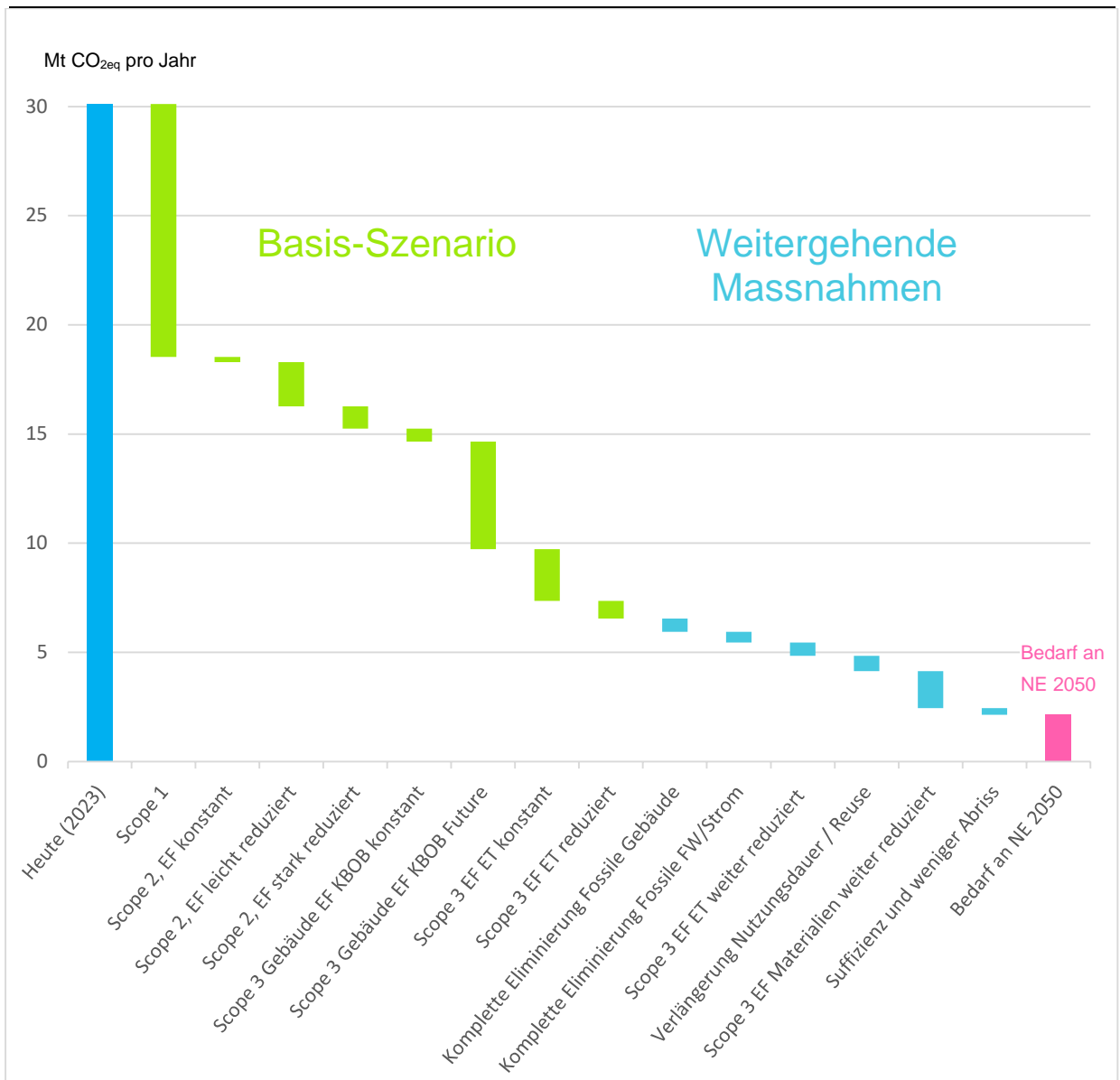




Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich (NN-THGG)

F1 Top-down Betrachtungen





Datum: 30. November 2024

Ort: Zürich und Basel

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

TEP Energy GmbH
Rotbuchstr. 68, CH-8037 Zürich
www.tep-energy.ch

Carbotech AG
St. Alban-Vorstadt 19, CH-4002 Basel
www.carbotech.ch

Autorinnen und Autoren:

Martin Jakob, TEP Energy, martin.jakob@tep-energy.ch
Giacomo Catenazzi, TEP Energy, Giacomo.catenazzi@tep-energy.ch
Cornelia Stettler, Carbotech AG, c.stettler@carbotech.ch
Yasmine Priore, ETHZ
Joachim Bagemihl, TEP Energy
Armin Binz, Binz Energie am Bau GmbH

Begleitung und Mitarbeit durch Mitglieder des Projektteams der Projektteile F2 bis F4:

K0: Christine Steiner Bächli, KOS
F3: Amadea Tschannen, Interface

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Rolf Frischknecht, treeze Ltd., mandatiert durch das BFE

Mitglieder der Steuergruppe:

René Bäbler, KBOB
Tom Blindenbacher, 2000W-Gesellschaft
Olivier Brenner, EnDK
Christoph Gmür, MuKE
Adrian Grossenbacher, BFE
Niko Heeren, AHB Stadt Zürich
David Hiltbrunner, BAFU
Sabrina Krank, ETH Rat / BLO
Annick Lalive, SIA 2032

Andrea Lötscher, EnFK
Joe Luthiger, Verein NNBS
Andreas Meyer, Verein Minergie / Verein GEAK
Katrín Pfäffli, SIA 390/1
Roger Ramer, BAFU
Marianne Stähler, Verein Ecobau
Christoph Starck, SIA
Sabine von Stockar, Verein Minergie / Verein GEAK

BFE-Vertragsnummer: SI/502615-01

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



Zusammenfassung

Dieser Bericht dokumentiert die Arbeiten zu den Fragestellungen F1 des Forschungsprojekts Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich. Betrachtet wird der Gebäudebereich über den gesamten Lebenszyklus inklusive der vor- und nachgelagerten Treibhausgasemissionen (THGE) (Scope 3). Er unterscheidet sich dadurch grundsätzlich vom Betrachtungszeitraum und -perimeter des Gebäudesektors gemäss CO₂-Gesetz bzw. Klima- und Innovationsgesetz (KIG), welche nur die direkten bzw. die direkten plus die indirekten THGE miteinbeziehen (Ausnahme Vorbildfunktion Bund und Kantone, das auch vor- und nachgelagerte Emissionen berücksichtigt).

Die Zielsetzung des hier dokumentierten Teilprojekts F1 ist aufzuzeigen, wie das für den Gebäudesektor definierte Emissionsbudget eingehalten werden kann, welche zusätzlichen Emissionen für den Gebäudebereich in der Schweiz und im Ausland zu erwarten sind und welche bottom-up seitigen Voraussetzungen erforderlich sind. Dabei soll auch die Rolle technologischer und struktureller Entwicklungen der Sektoren Energie und Industrie, der Negativemissionstechnologien und der auf Biomasse basierten Baustoffe aufgezeigt werden.

Die Top-down Betrachtungen beruhen zum einen auf Modellrechnungen mit dem Gebäudeparkmodell für die Zeitspanne 2023 bis 2050 und zum anderen auf gezielten Top-down Analysen von Potenzialen und Materialflüssen. Um die Fragestellungen zu beantworten, werden ein Basis-Szenario und verschiedene Szenario-Varianten und Sensitivitäten definiert, siehe nachfolgende Tabelle Z1.

Tabelle Z1 Definition des Basis-Szenario sowie von Szenariovarianten und Sensitivitäten für die 3 Scopes

Scopes	Basis-Szenario	Varianten und Sensitivitäten
Alle	Erhöhung der betrieblichen Energieeffizienz im Bereich Gebäudehülle, Heizanlagen, Gebäudetechnik und Geräte.	<i>Keine Varianten und Sensitivitäten</i>
1	Nahezu keine fossilen Energieträger im Gebäudepark bis 2050 (gemäss GPM)	<i>Gar keine fossilen Energieträger im Gebäudepark bis 2050</i>
2	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Stromnachfrage für Elektroheizungen/-boiler auf nahe 0, Anstieg WP, Steigende Nachfrage Fernwärme Emissionsfaktoren (EF) «stark» reduziert 	<i>EF weniger stark oder gar nicht reduziert, um den Effekt dieses Hebels aufzuzeigen</i>
3 Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> Hebel Wahl der Konstruktionstypen Hebel Materialeinsatz Mit Hebel KBOB Emissionsfaktoren und Emissionskoeffizienten 2050 Ohne Hebel nicht-technische Massnahme Hebel temporäre Senken und Hebel NET werden separat ausgewiesen 	<i>Geringere oder keine Wirkung einzelner Hebel, um deren Effekte aufzuzeigen.</i> <i>Weitergehende oder zusätzliche Hebel, um Emissionen gegenüber dem Basis-Szenario weiter zu senken:</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>Höherer Anteil Holzbau</i> <i>Weitergehende Reduktion EK Bauelemente</i> <i>Weniger Abriss und Ersatzneubau</i> <i>Weniger EBF-Wachstum</i> <i>Längere Nutzungszeiten</i>
3 Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> Konstante oder sinkende Nachfrage Emissionsfaktoren (EF) stark reduziert 	<i>EF weniger stark oder gar nicht reduziert, um den Effekt dieses Hebels aufzuzeigen</i>



Bezogen auf die verschiedenen Forschungsfragen ergeben sich nachfolgende Ergebnisse und Erkenntnisse.

F1.1 Was bedeutet Netto-Null in Bezug auf die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudeparks Schweiz verursachten THG-Emissionen (THGE) bis 2050 unter Einbezug von Scope 1, 2 und 3?

Diese Fragestellung wird mit zwei unterschiedlichen Ansätzen beantwortet. Zum einen wird auf die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen und damit auf das KIG Bezug genommen und zum anderen wird das Budget für den Gebäudebereich der Schweiz von einem wissenschaftlich begründeten Globalbudget auf die Schweiz heruntergebrochen.

