



Bilanzierung von Negativ- emissionen (NET) im Bauwesen

Berechnung und Beitrag von NET
zum Klimaziel Netto-Null

Fachstelle Umweltgerechtes Bauen

Impressum

Auftraggeber

Fachstelle Umweltgerechtes Bauen
Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Ansprechpartner: Niko Heeren

Autor*innen

Rolf Frischknecht
treeze Ltd, fair life cycle thinking
Kanzleistrasse 4
CH-8610 Uster
www.treeze.ch
Tel. +41 44 940 61 91
Fax +41 44 940 61 94
frischknecht@treeze.ch

Katrin Pfäffli
preisig:pfäffli, Architekturbüro K. Pfäffli
Schaffhauserstrasse 21
CH-8006 Zürich
www.preisigpfaeffli.ch

Die Autor*innen sind für den Inhalt und die Schlussfolgerungen dieses Berichts alleinig verantwortlich.

Begleitgruppe

Der vorliegende Bericht wurde mehrfach durch eine Begleitgruppe gespiegelt und mit deren wertvollen Hinweisen aufgewertet.

Cyril Brunner, Guillaume Habert, Daniel Kellenberger, Kevin Knecht, Annick Lalive d'Epinay, Sébastien Lasvaux, Michael Pöll

Zusammenfassung

Die Stadt Zürich hat sich zum Ziel gesetzt, die stadt eigenen direkten Treibhausgasemissionen bis 2035 auf Netto Null zu reduzieren. Das bedeutet, die Emissionen müssen bis zu diesem Zeitpunkt weitestgehend reduziert werden und der verbleibende Anteil wird durch Negativemissionen auf Netto Null ausgeglichen. Es besteht jedoch Unklarheit ob, wie und welche Negativemissionstechnologien (NET) dabei berücksichtigt werden und wie diese in die städtische Kohlenstoffbuchhaltung des UGZ¹ zurückfliessen können.

Dieser Bericht enthält eine Auslegeordnung und Rechenregeln bezüglich NET im Bauwesen. Die Erkenntnisse sind konkret auf die Praxis der Stadtverwaltung und die AHB-Bauprojekte anwendbar. Mit dem projekt wurden die folgenden Ziele verfolgt: (1) Überblick NET im Bauwesen vermitteln und bestehendes Wissen konsolidieren; (2) Entwicklung einer Berechnungsmethode, welche zu SIA 2032 und SIA 2040 kompatibel ist und sich in das Reporting des AHB und UGZ einbinden lässt; (3) Empfehlungen an den Auftraggeber und die Baubranche Schweiz formulieren. Die Studie führte zu den folgenden Erkenntnissen:

Biogenes und direkt aus der Atmosphäre entferntes CO₂ muss permanent, das heisst für mindestens 3000 bis 8000 Jahre, gespeichert werden, um einen anhaltend reduzierenden Einfluss auf die maximale mittlere Temperaturerhöhung zu haben. Wird entferntes CO₂ kürzer gespeichert, erlischt die positive Wirkung auf die globale Temperatur mit der Re-Emission des gespeicherten CO₂. Die Bestimmung der Schweizer CO₂-Verordnung mit einer Anrechenbarkeit der Senkenleistung bei einer Speicherdauer von lediglich 30 Jahren greift deutlich zu kurz. Daher muss angesichts einer Lebensdauer von Gebäuden von 50 bis 100 oder 200 Jahren die Re-Emission als CO₂-Emission bilanziert werden.

Für Baustoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe braucht es für die Anrechenbarkeit von Negativemissionen eine rechtlich verbindliche Zusicherung der Permanenz. Bei Baustoffen mit karbonatisierten Zuschlagstoffen ist die Permanenz durch die chemische Bindung gegeben. Bei Pflanzenkohlebeton sollte die langfristige Permanenz durch geeignete Versuche nachgewiesen werden.

Eine Bilanzierung von Negativemissionen von Baustoffen für SIA 2032 und SIA 2040 ist möglich. Dabei kommen dieselben methodischen Setzungen zur Anwendung. Die Norm SN EN 15804:2012+A2:2019 hingegen verlangt auch im Falle einer permanenten Sequestrierung eine ausgeglichene Bilanz von Entnahme und Emission des biogenen CO₂, was einen wesentlichen Mangel dieser Norm darstellt.

Auf eine «dynamische» Bilanzierung soll verzichtet werden. Auch in Zukunft (re-)emittiertes CO₂ soll mit dem Treibhauspotenzial 1 kg CO₂-eq pro kg bewertet werden.

Die Beiträge der Negativemissionen sollen strikt getrennt bilanziert und ausgewiesen werden von den Treibhausgasemissionen des Gebäudes. Auf ein Saldieren auf Baumaterial- und Bauelementebene sollte verzichtet werden.

¹ UGZ: Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich

Die Wirkung von Vermeidungsstrategien wie Substitution (z.B. Holzbau), Kompaktheit, Suffizienz, LowTech, Weiter- und Wiederverwendung ist deutlich höher als das Potenzial von Baustoffen mit Negativemissionen.

Wenn biogenes CO₂ angerechnet werden kann (weil rechtlich verbindlich gesichert) dann hat der Holzbau durch seine vielseitige Anwendbarkeit (Konstruktionsholz, Bekleidungen, Innenausbau) eindeutig das grösste Potenzial für Negativemissionen im Gebäude. Der Einsatz von weiteren nachwachsenden Rohstoffen in Gebäuden, beispielsweise Stroh oder Hanfkalk, ist vielversprechend, in der Breite jedoch noch wenig realisiert. Hier besteht allenfalls ein Bedarf an angewandter Forschung.

Die Anrechenbarkeit gilt unter der Voraussetzung, dass der Kohlenstoff in diesen Materialien nach dem Ende der Nutzungsdauer nicht zurück in die Atmosphäre gelangt. Die Einlagerung von Kohlenstoff in Gebäuden kann helfen, etwas Zeit zu gewinnen. Diese muss genutzt werden um Antworten und Lösungswege zu finden auf die zentrale Fragestellung, wie die notwendige Permanenz rechtlich verbindlich abgesichert und deren Umsetzung etabliert werden kann. Auch hier besteht Forschungsbedarf. Mögliche Fahrten sind skizziert.

Es hat sich gezeigt, dass biogener Kohlenstoff in nachwachsenden Rohstoffen in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden kann (als Holzbaustoff, als Holzkohle im Pflanzenkohlebeton). Mit einer Potenzialstudie für die Schweiz könnten verschiedene Szenarien modelliert und durchgerechnet werden. Für diese Szenarien könnten einerseits die erzielbaren Negative-missionen wie auch die Aufwendungen und Treibhausgasemissionen quantifiziert werden.

Der Beitrag der forciert karbonatisierten Baustoffe an die Negativemissionen von Gebäuden ist noch relativ gering. Pflanzenkohlebeton (bei gesicherter Permanenz) oder forciert karbonatisierter Beton vermögen den Mehraufwand und die Mehremissionen beispielsweise gegenüber einem Holzbau nicht zu kompensieren. Das Potenzial der forcierten Karbonatisierung bei mineralischen Baustoffen ist vermutlich aber noch nicht ausgeschöpft. Die Forschung sollte sich darauf konzentrieren, wie dieser Beitrag bei gleichbleibendem oder nur leicht höherem Aufwand um eine Grössenordnung erhöht werden kann.

Gebäude mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen wird es auf absehbare Zeit NICHT geben. Sie kommen in Reichweite, wenn die Treibhausgasemissionen der Herstellung von Baustoffen wie Zement, Stahl, Backstein, oder Glas massiv reduziert würden.

Anstrengungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen müssen deutlich verstärkt werden. Neben Bau- und Planungsverantwortlichen müssen Baustoffhersteller:innen vermehrt eingebunden werden. Die Dekarbonisierung der Herstellung von Baumaterialien und Bauelementen muss hierbei ein prioritäres Ziel sein. Es sollen Massnahmen geprüft werden, wie die für das kommende Jahrzehnt geforderte massive Reduktion der Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Baumaterialien und Bauelementen erreicht beziehungsweise unterstützt werden kann.

Stand heute ist das Potenzial und Volumen für die Entnahme und permanente Endlagerung von CO₂ (biogen oder atmosphärisch) noch klein. Das gilt auch für die am Markt angebotenen Baumaterialien. Es stellt sich deshalb die Frage, ob sich die Stadt Zürich an einer (finanziellen) Förderung von Negativemissionstechnologien beteiligen beziehungsweise eine solche lancieren soll.

Résumé

La ville de Zurich s'est fixé pour objectif de réduire ses émissions directes de gaz à effet de serre à zéro d'ici 2035. Cela signifie que les émissions doivent être réduites autant que possible d'ici cette date et que la part restante sera compensée par des émissions négatives pour atteindre le zéro net. Il n'est toutefois pas clair si, comment et quelles technologies d'émissions négatives (NET) sont prises en compte dans ce contexte et comment celles-ci peuvent être réintégrées dans la comptabilité carbone urbaine de l'UGZ.

Le présent rapport contient un état des lieux et des règles de calcul concernant les NET dans la construction. Les conclusions sont applicables concrètement à la pratique de l'administration municipale et aux projets de construction AHB. Les objectifs du projet étaient les suivants : (1) donner une vue d'ensemble des NET dans la construction et consolider les connaissances existantes; (2) développer une méthode de calcul compatible avec SIA 2032 et SIA 2040 et pouvant être intégrée dans le reporting de l'AHB et de l'UGZ; (3) formuler des recommandations à l'intention du mandant et du secteur suisse de la construction. L'étude a abouti aux conclusions suivantes:

Le CO₂ biogénique et directement éliminé de l'atmosphère doit être stocké en permanence, c'est-à-dire pendant au moins 3000 à 8000 ans, pour avoir un effet réducteur durable sur l'augmentation moyenne maximale de la température. Si le CO₂ éliminé est stocké moins longtemps, l'effet positif sur la température globale disparaît avec la réémission du CO₂ stocké. La disposition de l'ordonnance suisse sur le CO₂ qui prévoit la prise en compte de l'effet de puits pour une durée de stockage de 30 ans seulement est nettement insuffisante. C'est pourquoi, compte tenu d'une durée de vie des bâtiments de 50 à 100 ou 200 ans, la ré-émission doit être comptabilisée comme une émission de CO₂.

Pour les matériaux de construction à base de matières premières renouvelables, la prise en compte des émissions négatives nécessite une garantie de permanence juridiquement contraignante. Pour les matériaux de construction contenant des granulats carbonatés, la permanence est assurée par la liaison chimique. Pour le béton de biochar, la permanence à long terme devrait être prouvée par des essais appropriés.

Il est possible d'établir un bilan des émissions négatives des matériaux de construction pour SIA 2032 et SIA 2040. Les mêmes paramètres méthodologiques sont appliqués. En revanche, la norme SN EN 15804:2012+A2:2019 exige un bilan équilibré des prélèvements et des émissions de CO₂ biogénique, même en cas de séquestration permanente, ce qui constitue un défaut majeur de cette norme.

Il faut renoncer à un bilan "dynamique". Le CO₂ (ré)émis à l'avenir doit également être évalué avec un potentiel d'effet de serre de 1 kg CO₂-eq par kg.

Les contributions des émissions négatives doivent être comptabilisées et indiquées strictement séparément des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment. Il convient de renoncer à une compensation au niveau des matériaux et des éléments de construction.

L'impact des stratégies d'évitement telles que la substitution (p. ex. construction en bois), la compacité, la suffisance, la low-tech, la réutilisation et le recyclage est nettement plus élevé que le potentiel des matériaux de construction à émissions négatives.

Si le CO₂ biogène peut être pris en compte (parce qu'il est juridiquement garanti), la construction en bois présente clairement le plus grand potentiel d'émissions négatives dans le bâtiment grâce à ses multiples applications (bois de construction, revêtements, aménagement intérieur). L'utilisation d'autres matières premières renouvelables dans les bâtiments, telles que la paille ou la chaux de chanvre, est prometteuse, mais encore peu réalisée à grande échelle. Il existe tout au plus un besoin de recherche appliquée dans ce domaine.

L'imputabilité s'applique à condition que le carbone contenu dans ces matériaux ne retourne pas dans l'atmosphère à la fin de leur durée de vie. Le stockage du carbone dans les bâtiments peut aider à gagner du temps. Celui-ci doit être utilisé pour trouver des réponses et des solutions à la question centrale de savoir comment la permanence nécessaire peut être garantie de manière juridiquement contraignante et comment sa mise en œuvre peut être établie. Là aussi, la recherche est nécessaire. Des pistes possibles sont esquissées.

Il s'est avéré que le carbone biogène contenu dans les matières premières renouvelables peut être utilisé dans les applications les plus diverses (comme matériau de construction en bois, comme charbon de bois dans le béton de biochar). Une étude de potentiel pour la Suisse permettrait de modéliser et de calculer différents scénarios. Pour ces scénarios, il serait possible de quantifier les émissions négatives réalisables ainsi que les dépenses et les émissions de gaz à effet de serre.

La contribution des matériaux de construction à carbonatation forcée aux émissions négatives des bâtiments est encore relativement faible. Le béton au biochar (dont la permanence est assurée) ou le béton à carbonatation forcée ne peuvent pas compenser les dépenses et les émissions supplémentaires par rapport à une construction en bois, par exemple. Le potentiel de la carbonatation forcée des matériaux de construction minéraux n'est probablement pas encore épuisé. La recherche devrait se concentrer sur la manière dont cette contribution peut être augmentée d'un ordre de grandeur avec les mêmes efforts ou des efforts légèrement plus importants.

Les bâtiments dont les émissions nettes de gaz à effet de serre sont nulles n'existeront PAS dans un avenir prévisible. Ils seront à portée de main si les émissions de gaz à effet de serre liées à la production de matériaux de construction tels que le ciment, l'acier, la brique ou le verre sont massivement réduites.

Les efforts visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre doivent être considérablement renforcés. Outre les responsables de la construction et de la planification, les fabricants de matériaux de construction doivent être davantage impliqués. La décarbonisation de la production de matériaux et d'éléments de construction doit être un objectif prioritaire. Il convient d'examiner des mesures permettant d'atteindre ou de soutenir la réduction massive des émissions de gaz à effet de serre dans la fabrication de matériaux et d'éléments de construction exigée pour la prochaine décennie.

A l'heure actuelle, le potentiel et le volume de captage et de stockage définitif de CO₂ (biogénique ou atmosphérique) sont encore faibles. Cela vaut également pour les matériaux de construction proposés sur le marché. La question se pose donc de savoir si la ville de Zurich doit participer à une promotion (financière) des technologies à émission négative ou en lancer une.

Summary

The city of Zurich has set itself the goal of reducing the city's own direct greenhouse gas emissions to net zero by 2035. This means that emissions must be reduced as far as possible by this date and the remaining share will be offset by negative emissions to net zero. However, it is unclear whether, how and which negative emission technologies (NET) will be taken into account and how these can be fed back into the urban carbon accounting of the IPCC.

This report contains an overview and calculation rules regarding NET in the building sector. The findings are concretely applicable to the practice of the city administration and the CSO construction projects. The project had the following objectives: (1) to provide an overview of NET in construction and consolidate existing knowledge; (2) to develop a calculation method that is compatible with SIA 2032 and SIA 2040 and can be integrated into the reporting of the AHB and UGZ; (3) to formulate recommendations for the client and the Swiss construction industry. The study led to the following findings:

Biogenic CO₂ removed directly from the atmosphere must be stored permanently, i.e. for at least 3000 to 8000 years, in order to have a sustained reducing effect on the maximum mean temperature increase. If removed CO₂ is stored for a shorter period of time, the positive effect on global temperature will cease with the re-emission of the stored CO₂. The provision of the Swiss CO₂ Ordinance with a creditability of the sink effect with a storage period of only 30 years is clearly too short-sighted. Therefore, in view of the lifespan of buildings of 50 to 100 or 200 years, the re-emission must be accounted for as CO₂ emission.

For building materials based on renewable raw materials, a legally binding assurance of permanence is needed for the creditability of negative emissions. In the case of building materials with carbonated aggregates, permanence is given by the chemical bond. In the case of biochar concrete, long-term permanence should be proven by suitable tests.

A balance of negative emissions of building materials for SIA 2032 and SIA 2040 is possible. The same methodological settings are applied. The standard SN EN 15804:2012+A2:2019, on the other hand, requires a balanced balance of extraction and emission of biogenic CO₂ even in the case of permanent sequestration, which is a major shortcoming of this standard.

A "dynamic" balance is to be dispensed with. CO₂ (re-)emitted in the future should also be assessed with the global warming potential 1 kg CO₂-eq per kg.

The contributions of negative emissions should be accounted for and reported strictly separately from the greenhouse gas emissions of the building. Netting at the level of building materials and building elements should be dispensed with.

The effect of avoidance strategies such as substitution (e.g. timber construction), compactness, efficiency, low tech, reuse and recycling is significantly higher than the potential of building materials with negative emissions.

If biogenic CO₂ can be accounted for (because it is legally binding), then timber construction clearly has the greatest potential for negative emissions in buildings due to its versatility (structural timber, cladding, interior finishing). The use of other renewable raw materials in buildings,

such as straw or hemp lime, is promising, but has not yet been widely implemented. At best, there is a need for applied research here.

The creditability applies under the condition that the carbon in these materials does not return to the atmosphere after the end of their useful life. Carbon storage in buildings can help to buy some time. This time must be used to find answers and solutions to the central question of how the necessary permanence can be secured in a legally binding manner and how its implementation can be established. Here, too, there is a need for research. Possible paths are outlined.

It has been shown that biogenic carbon in renewable raw materials can be used in a wide variety of applications (as a wood building material, as charcoal in biochar concrete). With a potential study for Switzerland, various scenarios could be modelled and calculated. For these scenarios, the achievable negative emissions as well as the expenditures and greenhouse gas emissions could be quantified.

The contribution of the carbonated building materials to the negative emissions of buildings is still relatively small. Biochar concrete (with guaranteed permanence) or forced carbonated concrete are not able to compensate for the additional costs and emissions compared to a wooden building, for example. However, the potential of forced carbonation of mineral building materials has probably not yet been exhausted. Research should concentrate on how this contribution can be increased by an order of magnitude with the same or only slightly higher effort.

Buildings with net zero greenhouse gas emissions will NOT happen in the foreseeable future. They would come within reach if the greenhouse gas emissions from the production of building materials such as cement, steel, brick, or glass were massively reduced.

Efforts to reduce greenhouse gas emissions must be significantly intensified. In addition to those responsible for construction and planning, building material manufacturers must be increasingly involved. The decarbonisation of the production of building materials and building elements must be a priority goal. Measures should be examined as to how the massive reduction of greenhouse gas emissions in the production of building materials and building elements required for the coming decade can be achieved or supported.

As things stand today, the potential and volume for the extraction and permanent final storage of CO₂ (biogenic or atmospheric) is still small. This also applies to the building materials offered on the market. The question therefore arises as to whether the City of Zurich should participate in or launch a (financial) promotion of negative emission technologies.

Inhalt

1	AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Ziele	1
1.3	Fragen	1
1.4	Abgrenzung	2
1.4.1	Übersicht	2
1.4.2	Negativemissionstechnologien ohne Bezug zum Bauen	2
1.4.3	Potenziell vermiedene Emissionen	3
1.4.4	Natürliche Karbonatisierung	3
2	WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN	3
2.1	Einführung	3
2.2	Negativemissionstechnologien	3
2.3	Temporäres Speichern von biogenem Kohlenstoff	5
3	CHARAKTERISIERUNG VON NET-BAUMATERIALIEN	7
3.1	Einführung	7
3.2	Karbonatisierte mineralische Baumaterialien (KM)	8
3.2.1	Beschreibung und Beispiele	8
3.2.2	Herstellung	8
3.2.3	Entsorgung	9
3.2.4	Normative Aspekte	9
3.2.5	Unsicherheiten und Forschungsbedarf	9
3.2.6	Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen	9
3.3	Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe (NR)	10
3.3.1	Beschreibung und Beispiele	10
3.3.2	Herstellung	10
3.3.3	Entsorgung	10
3.3.4	Normative Aspekte	11
3.3.5	Unsicherheiten und Forschungsbedarf	11
3.3.6	Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen	11
3.4	Mineralisch-organische Baumaterialien (MO)	12
3.4.1	Beschreibung und Beispiele	12
3.4.2	Herstellung	12

3.4.3	Entsorgung	12
3.4.4	Normative Aspekte	12
3.4.5	Unsicherheiten und Forschungsbedarf	12
3.4.6	Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen	13
3.4.7	<i>Einschätzung zu Pflanzkohlebeton von Cyril Brunner</i>	13
4	BILANZIERUNGSANSÄTZE	14
4.1	Grundlagen und Arbeiten	14
4.2	«Dynamische» Bilanzierung der Treibhausgasemissionen	15
4.2.1	Fixer Zeithorizont 100 Jahre	15
4.2.2	CO ₂ -Entfernung vor oder nach dem Ernten	16
4.2.3	Konnex zwischen Verweildauer im Speicher und Rotationsdauer	17
4.2.4	Natürliche Karbonatisierung	17
4.2.5	Kritik und Einschätzung	17
4.2.6	Fazit	18
4.3	Klimapositives Bauen	18
4.3.1	Wesentliche Merkmale	18
4.3.2	Kritik und Einschätzung	18
4.3.3	Fazit	18
4.4	CO ₂ -Speichersaldo	18
4.4.1	Wesentliche Merkmale	18
4.4.2	Kritik und Einschätzung	19
4.4.3	Fazit	20
4.5	1.5°C Ziel-Taugliche Bilanzierung und Bewertung	20
4.6	Einschätzung Cyril Brunner	20
5	BILANZIERUNG NEGATIVER TREIBHAUSGAS-EMISSIONEN	22
5.1	Übersicht	22
5.2	Internationale Situation und Tendenzen in Europa	22
5.2.1	Überblick	22
5.2.2	Rechtlicher und normativer Kontext	23
5.2.3	Baumaterialien, die anrechenbare Negativemissionen generieren (können)	23
5.2.4	Modellierung und Bewertung des biogenen Kohlenstoffs	24
5.2.5	Akzeptanz freiwilliger Bewertungssysteme	24
5.2.6	Anforderungen an die Anrechenbarkeit von Negativemissionen	24
5.2.7	Verbindlichkeit der Anforderungen an die Anrechenbarkeit	24

5.2.8	Optionen für rechtsverbindliche Anforderungen an die Permanenz	24
5.2.9	Internationaler Konsens	25
5.2.10	Weitere diverse Rückmeldungen	25
5.2.11	Synthese	26
5.3	Bilanzierungsmethode für SIA 2032 und SIA 2040	26
5.3.1	Einführung	26
5.3.2	Bilanzperimeter	26
5.3.3	Einheit und Bezugsgrösse	26
5.3.4	Neubau und Umbau	27
5.3.5	Amortisationsdauer	27
5.3.6	Zu berücksichtigende Bauteile, Vereinfachungen und Vernachlässigungen	27
5.3.7	Strukturierung der Bilanz	27
5.3.8	Phasengerechte Bilanzierung	27
5.3.9	Ergebnisdarstellung	28
5.4	Gebäude mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen	28
5.4.1	Anforderungen	28
5.4.2	Definition «NNT-Gebäude»	29
5.4.3	Definition «NNT-Gebäude, mit Ex-Situ Ausgleich»	29
5.4.4	Typologie von «NNT-Gebäuden»	30
5.5	Reporting Treibhausgasemissionen für Städte und Gemeinden	30
6	UMSETZUNGSVORSCHLÄGE FÜR ANFORDERUNGEN	31
6.1	Übersicht	31
6.2	Rechtsverbindlichkeit Permanenz	31
6.3	CO ₂ -Emissionszertifikate und deren Anrechenbarkeit für Netto-Null	32
7	RECHENHILFE GEBÄUDE (IN ANLEHNUNG SIA 2040)	32
7.1	Grundlagen und Übersicht	32
7.2	Grundlagen und Annahmen	32
8	BILANZIERUNG UND AUSWERTUNG VON GEBÄUDEN	33
8.1	Übersicht	33
8.2	Gebäude 1a: Kleines Mehrfamilienhaus, Umbau und Aufstockung	34
8.3	Gebäude 1b: Kleines Mehrfamilienhaus, Neubau	35
8.4	Gebäude 1c: Kleines Mehrfamilienhaus, energetische Sanierung	36
8.5	Gebäude 2: Grosses Mehrfamilienhaus, Neubau	37
8.6	Gebäude 3: Schulhaus, Neubau	39

8.7	Synthese	40
9	FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	40
9.1	Folgerungen	40
9.2	Empfehlungen, Handlungs- und Forschungsbedarf	41
	LITERATUR	43
A	GEBÄUDEBILANZEN DER FALLBEISPIELE	46
A.1	Gebäude 1	46
A.2	Gebäude 2	49
A.3	Gebäude 3	50
B	LISTE DER MATERIALIEN	52

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Die Stadt Zürich hat sich zum Ziel gesetzt, die stadteigenen direkten Treibhausgasemissionen bis 2035 auf Netto Null zu reduzieren. Das bedeutet, die Emissionen müssen bis zu diesem Zeitpunkt weitestgehend reduziert werden und der verbleibende Anteil wird durch Negativemissionen auf Netto Null ausgeglichen. Gemäss Stadtratsbeschluss müssen zudem die indirekten Emissionen um 30 Prozent gegenüber 1990 reduziert werden. Die Fachstelle umweltgerechtes Bauen erarbeitet derzeit eine Strategie wie dies in Zusammenarbeit innerhalb der gesamten Stadtverwaltung erreicht werden kann. Es besteht jedoch Unklarheit ob, wie und welche Negativemissionstechnologien (NET) dabei berücksichtigt werden und wie diese in die städtische Kohlenstoffbuchhaltung des UGZ² zurückfliessen können.

