. Angaben zu den U-Werten und Details der Bauteilaufbauten
- Berechnungen und Ergebnisse der Ökobilanzierungen aller Geschossdecken inkl. Angaben zu den Schalldämmwerten und Details der Bauteilaufbauten
- Interview mit Rainer Hettenbach (Erfahrungsbericht)

Gemäss den Vorgaben der „Programmbeschreibung MAS FHNW in nachhaltigem Bauen (EN Bau) – Masterarbeit 2024/2025“ wird der Anhang in einer separaten Datei abgegeben.

Der Name dieser Datei lautet „MA EN Bau Rusnak Anhang“.