- Beim ersten Ansatz wird für die Berechnung des Budgets der THGE ein Zielpfad auf der Basis der Zielsetzung im KIG definiert. Dabei werden die unterschiedlichen Systemgrenzen berücksichtigt. Für den Gebäudebereich ergibt sich eine Reduktion der jährlichen THGE um -30% bis 2030, -54% bis 2040 und -93% bis 2050, jeweils im Vergleich zum Stand 2020. Daraus ergibt sich für das Jahr 2050 ein verbleibender Anteil schwer vermeidbarer Emissionen und damit ein Bedarf an Negativemissionen (NE) von 2.0 Mt CO_{2eq}. Aus der KIG-Zielsetzung resultiert ein Emissionsbudget für die Periode 1990 bis 2050 von rund 1620 Mt CO_{2eq}, wovon bis 2023 schon knapp 70% verbraucht sind. Damit verbleibt ein Restbudget von rund 510 Mt CO_{2eq}.
- Beim zweiten Ansatz, d.h. aus einer globalen Perspektive betrachtet, hängt das Budget vom angestrebten Ziel, von der Sicherheit, es zu erreichen, und vom Allokationsansatz ab. Bei einem 1.5°C-Ziel sind es je nach Ansatz 200 Mt CO_{2eq} oder weniger und bei einem 1.7°C-Ziel 420 Mt CO_{2eq} oder weniger (jeweils bei einer Sicherheit von mindestens zwei Dritteln).

Im Quervergleich handelt es sich beim Budget gestützt auf das KIG in der Höhe von 510 Mt CO_{2eq} also um eine eher grosszügige Zielsetzung. Umgekehrt formuliert wird aufgrund des wissenschaftlich begründeten Globalbudgets, das der Schweiz zur Verfügung steht, im Vergleich zum KIG eine deutlich raschere Absenkung der THGE des Gebäudebereichs erforderlich.

F1.2 Welche THGE-Reduktionen und welche Negativemissionen werden von der Erstellung und welche THGE-Reduktionen vom Betrieb erwartet, um Netto-Null im Gebäudebereich in einer Lebenswegbetrachtung zu erreichen?

Im definierten Basis-Szenario werden zwischen heute (2023) und 2050 folgende Reduktionen erreicht:

- Bei den Scope 1 Emissionen aus der Verbrennung von Heizöl und Erdgas lässt sich eine Reduktion auf beinahe Null erreichen.
- Bei den Scope 2 Emissionen, die bei der Erzeugung von Strom und Fernwärme entstehen, ist ebenfalls eine hohe Reduktion zu erwarten. Allerdings ist diese etwas geringer und im Jahr 2050 verbleiben noch rund 14% der Emissionen des Stands von 2023. Dies hat auch damit zu tun, dass die Nachfrage nach Elektrizität für Wärmepumpen und von Fernwärme zunimmt und dass die Emissionsfaktoren nicht auf 0 abnehmen.
- Bei den Scope 3 Emissionen ist die Reduktion noch etwas weniger ausgeprägt. Die Scope 3 Emissionen Gebäude aus Konstruktion, Erneuerung und Rückbau der Gebäude gehen um knapp 60% zurück, dies wegen der geringeren Bautätigkeit, emissionsärmeren Konstruktionstypen, Bauteil und Materialien. Auch die Scope 3 Emissionen aus der Bereitstellung von Energieträgern und der Energieinfrastruktur sind rückläufig.

Zusammengefasst werden zwischen 2023 und 2050 die Emissionen der Scopes 1 und 2 um 93%, die des Scope 3 um 62% und die aller drei Scopes zusammen um 78% reduziert. Trotz dieser deutlichen Reduktionen beträgt der CO₂-Ausstoss im Basis-Szenario im Jahr 2050 immer noch rund 6.5 Mt pro Jahr, vorwiegend aus dem Bau und der Erneuerung (rund 4.1 Mt pro Jahr) und teilweise aus dem Betrieb der Gebäude (rund 2.4 Mt pro Jahr, davon knapp 1.3 Mt pro Jahr dem Scope 3 der Energieträger).

Damit ergibt sich für 2050 im Basis-Szenario ein Bedarf an Negativemissionen von rund 6.5 Mt pro Jahr. Dies würde die durch das KIG vorgesehenen Beträge von 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr bei weitem über-



steigen, weshalb weitere Massnahmen wichtig, um den Bedarf an NE auf ein darstellbares Mass zu reduzieren (siehe unten zur Fragestellung F1.4).

F1.3 Wie gross sind die Potenziale bzw. die nachhaltige Verfügbarkeit von Baustoffen (insbesondere Biomasse-basierte), welche zu Negativemissionen im Gebäudebereich führen.

Die Potenziale der Baustoffe in Form von dauerhaften NET-Lösungen für den Hochbau, wie z.B. der Einsatz von karbonatisiertem Beton, reichen für einen Ausgleich der verbleibenden Emissionen des Basis-Szenarios bei weitem nicht aus. Dies ist selbst dann der Fall, wenn die Einlagerung von Pflanzenkohle angerechnet wird, obwohl noch offene Fragen zur Dauerhaftigkeit beim Einsatz im Beton bestehen. Der grösste Beitrag zu potenziellen Negativemissionen (NE) liegt in Massnahmen, die zunächst Temporäre Senken (TS) durch den Einsatz von biogenen Baumaterialien generieren, welche zu einem späteren Zeitpunkt in NE überführt werden können. Dies wird erreicht, falls der im verbauten Holz und anderen biogenen Baustoffen gespeicherte Kohlenstoff über die Lebensdauer des Gebäudes hinaus gespeichert wird. Deren NE-Potenzial ist aufgrund der grossen Kohlenstoffvorräte für einen Ausgleich der verbleibenden Emissionen wesentlich. In der Szenario-Variante «mehr Holz» wird der vom KIG abgeleitete Bedarf an NE von rund -2 Mt CO_{2eq} pro Jahr gerade in etwa erreicht (siehe Tabelle Z2), dies unter der Voraussetzung, dass temporäre Senken durch die Verwendung von biogenen Materialien bereits zum Zeitpunkt deren Verwendung angerechnet werden und nicht erst zum Zeitpunkt der Überführung in NE).

Tabelle Z2 NE Potential zwischen den Jahren 2023 und 2050 in Mt CO_{2eq}

	2023	2030	2035	2040	2045	2050
NE Pflanzenkohle in Beton	0	-0.02	-0.04	-0.05	-0.07	-0.10
NE-Potenzial Holz/Stroh (Szenario-Variante mehr Holz)	-0.82	-1.14 (-1.60)	-1.15 (-1.54)	-1.23 (-1.66)	-1.16 (-1.56)	-1.16 (-1.60)
Entsorgung Altholz CCS	0	-0.04	-0.06	-0.14	-0.20	-0.35
Summe NE (Szenario-Variante mehr Holz)	-0.82	-1,20 (1,64)	-1,25 (-1,64)	-1,42 (-1,85)	-1,44 (-1,84)	-1,61 (-2,05)

Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy, Carbotech

Um diese Potenziale an TS und NE nutzen zu können, sind folgende Hinweise sind Voraussetzungen beachten (siehe auch Teilprojekte F0 und F4), wobei bei gewissen Punkten weitergehende Klärungen vorzunehmen sind:

- Lösungen zur Sicherung der dauerhaften Speicherung liegen zu einem wesentlichen Teil ausserhalb der Gebäude. Dies ist z.B. bei BECCS-Anlagen der Fall, d.h. bei der thermischen Verwertung von Biomasse verbunden mit der Abscheidung und langfristigen Speicherung der CO₂-Emissionen (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). Solche Anlagen befinden sich z.B. in Kehrichtverwertungsanlagen oder in grossen Unternehmen z.B. bei der Zementproduktion und auch die Speicherung erfolgt ausserhalb der Gebäude, z.B. in geologischen Formationen wie z.B. erschöpfte Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten.
- Nur mit einer gesetzlich geregelten und/oder rechtlich verbindlichen Lösung wird der Rahmen für eine dauerhafte Speicherung geschaffen.
- Um Doppelzählungen zu vermeiden, dürfen NE nur dann dem Gebäudebereich angerechnet werden, wenn bei der Verwendung von Baumaterialien und Bauelementen mit temporären Senken oder NE auch die zugehörigen Zertifikate erworben werden bzw. nur, wenn keine solchen Zertifikate an Dritte abgegeben werden.



- Mit Investitionen in Anlagen, die Emissionen aus der Nutzung von Biomasse einfangen (BECCS), könnten die Voraussetzungen zur dauerhaften Speicherung bei der Entsorgung von Altholz geschaffen werden, um die bereits vor 2050 anfallenden Abfallströme in NE zu überführen. Diese Entsorgung umfasst typischerweise die thermische Verwertung und die Abscheidung des dabei entstehenden CO₂, aber auch andere technische Möglichkeiten sind denkbar.

F1.4 Welche Absenkpfade 2030/2040/2050 unter Einhaltung des CO₂-Budgets für den Gebäudebereich gemäss F0.1¹ und differenziert nach THGE und Negativemissionen ergeben sich daraus, unterschieden nach Gebäudebestand und Neubauten?

Die Emissionen des Gebäudebereichs in Höhe von rund 30 Mt CO_{2eq} pro Jahr stammen im Jahr 2023 etwa zur Hälfte aus den direkten und indirekten Emissionen (Scopes 1 und 2) und zur Hälfte aus vor- und nachgelagerten Emissionen (Scope 3). Erstere werden im Wesentlichen, während der Betriebsphase der Gebäude ausgestossen (direkt oder durch Heiz- und Kraftwerke) und Letztere fallen während der Errichtung und der Entsorgung von Materialien an. Zudem ist zwischen Neubau und Bestand zu unterscheiden: 2023 betragen die Emissionen Erstellung bei Neubauten 4.3 Mt CO_{2eq} pro Jahr und beim Gebäudebestand 5.3 Mt CO_{2eq} pro Jahr. An die Emissionen 2023 knüpfen die Absenkpfade an:

- Bei den Scopes 1 und 2 basiert der Absenkpfad vor allem auf dem Ersatz der fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas durch Wärmepumpen (WP) und Fernwärme (FW). Motiviert durch die angestrebte stärkere Nutzung von Holz als Baumaterial wird auch Energieholz für Heizungen in Gebäuden um gut 30% reduziert. Die Scope 2 Emissionen reduzieren sich zudem durch die weitgehende Dekarbonisierung der Fernwärme- und Stromerzeugung. Beim Strom spielt auch die reduzierte Nachfrage eine Rolle, ermöglicht durch Effizienzgewinne im Bereich Geräte und Gebäudetechnik.
- Bei den Scope 3 Emissionen tragen die folgenden Effekte zum Absenkpfad bei:
 - Deutlich reduzierte Bautätigkeit, weshalb sich die jährlichen Emissionen der Erstellung des Bereichs Neubau, der 2023 etwa die Hälfte der Erstellungs-Emissionen ausmacht, bereits ohne weitere Massnahmen um etwa 40% reduzieren. Aufgrund des wachsenden Anteils des Gebäudeparks, bei welchem die Bauelemente aufgrund ihres Alters annahmengenäss zu ersetzen sind, gibt es eine erhöhte Erneuerungstätigkeit. Dies ist mit entsprechenden Emissionen der Erstellung verbunden, wobei im Vergleich zum Neubaubereich weniger relatives Reduktionspotenzial durch technische Massnahmen zur Optimierung zur Verfügung steht. Wichtig sind demzufolge ergänzende Massnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer, Reparierbarkeit und Wiederverwendung, um eine Reduktion der Emissionen im Bereich der Erneuerung zu erreichen.
 - Gebäudeseitige Massnahmen, d.h. Wahl von emissionsärmeren Konstruktionstypen, Gebäudeelementen und Materialien, wirkungsvoll v.a. im Neubaubereich (Reduktion ca. 20%)
 - Reduktion der Scope 3 Emissionen durch die Bereitstellung von Endenergie und Sekundärenergie (hauptsächlich Fernwärme und Strom für WP), wobei sich diese sowohl durch die Reduktion der Nachfrage als auch durch die Reduktion der spezifischen Emissionen reduzieren lassen (beispielsweise bei PV- und Windenergieanlagen).
 - Industrieseitige Massnahmen, d.h. Reduktion der spezifischen Emissionsfaktoren von Materialien und Gebäudeelementen. Basierend auf Emissionsfaktoren gemäss «KBOB Future» reduzieren sich die Emissionen aus der Erstellung um rund zwei Drittel.