Aktuell führt das Amt für Hochbauten ein Projektcontrolling für das Reporting der 2000-Watt-Gesellschaft. Dort werden für grosse Bauprojekte die wichtigsten Daten festgehalten. Es sind auch Kennzahlen bezüglich Ökologie, wie Energiekennzahl oder erreichtes Gebäudelabel, enthalten. Auch die Treibhausgasemissionen nach SIA 2040 und SIA 2032 werden dokumentiert, jedoch können noch keine Negativemissionen erfasst werden.

1.2 Ziele

Dieser Bericht enthält eine Auslegeordnung und Rechenregeln bezüglich NET im Bauwesen. Die Erkenntnisse sind konkret auf die Praxis der Stadtverwaltung und die AHB-Bauprojekte anwendbar. Die Unterziele des Projekts waren die folgenden:

- a. Überblick NET im Bauwesen vermitteln und bestehendes Wissen konsolidieren;
- b. Entwicklung einer Berechnungsmethode, welche zu SIA 2032 und SIA 2040 kompatibel ist und sich in das Reporting des AHB und UGZ einbinden lässt;
- c. Empfehlungen an Auftraggeber und die Baubranche Schweiz formulieren;
- d. Beantwortung der in Unterkapitel 1.3 gestellten Fragen;

1.3 Fragen

Mit diesem Projekt sollen gemäss Ausschreibung die folgenden konkreten Fragen beantwortet werden:

1. Sind NET im Bauwesen eine sinnvolle Strategie in Hinblick auf das städtische Klimaziel Netto Null 2035?

² UGZ: Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich

2. Welche Materialien / Technologien (biogen und mineralisch) stehen heute und in absehbarer Zukunft zur Verfügung und wie sind deren Potentiale?
3. Gibt es anerkannte und anwendbare Berechnungsmethoden im nationalen und internationalen Kontext? Zeichnet sich ein Konsens ab?
4. Wie sind dynamische Berechnungsmethoden zu bewerten?
5. Wie kann dem Umstand Rechnung getragen werden, dass viele NETs lediglich eine zeitliche Verschiebung bedeuten?
 - a. Ist forcierte Karbonatisierung ein vorgezogener natürlicher Prozess?
 - b. In den meisten Fällen ist die finale Senke von Holzwerkstoffen die thermische Verwertung. Gibt es dennoch einen Nutzen für das Klima?
6. Ist es möglich eine Berechnungsmethode zu finden, die kompatibel zu SIA 2032 und SIA 2040 ist?
7. Welche Bilanzierungsmethode hat eine Chance sich in der Schweizer und europäischen Baubranche zu etablieren?
8. Welche Schritte sollte die Stadt Zürich unternehmen in Hinblick auf:
 - a. Reporting städtisches Klimaziel Netto Null 2035
 - b. Förderung von NET am Schweizer Markt?
9. Bestehen dringliche Wissenslücken?

1.4 Abgrenzung

1.4.1 Übersicht

In dieser Studie werden Modellierungs- und Bewertungsfragen im Zusammenhang mit Baumaterialien diskutiert und beurteilt, die auf Negativemissionstechnologien basieren und deshalb möglicherweise einen Beitrag zu negativen Treibhausgasemissionen liefern können³.

Die folgenden Effekte gelten entweder nicht als Negativemissionstechnologien oder haben keinen direkten Bezug zum Bauen und werden in dieser Studie nicht behandelt.

1.4.2 Negativemissionstechnologien ohne Bezug zum Bauen

Negativemissionstechnologien wie das Abscheiden und Endlagern von biogenem CO₂ aus dem Kamin von Biomasse-Heizkraftwerken, dem Filtern und Endlagern von CO₂ aus der Atmosphäre, Ansätzen des Geoengineering (wie Düngen der Ozeane) oder dem Aufforsten von Wäldern haben keinen direkten Bezug zum Bauen und sind deshalb nicht Gegenstand der hier vorliegenden Studie.

³ Für die Stadt Zürich handelt es sich um mögliche Beiträge zur Reduktion ihrer indirekten Emissionen.

1.4.3 Potenziell vermiedene Emissionen

Das Rezyklieren oder das Wiederverwenden von Baumaterialien und Bauelementen nach Erreichen ihrer Nutzungsdauer kann möglicherweise dazu führen, dass andernorts keine neuen Baumaterialien produziert oder Bauelemente hergestellt werden. Auf Basis einer «was wäre wenn»-Betrachtung können Emissionen abgeschätzt werden, die durch Recycling und Reuse ausserhalb der Systemgrenze des Gebäudes potenziell vermieden werden. Analoges gilt für Energie (in der Regel Elektrizität), die am oder im Gebäude erzeugt und teilweise exportiert wird. Potenziell vermiedene Emissionen sind keine Negativemissionen, sondern gelten als (potenzielle) Emissionsminderungen. Sie werden deshalb in diesem Bericht ebenfalls nicht thematisiert.

1.4.4 Natürliche Karbonatisierung

Bei Zement-basierten Baustoffen kann eine natürliche Karbonatisierung beobachtet werden. Das Ausmass der natürlichen Karbonatisierung hängt von verschiedenen Einflussgrössen ab, insbesondere von der Exposition des Bauteils, der Geometrie und Mächtigkeit des Bauteils, dem Vorhandensein von Wasser, allfälligen Massnahmen, die gegen die Karbonatisierung getroffen wurden und allfälligen Beschichtungen (wie beispielsweise Anstriche). Der Beitrag der natürlichen Karbonatisierung während der Nutzungsdauer von Gebäuden wird als gering eingeschätzt (siehe Abschnitt 4.2.4). Es ist umstritten, ob die natürliche Karbonatisierung als Negativemissionstechnologie gilt, da es sich dabei nicht um eine absichtliche Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre handelt.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

2.1 Einführung

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen zu Negativemissionstechnologien und der Wirkung des temporären Speicherns und permanenten Sequestrierens von biogenem Kohlenstoff beschrieben. Sie bilden die wesentliche Grundlage für die Beurteilung von NET-Baumaterialien.

2.2 Negativemissionstechnologien

Negativemissionstechnologien bezieht sich auf anthropogene Aktivitäten, die das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten und Bauwerken (in der Technosphäre) speichern⁴. Sie greifen in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde ein und richten sich direkt gegen die Grundursache des Klimawandels. Negativemissionstechnologien sind gemäss den neusten Erkenntnissen des IPCC (IPCC 2019, 2021) neben der erforderlichen massiven

⁴ Definition gemäss IPCC, (2021), Annex VII

Reduktion der Treibhausgas-Emissionen in grossem Massstab erforderlich, um den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf 1.5°C oder 2.0°C zu begrenzen.

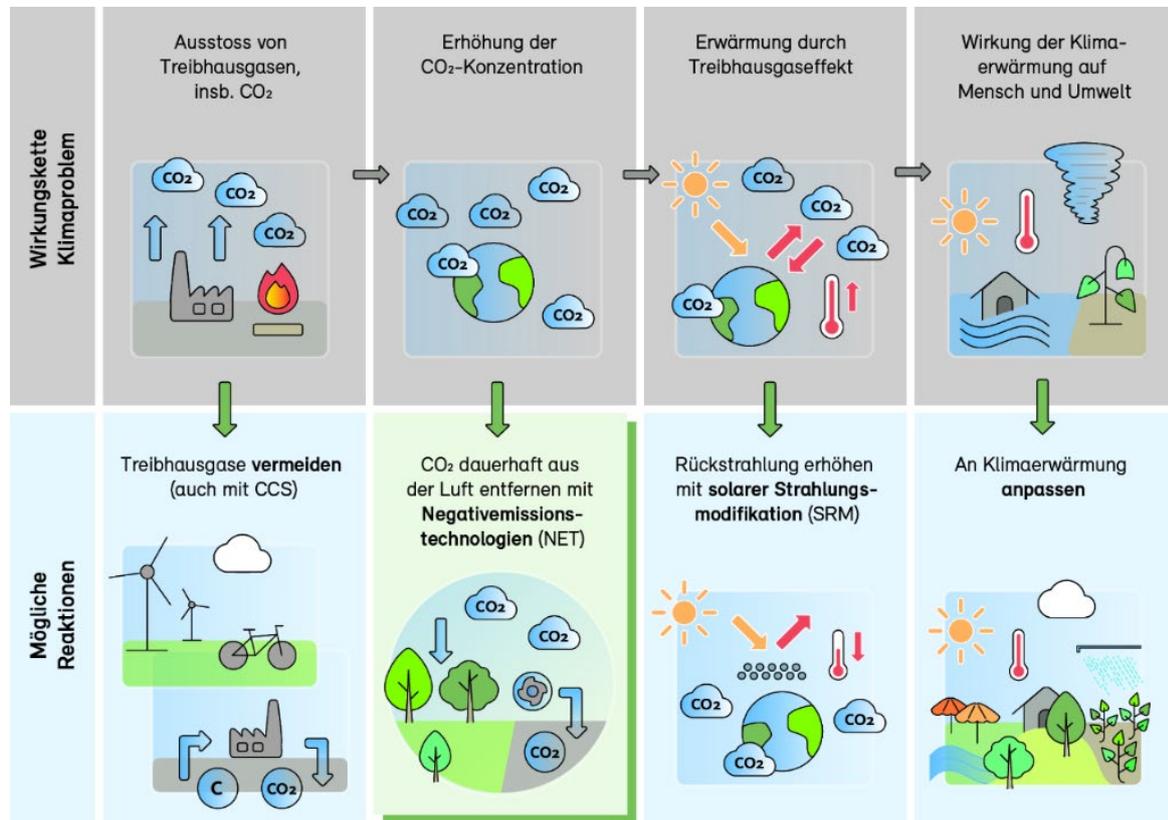


Fig. 2.1 Der Mensch kann entlang der Wirkungskette des Klimaproblems unterschiedlich reagieren. Quelle: [BAFU-Darstellung](#)

Gemäss heutigem Stand werden die folgenden Negativenemissionstechnologien unterschieden (Rueda et al. 2021):

- Auf- und Wiederaufforstung;
- Pflanzenkohle, in (landwirtschaftliche) Böden eingebracht;
- Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (BECCS);
- Direkte CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre und Speicherung (DACCS);
- Beschleunigte Verwitterung auf dem Land und in Meeren;
- Ozeandüngung; und
- Kohlenstoffsequestrierung in Böden.

Das permanente Speichern von biogenem Kohlenstoff in Baumaterialien ist ebenfalls eine Negativenemissionstechnologie, auch wenn sie in der genannten Publikation nicht explizit aufgeführt ist.

Negativemissionstechnologien sind klar zu unterscheiden von vermiedenen Emissionen. Potenziell vermiedene Emissionen, beispielsweise durch Investition in erneuerbare Energien oder durch das Auffangen und Verbrennen von aus Deponien entweichendem Methan, gelten nicht als Negativemissionstechnologien, sondern sind Massnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen.

Die aufgeführten negativen Emissionstechnologien unterscheiden sich deutlich in Bezug auf die Permanenz der Speicherung/Sequestrierung. Während BECCS, DACS und der forcierten Verwitterung eine hohe Permanenz attestiert wird (zwischen 9 und 10 auf einer Skala von 0 bis 10), wird diese bei allen übrigen negativen Emissionstechnologien als deutlich geringer beurteilt (Pflanzenkohle 2.0, Aufforstung 1.0, Rueda et al. 2021)).

Das Kriterium der Permanenz ist entscheidend, damit die Wirkung von NET auf die globale Mitteltemperatur auch von Dauer ist.

2.3 Temporäres Speichern von biogenem Kohlenstoff

Modellrechnungen führender Klimaforscher:innen zeigen deutlich, dass ein temporäres Speichern biogenen Kohlenstoffs lediglich zu einer Verzögerung des Temperaturanstiegs um ein paar Jahre führt. Matthews et al. (2022) haben verschiedene Szenarien modelliert, um den Effekt des temporären Speicherns unterschiedlich grosser Mengen biogenen beziehungsweise atmosphärischen Kohlenstoffs bei zwei unterschiedlichen Klimaszenarien (mit einem relativ schwachen Reduktionsziel, SSP2-4.5, beziehungsweise mit einem Paris-kompatiblen (max. 1.6°C) Reduktionsziel, SSP1-1.9) abzuschätzen (siehe Fig. 2.2).

Bei einer relativ schwachen Reduktion der Treibhausgasemissionen kann der Temperaturanstieg durch temporäres Speichern von biogenem Kohlenstoff maximal um ein paar Jahre verzögert, nicht aber reduziert werden (siehe gestrichelte Linien in Fig. 2.2, c.). Der langfristige Temperaturanstieg beträgt in jedem Fall etwas mehr als 2.8°C (siehe Fig. 2.2, e.). Bei einer sehr starken Reduktion, welche eine rasche und vollständige Dekarbonisierung des Energiesektors erfordert, kann der maximale Temperaturanstieg (peak warming) durch temporäres Speichern von biogenem Kohlenstoff um rund ein Zehntelgrad reduziert werden (1.45°C statt 1.55°C, siehe ausgezogene Linien in Fig. 2.2, c. und e.). Der mindernde Effekt einer temporären Speicherung verschwindet nachdem das gespeicherte CO₂ wieder emittiert wird und die langfristige Erhöhung der mittleren globalen Temperatur ist auch in diesem Klimaszenario mit und ohne temporäre Speicherung ab dem Jahr 2100 praktisch identisch (siehe ausgezogene Linien in Fig. 2.2, c.).

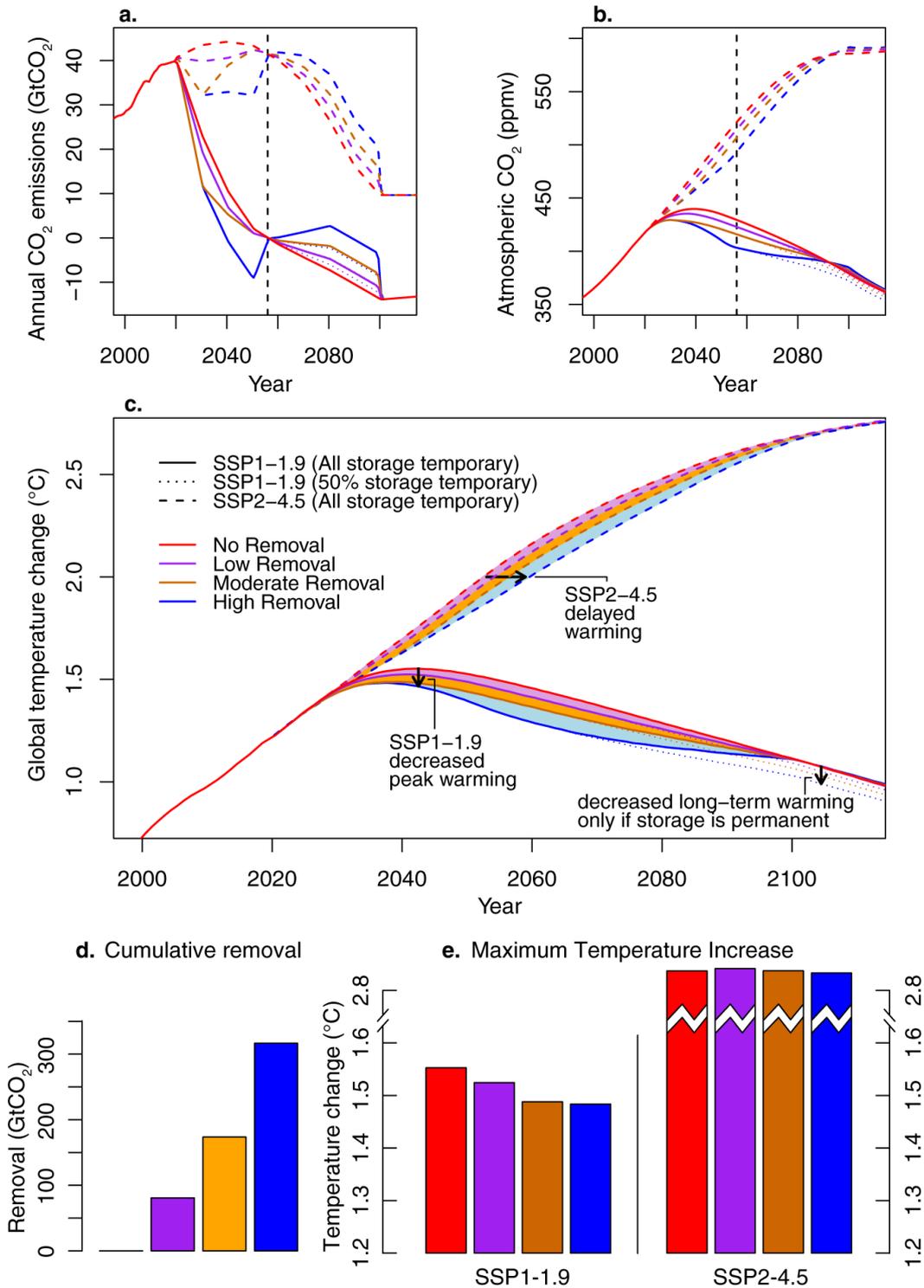


Fig. 2.2 Reaktionen des Weltklimas auf vorgegebene Szenarien zur temporären Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre (Matthews et al. 2022)

Daraus lassen sich die folgenden Schlüsse ableiten:

Das Entfernen von CO₂ aus der Atmosphäre reduziert die CO₂-bedingte globale Erwärmung für die Dauer des Kohlenstoffzugs.

Aus der Atmosphäre entferntes CO₂ sowie biogenes CO₂ muss permanent gespeichert (=sequestriert) werden, um den langfristigen Anstieg der globalen Mitteltemperatur zu mindern. Gemäss heutigen Kenntnissen dürfte eine Speicherung/Sequestrierung über einen Zeitraum von zwischen 3000 und 8000 Jahren (Halbwertszeit) das Kriterium der Permanenz erfüllen (Brunner 2022). Mit anderen Worten: Für biogenen beziehungsweise atmosphärischen Kohlenstoff, der heute in Gebäuden eingelagert wird, muss sichergestellt werden, dass dieser für 3000 bis 8000 Jahre nicht wieder in die Atmosphäre gelangt.

Das temporäre Sequestrieren biogenen Kohlenstoffs hat einen positiven Effekt auf den Klimawandel im Sinne einer leichten Reduktion des Temperaturmaximums, wenn diese Massnahme zusätzlich zur massiven Reduktion der fossilen CO₂-Emissionen auf ein absolutes Minimum umgesetzt wird und von permanenten Negativemissionen von jährlich mehreren Gigatonnen begleitet wird.

Um die Erwärmungswirkung der Emission einer Tonne CO₂ vollständig zu eliminieren muss mindestens eine Tonne CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden. Das Verwenden von Treibhauspotenzialen kleiner als 1 kg CO₂-eq pro kg CO₂ für das Wiederfreisetzen von temporär gespeichertem biogenem CO₂ lässt sich klimaphysikalisch nicht erklären.

Ein temporäres Speichern biogenen Kohlenstoffs verschafft Zeit, technische Lösungen zur Abtrennung, und zur permanenten Sequestrierung des biogenen CO₂ zu entwickeln und zur Marktreife zu bringen. Angesichts der zeitlichen Dringlichkeit ist dieser Zeitgewinn wichtig und eine grosse Chance. Ob der Zeitgewinn jedoch im beschriebenen Sinne genutzt wird, ist heute noch ungewiss.

3 Charakterisierung von NET-Baumaterialien

3.1 Einführung

Heute und in absehbarer Zukunft werden Baumaterialien eingesetzt, die möglicherweise zu anrechenbaren Negativemissionen führen. Die Materialien lassen sich in drei Klassen gruppieren nämlich solche,

1. die forciert karbonatisierte Zuschlagsstoffe enthalten (zum Beispiel Beton mit einem Anteil rezykliertem, karbonatisiertem Betongranulat oder Zement aus beschleunigt karbonatisierten Rohstoffen wie Magnesiumsilikat⁵);
2. die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden (zum Beispiel Holz, Holzwerkstoffe oder Strohballen);
3. die aus einer Mischung mineralischer und nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden (zum Beispiel mit Pflanzenkohle versetzter Beton, Hanfbeton).

⁵ www.carboncure.com, Zugriff am 26. Oktober 2022

Die drei vorgenannten Typen von Materialien werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben und charakterisiert. Dabei werden die folgenden Themen abgedeckt:

- a. Herstellung: Beschreibung der Art der Fixierung des atmosphärischen Kohlenstoffs im Baumaterial;
- b. Entsorgung: Schicksal des gespeicherten biogenen/atmosphärischen Kohlenstoffs;
- c. Normative Aspekte;
- d. Unsicherheiten und Forschungsbedarf;
- e. Empfehlung zu Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen.⁶

In Unterkapitel 5.3 werden Empfehlungen zur Quantifizierung und Bezugsgrösse gegeben. Anhang B enthält eine alphabetisch geordnete Liste der Materialien mit Zuordnung zum «Speichertyp».

3.2 Karbonatisierte mineralische Baumaterialien (KM)

3.2.1 Beschreibung und Beispiele

Recycling-Betongranulat stammt aus dem Abbruch von Gebäuden und Infrastrukturbauten. Es wird in Aufbereitungsanlagen in den im Hoch- und Tiefbau geforderten Korngrössen hergestellt und bei der Herstellung von Recycling-Beton eingesetzt. Das Recycling-Betongranulat eignet sich aufgrund des günstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses für eine forcierte/beschleunigte Karbonatisierung. Karbonatisierte mineralische Baumaterialien sind bereits auf dem Markt erhältlich.

3.2.2 Herstellung

Bei der Herstellung von Zement fallen grosse Mengen CO₂ an. Ein Drittel davon entfällt auf die Bereitstellung der thermischen Energie aus meist fossilen Brennstoffen. Die restlichen Emissionen gehen auf die chemischen Prozesse (Kalzinierung) zurück, welche auch bei der Verwendung erneuerbarer Brennstoffe auftreten. Dieser chemische Vorgang ist (teilweise) reversibel und kann mit technischen Mitteln beschleunigt werden.