Unter Berücksichtigung dieser Absenkpfade macht die Erneuerung des Gebäudebestands im Jahr 2050 den wesentlichen Teil der Emissionen Erstellung aus (3.3 von 4.1 Mt CO_{2eq} pro Jahr). Dabei handelt es sich um Emissionen aus der Erneuerung und dem Ersatz von Materialien, Gebäude-

¹ F0.1: Welches CO₂-Budget bis 2050 leitet sich aus dem Absenkpfad für den Gebäudesektor (direkte Emissionen) gemäss KIG ab? Welcher Anteil des für die Schweiz noch verfügbaren Emissions-Budgets muss in einer umfassenden Lebenswegbetrachtung für den Gebäudebereich ergänzt werden?



elementen und der Gebäudetechnik sowie des Innen- und Aussenbaus. Die höhere Bedeutung des Gebäudebestands im Vergleich zum Neubau hat folgende Gründe: die Neubautätigkeit sinkt, der Gebäudebestand wächst und die Reduktionspotenziale im Gebäudebestand sind geringer (gemäss der verwendeten Grundlage KBOB Future).

Mit den identifizierten technischen Hebeln bei Planung, Bau und Betrieb der Gebäude sowie der Emissionsreduktion im Energiesystem und bei der Produktion von Baumaterialien und -elementen im Sinne zukünftiger Emissionsfaktoren gemäss «KBOB Future» wird zwar das aus dem KIG abgeleitete Budget der Periode 2023 bis 2050 eingehalten. Das global zugeteilte Budget wird jedoch wesentlich überschritten. Zudem wird das für Zieljahr 2050 aus dem KIG abgeleitete Reduktionsziel im Basis-Szenario nicht erreicht. Im Jahr 2050 verbleiben brutto THGE in der Höhe von rund 6.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Ohne weitergehende Massnahmen würde ein relativ grosser Bedarf an negativen Emissionen entstehen, die bereitgestellt werden müssten. Dies würde die aus dem KIG für den Gebäudebereich abgeleiteten NE-Beträge von 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr bei weitem übersteigen.

Deshalb sind nebst den berücksichtigten Massnahmen noch weitere Hebel notwendig, deren Wirkung teilweise grob quantifiziert wird und teilweise im Nachgang von diesem Projekt weitergehend abzuschätzen sind. Folgende Ansätze werden in Betracht gezogen:

- Vollständige Eliminierung der fossilen Energien in Gebäuden.
Zusatz-Effekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.6 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Vollständige Eliminierung der fossilen Energien bei der Erzeugung der Sekundärenergieträger Fernwärme und Strom (z.B. durch den Einsatz von Wärmepumpen, Biomasse, grünem Wasserstoff oder anderen fossilfreien bzw. erneuerbar erzeugten Energieträgern).
Zusatz-Effekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Halbierung der Scope 3 Emissionen aus der Bereitstellung der Energieträger (analoge Annahme wie bei den Baumaterialien und Gebäudeelementen).
Zusatz-Effekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.6 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden und Bauteilen, z.B. durch die umsichtige Planung von Gebäudeerneuerungen, Systemtrennung und wenn möglich Wiederverwendung von Bauteilen die Verbesserungen der Reparierbarkeit bei Bauteilen, Gebäudetechnik, Gebäudeausstattung etc.
Zusatzeffekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.85 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Weitere Reduktion der spezifischen Emissionen von Baumaterialien und Gebäudeelementen um 50% (über die Annahmen von «KBOB Future» hinaus).
Zusatzeffekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Flächenreduktion (Suffizienz) und weniger Abriss- und Ersatzneubau gemäss Annahmen bei den Sensitivitätsrechnungen.
Zusatzeffekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.3 Mt CO_{2eq} pro Jahr.

In Abbildung Z1 sind die verschiedenen Beiträge (Hebel) zur Emissionsreduktion des Basis-Szenario und der weitergehenden Massnahmen in einer Wasserfall-Darstellung visualisiert.

Unter Berücksichtigung von Überlagerungseffekten reduzieren sich die Betriebsemissionen um rund 1.7 Mt CO_{2eq} pro Jahr und die Emissionen Erstellung um rund 2.7 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Damit betragen die Brutto-Emissionen im Jahr 2050 rund 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr (statt 6.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr wie im Basis-Szenario). Diese Emissionen lassen sich durch NE im Gebäudebereich ausgleichen (siehe Tabelle Z2). Dies bedeutet zum einen, dass das Netto-Null Ziel im Gebäudebereich grundsätzlich erreichbar ist und zum anderen, dass alle verfügbaren Hebel in Bewegung gesetzt werden müssen, da es sich um eine «Punktlandung» ohne nennenswerte Spielräume handelt.

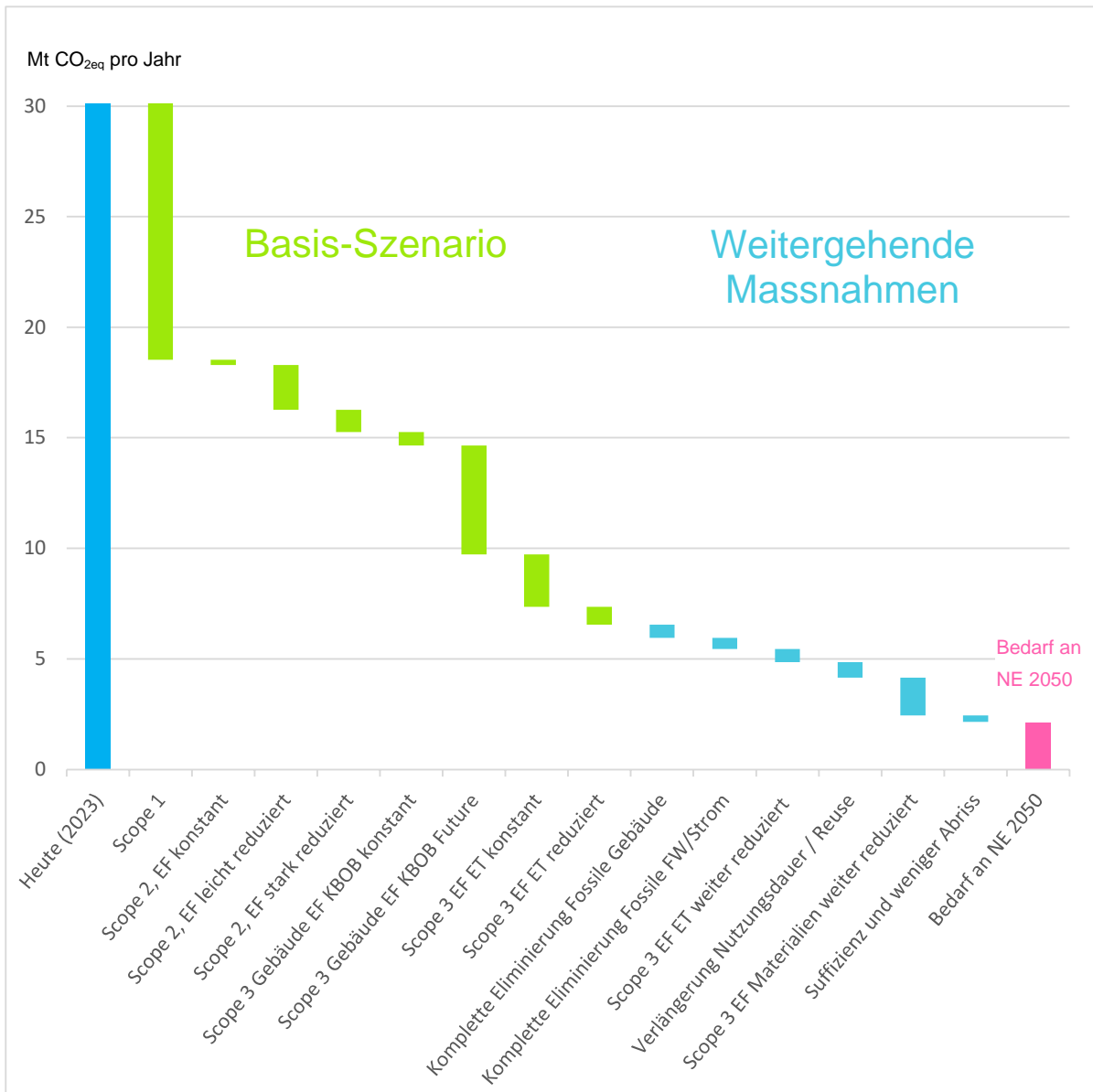


Abbildung Z1: THG-Emissionen 2023 (Mt CO_{2eq} pro Jahr) Reduktion pro Hebel bis 2050 für das Basis-Szenario und die weitergehenden Massnahmen sowie Bedarf an NE in 2050. Quelle: TEP Energy, 2024

F1.5 Quantifizierung der Auswirkungen der Absenkpfade auf Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats in verbautem Holz und anderen Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Im Basis-Szenario sind steigende Holzbau-Anteile in den analysierten Gebäudekategorien hinterlegt (siehe dazu Kapitel 3). Die so erzielte Erhöhung der jährlich eingesetzten Menge liegt in der Phase 2030 bis 2050 bei rund 30% über dem Ausgangswert des Basis-Szenarios. Mit einer Szenario-Variante *Höherer Anteil Holzbau* wird eine stärker forcierte Steigerung mit einer 40%-Erhöhung des Bauholzeinsatzes und einer zusätzlichen Förderung von Strohdämmstoffen skizziert. Daraus abgeleitet ergibt sich über den Zeithorizont von 2023 bis 2050 eine 180% bis 195% höhere Menge verbauten Holz im Vergleich zur aus dem Gebäudepark entnommenen Menge Holz bei Abriss und Ersatz von Bauteilen. Über die Zeitspanne 2023 bis 2050 ergibt sich daraus ein Netto-Zuwachs von 3.9 bis



5.5 Mt gespeichertem Kohlenstoff im Gebäudepark. Dies entspricht einer temporären Senke in der Höhe von 14 bis 20 Mt CO_{2eq} oder umgerechnet einem Zuwachs von 0.5-0.7 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Voraussetzung für eine Anrechnung als Negativemissionen sind, wie oben unter F1.3 beschrieben, eine gesetzlich und/oder rechtsverbindliche Sicherung der Permanenz (weit über die Lebensdauer der Gebäude hinaus). Ebenfalls zwingend erforderlich ist die Vermeidung von Doppelzählungen. Dies kann z.B. durch eine Verpflichtung erreicht werden, so dass die mit den NET verbundenen Zertifikate miterworben und behalten werden müssen (kein Verkauf von NE-Zertifikaten an Dritte).