Bei der forcierten Karbonatisierung wird das Recycling-Betongranulat mit CO₂, welches entweder bei der Reinigung von Rohbiogas abgetrennt oder direkt aus der Atmosphäre entnommen wird, während mehrerer Stunden begast. Das CO₂ bindet sich während der Reaktion mit dem kalzinierten Zement zu Calciumcarbonat (CaCO₃). Somit werden ein Teil des bei der Herstellung von Zement emittierten CO₂ wieder gebunden. Heutige Anlagen können auf diese Weise

⁶ Das Thema ReUse (Frage 11) wird nicht generell diskutiert. Vielmehr wird ein Vorschlag gemacht, wie im Falle der Wiederverwendung von Bauteilen mit der Speicherwirkung und mit negativen Emissionen umgegangen werden soll.

rund 10 kg CO₂ (also rund 2.7 kg Kohlenstoff) pro m³ Beton beziehungsweise 5.7 kg CO₂ pro Tonne Recycling-Betongranulat einbinden⁷.

3.2.3 Entsorgung

Beton mit forciert karbonatisiertem Betongranulat wird wie konventioneller Beton rückgebaut, gebrochen und aufbereitet für die nächste Nutzung. Gemäss aktuellem Stand des Wissens wird etwas mehr als ein Drittel deponiert, der Rest stofflich verwertet (Klingler & Savi 2021). Bei Rückbau, Aufbereitung und Herstellung von Recyclingbeton oder dem Einsatz von Recycling-Betongranulat als Koffermaterial verbleibt der chemisch gebundene biogene Kohlenstoff im Beton(-granulat).

3.2.4 Normative Aspekte

CO₂-Emissionen infolge Kalzinierung und CO₂-Entfernung durch (Re-)Karbonatisierung sollen gemäss der europäischen Norm EN 15804:2012+A2:2019, Ziffer C.2.3 unter den fossilen Treibhausgasemissionen verbucht werden.

3.2.5 Unsicherheiten und Forschungsbedarf

Für ein erneutes Freisetzen des im Calciumcarbonat gebundenen Kohlenstoffs bedarf es hoher Temperaturen. Das Recycling-Betongranulat müsste für ein Freisetzen also wie Klinker gebrannt werden. Dass dieser Prozess unter natürlichen Bedingungen abläuft oder dass Recycling-Betongranulat absichtlich in Kehrrechtverbrennungsanlagen thermisch behandelt wird, ist sehr unwahrscheinlich. Das in karbonatisierten Baustoffen forciert gebundene CO₂ kann deshalb als permanent sequestriert gelten.

Eine wesentliche Unsicherheit liegt in zurzeit, Stand Juni 2022, noch spärlich vorhandenen Ökobilanzdaten zur Herstellung von karbonatisiertem Recycling-Betongranulat. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Hersteller von forciert karbonatisierten Baustoffen die für die KBOB-Empfehlung erforderlichen Ökobilanzen in naher Zukunft erarbeiten werden.

3.2.6 Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen

Die Entnahme des biogenen Kohlenstoffs aus der Atmosphäre wird bei seiner Entnahme aus der Atmosphäre oder bei seiner Abtrennung aus dem Rohbiogas (Reinigung) als negative CO₂-Emission verbucht.

Bei der Entsorgung am Ende der Lebensdauer von Bauteil beziehungsweise Gebäude wird kein aus dem Baumaterial stammendes biogenes CO₂ freigesetzt.

Die Aufwendungen für die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre beziehungsweise zur Abtrennung aus Rohbiogas, die Lagerung des gewonnenen CO₂, der Transport zu den Behandlungsanlagen (meist Beton- und Kieswerke) und die anschliessende forcierte Karbonatisierung

⁷ Unter Annahme von 1'750 kg Recycling-Betongranulat pro m³ Beton.

des Recycling-Betongranulats sind in einer klassischen, detaillierten Ökobilanz zu quantifizieren und modellieren.

3.3 Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe (NR)

3.3.1 Beschreibung und Beispiele

Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe weisen als Baumaterial weiterhin die wesentlichen Merkmale der nachwachsenden Rohstoffe auf. Nachwachsende Rohstoffe auf Pflanzenbasis binden Kohlenstoff aus der Atmosphäre im Rahmen der Photosynthese, also während des Wachstums. Die Speichermenge ist abhängig von der Masse, Dichte, dem Alter der Pflanzen und der Stehdauer. Der wichtigste nachwachsende Rohstoff im Schweizer Bauwesen ist Holz. Holz und Holzwerkstoffe finden ihren Einsatz als primäre Tragkonstruktion, aber auch als Bekleidungen und im Innenausbau. Der Einsatz von Baumaterialien aus anderen nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh, Bambus oder Schafwolle ist zurzeit (Stand Juli 2022) überschaubar und mengenmässig von untergeordneter Relevanz. Diese Baumaterialien finden jedoch zunehmend Beachtung.

3.3.2 Herstellung

Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe können eine stark variierende Fertigungstiefe aufweisen. Insbesondere bei Holzwerkstoffen ist die Bandbreite von Balken, Latten oder Brettern aus sägerohem Vollholz über verleimte Brettschichtträger bis hin zu Weichfaserplatten und Grobspanplatten gross. Der tatsächliche Anteil an nachwachsenden Rohstoffen in den Holzwerkstoffen ist entsprechend unterschiedlich. Die Menge gespeicherten biogenen Kohlenstoffs liegt zwischen 0.4 und 0.46 kg C pro kg.

Bei Baumaterialien aus anderen nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh oder Schafwolle handelt es sich in der Regel um Abfall- oder Nebenprodukte aus Produktionsketten in der Landwirtschaft oder Tierzucht. Hier stellt sich in den meisten Fällen die Frage der angemessenen Zuordnung der landwirtschaftlichen Aufwendungen und Emissionen auf die in den Baumaterialien genutzten Rohstoffe. Ein Beispiel hierfür sind das Stroh und die Weizenkörner aus dem Anbau von Weizen.

3.3.3 Entsorgung

Gemäss den aktuellsten Untersuchungen zu Rückbau und Entsorgung von Baumaterialien (Klingler & Savi 2021) werden in der Schweiz knapp 16.5 % der Holz- und Holzwerkstoffe in einer Kehrichtverbrennungsanlage und knapp 0.5 % in einer Deponie Typ E entsorgt. Die restlichen 83 % werden stofflich (36.5 %) und energetisch (46.5 %) verwertet. Somit wird heute knapp zwei Drittel des biogenen Kohlenstoffs freigesetzt, entweder in Kehrichtverbrennungsanlagen oder in Altholz-Heizkraftwerken.

Die beim Verbrennen des Altholzes erzeugte Energie kann dazu dienen, die Treibhausgasemissionen andernorts zu senken. Dabei handelt es sich also um potenziell vermiedene Emissionen

ausserhalb der Systemgrenze (von Gebäuden) und nicht um Negativemissionstechnologien. Potenziell vermiedene Emissionen sind nicht anrechenbar, siehe auch KBOB-Bilanzierungsregeln, Ziffern 6.10 und 7.3 (KBOB et al. 2021).

3.3.4 Normative Aspekte

Die europäische Norm EN 15804:2012+A2:2019 verlangt nach einer ausgeglichenen Bilanz der biogenen CO₂-Emissionen, ungeachtet des Entsorgungsweges (Recycling, Verbrennung, Deponie). Gemäss dieser Norm darf selbst eine permanente Speicherung bei der Ermittlung der biogenen Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt werden (Ziffer 5.4.3 der genannten Norm). In der CO₂-Verordnung Artikel 5, Absatz 2 (Schweizerischer Bundesrat 2022) werden Projekten und Programmen, bei denen die Speicherung mindestens 30 Jahre dauert, eine permanente Senkenleistung bescheinigt. Beides widerspricht den wissenschaftlichen Erkenntnissen, wonach biogener Kohlenstoff der über einen Zeitraum von 3000 bis 8000 Jahren sequestriert wird, einen reduzierenden Einfluss auf den Anstieg der durchschnittlichen globalen Erdtemperatur ausübt (siehe Unterkapitel 2.3).

3.3.5 Unsicherheiten und Forschungsbedarf

Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe können in Gebäuden als temporärer gegebenfalls auch als permanenter Speicher dienen. Beim Errichten von Gebäuden ist ungewiss, wie diese Baumaterialien rückgebaut und rezykliert oder entsorgt werden. Es ist also unsicher, ob das der Atmosphäre entnommene CO₂ freigesetzt oder der biogene Kohlenstoff mit einer Wiederverwendung oder mit Recycling für einen weiteren Produktlebenszyklus (unbekannter Dauer) gespeichert bleibt. Diese Unsicherheiten lassen sich nicht mit Forschung reduzieren, sondern liegen in der Natur der Sache.

3.3.6 Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen

Die Bilanz des biogenen Kohlenstoffs soll gemäss der Norm SN EN 15804:2012+A2:2019 über den gesamten Lebensweg eines Baumaterials ausgeglichen sein. Die Entnahme biogenen CO₂ beim Wachstum der nachwachsenden Rohstoffe und die Emissionen biogenen CO₂ bei Entsorgung beziehungsweise Recycling müssen sich die Waage halten und ergeben damit Netto-Null biogene CO₂ Emissionen.

In der Treibhausgasbilanz eines Gebäudes darf davon nur abgewichen und nur die CO₂-Entfernung nicht aber die CO₂-Emission verbucht werden, wenn rechtlich verbindlich zugesichert wird, dass der in den Baumaterialien enthaltene biogene Kohlenstoff beim Bauteilersatz beziehungsweise Rückbau abgetrennt und permanent endgelagert wird. Wird das Baumaterial rezykliert oder wiederverwendet, so muss diese rechtlich verbindliche Zusicherung an den Abnehmer beziehungsweise die Abnehmerin des Materials übertragen werden.

3.4 Mineralisch-organische Baumaterialien (MO)

3.4.1 Beschreibung und Beispiele

Unter der Kategorie mineralisch-organischer Baumaterialien fallen zwei Typen von Materialien. Zum einen werden typischen mineralischen Baustoffen wie Beton oder Backsteine Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen beigemischt. Dabei kann es sich um wenig verarbeitete Nebenprodukte aus der Landwirtschaft handeln wie Stroh (typischerweise aus dem Anbau von Weizen stammend) oder um mineralisierte Produkte wie Pflanzkohle.

Zum anderen werden organische Materialien mit Zement oder anderen mineralischen Bindemitteln verfestigt. Zu dieser Kategorie zählen beispielsweise Gipsfaser- und Holzzementplatten oder auch Hanfbeton.

3.4.2 Herstellung

Die Materialien dieser Kategorie werden im Wesentlichen durch Mischen von organischen und mineralischen Rohstoffen hergestellt. Ein wesentliches Merkmal der Herstellung ist damit das Fehlen einer chemischen Reaktion/Mineralisierung des biogenen Kohlenstoffs im Baumaterial. Der biogene Kohlenstoff liegt nicht in oxidiert (mineralisierter) Form (wie beispielsweise CO_2 oder CaCO_3) vor, sondern in Form organischer Verbindungen wie beispielsweise $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}$ (Braunkohle).

3.4.3 Entsorgung

Der Gehalt der Materialien dieser Kategorie an organischem Kohlenstoff liegt meist deutlich über dem TOC-Grenzwert von 2 Massen-% für inerte Baustoffe⁸, die auf einer Deponie des Typs B abgelagert werden dürfen. Sie werden in der Regel in einer KVA entsorgt oder deponiert und zwar in einer Deponie des Typs E (nicht brennbare Abfälle aus Verbundstoffen). Gemäss Klingler und Savi (2021) werden mineralisch-organische Verbundstoffe zu 97.5 % verbrannt und zu 2.5 % deponiert, Gipswerkstoffe hingegen grossmehrheitlich deponiert.

3.4.4 Normative Aspekte

Die Materialien dieser Kategorie fallen unter die Gruppe von Materialien, bei denen die -1/+1 Bilanzierung des biogenen CO_2 der Norm EN 15804:2012+A2:2019 anzuwenden ist.

3.4.5 Unsicherheiten und Forschungsbedarf

Die grösste Unsicherheit besteht im Verhalten des biogenen Kohlenstoffs in der Bauschuttsortierung und der Aufbereitung der Rohstoffe. Die verschiedenen Materialien der Kategorie «mineralisch-organisch» unterscheiden sich in der Entsorgung und dem Stoffschicksal des organischen Kohlenstoffs.

⁸ Der aktuell auf dem Markt angebotene Pflanzkohlebeton enthält 40 kg C, was einem Gehalt von rund 1.6 % entspricht. Dieser Pflanzkohlebeton hält somit den TOC-Grenzwert für Inertstoffe ein.

Bei der Entsorgung von mit Pflanzenkohle versetztem Beton beziehungsweise bei der Herstellung von Betongranulat aus diesem Material verbleibt der biogene Kohlenstoff in der Betonmatrix (im Betongranulat) beziehungsweise in der Feinfraktion, die ebenfalls für die Herstellung neuer Baustoffe verwendet wird.⁹ Das Verhalten und das Stoffschicksal der Pflanzenkohle im deponierten Betonabbruch sollen mit Eluattests eruiert und quantifiziert werden.

Bei Materialien wie Hanfbeton oder Holzzementplatten wird Kalk/Zement und Hanf/Holz zu trennen versucht. Der Zement wird derzeit deponiert und die Hanfschäben werden kompostiert (Talandier et al. 2016a, b). Der Kohlenstoff liegt damit im organischen Material vor und wird früher oder später wieder als biogenes CO₂ freigesetzt.

Eine weitere Unsicherheit liegt in zurzeit, Stand Juni 2022, noch fehlenden Ökobilanzdaten zur Herstellung von Pflanzenkohle und in der Allokation zwischen Hanfsamen und Hanfstroh (Schäben). Die landwirtschaftlichen Aufwände der Kultivierung von Hanf wurden auf Basis der spezifischen Preise und der Hektarerträge auf Samen und Stroh/Schäben aufgeteilt (Talandier et al. 2016a).

3.4.6 Modellierung, Randbedingungen und Anforderungen

Die Bilanz des biogenen CO₂ über den gesamten Lebensweg soll gemäss der Norm SN EN 15804:2012+A2:2019 Netto-Null ergeben. Das während dem Wachstum (des Baums, der Hanfpflanze, etc.) der Atmosphäre entzogene CO₂ wird bei der Entsorgung oder darauffolgenden Prozessen wieder freigesetzt. Zumindest ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass der in diesen Materialien enthaltene biogene Kohlenstoff wieder freigesetzt wird. Ob dies bei Gipsfaser- oder Holzzementplatten der Fall ist, ist heute noch unklar. Solange hier Unklarheit herrscht wird eine Modellierung empfohlen, die von einer 100 % Freisetzung des biogenen Kohlenstoffs bei Rückbau und Entsorgung am Lebensende ausgeht.¹⁰

Von einer Modellierung mit einer Freisetzung biogenen Kohlenstoffs kann abgesehen werden, falls der Nachweis einer langfristigen und rechtlich verbindlichen Regelung erbracht wird, den in den Materialien enthaltenen biogenen Kohlenstoff am Ende der Lebensdauer der Bauelemente abzutrennen und entweder für eine permanente Sequestrierung oder ein Recycling oder Reuse besorgt zu sein (siehe Frischknecht et al. 2022).

3.4.7 Einschätzung zu Pflanzenkohlebeton von Cyril Brunner¹¹

Forschungsarbeiten zur Verweilzeit von Pflanzenkohle in Beton sind im Gang. Es liegen aber noch keine Ergebnisse vor und es ist auch keine Literatur zu diesem Thema bekannt.

Falls der Beton nach dem Abriss intakt bleibt, ist zu erwarten, dass die Speicherung des Kohlenstoffs länger andauern dürfte, als wenn die Pflanzenkohle in Böden eingearbeitet würde.

⁹ Aktennotiz, Michael Pöll, Fachstelle Umweltgerechtes Bauen, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 3. Oktober 2022.

¹⁰ Bei Pflanzenkohlebeton kann der Anteil des freigesetzten CO₂ auf Basis belastbarer empirischer Daten tiefer angesetzt werden.

¹¹ Persönliche Kommunikation, 2. Dezember 2022

Falls der Beton wegen dem Pflanzenkohleanteil jedoch in die KVA müsste, wäre dies im Hinblick auf den Klimaschutz kontraproduktiv. Einerseits, weil Carbonate im Beton dann gebrannt/kalziniert werden und somit CO₂ abgeben und andererseits, weil die Pflanzenkohle auch verbrannt wird.

Allgemein ist die Einschätzung verbreitet, dass die Pflanzenkohle besser als Futterzusatz verwendet werden sollte und somit indirekt in die Böden, oder direkt in die Böden eingearbeitet werden sollte (je nachdem mit oder ohne vorgängigem Beladen mit Nährstoffen). Gerade unter der zunehmenden Trockenheit bzw. den extremeren Niederschlägen mit dem fortschreitenden Klimawandel dürfte sich dies auch bei den meisten Schweizer Böden positiv auswirken, während Pflanzenkohle in Beton keinen oder nur einen bescheidenen Mehrwert bietet.

Es stellt sich die Frage zur generellen Absicht beim Einsatz von Pflanzenkohle:

Falls die Absicht ist, Methoden zur CO₂-Entfernung wie Pflanzenkohle zu unterstützen, ist dies sicherlich eine gute und aus meiner Sicht zielführende Sache.

Falls es aber die Absicht ist, die Gesamtreibhausgasemissionen des Gebäudes zu verringern, finde ich den Einsatz von Pflanzenkohle in Beton suboptimal. Denn bei diesem Vorgehen wird die eigentliche Quelle der Emissionen nicht adressiert (also bei der Zementherstellung), obwohl wir dafür Lösungen hätten (z.B. CCS bei der konventionellen Zementherstellung). Auch der Preis zeigt in dieselbe Richtung: obwohl ~ 600 CHF/tCO₂-eq ein fairer Preis für die Herstellung und Speicherung von Pflanzenkohle wäre, lägen die Vermeidungskosten bei der Zementherstellung eigentlich deutlich tiefer (bei CCS anfänglich um die 150-180 CHF/tCO₂, künftig um die 90-110 CHF/tCO₂). Mit CCS hergestellter Zement wird aber noch nicht kommerziell angeboten und eine erste Anlage wird erst 2024 in Norwegen in Betrieb gehen.

4 Bilanzierungsansätze

4.1 Grundlagen und Arbeiten

Die Speicherwirkung von Treibhausgasemissionen wird in unterschiedlichen Ansätzen bilanziert. Sie werden hier aus wissenschaftlicher Sicht eingeordnet.

Vor bald zehn Jahren wurde ein sogenannt «dynamischer» Bilanzierungsansatz publiziert (Levasseur et al. 2013), bei welchem Treibhauspotenziale angewendet werden, deren Höhe vom Zeitpunkt der Emission und/oder von der Rotationszeit der geernteten Biomasse abhängen. Dieser Ansatz wird bis heute zitiert und immer wieder verwendet bei der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Holzbauten (Hoxha et al. 2020) beziehungsweise beim Einsatz von Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe in Gebäuden (Mennibus et al. 2019; Pittau et al. 2018; Pittau et al. 2019; Pittau & Habert 2021). Zeitabhängige Treibhausgaspotenziale werden neu auch in der französischen Gesetzgebung verwendet (Ministère de la Transition Ecologique 2021).

In zwei Studien für die Fachstelle Umweltgerechtes Bauen des Amts für Hochbauten der Stadt Zürich wurde das Potenzial der Speicherung von biogenem Kohlenstoff in Gebäuden adressiert (Pittau & Habert 2021; Savi & Klingler 2021). Im weiteren haben nova Energie und Carbotech eine Untersuchung zu klimapositivem Bauen durchgeführt (Näf et al. 2021). Im Rahmen dieser

Arbeit wurde ein Vorschlag zur Anrechnung der Klimawirkung des Speicherns biogenen Kohlenstoffs in Gebäuden formuliert.

Das Öko-Institut in Deutschland hat kürzlich die sogenannte CO₂-Speichersaldo-Methode zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen von Holz und Holzwerkstoffen publiziert.¹²

In Unterkapitel 4.2 wird die Vorgehensweise und Methodik der Studie von Pittau & Habert (2021) beschrieben und kritisch gewürdigt, die auf dem sogenannten «dynamischen» Ansatz basiert, Unterkapitel 4.3 enthält eine Beschreibung und Beurteilung des Ansatzes aus der Studie zu klimapositivem Bauen (Näf et al. 2021). In Unterkapitel 4.4 wird der Ansatz «CO₂-Speichersaldo» vorgestellt und diskutiert. Im Unterkapitel 4.5 wird eine Bilanzierungs- und Bewertungsmethode vorgestellt, die mit dem 1.5°C Ziel vereinbar ist. Unterkapitel 4.6 enthält eine Stellungnahme von Dr. Cyril Brunner, Klimaphysik, ETH Zürich.

4.2 «Dynamische» Bilanzierung der Treibhausgasemissionen

Die «dynamische» und die «semi-dynamische» Ökobilanz wurde ursprünglich von Levasseur et al. (2013) entwickelt und publiziert. Die Methoden werden von Pittau & Habert (2021) angewendet. Ihre Anwendung basiert auf drei wesentlichen Grundlagen (fixer Zeithorizont, Wahl des Zeitpunkts der CO₂-Entfernung, Einfluss der Rotationsdauer nachwachsender Rohstoffe), welche in den drei folgenden Abschnitten beschrieben und diskutiert werden. In einem separaten Abschnitt werden die in der zitierten Studie präsentierten Ergebnisse in Bezug auf die natürliche Karbonatisierung beschrieben und mit Ergebnissen einer anderen Untersuchung verglichen.

4.2.1 Fixer Zeithorizont 100 Jahre

Die Autoren der hier besprochenen Studie mit «dynamischem» Ansatz fixieren den Zeithorizont auf 100 Jahre. Dabei verweisen sie auf den in der Klimapolitik verwendeten Integrationszeitraum von 100 Jahren zur Bestimmung der relativen Wirksamkeit (Strahlungsantrieb) der Treibhausgase (Treibhauspotenzial, GWP, integriert über 100 Jahre). Die Treibhauswirkung entspricht der weissen Fläche unterhalb der schwarzen Kurve in Fig. 4.1.

Durch den fixierten Zeithorizont wird der Strahlungsantrieb von Emissionen, die später auftreten (teilweise) nicht berücksichtigt (grau schattierte Fläche in Fig. 4.1 am Beispiel einer Emission im Jahr 71). Treibhausgase, die später im Lebenszyklus von Gebäuden, beispielsweise in der Entsorgungsphase nach 60 Jahren emittiert werden, haben gemäss diesem Ansatz eine deutlich geringere klimaerwärmende Wirkung (weisse Fläche unter der grauen Kurve) als Emissionen bei der Herstellung (und der Produktion von Baumaterialien) im Jahr 1 (weisse Fläche unter der schwarzen Kurve).

¹² <https://co2-speichersaldo.de/de/index.html>, Zugriff am 20. Juni 2022

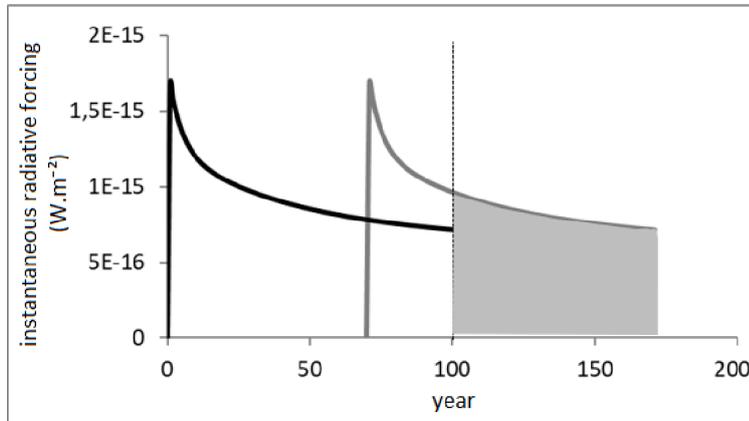


Fig. 4.1 Momentaner Strahlungsantrieb der Emission von 1 kg CO₂ im Jahr 1 und im Jahr 71, bei einem (fixen) Zeithorizont von 100 Jahren (Mennibus et al. 2019)

Der Integrationszeitraum von in der Regel 100 Jahren zur Bestimmung der relativen Wirksamkeit der Emission von 1 kg eines Treibhausgases, ausgedrückt mit dem «Treibhauspotenzial» (global warming potential, GWP) gilt jedoch unverändert für alle Emissionen und unabhängig vom Emissionszeitpunkt.