Auf der Ebene einer Gesamtbetrachtung des Ökosystems Wald-Gebäudepark bedeutet eine Erhöhung der Bauholznutzung nicht zwingend eine starke Erhöhung der Schweizer Holzernte oder eine Übernutzung der Wälder mit Einbussen der Kohlenstoffvorräte im Wald. Der im Basis-Szenario und im Szenario *Höherer Anteil Holzbau* modellierte Zuwachs der Bauholznutzung kann durch die verminderte Nutzung von Energieholz in Einzelgebäuden ausgeglichen werden. Die Reduktion von Energieholz von 10 TWh im Jahr 2023 auf 6.7 TWh im Jahr 2050 entspricht einer Reduktion der jährlichen Energieholzmenge von 0.8 Mio. t. Dieser Wert liegt über dem Zuwachs des jährlichen Bauholzbedarfs von 0.3 Mio. t (Erhöhung von 2023 0.6 Mio. t Holz auf bis zu 0.9 Mio. t Holz in der Szenario-Variante *Höherer Anteil Holzbau*). Eine Veränderung der C-Speicher aufgrund der Holznutzung ergibt sich auf der Ebene Ökosystem Wald abhängig vom Gesamtverbrauch von Holz für Gebäude, Möbel und andere Industrieanwendungen. Die angestrebte Erhöhung der Erntemenge gemäss der Ressourcenpolitik Holz ist im Gesamtbild aller Holznutzungen zu betrachten. Die Nutzung führt zu keiner Einbusse an Holzvorräten, sondern nur zu einem etwas geringeren Zuwachs an Vorräten in Wald-Ökosystemen. Abgesehen davon ist eine Reduktion der Holznutzung zur Maximierung der Kohlenstoffvorräte im Wald-Ökosystem im Hinblick auf die zunehmenden Risiken von Hitze-/Trockenheitsschäden und der daher notwendigen Anpassung der Baumarten nur beschränkt sinnvoll.

F1.6 Wie hoch sind die territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade (gemäss Langfristiger Klimastrategie, in der NET den nicht vermeidbaren Emissionen vorbehalten sind) bei einer Lebenswegbetrachtung von Gebäuden respektive des Gebäudeparks?

Die THGE der Erstellung liegen aktuell in der Grössenordnung von 9-11 Mt CO_{2eq} pro Jahr (gemäss dem Investitionsprinzip). Davon wird fast die Hälfte der Emissionen aus der Herstellung von Baumaterial dem Ausland zugeordnet. Die Verminderungsziele für den Sektor Bauindustrie von 90% gegenüber 1990 gemäss Vorgaben des KIG werden in dieser Studie gleichermassen auf die territorialen Anteile der Emissionen im Ausland angewendet. Damit bleibt ein Endwert schwer vermeidbarer Emissionen auf der Seite der Erstellung von etwa 2 Mt CO_{2eq} im Jahr 2050 mit territorialen Anteilen von je etwa 1 Mt CO_{2eq} aus der Inlandsproduktion und aus Importware. Im Basis-Szenario mit Gebäudeoptimierung und der Herstellung der Baumaterialien mit Emissionsfaktoren gemäss KBOB Future wird dieser Wert deutlich überschritten, es verbleiben mit 4.1 Mt CO_{2eq} für die Erstellung etwa doppelt so hohe THGE. Eine Halbierung des Endwertes erfordert weitere Massnahmen, siehe F1.4.

Fazit:

Die aus dem KIG abgeleiteten Emissionsziele werden mit dem für das Basis-Szenario getroffenen Annahmen nicht erreicht. Die schwer vermeidbaren Emissionen im Jahr 2050 abgeleitet aus dem KIG betragen ca. 2 Mt CO_{2eq}. Im Basis-Szenario bewegen sich die verbleibenden Restemissionen im Jahr 2050 jedoch auf einem Niveau von 6.5 Mt CO_{2eq}. Das Potenzial an negativen Emissionen ist zum Ausgleich des Defizits bei weitem nicht hinreichend, um diese Lücke zu schliessen. Zielführend sind deshalb zusätzliche Massnahmen zur Emissionsreduktion, wie sie im Projekt skizziert werden (siehe F1.4). Diese sind im Nachgang des Projekts weitergehend zu analysieren und zu erhärten, wobei ein Hauptfokus auf die Bestandsgebäude und auf die vor- und nachgelagerten Ketten zu legen ist.



Summary

This report documents the work on the research question F1 of the Net Zero Greenhouse Gas Emissions in Buildings research project. The building sector is analysed over the whole life cycle (Whole Life Carbon, WLC), including upstream and downstream greenhouse gas emissions (GHG) (Scope 3). It therefore differs fundamentally from the system boundary of the building sector according to the CO2 Act and the Climate and Innovation Act (KIG), which only include direct or direct plus indirect GHGs on an annual basis (except for the role model approach of the Confederation and cantons, which also considers upstream and downstream emissions).

The objective of the project part F1 documented here is to show how the emissions budget defined for the building sector can be met, what additional emissions are to be expected for the buildings' domain in Switzerland and abroad and what bottom-up prerequisites are required. The role of technological and structural developments in the energy and industry sectors, negative emission technologies and biomass-based building materials will also be highlighted.

The top-down considerations are based on calculations with the building stock model for the period 2023 to 2050 and on targeted top-down analyses of potentials and material flows. To answer the questions, a base scenario and various scenario variants and sensitivities are defined, see Table S1.

Table S1: Definition of the base scenario as well as scenario variants and sensitivities for the 3 scopes.

Scopes	Base scenario	Variants and sensitivities
All	Increasing operational energy efficiency in the areas of building envelopes, heating systems, building technology and appliances.	<i>No variants and sensitivities</i>
1	Virtually no fossil fuels in the building stock by 2050	<i>No fossil fuels at all in the building stock by 2050</i>
2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduction in electricity demand for electric heating/boilers to almost 0, increase in HP, ▪ Rising demand for district heating ▪ Emission factors (EF) "greatly" reduced 	<i>EF less strongly or not at all reduced to show the effect of this lever</i>
3 Buildings	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lever Choice of construction types ▪ Lever Material usage ▪ With lever KBOB emission factors and emission coefficients 2050 ▪ Without lever non-technical measure ▪ Lever temporary sinks and lever NET are recognised separately 	<p><i>Less or no effect of individual levers to show their effects.</i></p> <p><i>Further or additional levers to further reduce emissions compared to the baseline scenario:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Higher proportion of timber construction</i> • <i>Further reduction of EF components</i> • <i>Less demolition and "replacement building"</i> • <i>Less ERA growth</i> • <i>Longer utilisation times</i>
3 Energy sources	<ul style="list-style-type: none"> • Constant or falling demand • Emission factors (EF) greatly reduced 	<i>EF less strongly or not at all reduced to show the effect of this lever</i>

The following results and findings emerge in relation to the various research questions.



F1.1 Target definition: What does net-zero mean in terms of GHG emissions caused by the construction and operation of the Swiss building stock by 2050, including Scope 1, 2 and 3?

This question is answered using two approaches. Firstly, for the building sector with reference to the legal framework (KIG) and secondly, the budget for the buildings area in Switzerland is broken down from a scientifically based global budget to Switzerland.

- In the first approach, a target path is defined for the calculation of the GHG emissions budget based on the target in the KIG. The different system boundaries are considered. For the buildings sector, this results in a reduction in annual GHG emissions of -30% by 2030, -54% by 2040 and -93% by 2050, in each case compared to 2020. This results in a remaining share of emissions that are difficult to avoid for 2050 and therefore a requirement for negative emissions (NE) of 2.0 Mt CO₂-eq. The KIG target results in an emissions budget of around 1620 Mt CO₂-eq. for the period 1990 to 2050, of which almost 70% will already have been utilised by 2023. This leaves a residual budget of around 510 Mt CO₂eq.
- In the second approach (global perspective), the budget depends on the following factors: the (i) ambition of the target set, (ii) the certainty of achieving it, and (iii) the allocation approach, whereby the grandfathering principle was used here. For a 1.5°C target, the budget is 200 Mt CO₂-eq or less. With a 1.7°C target, it is 420 Mt CO₂-eq. or less (in each case with a probability of at least 67%).

A comparison of the two approaches shows that the residual budget of 510 Mt CO₂-eq. based on the KIG is a rather generous target. If the scientifically based global budget available to Switzerland is used as a guide, a significantly faster reduction in GHG emissions from buildings is required compared to the KIG.

F1.2 What GHG reductions and what negative emissions are expected from construction and what GHG reductions from operation to achieve net zero in the building sector in a life cycle perspective?

In the defined baseline scenario, the following reductions are achieved between today (2023) and 2050:

- For Scope 1 emissions from the combustion of heating oil and natural gas, a reduction to almost zero can be achieved.
- A high reduction can also be expected for Scope 2 emissions stemming from the generation of electricity and district heating. However, this is somewhat lower and in 2050, around 14% of the 2023 level of emissions will still remain. This is also due to the fact that the demand for electricity for heat pumps and district heating will increase and that the emission factors will not decrease to zero.
- The reduction in Scope 3 emissions is even less pronounced. Scope 3 emissions from the construction, renovation and demolition of buildings fall by just under 60% due to lower construction activity and lower-emission construction types, components and materials. Scope 3 emissions from the provision of energy sources and energy infrastructure are also declining.