Der Integrationszeitraum zur Bestimmung der relativen Wirksamkeit der Emission von 1 kg eines Treibhausgases hat also keinen Zusammenhang mit dem Zeithorizont der Ökobilanzstudie, welcher bei Gebäude-Ökobilanzen der Referenz-Nutzungsdauer entspricht.

Deshalb äussern sich Klimaforscher wie beispielsweise Cyril Brunner, ETHZ (Brunner 2022) mit Verweis auf wissenschaftliche Beiträge wie Matthews et al (2010; 2022) gegen diese Art der «dynamischen» Bilanzierung und das damit verbundene Berücksichtigen einer reduziert Klimawirkung zukünftiger Emissionen.

4.2.2 CO₂-Entfernung vor oder nach dem Ernten

In den «dynamischen» Ökobilanzen wird die CO₂-Entfernung des geernteten oder des an derselben Stelle neu gepflanzten nachwachsenden Rohstoffs berücksichtigt. Im ersten Fall erfolgt die CO₂-Entfernung also vor der Ernte. Damit wird das Einspeichern des im Rohstoff tatsächlich enthaltenen Kohlenstoffs modelliert. Im zweiten Fall erfolgt die CO₂-Entfernung nach der Ernte. Dieser Modellierung liegt die Überlegung zugrunde, dass für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern für jeden gefälltten Baum ein neuer Baum zu pflanzen und grosszuziehen ist.

Durch das Fixieren des Zeithorizonts auf 100 Jahre kommt der Wahl zwischen diesen beiden Varianten eine grosse Bedeutung zu.

Wird die CO₂-Entfernung durch die nachwachsende Biomasse nach der Ernte als negative CO₂-Emissionen verbucht (CO₂-Entfernung *nach* Ernte) und mit dem «dynamischen» Ansatz bewertet, so ist infolge des über die Zeit abnehmenden Treibhauspotenzials von CO₂ (siehe Abschnitt 4.2.1) die vermeintliche entlastende Wirkung bei schnell wachsenden Rohstoffen wie Stroh grösser als bei langsam wachsenden wie Holz. Dies führt zu den beispielsweise in Pittau

et al. (2018) und Pittau & Habert (2021) formulierten Empfehlungen zugunsten schnell nachwachsender Rohstoffe.

Würde hingegen die CO₂-Entfernung der geernteten Biomasse als Negativemission verbucht (CO₂-Entfernung *vor* Ernte), würden die Empfehlungen auf Basis der «dynamischen» Bilanzierung eher zugunsten langsam wachsender Rohstoffe ausfallen.

4.2.3 Konnex zwischen Verweildauer im Speicher und Rotationsdauer

In der «semi-dynamische» Methode werden die Verweildauer nachwachsender Rohstoffe in Gebäuden (Amortisationsdauer der Bauteile gemäss SIA 2032) und der Rotationsdauer nachwachsender Rohstoffe (Zeitdauer zwischen Aussaat bis Ernte) miteinander in Bezug gebracht. Die CO₂-Entfernung wird lediglich für die Zeitspanne der Verweildauer im Gebäude, beziehungsweise der Produktelebensdauer berücksichtigt.

Theoretisch würde das Verwenden nachwachsender Rohstoffe mit langer Rotationsdauer wie beispielsweise Holz für Produkte mit kurzer Lebensdauer dazu führen, dass die Wälder nicht nachhaltig genutzt werden. Die Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung eines Waldes hängt jedoch nicht ab von der Lebensdauer der aus dem Holz hergestellten Produkte, sondern vom Verhältnis zwischen geernteter und nachwachsender Holzmenge (sowie natürlich weiteren, nicht Stofffluss-bezogenen Aspekten).

4.2.4 Natürliche Karbonatisierung

Die Karbonatisierung, das heisst die Rückbindung des beim Kalzinieren in die Atmosphäre freigesetzten geogenen CO₂ (im Wesentlichen aus Kalkstein), erfolgt einerseits natürlich, andererseits vermehrt auch forciert. In der Studie von Pittau & Habert (2021) wird die natürliche Karbonatisierung modelliert und deren Beitrag zur CO₂-Entfernung mit verschiedenen Ansätzen, unter anderem auch mit der dynamischen Methode quantifiziert¹³. Der Beitrag der Karbonatisierung über 100 Jahre im (heutigen und zukünftigen) Gebäudebestand der Stadt Zürich ist unabhängig von der Wahl des Modellierungsansatzes (klassisch oder «dynamisch») mit weniger als 0.5 % bezogen auf die gesamten Treibhausgasemissionen sehr gering.

Die Erkenntnis von Pittau & Habert (2021) deckt sich mit derjenigen einer Abschätzung auf Basis eines Wohngebäudes (Werner & Frischknecht 2018). Bei jenem Wohngebäude (Rautstrasse Zürich, Massivbau) beträgt die CO₂-Entfernung durch natürliche Karbonatisierung über 60 Jahre zwischen 0.5 % (realistisch) bis 1.5 % (optimistisch) der gesamten Treibhausgasemissionen der Errichtung (das heisst ohne Treibhausgasemissionen im Betrieb).

4.2.5 Kritik und Einschätzung

Der «dynamischen» Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Produkten und Investitionsgütern wie Gebäuden liegen nicht objektiv begründbare Grundlagen und eine sachlich falsche

¹³ Das Ziel der Studie war Konsistenz in der Methode mineralische Materialien und Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Diskontierung der Erwärmungswirkung verzögerter CO₂-Emissionen zugrunde. Darauf basierende Empfehlungen, insbesondere das Bevorzugen rasch wachsender Rohstoffe wie Stroh gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen sollten nicht ausgesprochen werden.

Nicht das Wachstumstempo ist entscheidend in Bezug auf die Beeinflussung der Veränderung der globalen Mitteltemperatur sondern die Permanenz der Speicherung biogenen Kohlenstoffs.

4.2.6 Fazit

Von der Anwendung einer «dynamischen» Bilanzierung wird abgeraten. Stattdessen wird eine 1.5°C Ziel taugliche Bilanzierung empfohlen (siehe Unterkapitel 4.5).

4.3 Klimapositives Bauen

4.3.1 Wesentliche Merkmale

In der Studie zu klimapositivem Bauen wird betont, dass eingespeicherter biogener Kohlenstoff in kg C auszuweisen und auf eine Aggregation mit den bei Erstellung und Betrieb verursachten Treibhausgasemissionen zu verzichten sei.

Trotzdem wird vorgeschlagen, dem in Gebäuden gespeicherten biogenen Kohlenstoff ein Treibhauspotenzial von knapp 1.5 kg CO₂-eq pro kg C (entspricht 0.4 kg CO₂-eq pro kg CO₂) zuzuordnen. Dieser orientiert sich an den Werten für das Treibhauspotenzial wie sie in den sogenannten «dynamischen» Bilanzierungsmethoden (siehe Unterkapitel 4.2) verwendet werden.

4.3.2 Kritik und Einschätzung

Die Autoren und Autorinnen der Studie klimapositives Bauen schreiben, dass es sich beim vorgeschlagenen Ansatz um eine subjektive, auf Werturteilen basierende Bewertung handelt. Der politisch motivierte Vorschlag lässt eine wissenschaftliche Grundlage vermissen und blendet wissenschaftliche Erkenntnisse zur Wirkung des temporären Speicherns von biogenem beziehungsweise atmosphärischem Kohlenstoff aus.

4.3.3 Fazit

Von einer Anwendung des Ansatzes «klimapositives Bauen» wird abgeraten. Stattdessen wird eine 1.5°C Ziel taugliche Bilanzierung empfohlen (siehe Unterkapitel 4.5).

4.4 CO₂-Speichersaldo

4.4.1 Wesentliche Merkmale

In Deutschland wurde vor kurzem die sogenannte CO₂-Speichersaldo Methode publiziert, welche den Anspruch hat, die CO₂- und Treibhausgasemissionen der Holznutzung zu quantifizieren. Die Kohlenstoffspeicherung von Szenarien einer intensiven Holznutzung werden mit sol-

chen einer extensiven Holznutzung verglichen. Zudem werden auch die Treibhausgasemissionen der Weiterverarbeitung des geernteten Holzes zu Holzwerkstoffen und Brennstoffen sowie die potenziell vermiedenen Treibhausgasemissionen von Alternativprodukten berücksichtigt (siehe Fig. 4.2).

Aus der Beschreibung der Methode geht nicht hervor, wie hoch die Einschlagmengen der intensiven beziehungsweise extensiven Waldbewirtschaftung im Vergleich zum Holzwachstum angesetzt werden. Es ist zu vermuten, dass bei extensiver Bewirtschaftung die Biomasse netto zunimmt und damit im Wald pro m³ Einschlag mehr CO₂ gespeichert wird als bei intensiver Bewirtschaftung. Die jährliche Zunahme des Kohlenstofflagers in deutschen Wäldern wird in Bezug gesetzt zur jährlichen Einschlagmenge. Wird mehr Holz eingeschlagen, wächst das Kohlenstofflager des Waldes langsamer und gleichzeitig wird die Bezugsgröße kleiner.

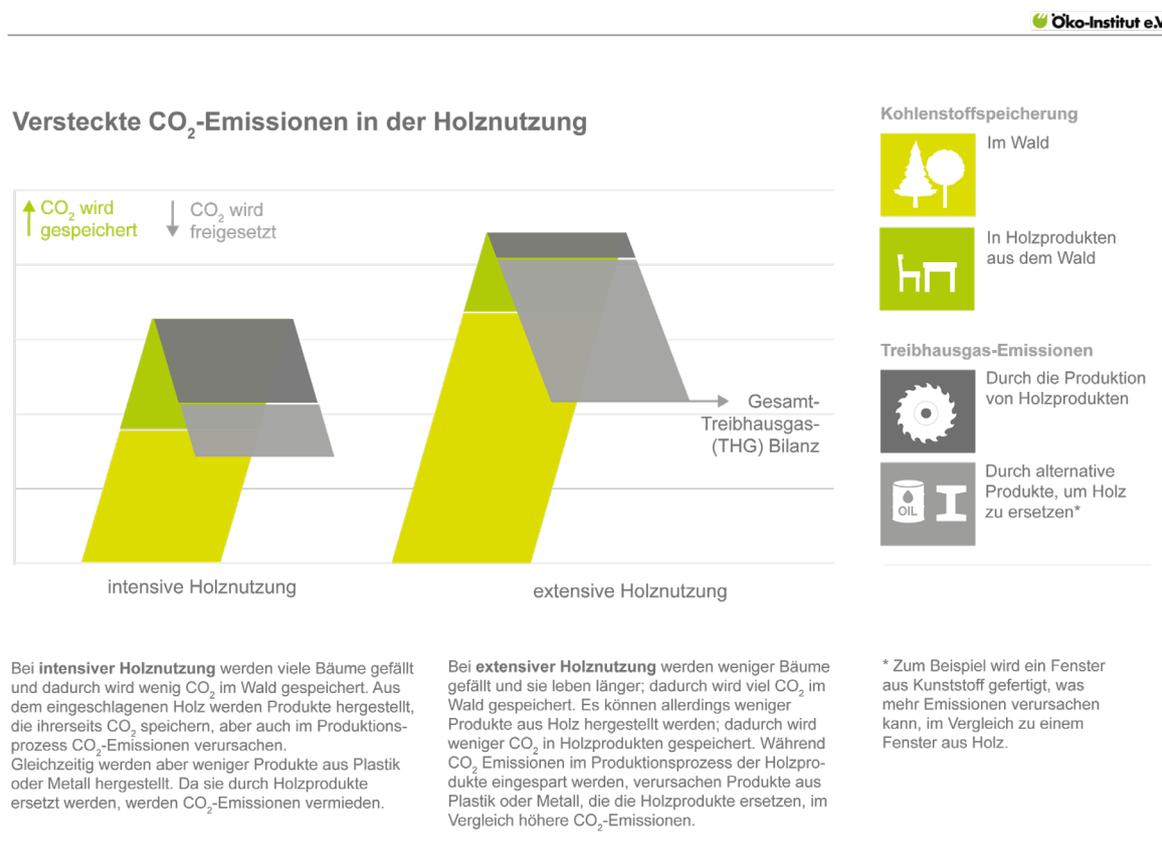


Fig. 4.2 Kohlenstoffspeicherung und Treibhausgas-Emissionen im Zusammenhang mit intensive und extensiver Holznutzung (<https://co2-speichersaldo.de/de/index.html>). Hinweis: Höhere Werte entsprechen einer höheren Speicherwirkung.

4.4.2 Kritik und Einschätzung

Der Ansatz schafft eine Verbindung zwischen den Informationen des jährlich abgerechneten Treibhausgasinventars Deutschlands mit der kalendarisch nicht definierten Ökobilanz von Holzprodukten. Die Anrechnung der jährlichen CO₂-Entfernung durch eine Netto-Zunahme des

Holzvorrats im Wald auf die jährlich eingeschlagene und damit genutzte Holzmenge ist unüblich. Es kann in der Welt der Ökobilanzierung zu Doppelzählungen führen, falls das zusätzliche Holzvolumen geerntet und der Holzvorrat (ausgedrückt in m³ pro Hektar) wieder auf den heutigen Wert sinken würde.

Auch wird mit diesem Ansatz davon ausgegangen, dass die Zunahme des Holzvorrats im Wald eine permanente Senke darstellt. Dies ist nicht der Fall.

4.4.3 Fazit

Die Ökobilanzierung gemäss dem CO₂-Speichersaldo-Ansatz entspricht nicht dem Stand der Technik und sollte deshalb nicht angewendet werden. Stattdessen wird eine 1.5°C Ziel taugliche Bilanzierung empfohlen (siehe Unterkapitel 4.5).

4.5 1.5°C Ziel-Taugliche Bilanzierung und Bewertung

Auf Basis der in Kapitel 2 zusammengefassten wissenschaftlichen Erkenntnisse kann in Bezug auf die Bilanzierung und Bewertung folgendes postuliert werden:

1. Die Baumaterialien enthalten (biogenen) Kohlenstoff, der der Atmosphäre entnommen wurde (durch Photosynthese oder direkt oder indirekt durch technische Prozesse);
2. Der Kohlenstoff ist entweder im Baumaterial permanent gebunden oder die Permanenz ist durch eine langfristige, rechtsverbindliche Regelung abgesichert;

Auf eine zeitabhängige Bilanzierung von CO₂-Entfernung und -Emissionen soll verzichtet werden. Jedes kg CO₂ wird mit dem Treibhauspotenzial von 1 kg CO₂-eq/kg CO₂ (Emission) beziehungsweise -1 kg CO₂-eq/kg CO₂ (Entnahme) bewertet.

Bei abgesicherter Permanenz der Speicherung soll die anrechenbare CO₂-Entfernung ermittelt werden auf Basis des Gehalts an biogenem Kohlenstoff im Baumaterial und Umrechnung auf CO₂.¹⁴

Auf eine vollständige Bilanz der biogenen CO₂-Entfernung und -Emissionen entlang der gesamten Lieferketten kann verzichtet werden (solange die Schweizer Bilanzierungsregeln die entsprechende Anforderung der Norm EN 15804:2012+A2:2019 nicht übernehmen).

Negativemissionen sind nicht anrechenbar für die aus der Atmosphäre entnommenen Mengen CO₂, für die Emissionszertifikate verkauft wurden.

4.6 Einschätzung Cyril Brunner

Bei NET mit temporärem CO₂-Speicher bieten sich innerhalb einer Klimastrategie zwei Anwendungsmöglichkeiten, welche auch kombiniert werden können. Einerseits können temporäre NET wie permanente NET eingesetzt werden, jedoch muss der Verlust des gespeicherten CO₂ erfasst und wie eine CO₂-Emissionen bilanziert werden. Um beispielsweise Restemissionen mit temporären NET konstant auf Netto-Null auszugleichen, müssen während dem Verlust des

¹⁴ 1 kg biogener Kohlenstoff im Produkt entspricht 3.67 kg aus der Atmosphäre entnommenes CO₂.

Speichers erneut NET im Umfang des re-emittierten CO₂ betrieben werden. Andererseits können temporäre NET zusätzlich zu permanenten NET genutzt werden, während letztere die verbleibenden Restemissionen zuerst vollständig auf Netto-Null ausgleichen und später netto negative Emissionen bewirken (der Atmosphäre wird unter dem Strich mehr CO₂ entzogen, als gleichzeitig noch emittiert wird). Somit wird Netto-Null früher erreicht und das Temperaturmaximum gedämpft.

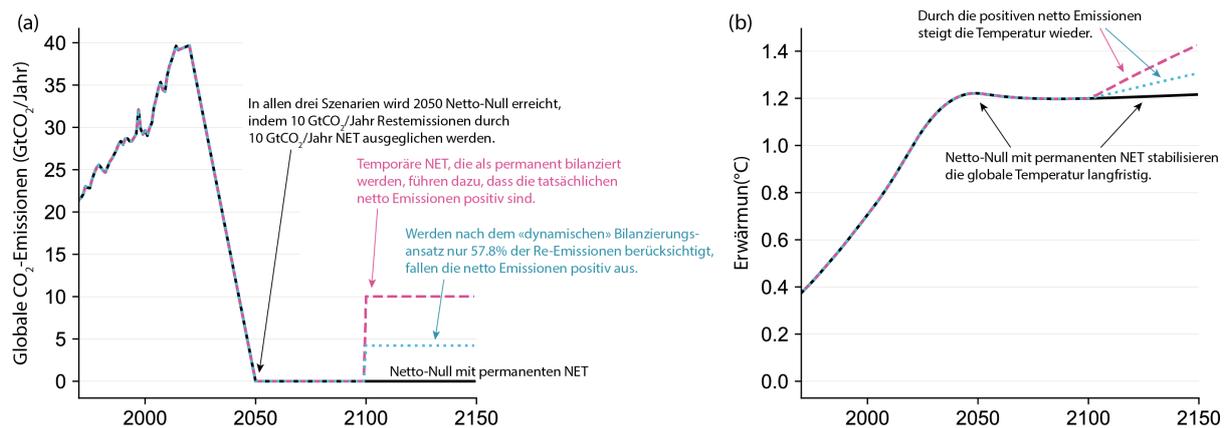


Fig. 4.3 Globale CO₂-Emissionen für drei fiktive Szenarien (a) und die resultierende Erwärmung (b). Alle drei Szenarien erreichen nach 2050 in der vom Menschen erstellten Bilanzierung (= formell) Netto-Null CO₂-Emissionen, wobei die tatsächlichen CO₂-Emissionen positiv sein können. Netto-Null-Szenario mit dauerhaften NET (schwarz), mit temporären NET und einem formell ignorieren Verlust des gespeicherten CO₂ nach 50 Jahren (rot, gestrichelt) und mit temporären NET, wobei entsprechend dem dynamischen Bilanzierungsansatz nur 57,8% der Re-Emissionen aus dem Verlust des gespeicherten CO₂ formell angerechnet wird (blau, gepunktet). Die Erwärmung umfasst nur die CO₂-Effekte, ignoriert jedoch die in der Realität vorherrschenden Effekte anderer Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen.

Die inkorrekte Verrechnung von temporären NET kann gravierende Folgen für das Erreichen der Klimaziele haben. Zur Illustration wurden mit dem Finite Amplitude Impulse Response simple climate model (FaIR; Millar et al. 2017; Smith et al. 2018) drei Szenarien simuliert und in Fig. 4.3 visualisiert. Bei allen drei Szenarien werden die globalen CO₂-Emissionen zwischen 2020 und 2050 linear auf Netto-Null reduziert. Es wird angenommen, dass nach 2050 in einer formellen Bilanz, d.h. einer vom Menschen erstellten Bilanzierung die verbleibenden Restemissionen im Umfang von 10 GtCO₂/Jahr mit NET im Umfang von 10 GtCO₂/Jahr jeweils auf Netto-Null ausgeglichen werden. Beim ersten Szenario (schwarz) werden permanente NET genutzt und somit sind die tatsächlichen CO₂-Emissionen identisch mit den formell bilanzierten. Dadurch bleibt eine zusätzliche Erwärmung nach Erreichen von Netto-Null CO₂-Emissionen aus. Im zweiten Szenario (rot, gestrichelt) werden temporäre NET mit einer CO₂-Speicherdauer von 50 Jahren verwendet, jedoch formell als permanente NET bilanziert. In der Folge fallen die tatsächlichen CO₂-Emissionen nach 50 Jahren im Jahr 2100 positiv aus, weil die Restemissionen von 10 GtCO₂/Jahr und der Verlust des gespeicherten CO₂ (weitere 10 GtCO₂/Jahr) unvollständig durch die in diesem Jahr erzielten negativen Emissionen von 10 GtCO₂/Jahr ausgeglichen werden. In der formellen Bilanz werden die Re-Emissionen ignoriert, so dass diese immer noch eine CO₂-Bilanz von Netto-Null vortäuscht. Durch die positiven netto Emissionen steigt die Temperatur wieder an. Im dritten Szenario (blau, gepunktet) wird zwar berücksichtigt, dass die verwendeten NET nur einen temporären CO₂-Speicher von 50 Jahren haben, jedoch werden

basierend auf dem dynamischen Bilanzierungsansatz nur rund 58% der Re-Emissionen als solche bilanziert. Dadurch werden ab 2100 nur noch NET im Umfang von rund 5.8 MtCO₂/Jahr betrieben. Die tatsächliche CO₂-Bilanz fällt nach 2100 hingegen positiv aus, wodurch sich die Temperatur wieder erhöht.

Zusammengefasst haben NET mit einem temporären CO₂-Speicher eine positive Wirkung auf die globale Temperatur, jedoch müssen sie korrekt bilanziert werden. Es wäre wertvoll, diesen Nutzen zu quantifizieren und entsprechend zu bewerten. Der Nutzen sollte jedoch nicht als «Rabatt» bei den Re-Emissionen durch den Verlust der CO₂-Speichers verrechnet werden, da dies sonst zu einer unbewussten Erhöhung der globalen Temperatur führen würde.

5 Bilanzierung negativer Treibhausgas-Emissionen

5.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer internationalen Umfrage präsentiert (Unterkapitel 5.2), eine Bilanzierung negativer Treibhausgas-Emissionen beschrieben, die kompatibel ist mit den Merkblättern SIA 2032 und 2040 (Unterkapitel 5.3), eine Typologie der Definitionen von Gebäuden mit Netto-Null-Treibhausgas-Emissionen vorgeschlagen (Unterkapitel 5.4) und ein Vorschlag gemacht für das Reporting der Treibhausgasemissionen der Stadt Zürich (Unterkapitel 5.5)

5.2 Internationale Situation und Tendenzen in Europa

5.2.1 Überblick

In diesem Projekt wurde eine Umfrage durchgeführt bei rund 40 internationalen Expert:innen zu Gebäudeökobilanzen, die im Rahmen des IEA EBC Annex 72 «Assessing Life Cycle Related Environmental Impacts Caused by Buildings»¹⁵ kooperieren.

Die angeschriebenen Expert:innen wurden gefragt nach Bilanzierungsmethoden in Bezug auf Negativemissionstechnologien, biogenem CO₂ und deren Stand und Akzeptanz im Land. Die Expert:innen wurden auch um eine Einschätzung gebeten, ob ein europäischer beziehungsweise internationaler Konsens absehbar ist.