Between 2023 and 2050, emissions from Scopes 1 and 2 are reduced by 93%, Scope 3 by 62% and all three Scopes together by 78%. Despite these significant reductions, CO₂ emissions in the base scenario still amount to around 6.5 Mt per year in 2050. These emissions come primarily from construction and renovation (around 4.1 Mt per year) and partly from the operation of buildings (around 2.4 Mt per year, of which just under 1.3 Mt comes from Scope 3 energy sources). This results in a need for negative emissions of around 6.5 Mt per year in 2050 in the base scenario. This would far exceed the quantity of 2 Mt CO₂-eq. per year derived from the KIG. Further measures are therefore important to reduce the need for NE to an achievable level (see question F1.4).



F1.3 How great are the potentials or sustainable availability of building materials (especially biomass-based) that lead to negative emissions in the building area?

The potential of building materials in the form of durable NET solutions for building construction, such as the use of carbonated concrete, is far from sufficient to balance the remaining emissions of the baseline scenario. This is the case even if the storage of biochar is considered. The greatest contribution to potential negative emissions (NE) is made by measures that initially generate temporary sinks through the use of biogenic building materials, which can be converted into NE at a later date. This is achieved if the carbon stored in the wood used or in other biogenic building materials is stored beyond the service life of the building. Due to the large carbon stocks, this NE potential is essential for balancing the remaining emissions. In the "more wood" scenario variant, the NE need derived from the KIG for remaining emissions of around 2 Mt CO_{2-eq.} per year is just achieved, see Table S2 (subject to the condition that temporary sinks caused by the use of biogenic materials are already recognised at the time of their use and not only at the time of transfer to NE).

Table S2 NE Potential between 2023 and 2050 in Mt CO_{2eq}

	2023	2030	2035	2040	2045	2050
NE Biochar in concrete	0	-0.02	-0.04	-0.05	-0.07	-0.10
NE potential wood/straw (scenario variant more wood)	-0.82	-1.14 (-1.60)	-1.15 (-1.54)	-1.23 (-1.66)	-1.16 (-1.56)	-1.16 (-1.60)
Disposal of waste wood CCS	0	-0.04	-0.06	-0.14	-0.20	-0.35
Total NE (scenario variant more wood)	-0.82	-1,20 (1,64)	-1,25 (-1,64)	-1,42 (-1,85)	-1,44 (-1,84)	-1,61 (-2,05)

Source: Assumptions and calculations TEP Energy, Carbotech

To be able to utilise this potential for TS and NE, the following information must be observed (see also sub-projects F0 and F4), although further clarification is required on certain points:

- Solutions for securing permanent storage are to a large extent located outside the buildings. This is the case, for example, with BECCS plants, i.e. the thermal utilisation of biomass combined with the capture and long-term storage of CO₂ emissions (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). Such plants are located, for example, in waste-to-energy plants or in large companies, e.g. in cement production, and storage also takes place outside buildings, e.g. in geological formations such as depleted oil and gas deposits.
- Only a legally regulated and/or legally binding solution will create the framework for permanent storage.
- To avoid double counting, NE may only be counted towards the buildings sector if the associated certificates are also acquired when building materials and construction elements with temporary sinks or NE are used, or only if no such certificates are issued to third parties.
- Investments in plants that capture emissions from the use of biomass (BECCS) could create the conditions for permanent storage in the disposal of waste wood to convert the waste streams generated before 2050 into NE. This disposal typically involves thermal utilisation and the capture of the resulting CO₂, but other technical options are also conceivable.



F1.4? Which reduction paths in 2030/2040/2050, in compliance with the CO₂ budget for the building area according to F0.1 and differentiated according to GHG emissions and negative emissions, result from this, differentiated according to existing buildings and new buildings?

Around half of the building area's emissions of circa 30 Mt CO_{2-eq.} per year in 2023 are from direct and indirect emissions (Scopes 1 and 2) and half from downstream emissions (Scope 3). The former are mainly emitted during the operational phase of the buildings (directly or through heating and power plants) and the latter occur during the construction and disposal of materials. A distinction must also be made between new and existing buildings: in 2023, emissions from the construction of new buildings amount to 4.3 Mt CO_{2-eq.} per year and 5.3 Mt CO_{2-eq.} per year for existing buildings. The following reduction paths are linked to the 2023 emissions:

- In Scopes 1 and 2, the reduction path is primarily based on the replacement of fossil fuels such as heating oil and natural gas with heat pumps (HP) and district heating (DH). Motivated by the aim to increase the use of wood as a building material, wood energy for heating in buildings will also be reduced by a good 30%. Scope 2 emissions are also reduced due to the extensive decarbonisation of district heating and electricity generation. In the case of electricity, the reduced demand, made possible by efficiency gains in appliances and building technology, also plays a role.
- The following effects contribute to the reduction pathway for Scope 3 emissions:
 - A significant reduction in construction activity, partly due to the slowdown in population growth and a stagnation in the amount of space required per person. As a result, annual emissions from the construction of new buildings are already reduced by around 40% without further measures. Due to the growing proportion of the building stock in which the building elements must be replaced due to their age, there is an increase in renovation activity. This is associated with corresponding emissions from construction, whereby less relative reduction potential is available in this area through technical measures for optimisation (compared to the new construction sector). Consequently, additional measures to extend the service life, reparability and reuse of building elements are important.
 - Measures on the building side, i.e. the choice of lower-emission construction types, building elements and materials, are particularly effective in new buildings (reduction of approx. 20%).
 - A reduction in Scope 3 emissions can be achieved through the provision of final energy and secondary energy (mainly district heating and electricity for heat pumps). Both by reducing demand and by reducing specific emissions (e.g. from PV and wind energy systems).
 - Industry-related measures, i.e. reducing the specific emission factors of materials and building elements, reduce the emissions from construction by around two thirds, based on emission factors according to the "KBOB-Future".

Taking these reduction paths into account, the renewal of the building stock in 2050 accounts for the majority of emissions from construction (3.3 of 4.1 Mt CO_{2-eq.} per year). These are emissions from the renewal and replacement of materials, building elements and building technology as well as interior and exterior fittings. The reasons for the greater importance of existing buildings compared to new buildings are as follows: new construction activity is falling; existing buildings are growing and the reduction potential in existing buildings is lower (according to the KBOB Future basis used).

With the identified technical levers (see Table) in the planning, construction and operation of buildings as well as the reduction of emissions in the energy system and in the production of building materials and elements in terms of future emission factors according to the "KBOB Future", the budget of 500 Mt CO_{2-eq.} derived from the KIG for the period 2023 to 2050 is met. However, the globally allocated



budget of 200 Mt CO_{2-eq.} is clearly exceeded. Overall, the reduction target derived from KIG for 2050 is far from being achieved in the baseline scenario: gross GHG emissions of around 6.5 Mt CO_{2-eq.} per year remain. Without further measures, a large amount of NE would have to be provided. This would far exceed the amount of NE of 2 Mt CO_{2-eq.} per year derived from the KIG for the building area. In addition to the measures analysed, further levers are therefore required that go beyond the base scenario. Their impact was quantified in a sensitivity analysis. The following levers were roughly quantified:

- Complete elimination of fossil fuels in buildings.
Additional effect compared to the base scenario: approx. 0.6 Mt CO_{2-eq.} per year.
- Complete elimination of fossil fuels in the generation of secondary energy sources such as district heating and electricity, e.g. through the use of heat pumps, biomass, green hydrogen or other fossil-free or renewable energy sources.
Additional effect compared to the base scenario: approx. 0.5 Mt CO_{2-eq.} per year.
- Halving of Scope 3 emissions from the provision of energy carriers (analogue assumption as for building materials and building elements).
Additional effect compared to the base scenario: approx. 0.6 Mt CO_{2-eq.} per year.
- Extending the lifespan and useful life of buildings and components, e.g. through the careful planning of building renovations, system separation and, where possible, the reuse of components, improvements in the reparability of components, building technology and building equipment.
Additional effect compared to the base scenario: approx. 0.85 Mt CO_{2-eq.} per year.
- Further reduction of specific emissions from building materials and building elements by 50%, i.e. beyond the assumptions of "KBOB-Future".
Additional effect compared to the base scenario: approx. 2 Mt CO_{2-eq.} per year.
- Reduction in space (sufficiency) and less demolition and "replacement building".
Additional effect compared to the base scenario: approx. 0.3 Mt CO_{2-eq.} per year.

Figure S1 visualises the various contributions (levers) to reducing emissions in the base scenario and the more far-reaching measures in a waterfall diagram.

Taking overlay effects into account, operational emissions are reduced by around 1.7 Mt CO_{2-eq.} per year and production emissions by around 2.7 Mt CO_{2-eq.} per year. This means that gross emissions in 2050 amount to around 2 Mt CO_{2-eq.} per year, instead of 6.5 Mt CO_{2-eq.} per year as in the baseline scenario. These emissions can be balanced by NE in the building area. On the one hand, this means that the net-zero target in the building area is fundamentally achievable and, on the other, that all available levers must be utilised, as it is a 'precision landing' without any significant leeway.

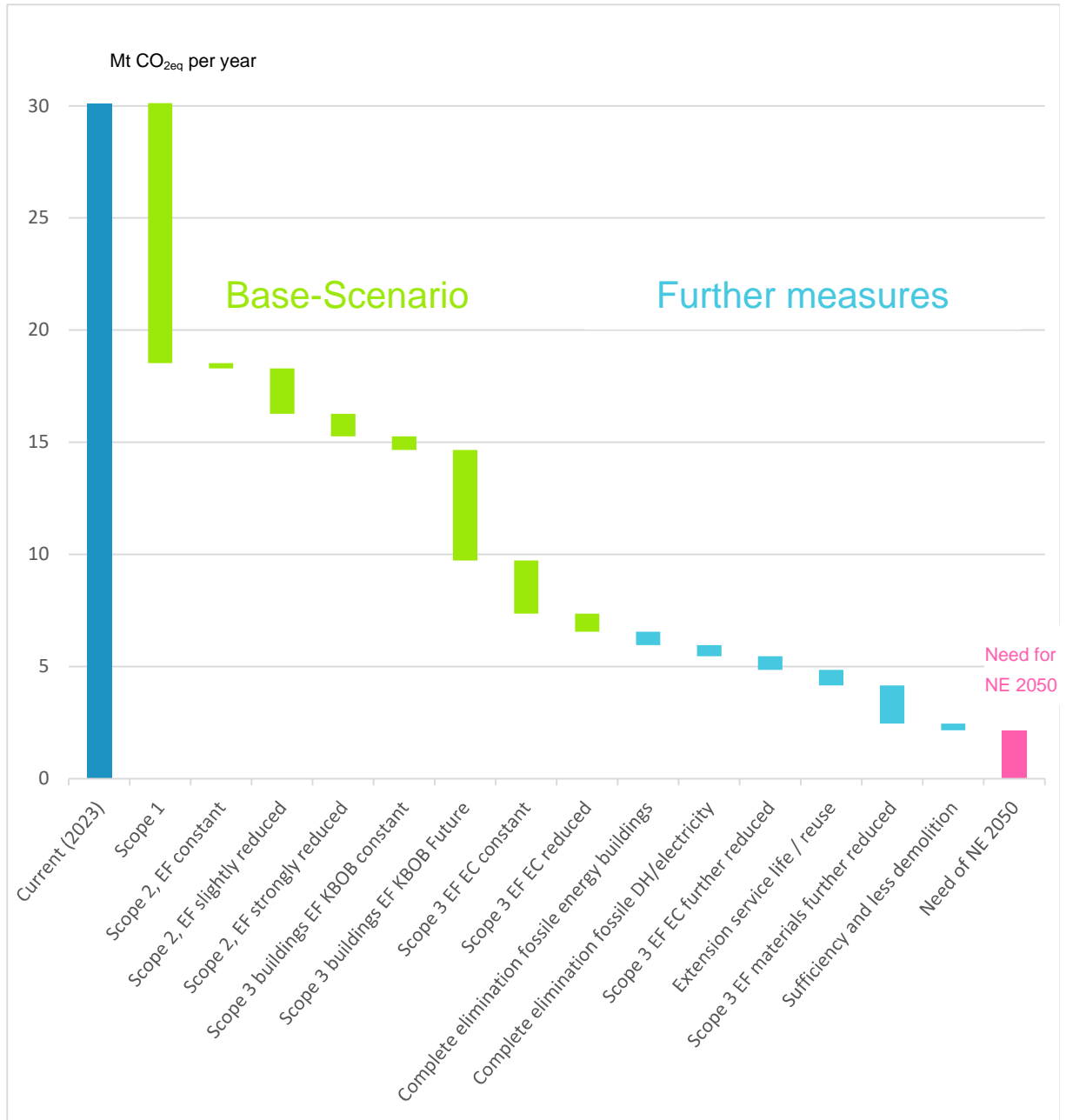


Figure S1: GHG emissions 2023 (Mt CO_{2eq} pro Jahr) and reduction per lever by 2050 for the base scenario and the further measures as well as the need for NE in 2050. Source: TEP Energy, 2024

F1.5 Quantify the impact of the reduction paths on the increase/decrease of carbon stocks in used wood and other building materials based on renewable resources.

In the baseline scenario, the proportion of timber construction in the analysed building categories increases. The resulting increase in the annual amount of wood used in the period from 2030 to 2050 is around 30% above the baseline value of the base scenario. An increase in the use of construction timber (increase of 40% instead of 30%) and additional promotion of straw insulation materials is outlined with



a "higher proportion of timber construction" scenario variant. This results in a 180% to 195% increase in the amount of wood used over the time horizon from 2023 to 2050 compared to the amount of wood removed from the building stock when demolishing and replacing building components. Over the period from 2023 to 2050, this results in a net increase of 3.9 to 5.5 Mt of stored carbon in the building stock. This corresponds to a temporary sink of 14 to 20 Mt CO_{2-eq.} by 2050, or the equivalent of a sink increase of 0.5-0.7 Mt CO_{2-eq.} per year. As described above under F1.3, a legally binding guarantee of permanence beyond the lifetime of the buildings is a prerequisite for being recognised as a NE. It is also essential that suitable measures are taken to avoid double counting. This can be achieved, for example, by purchasing and retaining the certificates associated with the NET (no sale of NE certificates to third parties).

At the level of an overall view of the forest-building stock ecosystem, an increase in the use of construction timber does not necessarily mean a sharp increase in the Swiss timber harvest or an overutilisation of forests with a loss of carbon stocks in the forest. The increase in the use of construction timber modelled in the baseline scenario and in the Higher proportion of timber construction scenario can be offset by the reduced use of energy wood in individual buildings. The reduction in energy wood from 10 TWh in 2023 to 6.7 TWh in 2050 corresponds to a reduction in the annual amount of energy wood of 0.8 million tonnes. This value is higher than the increase in annual timber demand of 0.3 million tonnes (increase from 0.6 million tonnes of wood in 2023 to up to 0.9 million tonnes of wood in the higher proportion of timber construction scenario variant). A change in C storage due to wood utilisation occurs at the forest ecosystem level depending on the total consumption of wood for buildings, furniture and other industrial applications. The targeted increase in harvest volumes in accordance with the Wood Resource Policy must be considered in the overall picture of all wood utilisation. Utilisation does not lead to a reduction in wood stocks, but only to a slightly lower increase in stocks in forest ecosystems. Apart from this, a reduction in wood use to maximise carbon stocks in the forest ecosystem only makes limited sense in view of the increasing risks of heat/drought damage and the necessary adaptation of tree species.

F1.6 What are the territorial shares of the emission targets and reduction paths (according to the Long-Term Climate Strategy, in which NET are reserved for unavoidable emissions) in a life cycle assessment of buildings or the building stock?

The GHG emissions from construction are currently in the order of 9 to 11 Mt CO_{2-eq.} per year. The reduction targets of 90% compared to 1990 for the construction industry sector in accordance with the KIG are applied equally to the territorial shares of emissions abroad in this study. This leaves a final value of difficult-to-avoid emissions of around 2 Mt CO_{2-eq.} in 2050 on the construction side, with territorial shares of around 1 Mt CO_{2-eq.} each from domestic production and imported goods. In the baseline scenario with building optimisation and the production of building materials with emission factors according to the KBOB future, this value is significantly exceeded: at 4.1 Mt CO_{2-eq.}, around twice as many GHG emissions remain for construction. Halving the final value requires further measures, see F1.4.

Conclusions

The emissions targets derived from the KIG are not achieved with the assumptions made for the baseline scenario. There are major deviations, particularly towards the end of the time horizon in the years 2040-2050. Derived from the KIG targets, the emissions that are difficult to avoid in 2050 for the building area can be estimated at 2 Mt CO_{2-eq.} Even with the assumed reduction in emissions in the production of building materials in combination with a sharp decline in new construction activity, the residual emissions still remain at a level of 6.5 Mt CO_{2-eq.} Negative emissions or temporary sinks to balance for this deficit exist at present and in the future but are, from today's perspective, far from sufficient to close this gap. There are also technical and regulatory hurdles. Additional measures to reduce emissions, such as those proposed in this project, are therefore expedient. Their contribution to reducing emissions should be analysed further in the follow-up, with a focus on the maintenance and renovation of existing buildings, and on upstream and downstream value chain.



Résumé

Dans le sous-projet F1, le domaine du bâtiment est considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, y compris les émissions GES en amont et en aval (scope 3) (approche « Whole Life Carbon » WLC). Il se distingue donc fondamentalement de la période et du périmètre d'analyse du secteur du bâtiment selon la loi sur le CO₂ ou la loi sur le climat et l'innovation (LCI). Seuls les émissions GES directes y sont prises en compte, à l'exception du « rôle d'exemple de la Confédération et des cantons » ; les émissions GES indirectes sont adressées dans leurs secteurs respectifs, par exemple dans le secteur industriel, sans distinction entre les émissions liées aux bâtiments et les autres émissions.

L'objectif du sous-projet F1 est de montrer comment le budget d'émissions défini pour le secteur du bâtiment peut être respecté, quelles émissions supplémentaires sont attendues pour le domaine du bâtiment en Suisse et à l'étranger et quelles conditions ascendantes sont nécessaires pour atteindre l'objectif. Le rôle des développements technologiques et structurels des secteurs de l'énergie et de l'industrie, des technologies à émissions négatives et des matériaux de construction à base de biomasse est également mis en évidence. Les considérations top-down reposent d'une part sur des modélisations avec le modèle de parc immobilier pour la période 2023-2050 et d'autre part sur des analyses top-down ciblées des potentiels et des flux de matériaux. Le tableau suivant Tableau R1 décrit le scénario de base défini et les différentes variantes de scénarios et de sensibilités.

Tableau R1 : Définition du scénario de base, des variantes de scénarios pour les 3 scopes.

Scopes	Scénario de base	Variantes et sensibilités
Tous (1 à 3)	Augmentation de l'efficacité énergétique dans le domaine de l'enveloppe du bâtiment, des installations de chauffage, de la technique du bâtiment et des appareils.	<i>Pas de variantes ni de sensibilités</i>
1	Pratiquement aucune énergie fossile dans le parc immobilier d'ici 2050	<i>Aucune énergie fossile dans le parc immobilier d'ici 2050</i>
2	<ul style="list-style-type: none">▪ Réduction de la demande en électricité pour le chauffage électrique/chauffe-eau à un niveau proche de 0, augmentation des PAC▪ Demande croissante de chauffage urbain▪ Facteurs d'émission (FE) "fortement" réduits	<i>FE moins ou pas du tout réduit pour montrer l'effet de ce levier</i>
3 Bâtiment	<ul style="list-style-type: none">▪ Levier Choix du type de construction▪ Levier Choix des matériaux▪ Avec levier KBOB Facteurs et coefficients d'émission 2050▪ Sans levier Mesure non technique• Leviers de baisses temporaires et leviers NET présentés séparément	<i>Effet moindre ou inexistant de certains leviers pour mettre en évidence leurs effets.</i> <i>Leviers plus larges ou supplémentaires pour réduire davantage les émissions par rapport au scénario de référence :</i> <ul style="list-style-type: none">• Une plus grande part de construction en bois• Réduction supplémentaire des éléments de construction FE• Moins de démolition et de construction de remplacement• Moins de croissance de la SRE• Durées de vie plus longues
3 Sources d'énergie	<ul style="list-style-type: none">▪ Demande constante ou en baisse▪ Facteurs d'émission (FE) fortement réduits	<i>FE moins ou pas du tout réduit pour montrer l'effet de ce levier</i>



En ce qui concerne les différentes questions de recherche, les résultats et les conclusions sont les suivants :

F1.1 Définition de l'objectif : que signifie zéro émission nette en ce qui concerne les émissions GES causées par la construction et l'exploitation du parc immobilier suisse jusqu'en 2050, en incluant les Scopes 1, 2 et 3 ?