Expert:innen aus Belgien, Dänemark, Frankreich, Grossbritannien, Kanada, Schweden, Spanien und Tschechien haben die Fragen aus nationaler und teilweise persönlicher Sicht beantwortet.

¹⁵ <https://annex72.iea-ebc.org/>, Zugriff am 2. Mai 2022

5.2.2 Rechtlicher und normativer Kontext

In allen Ländern außer Frankreich¹⁶ gibt es keine gesetzlichen oder rechtsverbindlichen Vorschriften für die Rechenschaftspflicht und die Anrechnung von Negativemissionen.

In mehreren Ländern gibt es freiwillige, private Initiativen, die es erlauben oder empfehlen, Negativemissionen durch Aufforstung an anderer Stelle zu berücksichtigen (Gebäudebezogen: NREP in Dänemark¹⁷, NollCO2¹⁸ und White Arkitekter in Schweden, Part Z¹⁹, Net Zero Carbon Buildings Standard²⁰, RICS-Methodik²¹ und andere in Grossbritannien; allgemein: Carboneg²² in der Tschechischen Republik, Climate Trade²³ in Spanien,

5.2.3 Baumaterialien, die anrechenbare Negativemissionen generieren (können)

Nach der persönlichen Meinung der Expert:innen aus Belgien, Tschechien und Spanien sollten Negativemissionen aus der Karbonatisierung, bei Materialien auf Basis erneuerbarer Rohstoffe (unter bestimmten Bedingungen und teilweise unter Ausschluss von erneuerbaren Materialien auf tierischer Basis) und mineralisch-organische Materialien angerechnet werden.

Die nachstehend zusammengefassten Antworten der Expert:innen aus den anderen Ländern beruhen auf nationalen Gesetzen, Normen und Initiativen.

In Frankreich und Schweden werden die Negativemissionen forciert karbonatisierter mineralischer Materialien nicht berücksichtigt, Expert:innen aus drei Ländern haben dazu keine Angaben gemacht.

Bei Materialien, die auf erneuerbaren Rohstoffen basieren (Beispiele: Holz, Holzwerkstoffe, Bambus, Stroh, Schafwolle), werden Negativemissionen in allen Ländern berücksichtigt mit Ausnahme von Dänemark (welches keine Angabe dazu gemacht hat).

Mineralisch-organische Materialien werden im Hinblick auf deren mögliche Negativemissionen kaum diskutiert. In Frankreich werden Negativemissionen dieser Materialgruppe nicht berücksichtigt.

In Malmö, Schweden werden das Erzeugen von Energie mit Biomasse mit nachgeschalteter Abscheidung und Speicherung des CO₂ (Bioenergy carbon capture and storage) und Emissionsreduktionen mittels CO₂-Abscheidung und -Speicherung (carbon capture and storage, CCS) als Offsets berücksichtigt, wenn Investitionsverträge vorgelegt werden können.

¹⁶ https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=LBxKOX3Duk3h0j_ck_WBwvf9HBYDu3aSYhPKEIm97w4, access on 3 November 2022

¹⁷ www.sgbc.se/nollCO2, access on 3 November 2022

¹⁸ <https://whitearkitekter.com/>, access on 3 November 2022

¹⁹ <https://part-z.uk/>, access on 3 November 2022

²⁰ <https://www.nzcbuildings.co.uk/>, access on 3 November 2022

²¹ https://consultations.rics.org/Update_to_WLCA/consultationHome, access on 3 November 2022

²² <https://carboneg.eu/cs>, access on 3 November 2022

²³ <https://climatetrade.com/en/home/>, access on 3 November 2022

5.2.4 Modellierung und Bewertung des biogenen Kohlenstoffs

In Belgien, Kanada, Dänemark und Tschechien wird beim Wachstum die Entnahme des (biogenen) CO₂ aus der Atmosphäre und bei der Entsorgung die Emission des zuvor entnommenen CO₂ berücksichtigt (gemäss EN 15804 2019). In Schweden wird nur die Herstellung, nicht aber die Entsorgung berücksichtigt. Deshalb wird die Entnahme des CO₂ aus der Atmosphäre nicht quantifiziert (Bilanzierung gemäss EN 15804 2013). Einzig in Frankreich wird die Klimawirkung zukünftiger CO₂-Emissionen reduziert berücksichtigt. Spanien macht zu Modellierung und Bewertung des biogenen Kohlenstoffs keine Vorgaben.

5.2.5 Akzeptanz freiwilliger Bewertungssysteme

Die Akzeptanz der Anrechenbarkeit von und der Rechenregeln für Negativemissionen ist sehr unterschiedlich. Während in einigen Ländern oder Provinzen wie Kanada und Katalonien das Bewusstsein und die Akzeptanz hoch ist, ist sie in Tschechien und im restlichen Spanien sehr gering. In Schweden ist es gut akzeptiert, Negativemissionen nicht zu berücksichtigen. In Frankreich ist die Bilanzierung von Negativemissionen obligatorisch, weshalb die Frage der Akzeptanz nicht relevant ist.

5.2.6 Anforderungen an die Anrechenbarkeit von Negativemissionen

Die Permanenz (der biogene Kohlenstoff darf am Ende der Lebensdauer nicht freigesetzt werden und muss mehrere tausend Jahre lang von der Atmosphäre ferngehalten werden) ist in keinem Land vorgeschrieben. In Kanada wird bei Holz, das auf Deponien gelagert wird, eine dauerhafte Lagerung angenommen. In Belgien wird die Permanenz für chemisch gebundenes CO₂ nicht aber für Kohlenstoff in Baustoffen auf Basis erneuerbarer Rohstoffe als gegeben betrachtet.

In den meisten Ländern, mit Ausnahme von Frankreich, sind anrechenbare Negativemissionen ausserhalb des Gebäudeperimeters zulässig. Die Negativemissionen müssen also nicht zwingend mit den im Gebäude eingesetzten Materialien erzeugt werden. In Malmö, Schweden sind Investitionsverträge in BECCS und CCS anrechenbar (siehe auch Abschnitt 5.2.3).

Die Anstrengungen zur "Erzeugung" von Negativemissionen sollten in einer Lebenszyklusperspektive berücksichtigt werden. Die bei der Erzeugung von Negativemissionen verursachten Treibhausgasemissionen sind in die Bilanz einzubeziehen.

5.2.7 Verbindlichkeit der Anforderungen an die Anrechenbarkeit

Die im Abschnitt 5.2.6 beschriebenen Anforderungen sind weder in rechtlich verbindlichen Beurteilungssystemen noch in freiwilligen Instrumenten festgeschrieben. Eine Ausnahme bildet das Schwedische Gesetz zur Klimadeklaration für Neubauten.

5.2.8 Optionen für rechtsverbindliche Anforderungen an die Permanenz

Die Meinungen zu den beiden Optionen (1) «Grundbucheintrag» und (2) «Rücknahmegarantie und vorgezogene Stilllegungsgebühr» (siehe Unterkapitel 6.2) sind geteilt. Einige Experten bezweifeln, dass diese Optionen eine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung auf sehr lange Sicht gewährleisten können. Zwei Expert:innen entscheiden sich für die zweite, ein Experte für die erste

Option. Ein Experte hält beide Optionen für durchführbar und schlägt vor, beide zu kombinieren, um eine wirksamere Maßnahme zu erhalten. Eine Expertin zögert, heute "Kredite" für die künftige Bewirtschaftung des Gebäudes anzubieten.

Die Expert:innen haben zudem mehrere andere Optionen genannt:

Begrenzung der anrechenbaren negativen Emissionen auf chemisch gebundenes CO₂.

Einführung einer obligatorischen Ressourcenkartierung und -planung für jede auf dem Gelände durchgeführte Bautätigkeit, unterstützt durch Abfallbehandlungs-/Recyclingoptionen auf regionaler/kommunaler Ebene.

Einführung eines Gesetzes, das die Behandlung von Abbruch-, Ersatz- und Renovierungsarbeiten regelt. Materialien mit biogenem Kohlenstoffgehalt müssen von Gebäuden getrennt werden. Das Gesetz könnte die Einhaltung eines speziellen Endlagerungsprotokolls vorschreiben, z. B. das Vergraben dieser Elemente auf einer Deponie oder die thermische Verwertung mit Kohlenstoffabscheidung.

5.2.9 Internationaler Konsens

Das Erzielen eines Konsens wird als schwierige Aufgabe betrachtet, die auf europäischer Ebene möglicherweise leichter zu bewerkstelligen ist und sich auf einige Kernvorschriften konzentrieren sollte. Sie wird jedoch als notwendig erachtet, und es werden Aktivitäten wie die Arbeiten des IEA EBC Annex 72²⁴ erwähnt, die zur Konsensfindung beitragen können. Ein Experte brachte die Hoffnung zum Ausdruck, dass letztlich wissenschaftlich fundierte Argumente überzeugen werden.

5.2.10 Weitere diverse Rückmeldungen

Umweltdatenbanken sollten bei künftigen Vorschriften über Produkte und Technologien, die für die Anrechnung von Negativemissionen in Frage kommen, berücksichtigt werden.

Negative Emissionstechnologien, die keine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung gewährleisten können, wie z.B. Holz, dürfen nicht als austauschbar mit der Reduktion von fossilen CO₂-Emissionen angesehen werden, sondern müssen die massive Reduktion der fossilen CO₂-Emissionen ergänzen.

Anstatt Strom aus Kohlekraftwerken zu importieren und dies durch das Pflanzen von Bäumen zu kompensieren, die in bestimmten Klimazonen verbrannt werden können, sollte eine Priorität darin bestehen, mehr Photovoltaik auf Dächern zu installieren.

Für Produkte, die CO₂ speichern, das von anderen Industrien emittiert und zurückgewonnen wurde, sind Zuteilungsregeln erforderlich. Wer trägt beispielsweise die Emissionen im Zusammenhang mit der Verflüssigung und dem Transport des CO₂ zu der Anlage, in der das CO₂ für die forcierte Karbonatisierung verwendet wird?

Intensivierung der Finanzierung weiterer Forschung in diesem Bereich.

²⁴ <https://annex72.iea-ebc.org/>, Zugriff am 7. November 2022

5.2.11 Synthese

Die erhaltenen Antworten haben gezeigt, dass die Diskussion über die Frage der Anrechenbarkeit von Negativemissionen auch in anderen Ländern erst beginnt. Am weitesten fortgeschritten ist die Diskussion um die Anrechenbarkeit der temporären Senkenwirkung biogenen Kohlenstoffs in Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Mit Ausnahme von Kanada (Negativemissionssaldo durch Deponierung) und Frankreich (Negativemissionssaldo durch tieferes Treibhauspotenzial für CO₂, das erst in Zukunft emittiert werden wird) wird die Bilanz der biogenen CO₂-Flüsse ausgeglichen (CO₂ Entnahme aus der Atmosphäre gleich CO₂-Emission bei der Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer). Die Anrechenbarkeit der biogenen Kohlenstoffspeicher in Baumaterialien bei Vorliegen rechtsverbindlicher Sicherstellung der Permanenz wird von einzelnen eher kritisch beurteilt (lange Zeiträume, Vollzug). Alternativ wurde beispielsweise vorgeschlagen, Rückbau und Entsorgung von Gebäuden und den Baumaterialien auf Basis erneuerbarer Rohstoffe national so zu regeln, dass die erforderliche permanente Speicherung erreicht wird.

5.3 Bilanzierungsmethode für SIA 2032 und SIA 2040

5.3.1 Einführung

In diesem Unterkapitel werden ein Vorgehen und eine Bilanzierungsmethode zur Abschätzung von Baumaterial-bezogenen Negativemissionen beschrieben, die mit den Methoden der für die Schweiz massgebenden Richtlinien kompatibel sind, nämlich der Schweizer Regel SIA 2032 (SIA 2020) und dem Merkblatt SIA 2040 (SIA 2017).

5.3.2 Bilanzperimeter

Es gilt der Bilanzperimeter gemäss SIA 2032:2020, der für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs verwendet wird.

5.3.3 Einheit und Bezugsgrösse

In der KBOB Empfehlung 2009/1:2022 (KBOB et al. 2022) wird der Gehalt an biogenem Kohlenstoff in Baumaterialien und Bauteilen in kg C ausgewiesen. Dies entspricht der Vorgabe der europäischen Norm EN 15804:2012+A2:2019 (EN 15804 2019). Damit sind die Grundlagen vorhanden, den in einem Gebäude verbauten und dort temporär gespeicherten biogenen Kohlenstoff zu quantifizieren.

Als Monitoring-Grösse für den im Gebäudebestand der Stadt Zürich (öffentliche und nach Möglichkeit auch private Gebäude) gespeicherten biogenen Kohlenstoff wird die absolute Menge in Tonnen Kohlenstoff empfohlen. Diese Grösse ist konform mit der einschlägigen europäischen Normierung und signalisiert, dass der gespeicherte biogene Kohlenstoff nicht mit den Treibhausgasemissionen verrechnet werden soll.

Dieser Wert soll in den kommenden Jahrzehnten nach Möglichkeit zunehmen aber mindestens nicht abnehmen (Kohlenstoffspeicherung auf Portfolioebene).

Für biogenen und für aus der Atmosphäre entnommenen Kohlenstoff, der entweder permanent gespeichert ist oder für den eine permanente Speicherung rechtlich verbindlich gesichert ist, kann die dem C-Gehalt der Baumaterialien entsprechende Menge CO₂-Entfernung als negative CO₂-Emission verbucht werden. Die Werte sollen in *kg CO₂-eq pro m²*, eventuell in *kg CO₂-eq pro m² und Jahr* ausgedrückt werden.

5.3.4 Neubau und Umbau

Die Menge anrechenbarer negativer CO₂-Emissionen bestimmt sich aus der Menge der über den Bilanzperimeter gelieferten Baumaterialien und -elemente.

5.3.5 Amortisationsdauer

Die Amortisationsdauer der Bauteile, gemäss SIA 2032 (Anhang C), wird bei der Bestimmung der anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen berücksichtigt.

Obwohl aus heutiger Sicht unsicher ist, ob beim Bauteil-Ersatz wiederum Materialien mit anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen eingesetzt werden²⁵, gelten die anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen sowohl für die Erst- als auch die Ersatzinvestition.

5.3.6 Zu berücksichtigende Bauteile, Vereinfachungen und Vernachlässigungen

Es gelten sinngemäss dieselben Bestimmungen gemäss Ziffer 3.4, SIA 2032:2020, die für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs angewendet werden.

5.3.7 Strukturierung der Bilanz

In Analogie zur bisherigen Bilanzierung der Treibhausgasemissionen der Erstellung von Gebäuden sollen die anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen gemäss dem elementbasierten Baukostenplan Hochbau eBKP-H gegliedert und in einer separaten Bilanz quantifiziert werden.

5.3.8 Phasengerechte Bilanzierung

Für die Vorprojektphase werden Daten zu anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen auf Bauteilebene bereitgestellt. Sie sind eine Ergänzung der Daten der Rechenhilfe SIA 2040.

Für eine angemessene Quantifizierung der anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen sind allenfalls ein paar wenige zusätzliche Eingabefelder vorzusehen (spezifische Menge durch Karbonatisierung von Recycling-Betonaggregat fixierte CO₂; rechtsverbindliche Verpflichtung zur Abtrennung und permanenten Endlagerung biogenen Kohlenstoffs Ja/Nein, ggf. weitere).

Für die Projektphase werden analog zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen die Daten aus der KBOB-Empfehlung 2009/1:2022 (KBOB et al. 2022) beziehungsweise aus KBOB-konformen Ökobilanzen entnommen.

²⁵ Einsatz von Faserzementplatten in der Fassade anstelle der Holzschalung, Einsatz von Beton mit Wandkies anstelle von forciert karbonatisiertem Betonrecyclinggranulat.

5.3.9 Ergebnisdarstellung

Bei der Bilanzierung von Gebäuden anrechenbare negative CO₂-Emissionen, das heisst die anrechenbare Entnahme von CO₂, stehen in direktem physikalisch-chemischen Zusammenhang mit der Herstellung und Entsorgung der eingesetzten Baumaterialien.

Die Bilanzierung beziehungsweise die Dokumentation der Beiträge negativer Emissionen kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

1. Die Beiträge negativer CO₂-Emissionen werden addiert und den Treibhausgasemissionen gegenübergestellt. Es werden beide Teilergebnisse ausgewiesen.
2. Die Beiträge negativer CO₂-Emissionen werden mit den (fossilen) Treibhausgasemissionen verrechnet und nur das Saldo ausgewiesen.

Das alleinige Ausweisen von Saldowerten widerspricht dem Gebot der Transparenz. Auch verhindert es das Erkennen und Umsetzen markanter und dringend benötigter Emissionsreduktionen. Deshalb wird Folgendes vorgeschlagen:

Anrechenbare Negativemissionen werden in die folgenden zwei Kategorien eingeteilt:

- A. In nachwachsenden Rohstoffen gebundener Kohlenstoff, für den eine rechtsverbindliche Verpflichtung der permanenten Speicherung beziehungsweise Sequestrierung besteht.
- B. In mineralischen Baustoffen durch forcierte Karbonatisierung fixiertes CO₂.

Die Treibhausgasemissionen und die anrechenbaren negativen CO₂-Emissionen dürfen lediglich auf Basis des Gebäudes saldiert werden. Die Teilergebnisse (Treibhausgasemissionen einerseits und negative CO₂-Emissionen andererseits) müssen in jedem Fall ausgewiesen werden. Ein Saldieren auf Bauteil- oder Bauelementebene ist nicht gestattet.

5.4 Gebäude mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen

5.4.1 Anforderungen

Wir schlagen vor, dass für Gebäude mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen, oder kurz «NNT-Gebäude» folgendes gelten soll:

- Die Systemgrenze umfasst Erstellung und Betrieb, nicht aber Mobilität (standortabhängige Alltagsmobilität gemäss SIA 2040:2017 (SIA 2017)).
- Die Reduktion der Treibhausgasemissionen bleibt der primäre Ansatz (Ziel- und Richtwert SIA 2040 sind zu erfüllen) und ist immer vorzuziehen.
- Zur Kompensation der Treibhausgasemissionen sind Beiträge von Negativemissionstechnologien mit einer hohen Permanenz zugelassen.
- Treibhausgasemissionen verursacht durch Energie- und Materialaufwendungen und Verluste beim Bereitstellen von Negativemissionen sind zu berücksichtigen.
- Potenziell vermiedene Emissionen und Emissionsreduktionen gelten nicht als Negativemissionstechnologien.

Reichen die negativen CO₂-Emissionen der im Gebäude verbauten Baumaterialien und Bauteile nicht aus, um die Treibhausgasemissionen von Erstellung und Betrieb auszugleichen, kann eine Bauherrschaft anrechenbare Emissionszertifikate einsetzen, um auf Netto-Null-Treibhausgasemissionen zu kommen.

Gebäude, die zusätzlich anrechenbare Zertifikate benötigen, um Netto-Null-Treibhausgasemissionen in Erstellung und Betrieb zu erreichen, sind speziell zu kennzeichnen.

Überlegungen zur Anrechenbarkeit sind in Unterkapitel 0 ausgeführt.

5.4.2 Definition «NNT-Gebäude»

Aus den Anforderungen lässt sich die folgende Definition für ein «NNT-Gebäude» formulieren:

Ein Gebäude darf als NNT-Gebäude bezeichnet werden, wenn es ohne Anrechnung von Negativemissionen die aktuellen Zielwerte gemäss SIA 2040 unterschreitet und anrechenbare Negativemissionen nachgewiesen werden in der Höhe der Treibhausgasemissionen von Erstellung und Betrieb.

Als anrechenbare negative Emission gilt CO₂, welches in Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe und in mineralisch-organischen Baustoffen in Form von biogenem Kohlenstoff eingelagert ist und für das eine rechtsverbindliche Verpflichtung zur permanenten Speicherung besteht. Die Anrechenbarkeit gilt auch für atmosphärisches CO₂, welches durch forcierte Karbonatisierung in mineralischen Baustoffen permanent gebunden wird, die im Gebäude verbaut wurden.

5.4.3 Definition «NNT-Gebäude, mit Ex-Situ Ausgleich»

Aus den Anforderungen lässt sich die folgende Definition für ein «NNT-Gebäude, mit Ex Situ-Ausgleich» formulieren:

Ein Gebäude darf als «NNT-Gebäude mit Ex-Situ Ausgleich» bezeichnet werden, wenn es ohne Anrechnung von Negativemissionen die aktuellen Zielwerte gemäss SIA 2040 unterschreitet und anrechenbare negative Emissionen und anrechenbare Zertifikate nachgewiesen werden in der Höhe der Treibhausgasemissionen von Erstellung und Betrieb.

Als anrechenbare negative Emission gilt CO₂, welches in Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe und in mineralisch-organischen Baustoffen in Form von biogenem Kohlenstoff eingelagert ist und für das eine rechtsverbindliche Verpflichtung zur permanenten Speicherung besteht. Die Anrechenbarkeit gilt auch für atmosphärisches CO₂, welches durch forcierte Karbonatisierung in mineralischen Baustoffen permanent gebunden wird.

Die Anrechenbarkeit von CO₂-Zertifikaten ist gegeben für Massnahmen zur CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre kombiniert mit einer langfristigen Sequestrierung (Halbwertszeit 3'000 bis 8'000 Jahre).

5.4.4 Typologie von «NNT-Gebäuden»

Netto-Null-Gebäude können für verschiedene Bilanzgrenzen definiert werden. Es wird vorgeschlagen, entweder die Systemgrenze des SIA Effizienzpfads Energie zu verwenden (Erstellung, Betrieb und Mobilität oder mindestens Erstellung und Betrieb zu berücksichtigen (siehe Tab. 5.1). Beim Betrieb sollen sowohl die direkten Emissionen (Scope 1) als auch die Emissionen der Energiebereitstellung (Scopes 2 und 3) berücksichtigt werden.

Für die beiden Fälle können Varianten mit einem Ausgleich der Treibhausgasemissionen ausserhalb des Gebäudeperimeters definiert werden,

Tab. 5.1 Typologie von Gebäuden mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen, NNT-Gebäude.

Scope 1: Emissionen aus den Kaminen des Gebäudes

Scope 2: Emissionen aus den Kaminen der Kraft- und Fernheizwerke, die dem Gebäude Strom bzw. Fernwärme liefern

Scope 3: Alle übrigen Emissionen (Bereitstellung Brennstoffe, Bau Kraft- und Fernheizwerke, Übertragung und Verteilung, weiteres)

Ex-Situ Ausgleich: anrechenbar sind CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre bzw. biogenes CO₂ kombiniert mit permanenter Speicherung.

	Erstellung	Betrieb			Mobilität	Ex-Situ Ausgleich
		Scope 1	Scope 2	Scope 3		
NNT Gebäude	X	X	X	X		
NNT-Gebäude, Erstellung, Betrieb und Mobilität	X	X	X	X	X	
NNT Gebäude, mit Ex-Situ Ausgleich	X	X	X	X		X
NNT Gebäude, Erstellung, Betrieb und Mobilität, mit Ex-Situ Ausgleich	X	X	X	X	X	X

5.5 Reporting Treibhausgasemissionen für Städte und Gemeinden

Für das Reporting des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich und von Umwelt und Gesundheit Zürich wird vorgeschlagen, grundsätzlich dieselben Anforderungen an anrechenbare negative CO₂ Emissionen im Bausektor zu stellen. Vorbehalten sind die übergeordneten Anforderungen der Netto-Null-Strategie der Stadt Zürich.

Zusätzlich wird empfohlen, ein Monitoring des biogenen Kohlenstofflagers der Stadt Zürich aufzubauen mit dem Ziel, das Kohlenstofflager in den kommenden Jahren und Jahrzehnten mindestens zu erhalten beziehungsweise zu erhöhen.

Diese Empfehlungen gelten auch für private Bauherrschaften und Firmen mit eigenem Immobilien-Portfolio.