Deux approches sont utilisées pour répondre à cette question. D'une part, pour le secteur du bâtiment, en se référant aux conditions-cadres légales (LCI) et, d'autre part, le budget pour le domaine du bâtiment en Suisse est décomposé à partir d'un budget global scientifiquement justifié pour la Suisse (méthode selon la partie F0 du projet).

- Dans la première approche, une trajectoire cible est définie pour le calcul du budget d'émissions GES sur la base de l'objectif de la LCI. Les différentes limites du système sont prises en compte. Pour le secteur du bâtiment, il en résulte une réduction des émissions annuelles de GES de -30% d'ici 2030, -54% d'ici 2040 et -93% d'ici 2050, toujours par rapport à la situation de 2020. Il en résulte pour 2050 une part restante d'émissions difficilement évitables et donc un besoin d'émissions négatives (EN) de 2.0 Mt CO₂-eq. L'objectif de la LCI aboutit à un budget d'émissions pour la période 1990-2050 d'environ 1620 Mt CO₂-eq, dont près de 70% auront déjà été consommés en 2023. Il reste donc un budget d'environ 510 Mt CO₂-eq
- Dans la seconde approche (perspective globale), le budget dépend des facteurs suivants : objectif visé, certitude de l'atteindre et approche d'allocation, le principe d'antériorité ayant été utilisé ici. Pour un objectif de 1,5°C, 200 Mt CO₂-eq. Pour un objectif de 1,7°C, il s'agit de 420 Mt CO₂-eq. ou moins (dans chaque cas, avec une probabilité d'au moins 67%).

Si l'on compare les deux approches, le budget résiduel de 510 Mt CO₂-eq. basé sur la LCI est donc un objectif plutôt généreux. Si l'on se réfère au budget global scientifiquement justifié dont dispose la Suisse, une réduction nettement plus rapide des émissions de GES du domaine du bâtiment est nécessaire par rapport à la LCI.

F1.2 Quelles réductions des émissions GES et quelles émissions négatives sont attendues de la phase de construction, et quelles réductions des émissions GES sont attendues de l'exploitation pour atteindre le zéro en émissions nettes dans le domaine du bâtiment dans une perspective de cycle de vie ?

Dans le scénario de base défini, les réductions suivantes sont réalisées entre aujourd'hui (2023) et 2050 :

- Les émissions de scope 1 provenant de la combustion de fioul et de gaz naturel peuvent être réduites à presque zéro.
- Les émissions du scope 2, liées à la production d'électricité et de chauffage urbain, devraient également connaître une forte réduction. Cela s'explique notamment par le fait que la demande en électricité pour les pompes à chaleur et le chauffage urbain augmente et que les facteurs d'émission ne sont pas nuls.
- Pour les émissions de scope 3, la réduction est encore un peu plus faible. Les émissions de scope 3 provenant de la construction, de la rénovation et de la déconstruction des bâtiments diminuent de près de 60%. Cela s'explique par la réduction de l'activité de construction et par l'utilisation de types de construction, de composants et de matériaux moins polluants. Les émissions de scope 3 liées à la fourniture de sources d'énergie et à l'infrastructure énergétique sont également en baisse.

Entre 2023 et 2050, les émissions des scopes 1 et 2 sont réduites de 93%, celles du scope 3 de 62% et celles des trois scopes réunis de 78%. Malgré ces réductions significatives, les émissions de CO₂ dans le scénario de référence s'élèvent encore à environ 6,5 Mt par an en 2050. Ces émissions



proviennent principalement de la construction et de la rénovation (environ 4.1 Mt par an) et en partie de l'exploitation des bâtiments (environ 2.4 Mt par an, dont près de 1.3 Mt pour le scope 3 des sources d'énergie).

Il en résulte donc un besoin d'émissions négatives d'environ 6.5 Mt par an pour 2050 dans le scénario de base. Cela dépasserait largement les quantités de 2 Mt de CO_{2-eq.} par an dérivées de la LCI. D'autres mesures sont donc importantes pour réduire le besoin d'NE à un niveau atteignable (voir la question F1.4).

F1.3 Quelle est l'ampleur des potentiels et de la disponibilité durable des matériaux de construction (en particulier ceux à base de biomasse) pouvant conduire à des émissions négatives dans le domaine du bâtiment ?

Le potentiel des matériaux de construction sous forme de solutions NET durables pour le bâtiment, comme l'utilisation de béton carbonaté, est loin d'être suffisant pour égaliser les émissions restantes du scénario de base. C'est le cas même si le stockage de charbon végétal est pris en compte. La plus grande contribution aux émissions négatives potentielles (EN) est apportée par les mesures qui, grâce à l'utilisation de matériaux de construction biogènes, génèrent d'abord des puits temporaires qui peuvent être convertis en EN par la suite. Cela est possible si le carbone stocké dans le bois ou d'autres matériaux de construction biosourcés est conservé au-delà de la durée de vie du bâtiment. Ce potentiel d'EN est essentiel pour égaliser les émissions restantes en raison de l'importance des stocks de carbone. Dans la variante de scénario « plus de bois », le besoin pour des EN dérivé de la LCI pour équilibrer pour les émissions résiduelles d'environ 2 Mt CO_{2-eq.} par an est tout juste atteint (si les puits temporaires sont déjà pris en compte lors de la pose des matériaux et non pas seulement au moment du transfert effectif en EN).

Tableau R2 EN Potentiel entre les années 2023 et 2050 en Mt CO_{2eq}

	2023	2030	2035	2040	2045	2050
EN Charbon végétal dans le béton	0	-0.02	-0.04	-0.05	-0.07	-0.10
Potentiel EN bois/paille (variante de scénario plus de bois)	-0.82	-1.14 (-1.60)	-1.15 (-1.54)	-1.23 (-1.66)	-1.16 (-1.56)	-1.16 (-1.60)
Élimination du bois usagé CCS	0	-0.04	-0.06	-0.14	-0.20	-0.35
Somme EN (variante de scénario plus de bois))	-0.82	-1,20 (1,64)	-1,25 (-1,64)	-1,42 (-1,85)	-1,44 (-1,84)	-1,61 (-2,05)

Source : hypothèses et calculs TEP Energy, Carbotech

Afin de pouvoir exploiter ces potentiels en TS et EN, il convient de respecter les indications suivantes (voir également les projets partiels F0 et F4), tout en apportant des précisions sur certains points :

- Les solutions pour assurer un stockage durable se trouvent en grande partie en dehors des bâtiments. C'est par exemple le cas des installations BECCS, c'est-à-dire de la valorisation thermique de la biomasse associée au captage et au stockage à long terme des émissions de CO₂ (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). De telles installations se trouvent par exemple dans des usines de recyclage des déchets ou dans de grandes entreprises, par exemple pour la production de ciment, et le stockage se fait également à l'extérieur des bâtiments, par exemple dans des formations géologiques telles que des gisements de pétrole et de gaz épuisés.
- Seule une solution réglementée et/ou juridiquement contraignante permettra de créer le cadre d'un stockage durable.



- Afin d'éviter les doubles comptages, les EN ne peuvent être comptabilisés dans le secteur du bâtiment que si les certificats correspondants sont acquis lors de l'utilisation de matériaux et d'éléments de construction avec des puits temporaires ou des EN, ou seulement si aucun certificat de ce type n'est remis à des tiers.
- En investissant dans des installations de capture des émissions issues de l'utilisation de la biomasse (BECCS), il serait possible de créer les conditions d'un stockage permanent lors de l'élimination du bois usagé, afin de transformer les flux de déchets déjà produits avant 2050 en EN. Cette élimination comprend généralement la valorisation thermique et le captage du CO₂ qui en résulte, mais d'autres possibilités techniques sont également envisageables.

F1.4 Quelles trajectoires de réduction pour 2030/2040/2050, en conformité avec le budget de CO₂ pour le domaine du bâtiment selon F0.1 et différenciées entre émissions de GES et émissions négatives, en résultent, avec une distinction entre le parc immobilier existant et les nouvelles constructions ?

En 2023, les émissions du domaine du bâtiment, qui s'élèvent à environ 30 Mt CO₂-eq. par an, proviennent pour moitié des émissions directes et indirectes (scopes 1 et 2) et pour moitié des émissions en aval (scope 3). Les premières sont principalement émises pendant la phase d'exploitation des bâtiments (directement ou par les centrales de chauffage et de production d'énergie) et les secondes sont émises pendant la construction et l'élimination des matériaux. Il convient également de distinguer les nouvelles constructions des bâtiments existants : en 2023, les émissions liées à la construction s'élèvent à 4,3 Mt CO₂-eq. par an pour les nouvelles constructions et à 5,3 Mt CO₂-eq. par an pour les bâtiments existants. Les trajectoires de réduction suivantes se rattachent aux émissions de 2023 :

- Pour les scopes 1 et 2, la trajectoire de réduction est principalement basée sur le remplacement des énergies fossiles que sont le fioul et le gaz naturel par des pompes à chaleur (PAC) et le chauffage urbain (CHU). Motivé par l'objectif d'une utilisation accrue du bois comme matériau de construction, le bois-énergie utilisé pour le chauffage des bâtiments est également réduit de plus de 30%. Les émissions de scope 2 sont également réduites par la décarbonisation de la production de chauffage urbain et d'électricité. En ce qui concerne l'électricité, la réduction de la demande, rendue possible par des gains d'efficacité dans le domaine des appareils et des techniques de construction, joue également un rôle.
- Pour les émissions du scope 3, les effets suivants contribuent à la trajectoire de réduction :
 - Une réduction significative de l'activité de construction, due entre autres au ralentissement de la croissance démographique et à la stagnation des besoins en surface par personne. Par conséquent, les émissions annuelles du domaine de la construction neuve sont déjà réduites d'environ 40% sans mesures supplémentaires. En raison de la part croissante du parc immobilier dont les éléments de construction doivent être remplacés en raison de leur âge, il y a une activité de rénovation accrue. Ceci est lié aux émissions de la construction, et dans ce domaine, le potentiel relatif de réduction par des mesures techniques d'optimisation est moins important que dans le domaine des nouvelles constructions. Il est donc important de prendre des mesures complémentaires pour prolonger la durée de vie, la réparabilité et la réutilisation des éléments de construction.
 - Les mesures prises au niveau des bâtiments, c'est-à-dire le choix de types de construction, d'éléments de construction et de matériaux moins émissifs, sont surtout efficaces dans le domaine des nouvelles constructions (réduction d'environ 20%).
 - Une réduction des émissions de scope 3 peut être obtenue par la fourniture d'énergie finale et d'énergie secondaire (principalement le chauffage urbain et l'électricité pour les PAC). Tant par la réduction de la demande que par la réduction des émissions spécifiques (par exemple pour les installations photovoltaïques et éoliennes).