6 Umsetzungsvorschläge für Anforderungen

6.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden erste Ideen formuliert, wie die in diesem Bericht gestellten Anforderungen ausgestaltet sein beziehungsweise umgesetzt werden können. Es geht einerseits um das rechtsverbindliche Sicherstellen einer langfristigen permanenten Speicherung biogenen und atmosphärischen CO₂ (Unterkapitel 6.2) und andererseits um die Anforderung an anrechenbare CO₂-Zertifikate (Unterkapitel 0).

6.2 Rechtsverbindlichkeit Permanenz

Nicht jede CO₂-Entfernung wird permanent gespeichert. Eine langfristige, sozusagen permanente Speicherung des der Atmosphäre entnommenen CO₂ ist jedoch entscheidend, damit diese Entnahmen eine dämpfende Auswirkung auf das Ausmass der langfristigen Erhöhung der Mitteltemperatur haben und somit zum 1.5°C Ziel beitragen. Ist die Permanenz der Speicherung nicht a priori gegeben, braucht es aus Sicht der Autor:innen eine dauerhafte, rechtsverbindliche Absicherung.

Diese Absicherung ist erforderlich, falls eine Bauherrschaft für den in einem Gebäude gespeicherten biogenen Kohlenstoff negative CO₂-Emissionen anrechnen lassen will.

Zwei mögliche Ansätze sind nachstehend kurz skizziert:

1. *Grundbucheintrag*: Im Grundbuch werden neben den Eigentumsverhältnissen auch die Rechte und Lasten festgehalten. Die Rechte und Lasten verbleiben bei Handänderungen auf dem Grundstück, da sie an das Grundstück und die darauf errichteten Bauten gebunden sind. Deshalb hat ein Grundbucheintrag (wie beispielsweise ein Beseitigungsrevers) das Potenzial eine langfristige Rechtsverbindlichkeit zu garantieren. In einem per Gesetz verlangten Grundbucheintrag soll geregelt sein, dass Materialien, die biogenen Kohlenstoff enthalten entweder wiederverwendet, recycelt oder dann permanent sequestriert werden. Im Falle eines Recyclierens oder einer Wiederverwendung muss die Partei, die die Baumaterialien/Bauelemente abnimmt, eine analoge rechtliche Verpflichtung eingehen.
2. *Rücknahmegarantie und vorgezogene Stilllegungsgebühr*: Mit einem Gesetz auf Bundesebene müssen für Baumaterialien mit einem Gehalt an biogenem Kohlenstoff von den Herstellern und Importeuren die Rücknahme garantiert und zur Finanzierung vorgezogene Entsorgungsgebühren eingeführt werden. Gleichzeitig wird das thermische Verwerten dieser Materialien in Anlagen ohne Carbon Capture and Storage (CCS) verboten.

Das Ausrüsten von Kehrrechtverbrennungsanlagen und Altholz-Heizkraftwerken mit CCS schweizweit oder in einzelnen Städten und Gemeinden kombiniert mit einer gesetzlichen Entsorgungspflicht brennbarer Bauabfälle in derartigen Anlagen stellt eine mögliche Alternative zur Absicherung der Permanenz dar. Städte und Gemeinden können für ihre eigenen Liegenschaften eine entsprechende Selbstverpflichtung einführen.

6.3 CO₂-Emissionszertifikate und deren Anrechenbarkeit für Netto-Null

Heute auf dem Markt angebotene Emissionszertifikate basieren in der Regel auf Emissionsreduktionen, oftmals ermittelt im Vergleich mit einer kontrafaktischen Referenzentwicklung. Diese Art der Zertifikate kann der Emissionsreduktion dienen, nicht jedoch der CO₂-Entfernung. Deshalb müssen an anrechenbare CO₂-Emissionszertifikate weitergehende Anforderungen gestellt werden.

CO₂-Emissionszertifikate sind anrechenbar, wenn sie die folgenden Anforderungen erfüllen:

Von Dritten erworbene Zertifikate negativer Emissionen müssen ausgestellt sein auf Basis von Massnahmen zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre kombiniert mit einer Sequestrierung mit relativ hoher Permanenz (Halbwertszeit von 3'000 bis 8'000 Jahre, siehe Unterkapitel 2.3) wie Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) oder Biogenic Energy Carbon Capture and Storage (BECCS).

Von Dritten erworbene Zertifikate negativer Emissionen ausgestellt auf Basis von Massnahmen mit relativ geringer beziehungsweise unsicherer Permanenz wie beispielsweise aus Aufforstungsprojekten sind nicht anrechenbar.

7 Rechenhilfe Gebäude (in Anlehnung SIA 2040)

7.1 Grundlagen und Übersicht

Auf Basis der vorgeschlagenen Bilanzierungsmethode für die drei Typen von Baumaterialien wird auf der Grundlage der Vorprojektwerte im Anhang D, SIA 2032;2020 ein aktualisiertes Excel für die Bilanzierung im Bereich Erstellung von Gebäuden programmiert.²⁶ Dieses Excel ist bereits heute der Rechenhilfe SIA 2040 hinterlegt. Die Rechenhilfe SIA 2040 ermöglicht das Bilanzieren von Erstellung und Betrieb von Gebäuden und ist grundsätzlich erweiterbar zur Aufnahme der Modellierung des gebäudeinduzierten Verkehrs. Damit kann das in dieser Studie weiter entwickelte Excel eine geeignete Grundlage darstellen für die Rechenhilfe der künftigen Norm SIA 390/1 (Nachfolgerin des Merkblatts SIA 2040, das derzeit revidiert wird).

7.2 Grundlagen und Annahmen

Sämtliche Bilanzierungen sind nach den Regeln des Merkblatts SIA 2032, Graue Energie – Ökobilanzierung der Erstellung von Gebäuden (SIA 2020) ausgeführt. Die Negativemissionen werden separat bilanziert. Sie werden in die gleiche Einheit umgerechnet wie die Treibhausgasemissionen im Bereich Erstellung gemäss Merkblatt SIA 2040 (SIA 2017), nämlich bezogen auf den Quadratmeter Energiebezugsfläche des Gebäudes und umgerechnet auf Werte pro Jahr.

²⁶ Das entsprechende Excel mit den hinterlegten Konstruktionen ist schon in der Studie «Graue Energie und Treibhausgasemissionen von wiederverwendeten Bauteilen» weiterentwickelt worden (Pfäffli 2019). Es wurde auf die neuen Ökobilanzdaten der KBOB Empfehlung 2009/1:2022 aktualisiert und mit der hier entwickelten Methodik erweitert.

Die Bilanzierung der Negativen Emissionen basiert auf folgenden Annahmen:

- beschleunigte Karbonatisierung: Entsprechend den heute auf dem Markt bereits angebotenen Produkten (z.B. kibeco, zirkulit) wird von einer Einlagerungsmenge von 10 kg CO₂ pro Kubikmeter Beton ausgegangen. Sämtliche Bauteile, welche in Beton materialisiert sind, werden jeweils mit dieser Betonsorte eingesetzt. Alle Bauteile in Beton gehören zur Primärstruktur und sind damit mit einer Amortisationszeit von 60 Jahren gerechnet.
- Beton mit Pflanzenkohle: Auf einen Kubikmeter Beton wird in den folgenden Beispielrechnungen mit 100 kg dank beigemischter Pflanzenkohle eingelagertes CO₂ gerechnet. Diese Menge wird gemäss gewissen Anbietern auf dem Markt (z.B. KLARK) bereits übertroffen. Alle Bauteile in Beton gehören zur Primärstruktur und sind damit mit einer Amortisationszeit von 60 Jahren gerechnet.
- Biogen eingelagerter Kohlenstoff: In der aktuellen Ausgabe der Ökobilanzdaten im Baubereich (KBOB 2022) sind unterschiedlichste Holz- und Holzwerkstoffe aufgeführt. Holz ist, gemessen am Einsatz in der Architektur, sicher das häufigste Material mit biogen eingelagertem Kohlenstoff. Ebenfalls in Variantenrechnungen betrachtet werden Aussenwandkonstruktionen mit Strohballen und Hanfkalk. Nicht alle bilanzierten Aussenwandssysteme erreichen gleiche U-Werte. Es werden die Amortisationszeiten gemäss SIA 2032 angewendet (je nach Einsatz 30, 40 oder 60 Jahre). Nicht eingerechnet ist der biogen eingelagerte Kohlenstoff aus nur kurzzeitig eingesetzten Bauteilen wie beispielsweise der Schalungsbretter beim Betonieren.

8 Bilanzierung und Auswertung von Gebäuden

8.1 Übersicht

Mit dem im Projekt entwickelten Bilanzierungstool auf der Grundlage der Vorprojektwerte Merkblatt SIA 2032, aktualisiert auf die aktuellen Ökobilanzdaten im Baubereich und auf Basis der in Unterkapitel 5.3 vorgeschlagenen Bilanzierungsmethode werden hier drei Gebäude bilanziert, wobei der Fokus der Auswertungen auf der Speicherwirkung und dem möglichen Beitrag an Negativen Emissionen liegt.

Die Gebäude werden in unterschiedlichen Materialisierungen bilanziert. Es wird dabei darauf Wert gelegt, dass die gewählten Konstruktionen effektiv realistische Ausführungsvarianten darstellen.

Die Wahl der Gebäude erfolgt so, dass sie zur Potenzialabschätzung des Beitrags zu den negativen Emissionen des Gebäudeparks der Stadt Zürich eingesetzt und daraus Empfehlungen abgeleitet werden können. Es werden deshalb konkret in der Stadt Zürich realisierte oder in Realisation stehende Bauten ausgewählt und zwar sowohl Um- als auch Neubauten.

Das Gebäude 1 ist ein kleines Mehrfamilienhaus aus den 1950er Jahren. Es wird mit unterschiedlicher Eingriffstiefe in die bestehende Bausubstanz gerechnet: Real ausgeführt wurde ein Umbau mit Aufstockung des Gebäudes. Der Ersatzneubau maximiert die Eingriffstiefe. Mit

minimaler Eingriffstiefe wird die energetische Sanierung der Gebäudehülle ohne weitere Eingriffe in die Bausubstanz betrachtet. Das zweite Gebäude ist ein Neubau eines grossen und sehr kompakten Mehrfamilienhauses. Das Gebäude 3 zeigt den Neubau eines Schulhauses.

Es wurde nur die Erstellung bilanziert, nicht aber der Betrieb. Im Betrieb zeigen sich bei den hier vorgestellten Variantenrechnungen aufgrund von nicht vollständig übereinstimmenden U-Werten der Aussenwandsysteme marginale Abweichungen im Heizwärmebedarf. Alle anderen Eingabegrössen wie Lüftung, PV-Anlagen o.ä. sind jeweils in allen Varianten identisch gerechnet. Die detaillierten Ergebnistabellen sind in Anhang A zu finden.

8.2 Gebäude 1a: Kleines Mehrfamilienhaus, Umbau und Aufstockung

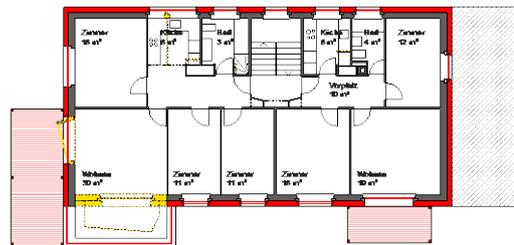


Fig. 8.1 Kleines Mehrfamilienhaus, Baujahr 1956, Umbau und Aufstockung 2010, Kämpfen für Architektur

Das Mehrfamilienhaus mit Baujahr 1956 wird in der Bausubstanz weitgehend erhalten. Die Gebäudehülle ist neu gedämmt, die Fenster wie auch die gesamte Gebäudetechnik ersetzt. Statt des vormaligen Schrägdachs wird ein neues Attikageschoss in Holzelementbauweise aufgesetzt. Das Gebäude erfüllt nach der Sanierung den Standard Minergie-P-Eco.

Als Variante wird das aufgesetzte Attikageschoss neben der realisierten Ausführung mit einer Strohballenwand und mit einer Aussenwandkonstruktion mit Hanfkalk gerechnet. In den beiden Variantenrechnungen sind die Aussenwandkonstruktionen mit einem Lehmputz versehen.

Tab. 8.1 Varianten, Gebäude 1a, kleines Mehrfamilienhaus – Umbau und Aufstockung

§: Permanenz und damit Anrechenbarkeit noch unklar

*: Darf nur bei rechtsverbindlich gesicherter Permanenz angerechnet werden.

Fallbeispiel 1:	Treibhausgasemissionen aus Erstellung	potenziell anrechenbare Negativemissionen		
		Herstellung und Entsorgung	Forcierte Karbonatisierung	Beton mit Pflanzkohle §
	kg CO ₂ -eq /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a
Aufstockung in Holzbauweise	7.9	-0.01	-0.1	-1.4
Aufstockung mit Strohballen	8.0	-0.01	-0.1	-1.6
Aufstockung mit Hanfkalk	8.2	-0.01	-0.1	-1.6

Die Beiträge an potenziell anrechenbaren Negativemissionen aus dem forciert karbonatisierten Beton bzw. des mit Pflanzkohle versetzten Beton sind bei diesem Fallbeispiel gering, da die Primärkonstruktion vollständig erhalten bleibt. Beton kommt nur bei einem kleinen Teil der Innenwände und bei den neu zugefügten Balkonplatten zum Einsatz.

Das Einsatzgebiet der Baumaterialien Holz, Stroh und Hanfkalk ist grösser: Die gesamte Außenwandkonstruktion des neu aufgesetzten Dachgeschosses wird jeweils in Leichtbauweise mit Holz, Stroh oder Hanfkalk erstellt. Bei allen Varianten ist zudem das Dach über dem neuen Attikageschoss in einer Brettstapeldecke ausgeführt. Das Potenzial an Negativemissionen der Baumaterialien Holz, Stroh und Hanfkalk liegt bei diesem Fallbeispiel zwischen rund 20 % (Holzbauweise) bis knapp 30 % (Strohbau) der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung.

8.3 Gebäude 1b: Kleines Mehrfamilienhaus, Neubau

Dasselbe kleine Mehrfamilienhaus wird hier als Neubau gerechnet. Es werden drei unterschiedliche Leichtbauweisen untersucht.

Tab. 8.2 Varianten, Gebäude 1b, kleines Mehrfamilienhaus - Neubau

§: Permanenz und damit Anrechenbarkeit noch unklar

*: Darf nur bei rechtsverbindlich gesicherter Permanenz angerechnet werden.

Fallbeispiel 1:	Treibhausgasemissionen aus Erstellung	potenziell anrechenbare Negativemissionen		
	Herstellung und Entsorgung	Forcierte Karbonatisierung	Beton mit Pflanzenkohle §	Biogen eingespeichert*
	kg CO ₂ -eq /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a
Holzbauweise	11.2	-0.05	-0.5	-3.7
Strohbauweise	11.3	-0.05	-0.5	-5.1
Hanfalk	12.3	-0.05	-0.5	-4.4

Die Beiträge an potenziell anrechenbaren Negativemissionen aus dem beschleunigt karbonatisierten Beton bzw. des mit Pflanzenkohle versetzten Beton liegen bei der Neubauvariante dieses Fallbeispiels bei 0.55 kg CO₂/m² a bzw. 4 bis 5 % der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung. Der grösste Beitrag stammt dabei aus den Bauteilen im Untergeschoss (Aussenwände, Fundamentplatten und Decke über UG in Beton).

Das Potenzial an Negativemissionen der Baumaterialien Holz, Stroh und Hanfkalk ist bei der Neubauvariante dieses Fallbeispiels recht bedeutend und liegt zwischen rund 30 % (Holzbauweise) bis fast 45 % (Strohbau) der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung. Der grösste Beitrag stammt aus der Aussenwandkonstruktion (variabel Holz, Stroh, Hanfkalk) und den Deckenkonstruktionen (Brettstapeldecken). Die in einzelnen Bauteilen, wie etwa den Aussenwänden mit Strohballen oder den Brettstapeldecken, biogen eingespeicherten Emissionen übersteigen deren Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und Entsorgung.

8.4 Gebäude 1c: Kleines Mehrfamilienhaus, energetische Sanierung



Fig. 8.2 Kleines Mehrfamilienhaus, Baujahr 1956, Sanierung der Gebäudehülle, hypothetisch

Hypothetisch wird das Mehrfamilienhaus mit Baujahr 1956 in seiner ursprünglichen Bausubstanz komplett erhalten, nur die Gebäudehülle wird energetisch saniert: Die Fassaden werden mit einer verputzten Aussenwärmedämmung aus Flachsfasern gedämmt, das Giebeldach mit Zellulosefasern ausgeflockt, die Fenster ersetzt. Die Wärmeerzeugung erfolgt neu mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe welche durch Photovoltaik-Module auf dem Dach unterstützt wird.

Die restliche Gebäudetechnik (Wärmeverteilung und -abgabe, Sanitär und Elektroverteilung) wird nicht erneuert. Das Gebäude erfüllt nach der energetischen Sanierung die gesetzlichen Vorschriften für Umbauten (Grenzwert SIA 380/1).

Tab. 8.3 Varianten, Gebäude 1c, kleines Mehrfamilienhaus – energetische Sanierung

§: Permanenz und damit Anrechenbarkeit noch unklar

*: Darf nur bei rechtsverbindlich gesicherter Permanenz angerechnet werden.

Fallbeispiel 1c:	Treibhausgasemissionen aus Erstellung	potenziell anrechenbare Negativemissionen		
		Herstellung und Entsorgung	Forcierte Karbonatisierung	Beton mit Pflanzenkohle §
	kg CO ₂ -eq /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a
Energetische Sanierung (Flachsfaserdämmung)	3.2	-0.00	-0.0	-0.7

Bei der energetischen Sanierung der Gebäudehülle dieses Fallbeispiels wird kein Beton eingesetzt. Entsprechend können auch keine Negativemissionen aus forcierter Karbonatisierung oder aus Beton mit Pflanzenkohle erzielt werden.

Für die Sanierungsmassnahmen wurden gezielt Dämmstoffe eingesetzt, welche biogenen Kohlenstoff enthalten.

Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung sind mit 3.2 kg/m² a ausserordentlich tief – sie stammen zu mehr als der Hälfte (56%) aus dem Fensterersatz und zu einem Viertel (25%) aus den Dämmmassnahmen am Dach und an den Fassaden.

Das Potenzial an Negativemissionen dank biogen eingelagertem Kohlenstoff in den Baumaterialien Holz, Flachs und Zellulose liegt bei diesem Fallbeispiel bei 21 % der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung.

8.5 Gebäude 2: Grosses Mehrfamilienhaus, Neubau



Fig. 8.3 Grosses Mehrfamilienhaus, Neubau, Fischer Architekten

Das grosse und äusserst kompakte Wohnhaus ist im Unter- und Erdgeschoss massiv in Beton gebaut. Darüber stapeln sich 6 gut strukturierte Obergeschosse in Holzbauweise mit Holzbetonverbunddecken. Die Fassadenbekleidung der Obergeschosse wird mit einer hinterlüfteten Holzschalung ausgeführt.

Als Variante wird derselbe Bau in einer klassischen Massivbauweise bilanziert mit Betondecken und Wandkonstruktionen in Beton und Mauerwerk.

Tab. 8.3 Varianten, Gebäude 2, grosses Mehrfamilienhaus

§: Permanenz und damit Anrechenbarkeit noch unklar

*: Darf nur bei rechtsverbindlich gesicherter Permanenz angerechnet werden.

Fallbeispiel 2:	Treibhausgasemissionen aus Erstellung	potenziell anrechenbare Negativemissionen		
		Forcierte Karbonatisierung	Beton mit Pflanzenkohle §	Biogen eingespeichert*
	Herstellung und Entsorgung			
	kg CO ₂ -eq/m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a
Holzbauweise	9.2	-0.06	-0.6	-2.8
Massivbauweise	10.7	-0.09	-0.9	-0.4

Die Beiträge an potenziell anrechenbaren Negativemissionen aus dem forciert karbonatisierten Beton bzw. des mit Pflanzenkohle versetzten Beton erreichen bei diesem Gebäude in der Holzbauweise 0.7 kg CO₂/m² a bzw. 7 %, bei der Massivbauweise 1.0 kg CO₂/m² a bzw. 9 % der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung. Der grösste Beitrag stammt dabei aus den Bauteilen im Unter- und Erdgeschoss (Aussenwände, Fundamentplatten und Decke über UG in Beton), sowie bei der Massivbauweise aus der Deckenkonstruktion (Betondecke).

Der Beitrag der bei gesicherter Permanenz anrechenbaren Negativemissionen liegt beim Holzbau bei rund 30 %. Der grösste Beitrag stammt aus der Aussenwandkonstruktion und den Deckenkonstruktionen (Holzbetonverbund). Bei dieser Deckenkonstruktion – bestehend aus einer Brettstapeldecke mit Betonüberdeckung - übersteigen die potenziellen Negativemissionen des biogen eingespeicherten Kohlenstoffs die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und Entsorgung des Bauteils.

8.6 Gebäude 3: Schulhaus, Neubau

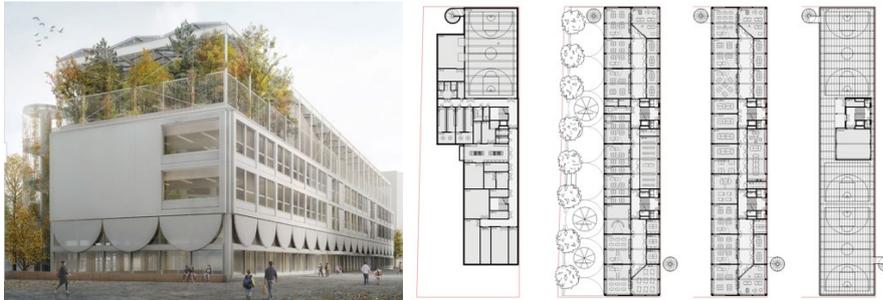


Fig. 8.4 Schulhaus, Neubau

Der lang gezogene, schlanke Zeilenbau verfügt über ein Untergeschoss und ist in Hybridbauweise geplant. Die Decken der Obergeschosse werden als Holzbetonverbunddecken ausgeführt. Eine Fotovoltaikanlage spendet Schatten auf dem für Sport und Aufenthalt genutzten Dach. Die Fassaden sind teils mit einer Holzschalung, teils mit hinterlüfteten Aluminiumpaneelen bekleidet.

Als Variante wird der Neubau in Massivbauweise ausgeführt mit Wand- und Deckenkonstruktionen in Beton.

Tab. 8.4 Varianten, Gebäude 3, Schulhaus

§: Permanenz und damit Anrechenbarkeit noch unklar

*: Darf nur bei rechtsverbindlich gesicherter Permanenz angerechnet werden.

Fallbeispiel 3: Schulhaus, Neubau	Treibhausgasemissionen aus Erstellung	potenziell anrechenbare Negativemissionen		
		Forcierte Karbonatisierung	Beton mit Pflanzenkohle §	Biogen eingespeichert*
	Herstellung und Entsorgung			
	kg CO ₂ -eq /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a	kg CO ₂ /m ² a
Hybridbauweise	12.4	-0.06	-0.6	-2.7
Massivbauweise	13.7	-0.09	-0.9	-0.7

Die Beiträge an potenziell anrechenbaren Negativemissionen aus dem forciert karbonatisierten Beton bzw. des mit Pflanzenkohle versetzten Beton erreichen bei diesem Schulhaus in der Hybridbauweise 0.7 kg CO₂/m² a bzw. 5 %, bei der Massivbauweise 1.00 kg CO₂/m² a bzw. 7 % der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung. Der grösste Beitrag stammt dabei aus der Primärkonstruktion.

Das Potenzial der real geplanten Hybridbauweise ist grösser. Der Beitrag der bei gesicherter Permanenz anrechenbaren Negativemissionen liegt bei rund 20 % der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung. Der grösste Beitrag stammt aus der Aussenwandkonstruktion und den Deckenkonstruktionen (Holzbetonverbund).

8.7 Synthese

Trotz der geringen Zahl an untersuchten Fallbeispielen lassen sich Tendenzen erkennen und erste Erkenntnisse gewinnen zum Potenzial von in Baustoffen eingelagerten Negativemissionen eines Gebäudes.

Wenn in Baumaterialien wie Holz, Hanfkalk, Stroh oder Flachs eingelagertes biogenes CO₂ angerechnet werden kann (weil die Permanenz rechtlich verbindlich abgesichert ist), dann haben diese Negativemissionen ein recht bedeutendes Potenzial. In Kombination mit den auch in der Erstellung guten Werten dieser Bauweisen ergeben sich Vorteile sowohl bei tatsächlich emittierten Treibhausgasen in der Erstellung als auch bei den potenziell anrechenbaren Negativemissionen.

Das Potenzial von Negativemissionen dank dem Einsatz von karbonatisiertem Beton oder von mit Pflanzenkohle angereichertem Beton bleibt, bilanziert über das ganze Gebäude, eher bescheiden. Dies gilt auch, wenn es in Zukunft gelingen sollte, die eingelagerten Mengen an CO₂ gegenüber den hier getroffenen Annahmen zu verdoppeln. Die Negativemissionen vermögen die Mehremissionen in der Erstellung eines Massivbaus gegenüber der Holzbauweise nicht auszugleichen.

Wie die Bilanzierung der Erstellung und der potenziell anrechenbaren Negativemissionen an Fallbeispielen zeigt, wird es in absehbarer Zeit und mit heutigen Bauweisen und Baumaterialien noch keine Gebäude mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen geben.

Betrachtet man die Unterschiede der Resultate bei der Erstellung der Gebäude darf vermutet werden, dass das Potenzial von Vermeidungsstrategien wie weniger Material (zum Beispiel durch grosse und kompakte Baukörper), die Verwendung von Material mit eher tiefen spezifischen Treibhausgasemissionen (wie zum Beispiel Holz) oder die längere Nutzung von bereits produzierten Bauteilen (zum Beispiel durch Umbau statt Neubau) ein grösseres Potenzial auf dem Weg zu Gebäuden mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen erreichen als zurzeit mit Negativen Emissionstechnologien zu erzielen sind. Um das bedeutende Negativemissions-Potenzial von Baustoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe zu realisieren, braucht es rechtsverbindliche Absicherungen, entweder bezogen auf einzelne Gebäude oder mittels Massnahmen und Vorgaben in Städten und Gemeinden, Kantonen oder auf Bundesebene.

9 Folgerungen und Empfehlungen

9.1 Folgerungen

Biogenes und direkt aus der Atmosphäre entferntes CO₂ muss permanent, das heisst für mindestens 3000 bis 8000 Jahre, gespeichert werden, um einen anhaltend reduzierenden Einfluss auf die maximale mittlere Temperaturerhöhung zu haben. Wird entferntes CO₂ kürzer gespeichert, erlischt die positive Wirkung auf die globale Temperatur mit der Re-Emission des gespeicherten CO₂. Die Bestimmung der Schweizer CO₂-Verordnung mit einer Anrechenbarkeit der Senkenleistung bei einer Speicherdauer von lediglich 30 Jahren greift deutlich zu kurz. Daher muss angesichts einer Lebensdauer von Gebäuden von 50 bis 100 oder 200 Jahren die Re-Emission als CO₂-Emission bilanziert werden.

Für Baustoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe braucht es für die Anrechenbarkeit von Negativemissionen eine rechtlich verbindliche Zusicherung der Permanenz. Bei Baustoffen mit karbonatisierten Zuschlagstoffen ist die Permanenz durch die chemische Bindung gegeben. Bei Pflanzkohlebeton sollte die langfristige Permanenz durch geeignete Versuche nachgewiesen werden.

Eine Bilanzierung von Negativemissionen von Baustoffen für SIA 2032 und SIA 2040 ist möglich. Dabei kommen dieselben methodischen Setzungen zur Anwendung. Die Norm SN EN 15804:2012+A2:2019 hingegen verlangt auch im Falle einer permanenten Sequestrierung eine ausgeglichene Bilanz von Entnahme und Emission des biogenen CO₂, was einen wesentlichen Mangel dieser Norm darstellt.

Auf eine «dynamische» Bilanzierung soll verzichtet werden. Auch in Zukunft (re-)emittiertes CO₂ soll mit dem Treibhauspotenzial 1 kg CO₂-eq pro kg bewertet werden.

Die Beiträge der Negativemissionen sollen strikt getrennt bilanziert und ausgewiesen werden von den Treibhausgasemissionen des Gebäudes. Auf ein Saldieren auf Baumaterial- und Bauelementebene sollte verzichtet werden.

Die Wirkung von Vermeidungsstrategien wie Substitution (z.B. Holzbau), Kompaktheit, Suffizienz, LowTech, Weiter- und Wiederverwendung ist deutlich höher als das Potenzial von Baustoffen mit Negativemissionen.

Wenn biogenes CO₂ angerechnet werden kann (weil rechtlich verbindlich gesichert) dann hat biogenes CO₂ in Kombination mit Holzbau das eindeutig grösste Potenzial für Negativemissionen im Gebäude.

Pflanzkohlebeton (bei gesicherter Permanenz) oder forciert karbonatisierter Beton vermögen den Mehraufwand und die Mehremissionen gegenüber einem Holzbau nicht zu kompensieren.

Gebäude mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen wird es auf absehbare Zeit NICHT geben. Sie kommen in Reichweite, wenn die Treibhausgasemissionen der Herstellung von Baustoffen wie Zement, Stahl, Backstein, oder Glas massiv reduziert wurden.

Anstrengungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen müssen deutlich verstärkt werden. Neben Bauverantwortliche und Planer:innen müssen Baustoffhersteller:innen vermehrt eingebunden werden.

9.2 Empfehlungen, Handlungs- und Forschungsbedarf

Die Dekarbonisierung der Herstellung von Baumaterialien und Bauelementen muss ein prioritäres Ziel sein. Es sollen deshalb Massnahmen geprüft werden, wie die für das kommende Jahrzehnt geforderte massive Reduktion der Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Baumaterialien und Bauelementen erreicht beziehungsweise unterstützt werden kann. Ein wichtiges Instrument hierzu ist das umwelt- beziehungsweise klimabezogene Lieferkettenmanagement (Alig et al. 2019).

Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe haben das grösste Potenzial Negativemissionen zu erzeugen unter der Voraussetzung, dass der Kohlenstoff in diesen Materialien nach dem Ende der Nutzungsdauer nicht in die Atmosphäre gelangt.

Eine zentrale Fragestellung ist deshalb, wie rechtlich verbindlich abgesichert werden kann, dass ein Grossteil des biogenen Kohlenstoffs im Gebäude nicht freigesetzt wird (Permanenz). Es sind Lösungen denkbar auf Ebene Einzelgebäude (Grundbucheintrag, Rücknahmegarantie und vorgezogene Stilllegungsgebühr) oder für Gebietskörperschaften (Ausrüsten von Entsorgungs- und Verwertungsanlagen mit CCS kombiniert mit einer generellen Entsorgungspflicht oder mindestens einer Selbstverpflichtung für die eigenen Liegenschaften von Städten und Gemeinden). In diesem Zusammenhang stellen sich auch Fragen zur Kontrolle und zu Sanktionen bei Nichteinhalten. Dieses Thema sollte in einem künftigen Forschungsvorhaben bearbeitet werden.

Der Beitrag der forciert karbonatisierten Baustoffe an die Negativemissionen von Gebäude ist noch relativ gering. Das Potenzial der forcierten Karbonatisierung bei mineralischen Baustoffen ist vermutlich aber noch nicht ausgeschöpft. Die Forschung sollte sich darauf konzentrieren, wie dieser Beitrag bei gleichbleibendem oder nur leicht höherem Aufwand um eine Grössenordnung erhöht werden kann.

Gebäude mit Strohdämmung oder mit Einsatz von anderen nachwachsenden Rohstoffen weisen vielversprechend tiefe Umweltkennwerte aus, werden aber in der Breite noch wenig realisiert. Hier besteht noch ein Bedarf angewandter Forschung.

Es hat sich gezeigt, dass biogener Kohlenstoff in nachwachsenden Rohstoffen in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden kann (als Holzbaustoff, als Holzkohle im Pflanzenkohlebeton). Mit einer Potenzialstudie für die Schweiz könnten verschiedene Szenarien modelliert und durchgerechnet werden. Für diese Szenarien könnten einerseits die erzielbaren Negativemissionen wie auch die Aufwendungen und Treibhausgasemissionen quantifiziert werden.

Stand heute ist das Potenzial und Volumen für die Entnahme und permanente Endlagerung von CO₂ (biogen oder atmosphärisch) noch klein. Das gilt auch für die am Markt angebotenen Baumaterialien. Es stellt sich deshalb die Frage, ob sich die Stadt Zürich an einer (finanziellen) Förderung von Negativemissionstechnologien beteiligen beziehungsweise eine solche lancieren soll.

Literatur

- Alig M., Frischknecht R., Nathani C., Hellmüller P. and Stolz P. (2019) Umweltatlas Lieferketten Schweiz. treeze Ltd. & Rütter Soceco AG, Uster & Rüschlikon.
- Brunner C. (2022) Climate effect of temporarily stored CO₂ within building materials. *In proceedings from: 80. LCA Forum*, ETH Zürich, Switzerland, LCA Forum Association.
- EN 15804 (2013) EN 15804:2012+A1:2013 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- EN 15804 (2019) EN 15804:2012+A2:2019 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- Frischknecht R., Bauer C., Brunner C., Habert G., Heeren N., Jungbluth N., Leionen I., Kuittinen M., Norton A., Passer A., Peuportier B., Schmid H. and Stettler C. (2022) Biogenic carbon and climate change mitigation: silver bullet or flash in the pan?; 80th LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 9 June 2022. *In: Buildings and Cities*, **forthcoming**, pp.
- Hoxha E., Passer A., Saade M. R. M., Trigaux D., Shuttleworth A., Pittau F., Allacker K. and Habert G. (2020) Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *In: Buildings and Cities*, **1**(1), pp. 504-524, <http://doi.org/10.5334/bc.46>.
- IPCC (2019) Global Warming of 1.5°C; An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. International Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- IPCC (2021) Climate Change 2021; The Physical Science Basis; Summary for Policy Makers; Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- KBOB, ecobau and IPB (2021) Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 5.0. Plattform "Ökobilanzdaten im Baubereich", KBOB, eco-bau, IPB, Bern.
- KBOB, ecobau and IPB (2022) KBOB-Empfehlung 2009/1:2022: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand Februar 2022. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, retrieved from: <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=de>.
- Klingler M. and Savi D. (2021) Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen. Büro für Umweltchemie, Zürich, Schweiz.
- Levasseur A., Lesage P., Margni M. and Samson R. (2013) Biogenic carbon and temporary storage addressed with dynamic life cycle assessment. *In: Journal of Industrial Ecology*, **17**(1), pp. 117–128, <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x>.
- Matthews H. D. (2010) Can carbon cycle geoengineering be a useful complement to ambitious climate mitigation? *In: Carbon Management*, **1**(1), pp. 135-144, 10.4155/cmt.10.14, retrieved from: <https://doi.org/10.4155/cmt.10.14>.
- Matthews H. D., Zickfeld K., Dickau M., MacIsaac A. J., Mathesius S., Nzotungicimpaye C.-M. and Luers A. (2022) Temporary nature-based carbon removal can lower peak warming in a well-below 2 °C scenario. *In: Communications Earth & Environment*, **3**(1), pp. 65, 10.1038/s43247-022-00391-z, retrieved from: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00391-z>.

- Mennibus A. H. d., Zieger V., Camus A., Menibus A. H. d., Vincelas T., Guévec Y., Troufflard J. and Grasson L. (2019) Dynamic life cycle assessment to compare conventional and bio-based building construction impact on global warming.
- Millar R. J., Nicholls Z. R., Friedlingstein P. and Allen M. R. (2017) A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. In: *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, pp. 7213–7228, <https://doi.org/10.5194/acp-17-7213-2017>.
- Ministère de la Transition Ecologique (2021) Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine. In: *JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE*, Vol. Texte 23 sur 66, Paris, France.
- Näf P., Sacher P., Dinkel F. and Stettler C. (2021) Klimapositives Bauen Ein Beitrag zum Pariser Absenkpfad. Nova Energie Basel AG, Carbotech AG.
- Pfäffli K. (2019) Graue Energie und Treibhausgasemissionen von wiederverwendeten Bauteilen: Methodik und Berechnung in Varianten am Fallbeispiel Gebäude K118 in Winterthur. im Auftrag der ZHAW und der Fachstelle Nachhaltiges Bauen des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich.
- Pittau F., Krause F., Lumia G. and Habert G. (2018) Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. In: *Building and Environment*, **129**, pp. 117-129.
- Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G. and Habert G. (2019) Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. In: *Journal of Cleaner Production*, pp.
- Pittau F. and Habert G. (2021) Methodology for biogenic carbon accounting and carbonation in LCA of buildings and construction products. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, ETH Zürich, Zürich.
- Rueda O., Mogollón J. M., Tukker A. and Scherer L. (2021) Negative-emissions technology portfolios to meet the 1.5 °C target. In: *Global Environmental Change*, **67**, pp. 102238, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102238>, retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378021000170>.
- Savi D. and Klingler M. (2021) Kohlenstoffspeicherung im Holzbau: Potenzial des Gebäudeparks in der Schweiz. Büro für Umweltchemie, Zürich.
- Schweizerischer Bundesrat (2022) Verordnung über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Verordnung), Vol. 641.711, Bern.
- SIA (2017) Merkblatt 2040: SIA-Effizienzpfad Energie. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.
- SIA (2020) Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden, Schweizer Regel; SIA 2032:2020. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.
- Smith C. J., Forster P. M., Allen M., Leach N., Millar R. J., Passerello G. A. and Regayre L. A. (2018) FAIR v1.3: a simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. In: *Geosci. Model Dev.*, **11**, pp. 2273–2297, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2273-2018>.
- Talandier G., Lasvaux S., Duret A. and Citherlet S. (2016a) Projet Bâti-Tech Volet 3 - Rapport méthodologique d'analyse du cycle de vie des co-produits de l'agriculture du chanvre (confidentiel). HES-SO, HEIG-VD, LESBAT, Yverdon-les-Bains, CH.
- Talandier G., Lasvaux S., Duret A. and Citherlet S. (2016b) Projet Bâti-Tech Volet 3 - Rapport méthodologique d'analyse du cycle de vie du béton de chanvre (confidentiel). HES-SO, HEIG-VD, LESBAT, Yverdon-les-Bains, CH.
- Werner F. and Frischknecht R. (2018) Technische Grundlagen zur Prüfung eines Wechsels auf die europäischen EPD Normen für die ökologische Bewertung von Baustoffen und Gebäuden. cemsuisse, Lignum, Stahlbau Zentrum Schweiz, KBOB, BAFU, AHB Stadt Zürich, Zürich & Uster.

A Gebäudebilanzen der Fallbeispiele

A.1 Gebäude 1

Tab. A.1 Fallbeispiel 1a, kleines Mehrfamilienhaus, Umbau und Aufstockung, Holzelementbau (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation	Fallbeispiel: kleines MFH, Umbau und Aufstockung			Legende:	
Objekteingaben	GF	m ²	789 Geschossfläche	Eingabefelder	
	EBF	m ²	657 Energiebezugsfläche	Auswahlfelder	
Fallbeispiel 1: Kleines Mehrfamilienhaus Umbau / Aufstockung	m ²		789 Geschossfläche	übernom. Werte	
	m ²		657 Energiebezugsfläche		

Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Treibhausgas-emissionen	potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
					kg/m ² a	Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂)	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂), a:60J	permanent biogen CO ₂ a: 30/40/60J
					kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a
: auf ein Jahr, bezogen								
Vorarbeiten	Aushub	Vol.	m ³	0 (Aushub überschneid.)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	0 Baugrubenabschluss	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	m ¹	0 Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	0 Bodenplatte	0.00	0.00	0.00	0.00
	Aussenwand	BTF	m ²	0 Aussenwand unter Terrain	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach	BTF	m ²	0 Dach unter Terrain	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk	BTF	m ²	138 Holzwand	0.06	0.00	0.00	-0.28
(Reserve)	Aussenwand: Tragwerk	BTF	m ²	0 Aussenwand Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau	BTF	m ²	138 Bekleidung Holz, hinterlüftet	0.10	0.00	0.00	-0.12
(Reserve)	Aussenwand: Aufbau	BTF	m ²	407 Bekleidung Faserzement, hinterlüftet	0.65	0.00	0.00	0.00
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	m ²	191	1.73	0.00	0.00	-0.22
	Innenwände	BTF	m ²	158	0.30	-0.01	-0.001	-0.02
	Decke: Tragwerk	BTF	m ²	28 Betondecke (25cm)	0.08	-0.02	-0.002	0.00
(Reserve)	Decke: Tragwerk	BTF	m ²	0 Decke Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Decke: Aufbau	BTF	m ²	160 UB und Bodenbelag	0.30	0.00	0.00	-0.04
(Reserve)	Decke: Aufbau	BTF	m ²	225 Dämmung gegen unbeheizt	0.08	0.00	0.00	0.00
	Balkon	BTF	m ²	54 Balkonfläche	0.35	-0.03	-0.003	0.00
	Dach: Tragwerk	BTF	m ²	132 Brettstapeldecke	0.11	0.00	0.00	-0.67
(Reserve)	Dach: Tragwerk	BTF	m ²	0 Dach Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau	BTF	m ²	132 gedämmt (Flachdach)	0.60	0.00	0.00	0.00
(Reserve)	Dach: Aufbau	BTF	m ²	69 gedämmt (Flachdach)	0.32	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	657 Elektroanlage inkl. Verteilung	0.43	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	kWp	18 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.95	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	657 Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.94	0.00	0.00	0.00
	Thermische Solarkollektoren	BTF	m ²	0 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	657 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.50	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	m ²	657 Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.42	0.00	0.00	0.00
Projektwert					7.9	-0.1	0.0	-1.3

Tab. A.2 Fallbeispiel 1, kleines Mehrfamilienhaus, Umbau und Aufstockung / Strohballenwand

Projektinformation	Fallbeispiel: kleines MFH, Umbau und Aufstockung / Stroh			Legende:	
Objekteingaben	GF	m ²	789 Geschossfläche	Eingabefelder	
	EBF	m ²	657 Energiebezugsfläche	Auswahlfelder	
				übernom. Werte	
				BTF = Bauteilfläche	

Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Treibhausgas-emissionen	potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
					kg/m ² a	Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂)	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂), a:60J	permanent biogen CO ₂ a: 30/40/60J
					kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a
: auf ein Jahr, bezogen								
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	0 (Aushub überschneid.)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	0 Baugrubenabschluss	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	m ¹	0 Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	0 Bodenplatte	0.00	0.00	0.00	0.00
	Aussenwand	BTF	m ²	0 Aussenwand unter Terrain	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach	BTF	m ²	0 Dach unter Terrain	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk	BTF	m ²	138 Strohwand	0.13	0.00	0.00	-0.76
(Reserve)	Aussenwand: Tragwerk	BTF	m ²	0 Aussenwand Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau	BTF	m ²	138 Bekleidung Holz, hinterlüftet	0.10	0.00	0.00	-0.12
(Reserve)	Aussenwand: Aufbau	BTF	m ²	407 Bekleidung Faserzement, hinterlüftet	0.65	0.00	0.00	0.00
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	m ²	191	1.73	0.00	0.00	-0.22
	Innenwände	BTF	m ²	158	0.30	-0.01	-0.001	-0.02
	Decke: Tragwerk	BTF	m ²	28 Betondecke (25cm)	0.08	-0.02	-0.002	0.00
(Reserve)	Decke: Tragwerk	BTF	m ²	0 Decke Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Decke: Aufbau	BTF	m ²	160 UB und Bodenbelag	0.30	0.00	0.00	-0.04
(Reserve)	Decke: Aufbau	BTF	m ²	225 Dämmung gegen unbeheizt	0.08	0.00	0.00	0.00
	Balkon	BTF	m ²	54 Balkonfläche	0.35	-0.03	-0.003	0.00
	Dach: Tragwerk	BTF	m ²	132 Brettstapeldecke	0.11	0.00	0.00	-0.67
(Reserve)	Dach: Tragwerk	BTF	m ²	0 Dach Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau	BTF	m ²	132 gedämmt (Flachdach)	0.60	0.00	0.00	0.00
(Reserve)	Dach: Aufbau	BTF	m ²	69 gedämmt (Flachdach)	0.32	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	657 Elektroanlage inkl. Verteilung	0.43	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	kWp	18 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.95	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	657 Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.94	0.00	0.00	0.00
	Thermische Solarkollektoren	BTF	m ²	0 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	657 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.50	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	m ²	657 Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.42	0.00	0.00	0.00
Projektwert					8.0	-0.1	-0.01	-1.8

Tab. A.3 Fallbeispiel 1, kleines Mehrfamilienhaus, Umbau und Aufstockung / Hempcrete (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: kleines MFH, Umbau und Aufstockung / Stroh			Legende:					
Objekteingaben	GF	m ²	789	Geschossfläche	Eingabefelder	potenziell anrechenbare Negativemissionen:				
	EBF	m ²	657	Energiebezugsfläche	Auswahlfelder übernom. Werte BTF = Bauteilfläche					
		Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Treibhausgas-emissionen kg/m ² a t auf ein Jahr, bezogen	Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂) kg/m ² a amortisiert, EBF	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂), a:60J kg/m ² a amortisiert, EBF	permanent biogen CO ₂ a: 30/40/60J kg/m ² a amortisiert, EBF
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	0	(Aushub einschließen)		0,00	0,00	0,00	0,00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	0	Baugrubenabschluss		0,00	0,00	0,00	0,00
	Pflanzung	BTl	m ²	0	Pflanzung		0,00	0,00	0,00	0,00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	0	Bodenplatte		0,00	0,00	0,00	0,00
	Aussenwand	BTF	m ²	0	Aussenwand unter Terrain		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dach	BTF	m ²	0	Dach unter Terrain		0,00	0,00	0,00	0,00
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	138	Hanfalksteine		0,38	0,00	0,00	-0,58
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	407	Bekleidung Holz, hinterlüftet		0,10	0,00	0,00	-0,12
	Fenster inkl. Sonnenschutz (Reserve)	BTF	m ²	191	Bekleidung Faserzement, hinterlüftet		0,65	0,00	0,00	-0,22
	Innenwände (Reserve)	BTF	m ²	158	Betondecke (25cm)		0,30	-0,01	-0,001	-0,02
	Decke: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	28	Decke Tragwerk		0,08	0,00	0,00	0,00
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	160	UB und Bodenbelag		0,30	0,00	0,00	-0,04
	Balkon (Reserve)	BTF	m ²	225	Dämmung gegen unbeheizt		0,08	0,00	0,00	0,00
	Dach: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	54	Brettschalung		0,35	-0,03	-0,003	0,00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	132	Brettschalung		0,11	0,00	0,00	-0,67
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	69	gedämmt (Flachdach)		0,32	0,00	0,00	0,00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	657	Elektroanlage inkl. Verteilung		0,43	0,00	0,00	0,00
	Solarstromanlage	max. Leist.	KWp	18	(Eingabe im Blatt "Elektro")		0,95	0,00	0,00	0,00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	657	Wärmeanlage inkl. Verteilung		0,94	0,00	0,00	0,00
	Thermische Solarkollektoren	BTF	m ²	0	(Eingabe im Blatt "Elektro")		0,00	0,00	0,00	0,00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	657	(Eingabe im Blatt "Elektro")		0,50	0,00	0,00	0,00
	Wasseranlage	EBF	m ²	657	Sanitäranlagen inkl. Verteilung		0,42	0,00	0,00	0,00
Projektwert							8.2	-0.1	-0.01	-1.6

Tab. A.4 Fallbeispiel 1, kleines Mehrfamilienhaus, Neubau / Holzbauweise (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: kleines MFH, Neubau (Holz)			Legende:					
Objekteingaben	GF	m ²	789	Geschossfläche	Eingabefelder	potenziell anrechenbare Negativemissionen:				
	EBF	m ²	657	Energiebezugsfläche	Auswahlfelder übernom. Werte BTF = Bauteilfläche					
		Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Treibhausgas-emissionen kg/m ² a t auf ein Jahr, bezogen	Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂) kg/m ² a amortisiert, EBF	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂), a:60J kg/m ² a amortisiert, EBF	permanent biogen CO ₂ a: 30/40/60J kg/m ² a amortisiert, EBF
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	675	(Aushub einschließen)		0,01	0,00	0,00	0,00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	120	Spundwand		0,52	0,00	0,00	0,00
	Pflanzung	BTl	m ²	338	Pflanzung		0,00	0,00	0,00	0,00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	225	ungedämmt		0,72	-0,21	-0,021	0,00
	Aussenwand	BTF	m ²	190	ungedämmt		0,53	-0,12	-0,012	0,00
	Dach	BTF	m ²	21	ungedämmt		0,08	-0,02	-0,002	0,00
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	138	Holz wand		0,06	0,00	0,00	-0,28
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	407	Holz wand		0,17	0,00	0,00	-0,83
	Fenster inkl. Sonnenschutz (Reserve)	BTF	m ²	138	Bekleidung Holz, hinterlüftet		0,10	0,00	0,00	-0,12
	Innenwände (Reserve)	BTF	m ²	407	Bekleidung Holz, hinterlüftet		0,29	0,00	0,00	-0,34
	Decke: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	191	Betondecke (25cm)		0,30	0,00	0,00	-0,22
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	158	Betondecke (25cm)		0,30	-0,01	-0,001	-0,02
	Decke: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	201	Holz elementdecke		0,54	-0,13	-0,013	0,00
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	363	UB und Bodenbelag		0,18	0,00	0,00	-0,70
	Balkon (Reserve)	BTF	m ²	600	Dämmung gegen unbeheizt		0,125	0,00	0,00	-0,17
	Dach: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	225	Dämmung gegen unbeheizt		0,08	0,00	0,00	0,00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	54	Brettschalung		0,35	-0,03	-0,003	0,00
	Dach: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	132	Brettschalung		0,11	0,00	0,00	-0,57
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	69	gedämmt (Flachdach)		0,32	0,00	0,00	-0,35
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	657	Elektroanlage inkl. Verteilung		0,43	0,00	0,00	0,00
	Solarstromanlage	max. Leist.	KWp	18	(Eingabe im Blatt "Elektro")		0,95	0,00	0,00	0,00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	657	Wärmeanlage inkl. Verteilung		0,94	0,00	0,00	0,00
	Thermische Solarkollektoren	BTF	m ²	0	(Eingabe im Blatt "Elektro")		0,00	0,00	0,00	0,00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	657	(Eingabe im Blatt "Elektro")		0,50	0,00	0,00	0,00
	Wasseranlage	EBF	m ²	657	Sanitäranlagen inkl. Verteilung		0,42	0,00	0,00	0,00
Projektwert							11.2	-0.6	-0.06	-3.7

Tab. A.5 Fallbeispiel 1, kleines Mehrfamilienhaus, Neubau / Strohbau (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: kleines MFH, Neubau (Stroh)				Legende:		
Objekteingaben	GF	m ²	789 Geschossfläche		Eingabefelder	Treibhausgas-emissionen kg/m ² a auf ein Jahr, bezogen		
	EBF	m ²	657 Energiebezugsfläche		Auswahlfelder übernom. Werte BTF = Bauteilfläche			
Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	kg/m ² a	potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
						Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂)	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂), a:60J	permanent biogen CO ₂ a: 30/40/60J
						kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a
						amortisiert, EBF	amortisiert, EBF	amortisiert, EBF
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	675 (Aushub eingeschlossen)	0.01	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	120 Spundwand	0.52	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	m ³	338 Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	225 ungedämmt	0.72	-0.21	-0.021	0.00
	Aussenwand	BTF	m ²	190 ungedämmt	0.53	-0.12	-0.012	0.00
	Dach	BTF	m ²	21 ungedämmt	0.08	-0.02	-0.002	0.00
Gebäude über Terrain	Aussenwand, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	138 Strohwand	0.13	0.00	0.00	-0.76
	Aussenwand, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	407 Strohwand	0.37	0.00	0.00	-2.26
	Fenster inkl. Sonnenschutz (Reserve)	BTF	m ²	138 Verputz ohne Dämmung	0.04	0.00	0.00	0.00
	Innenwände (Reserve)	BTF	m ²	407 Verputz ohne Dämmung	0.11	0.00	0.00	0.00
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	191	1.73	0.00	0.00	-0.22
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	158	0.30	-0.01	-0.001	-0.02
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	201 Betondecke (25cm)	0.54	-0.13	-0.013	0.00
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	363 Holzelementdecke	0.18	0.00	0.00	-0.70
	Decke, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	660 UB und Bodenbelag	1.25	0.00	0.00	-0.17
	Balkon (Reserve)	BTF	m ²	225 Dämmung gegen unbeheizt	0.08	0.00	0.00	0.00
	Balkon (Reserve)	BTF	m ²	54 Dämmung gegen unbeheizt	0.35	-0.03	-0.003	0.00
	Dach, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	132 Brettstapeldecke	0.11	0.00	0.00	-0.67
	Dach, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	69 Brettstapeldecke	0.06	0.00	0.00	-0.35
	Dach, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	132 gedämmt (Flachdach)	0.60	0.00	0.00	0.00
	Dach, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	69 gedämmt (Flachdach)	0.32	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	657 Elektroanlage inkl. Verteilung	0.43	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	kWp	18 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.95	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	657 Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.94	0.00	0.00	0.00
	Thermische Solarkollektoren	BTF	m ²	0 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	657 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.50	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	m ²	657 Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.42	0.00	0.00	0.00
Projektwert					11.3	-0.5	-0.05	-5.1

Tab. A.6 Fallbeispiel 1, kleines Mehrfamilienhaus, Neubau / Hanfkalk (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: kleines MFH, Neubau (Hanfkalk)				Legende:		
Objekteingaben	GF	m ²	789 Geschossfläche		Eingabefelder	Treibhausgas-emissionen kg/m ² a auf ein Jahr, bezogen		
	EBF	m ²	657 Energiebezugsfläche		Auswahlfelder übernom. Werte BTF = Bauteilfläche			
Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	kg/m ² a	potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
						Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂)	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂), a:60J	permanent biogen CO ₂ a: 30/40/60J
						kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a
						amortisiert, EBF	amortisiert, EBF	amortisiert, EBF
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	675 (Aushub eingeschlossen)	0.01	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	120 Spundwand	0.52	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	m ³	338 Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	225 ungedämmt	0.72	-0.21	-0.021	0.00
	Aussenwand	BTF	m ²	190 ungedämmt	0.53	-0.12	-0.012	0.00
	Dach	BTF	m ²	21 ungedämmt	0.08	-0.02	-0.002	0.00
Gebäude über Terrain	Aussenwand, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	138 Hanfkalksteine	0.38	0.00	0.00	-0.58
	Aussenwand, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	407 Hanfkalksteine	1.13	0.00	0.00	-1.71
	Fenster inkl. Sonnenschutz (Reserve)	BTF	m ²	138 Verputz ohne Dämmung	0.04	0.00	0.00	0.00
	Innenwände (Reserve)	BTF	m ²	407 Verputz ohne Dämmung	0.11	0.00	0.00	0.00
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	191	1.73	0.00	0.00	-0.22
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	158	0.30	-0.01	-0.001	-0.02
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	201 Betondecke (25cm)	0.54	-0.13	-0.013	0.00
	Decke, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	363 Holzelementdecke	0.18	0.00	0.00	-0.70
	Decke, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	660 UB und Bodenbelag	1.25	0.00	0.00	-0.17
	Balkon (Reserve)	BTF	m ²	225 Dämmung gegen unbeheizt	0.08	0.00	0.00	0.00
	Balkon (Reserve)	BTF	m ²	54 Dämmung gegen unbeheizt	0.35	-0.03	-0.003	0.00
	Dach, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	132 Brettstapeldecke	0.11	0.00	0.00	-0.67
	Dach, Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	69 Brettstapeldecke	0.06	0.00	0.00	-0.35
	Dach, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	132 gedämmt (Flachdach)	0.60	0.00	0.00	0.00
	Dach, Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	69 gedämmt (Flachdach)	0.32	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	657 Elektroanlage inkl. Verteilung	0.43	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	kWp	18 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.95	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	657 Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.94	0.00	0.00	0.00
	Thermische Solarkollektoren	BTF	m ²	0 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	657 (Eingabe im Blatt 'Beschreib')	0.50	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	m ²	657 Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.42	0.00	0.00	0.00
Projektwert					12.3	-0.5	-0.05	-4.4

Tab. A.7 Fallbeispiel 1c, kleines Mehrfamilienhaus, energetische Sanierung der Gebäudehülle (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: kleines MFH, energetische Sanierung				Legende:		potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
Objekteingaben		GF	m ²	657	Geschossfläche	Eingabefelder	Auswahlfelder	übernom. Werte	BTF = Bauteilfläche	
		EBF	m ²	525	Energiebezugsfläche					

Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Primärenergie nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Kohlendioxid	Karbonatisiert	permanent biogen
					kWh/m ² a	kg/m ² a	-100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂) a	-10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂ , x 60J)	CO ₂ a: 30/40/60J
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	0	Aushub (Aushub)	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	0	Baugrubenabschluss	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	0	Pfählung	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	0	Bodenplatte	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Aussenwand	BTF	0	Aussenwand unter Terrain	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
Gebäude über Terrain	Dach	BTF	0	Dach unter Terrain	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Aussenwand: Tragwerk	BTF	0	Aussenwand Tragwerk	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	(Reserve)	BTF	0	Aussenwand Tragwerk	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau	BTF	407	Verb. Aussenwämedämmung Flachs	2.0	0.46	0.0	0.00	-0.25
	(Reserve)	BTF	0	Aussenwand Aufbau	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	161	Fenster inkl. Sonnenschutz	7.6	1.83	0.0	0.00	-0.23
	Innenwände	BTF	0	Innenwände	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Decke: Tragwerk	BTF	0	Decke Tragwerk	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	(Reserve)	BTF	0	Decke Tragwerk	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Decke: Aufbau	BTF	0	Decke Aufbau	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	(Reserve)	BTF	180	Dämmung gegen unbeheizt	0.4	0.09	0.0	0.00	0.00
	Balkon	BTF	0	Balkon	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Dach: Tragwerk	BTF	0	Dach Tragwerk	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	(Reserve)	BTF	0	Dach Tragwerk	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Dach: Aufbau	BTF	201	gedämmt Iso floc (Geneigtes Dach)	0.8	0.24	0.0	0.00	-0.19
	(Reserve)	BTF	0	Dach Aufbau	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	525	Elektro im Umbau nicht erneuert	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	5	Eingabe im BTR (Betrieb)	1.3	0.36	0.0	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	525	Verteilung im Umbau nicht erneuert	0.5	0.13	0.0	0.00	0.00
	Themische Solarkollektoren	BTF	0	Eingabe im BTR (Betrieb)	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	525	Eingabe im BTR (Betrieb)	0.5	0.13	0.0	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	525	Sanitär im Umbau nicht erneuert	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
Projektwert					13	3.2	0.0	0.00	-0.7

A.2 Gebäude 2

Tab. A.8 Fallbeispiel 2, grosses Mehrfamilienhaus, Holzbau (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: grosses MFH, Neubau (Hybridbau)				Legende:		potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
Objekteingaben		GF	m ²	7'977	Geschossfläche	Eingabefelder	Auswahlfelder	übernom. Werte	BTF = Bauteilfläche	
		EBF	m ²	5'965	Energiebezugsfläche					

Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Treibhausgas-emissionen	Kohlendioxid	Karbonatisiert	permanent biogen
					kg/m ² a	-100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂) a	-10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂ , x 60J)	CO ₂ a: 30/40/60J
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	5408	Aushub (Aushub)	0.01	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	300	Spundwand	0.14	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	2028	Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	1352	ungedämmt	0.48	-0.14	-0.014	0.00
	Aussenwand	BTF	874	ungedämmt	0.27	-0.06	-0.006	0.00
Gebäude über Terrain	Dach	BTF	562	ungedämmt	0.23	-0.05	-0.005	0.00
	Aussenwand: Tragwerk	BTF	1400	Holzwand	0.06	0.00	0.00	-0.32
	(Reserve)	BTF	209	Betonwand	0.05	-0.01	-0.001	0.00
	Aussenwand: Aufbau	BTF	1400	Bekleidung Holz, hinterlüftet	0.11	0.00	0.00	-0.13
	(Reserve)	BTF	368	Bekleidung Faserzement, hinterlüftet	0.06	0.00	0.00	0.00
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	1330	Fenster inkl. Sonnenschutz	1.33	0.00	0.00	-0.17
	Innenwände	BTF	6382	Innenwände	1.32	-0.06	-0.006	-0.10
	Decke: Tragwerk	BTF	1625	Betondecke (25cm)	0.48	-0.11	-0.011	0.00
	(Reserve)	BTF	5000	Holzbetonverbund	0.61	-0.13	-0.013	-1.44
	Decke: Aufbau	BTF	5965	UB und Bodenbelag	1.24	0.00	0.00	-0.16
	(Reserve)	BTF	900	Dämmung gegen unbeheizt	0.04	0.00	0.00	0.00
	Balkon	BTF	504	Balkon	0.36	-0.03	-0.003	0.00
	Dach: Tragwerk	BTF	953	Brettstapeldecke	0.09	0.00	0.00	-0.53
	(Reserve)	BTF	0	Dach Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau	BTF	953	gedämmt (Flachdach)	0.48	0.00	0.00	0.00
	(Reserve)	BTF	0	Dach Aufbau	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	5965	Elektroanlage inkl. Verteilung	0.43	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	84	Eingabe im BTR (Betrieb)	0.50	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	5965	Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.35	0.00	0.00	0.00
	Themische Solarkollektoren	BTF	0	Eingabe im BTR (Betrieb)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	5965	Eingabe im BTR (Betrieb)	0.13	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	5965	Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.42	0.00	0.00	0.00
Projektwert					9.2	-0.6	-0.06	-2.8

Tab. A.9 Fallbeispiel 2, grosses Mehrfamilienhaus, Massivbau (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel: grosses MF H, Neubau (Massivbau)				Legende:		potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
Objekteingaben		GF	m ²	7977	Geschossfläche	Eingabefelder		Kohlenstoff	karbonatisiert	permanent
		EBF	m ²	5965	Energiebezugsfläche	Auswahlfelder		-100 kg CO ₂ /m ³	-10 kg CO ₂ /m ³	biogen CO ₂ a:
						übernom. Werte		amortisiert	amortisiert	30/40/60J
						BTF = Bauteilfläche		kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a
						Treibhausgasemissionen				
						kg/m ² a				
						auf ein Jahr, bezogen				
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	5408	Aushub einschliessl.	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	300	Spundwand	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	m	2028	Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	1352	ungedämmt	0.48	-0.14	-0.04	0.00	0.00
	Aussenwand	BTF	m ²	874	ungedämmt	0.27	-0.06	-0.006	0.00	0.00
	Dach	BTF	m ²	562	ungedämmt	0.23	-0.05	-0.005	0.00	0.00
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	1400	Betonwand	0.35	-0.08	-0.01	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	209	Betonwand	0.05	-0.01	-0.001	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	1400	Bekleidung Faserzement, hinterlüftet	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	368	Bekleidung Faserzement, hinterlüftet	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	m ²	1330		1.33	0.00	0.00	0.00	-0.17
	Innenwände	BTF	m ²	6382		1.32	-0.06	-0.006	0.00	-0.10
	Decke: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	1625	Betondecke (25cm)	0.48	-0.11	-0.011	0.00	0.00
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	5000	Betondecke (25cm)	1.49	-0.35	-0.035	0.00	0.00
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	5965	UB und Bodenbelag	1.24	0.00	0.00	0.00	-0.15
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	900	Dämmung gegen unbeheizt	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	Balkon	BTF	m ²	504	Halbhängedache	0.36	-0.03	-0.003	0.00	0.00
	Dach: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	953	Betondecke (25cm)	0.28	-0.07	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	0	Dach Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	953	gedämmt (Flachdach)	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	0	Dach Aufbau	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	5965	Elektroanlage inkl. Verteilung	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	kWp	84	(Eingabe an Blatt 'Decke')	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	5965	Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
	Thermische Solar Kollektoren	BTF	m ²	0	(Eingabe an Blatt 'Decke')	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	5965	(Eingabe an Blatt 'Decke')	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	m ²	5965	Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
Projektwert						10.7	-0.9	-0.09	-0.4	

A.3 Gebäude 3

Tab. A.10 Fallbeispiel 3, Schulhaus, Hybridbau (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel 03: Schulhaus, Neubau (Hybridbau)				Legende:		potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
Objekteingaben		GF	m ²	6208	Geschossfläche	Eingabefelder		Kohlenbeton	karbonatisiert	permanent
		EBF	m ²	5677	Energiebezugsfläche	Auswahlfelder		-100 kg CO ₂ /m ³	-10 kg CO ₂ /m ³	biogen CO ₂ a:
						übernom. Werte		amortisiert	amortisiert	30/40/60J
						BTF = Bauteilfläche		kg/m ² a	kg/m ² a	kg/m ² a
						Treibhausgasemissionen				
						kg/m ² a				
						auf ein Jahr, bezogen				
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³	9643	Aushub einschliessl.	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²	400	Spundwand	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pfählung	BTL	m	2795	Pfählung	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²	1863	gedämmt	1.04	-0.20	-0.020	0.00	0.00
	Aussenwand	BTF	m ²	952	gedämmt	0.49	-0.07	-0.007	0.00	0.00
	Dach	BTF	m ²	200	gedämmt	0.14	-0.02	-0.002	0.00	0.00
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	1094	Holz wand	0.05	0.00	0.00	0.00	-0.26
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	200	Betonwand	0.05	-0.01	-0.001	0.00	0.00
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	1094	Bekleidung Holz, hinterlüftet	0.09	0.00	0.00	0.00	-0.11
	Aussenwand: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	200	Bekleidung Metall/Glas, hinterlüftet	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	m ²	1741		1.83	0.00	0.00	0.00	-0.23
	Innenwände	BTF	m ²	9651	<i>Achtung Formel überschrieben!</i>	2.10	-0.09	-0.009	0.00	-0.17
	Decke: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	3306	Holzbetonverbund	0.48	-0.10	-0.010	0.00	-0.15
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	524	Betondecke (40cm)	0.33	-0.06	-0.006	0.00	0.00
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	5677	UB und Bodenbelag	1.24	0.00	0.00	0.00	-0.16
	Decke: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	0	Dämmung gegen unbeheizt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Balkon	BTF	m ²	0	Halbhängedache	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Tragwerk (Reserve)	BTF	m ²	1911	Holzbetonverbund	0.24	-0.05	-0.001	0.00	-0.58
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	0	Dach Tragwerk	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	1911	gedämmt (Flachdach)	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dach: Aufbau (Reserve)	BTF	m ²	0	Dach Aufbau	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²	5677	Elektroanlage inkl. Verteilung	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00
	Solarstromanlage	max. Leist.	kWp	170	(Eingabe an Blatt 'Decke')	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wärmeanlage	EBF	m ²	5677	Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00
	Thermische Solar Kollektoren	BTF	m ²	0	(Eingabe an Blatt 'Decke')	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lufttechnische Anlage	EBF	m ²	5677	(Eingabe an Blatt 'Decke')	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wasseranlage	EBF	m ²	5677	Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
Projektwert						12.4	-0.6	-0.06	-2.7	

Tab. A.11 Fallbeispiel 3, Schulhaus, Massivbau (blau: Bauteile mit potenziell anrechenbaren Negativemissionen)

Projektinformation		Fallbeispiel 03: Schulhaus, Neubau (Massivbau)				Legende:		potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
Objekteingaben	GF	m ²	6'208	Geschossfläche		Eingabefelder				
	EBF	m ²	5'677	Energiebezugsfläche		Auswahlfelder				
						übernom. Werte				
						BTF = Bauteilfläche				

Bezeichnung	Bezug	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	Treibhausgas-emissionen kg/m ² a	potenziell anrechenbare Negativemissionen:		
						Kohlebeton -100 kg CO ₂ /m ³ (kg CO ₂)	karbonatisiert -10 kg CO ₂ /m ³ amortisiert (kg CO ₂ , a:60J)	permanently biogen CO ₂ a: 30/40/60J
						amortisiert, EBF	amortisiert, EBF	amortisiert, EBF
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	9643	(Aushub unerschichtet)	0.01			
	Baugrubenabschluss	BTF	400	Spundwand	0.20			
	Frähhung	BTL	2795	Frähhung	0.00			
Gebäude unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	1863	gedämmt	1.04			
	Aussenwand	BTF	952	gedämmt	0.49			
	Dach	BTF	200	gedämmt	0.14			
Gebäude über Terrain	Aussenwand: Tragwerk	BTF	1094	Betonwand	0.29			
	(Reserve)	BTF	200	Betonwand	0.05			
	Aussenwand: Aufbau	BTF	1094	Bekleidung Holz, hinterlüftet	0.09			
	(Reserve)	BTF	200	Bekleidung Faserzement, hinterlüftet	0.04			
	Fenster inkl. Sonnenschutz	BTF	1741		1.83			
	Innenwände	BTF	9851	<i>Achtung Formel überschrieben!</i>	2.10			
	Decke: Tragwerk	BTF	3806	Betondecke (25cm)	1.18			
	(Reserve)	BTF	524	Betondecke (40cm)	0.33			
	Decke: Aufbau	BTF	5677	UB und Bodenbelag	1.24			
	(Reserve)	BTF	0	Dämmung gegen unbeheizt	0.00			
	Balkon	BTF	0	Balkon	0.00			
	Dach: Tragwerk	BTF	1911	Betondecke (25cm)	0.59			
	(Reserve)	BTF	0	Dach Tragwerk	0.00			
	Dach: Aufbau	BTF	1911	gedämmt (Flachdach)	1.01			
	(Reserve)	BTF	0	Dach Aufbau	0.00			
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	5677	Elektroanlage inkl. Verteilung	0.62			
	Solarstromanlage	max. Leist.	170	<i>(Eingabe im Blatt Verschieb)</i>	1.07			
	Wärmeanlage	EBF	5677	Wärmeanlage inkl. Verteilung	0.59			
	Thermische Solarkollektoren	BTF	0	<i>(Eingabe im Blatt Verschieb)</i>	0.00			
	Lufttechnische Anlage	EBF	5677	<i>(Eingabe im Blatt Verschieb)</i>	0.50			
	Wasseranlage	EBF	5677	Sanitäranlagen inkl. Verteilung	0.28			
Projektwert					13.7	-0.9	-0.08	-0.7

B Liste der Materialien

Material	Kategorie	Zusatzanforderungen
Beton, forciert karbonatisiert	KM	
Beton, mit Pflanzenkohle	KM	(Permanenz) ¹
Flachsfasern	NR	Permanenz
Gipsfaserplatten	MO	Permanenz
Gipskartonplatte	MO	Permanenz
Hanfbeton	KM	Permanenz
Hanfsteine	MO	Permanenz
Holz und Holzwerkstoffe	NR	Permanenz
Holzwohle-Leichtbauplatten (zementgebunden)	MO	Permanenz
Korkplatte	NR	Permanenz
Kraftpapier	NR	Permanenz
Linoleum	NR	Permanenz
Schafwolle	NR	Permanenz
Strohballenwand	NR	Permanenz
Teppich, Naturfaser	NR	Permanenz
Zellulosefasern	NR	Permanenz

¹: Permanenz unklar. Forschungsbedarf: Massenbilanzen bei Baumaterialaufbereitung und Recycling zur Bestimmung des Anteils Pflanzenkohle, die im Recycling-Betonaggregat verbleibt.