- Les mesures prises par l'industrie, c'est-à-dire la réduction des facteurs d'émission spécifiques des matériaux et des éléments de construction, réduisent les émissions de la construction d'environ deux tiers, sur la base des facteurs d'émission selon « KBOB-Future ».

En tenant compte de ces trajectoires de réduction, la rénovation du parc immobilier représente l'essentiel des émissions de la construction en 2050 (3,3 des 4,1 Mt de CO₂-eq. par an). Il s'agit des émissions dues à la rénovation et au remplacement des matériaux, des éléments du bâtiment et des installations techniques, ainsi que des aménagements intérieurs et extérieurs. L'importance plus grande du parc immobilier par rapport à la construction neuve s'explique par les raisons suivantes : l'activité de construction neuve diminue, le parc immobilier augmente et les potentiels de réduction dans le parc immobilier sont plus faibles (selon la base KBOB Future utilisée).

Avec les leviers techniques identifiés (voir tableau 2) dans la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments, ainsi que la réduction des émissions dans le système énergétique et dans la production de matériaux et d'éléments de construction au sens des futurs facteurs d'émission selon « KBOB-Future », le budget de 500 Mt CO₂-eq. dérivé de la LCI pour la période 2023-2050 est certes respecté. Le budget de 200 Mt CO₂-eq. alloué globalement est toutefois nettement dépassé. Dans l'ensemble, l'objectif de réduction prévu pour 2050 est loin d'être atteint dans le scénario de base : en 2050, il reste des émissions GES brutes de l'ordre de 6,5 Mt de CO₂-eq. par an. Si aucune mesure supplémentaire n'était prise, il faudrait un grand nombre de EN à mettre en œuvre. Cela dépasserait largement les montants de EN dérivés de la LCI pour le domaine du bâtiment, soit 2 Mt CO₂-eq. par an. En plus des mesures considérées, d'autres leviers sont donc nécessaires, qui vont au-delà du scénario de base. Leur effet a été grossièrement quantifié dans une analyse de sensibilité. Les leviers suivants ont été sommairement étudiés :

- Élimination totale des énergies fossiles dans les bâtiments.
Effet supplémentaire par rapport au scénario de base : environ 0,6 Mt CO₂-eq. par an.
- Élimination totale des énergies fossiles dans la production des sources d'énergie secondaires que sont le chauffage urbain et l'électricité, par exemple en utilisant des pompes à chaleur, la biomasse, l'hydrogène vert ou d'autres sources d'énergie sans fossile ou produites à partir de sources renouvelables.
Effet supplémentaire par rapport au scénario de base : environ 0,5 Mt CO₂-eq. par an.
- Réduction de moitié des émissions de scope 3 de l'approvisionnement des agents énergétiques (hypothèse analogue à celle des matériaux de construction et des éléments de construction).
Effet supplémentaire par rapport au scénario de base : environ 0,6 Mt CO₂-eq. par an.
- Prolonger la durée de vie et d'utilisation des bâtiments et des composants, par exemple en planifiant soigneusement la rénovation des bâtiments, en séparant les systèmes et en réutilisant les composants lorsque cela est possible, en améliorant la réparabilité des composants, de la technologie et de l'équipement des bâtiments.
Effet supplémentaire par rapport au scénario de base : environ 0,85 Mt CO₂-eq. par an.
- Réduction supplémentaire de 50% des émissions spécifiques des matériaux de construction et des éléments de construction, c'est-à-dire au-delà des hypothèses de « KBOB-Future ».
Effet supplémentaire par rapport au scénario de base : environ 2 Mt CO₂-eq. par an.
- Réduction de la surface (sobriété) et moins de démolitions et de constructions de remplacement.
Effet supplémentaire par rapport au scénario de base : environ 0,3 Mt CO₂-eq. par an.

La figure R1 présente une représentation en cascade des différentes contributions (leviers) à la réduction des émissions du scénario de base et des mesures plus ambitieuses.

En tenant compte des effets de superposition, les émissions d'exploitation sont réduites d'environ 1,7 Mt de CO₂-eq. par an et les émissions de construction d'environ 2,7 Mt de CO₂-eq. par an. Les émissions



brutes s'élèvent donc à environ 2 Mt CO_{2-eq.} par an en 2050, au lieu de 6,5 Mt CO_{2-eq.} par an dans le scénario de base. Ces émissions peuvent être égalisées par des EN dans le domaine du bâtiment. Cela signifie, d'une part, que l'objectif net-zéro dans le domaine du bâtiment est en principe réalisable et, d'autre part, que tous les leviers disponibles doivent être activés.

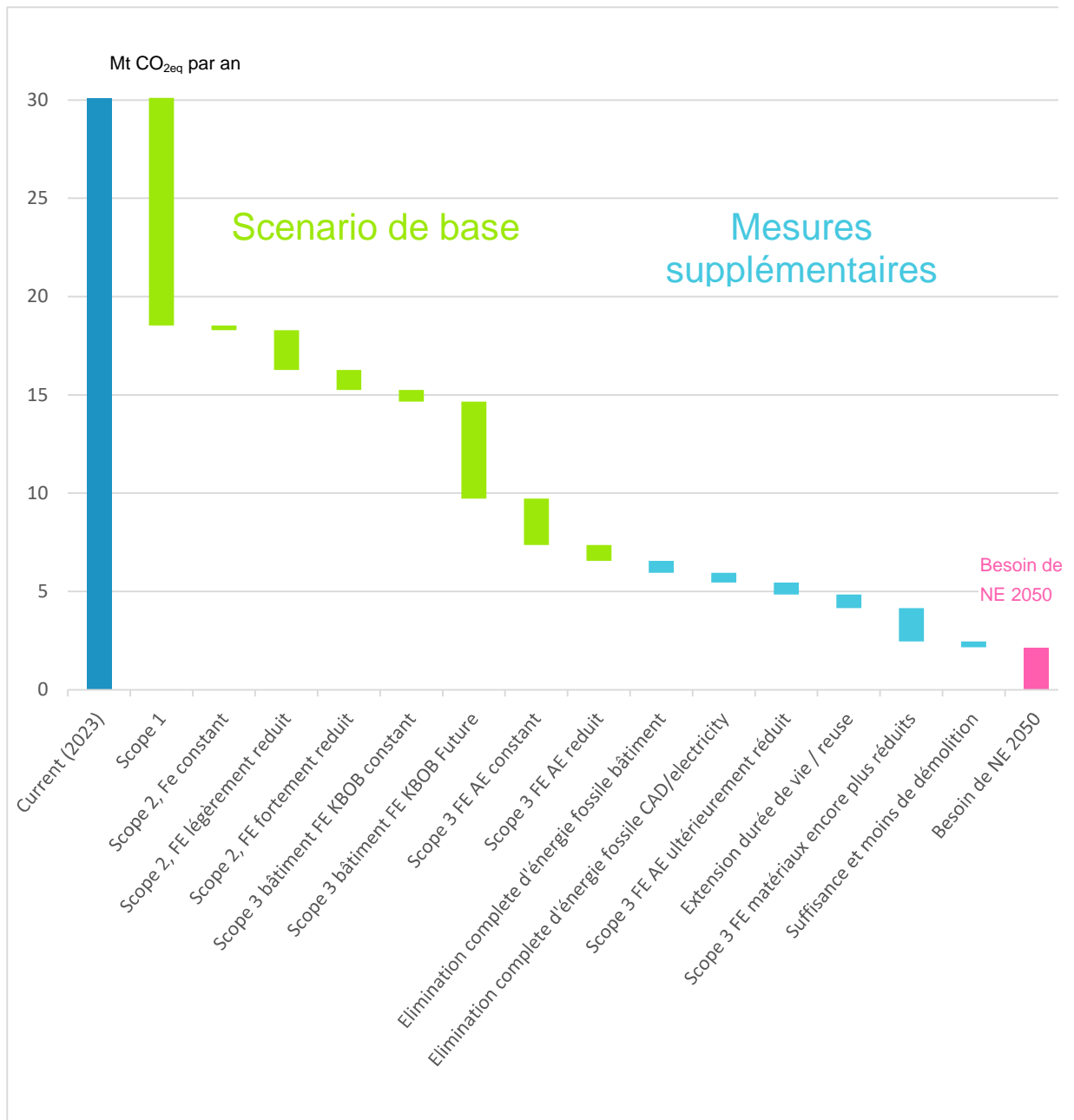


Figure R1: Emissions GES 2023 (Mt CO_{2-eq.} par an) et réduction par levier d'ici à 2050 pour le scénario de base et les mesures supplémentaires, ainsi que les besoins en EN en 2050.



F1.5 Quantification des impacts des trajectoires de réduction sur l'accumulation ou la diminution du stock de carbone dans le bois incorporé et autres matériaux de construction à base de ressources renouvelables.

Le scénario de base prévoit une augmentation de la part de la construction en bois dans les catégories de bâtiments analysées. L'augmentation ainsi obtenue de la quantité de bois utilisée annuellement entre 2030 et 2050 est d'environ 30% supérieure à la valeur de départ du scénario de base. Une variante de scénario « part accrue de la construction en bois » a permis d'esquisser une augmentation de l'utilisation du bois de construction (augmentation de 40% au lieu de 30%) et une promotion supplémentaire des matériaux d'isolation en paille. Il en résulte, sur l'horizon 2023-2050, une augmentation de 180% à 195% de la quantité de bois utilisé par rapport à la quantité de bois prélevée sur le parc immobilier en cas de démolition et de remplacement d'éléments de construction. Sur la période 2023-2050, cela représente une augmentation nette de 3,9 à 5,5 Mt de carbone stocké dans le parc immobilier. Cela correspond à un puits temporaire de 14 à 20 Mt de CO_{2-eq.} d'ici 2050 ou à une augmentation du puits de 0,5 à 0,7 Mt de CO_{2-eq.} par an. La condition préalable à la comptabilisation comme EN est, comme décrit ci-dessus dans la section F1.3, une garantie juridiquement contraignante de la permanence, au-delà de la durée de vie des bâtiments. Il est également impératif d'éviter les doubles comptages par des mesures appropriées.

Au niveau d'une vision globale de l'écosystème forêt-parc de bâtiments, une augmentation de l'utilisation du bois de construction ne signifie pas nécessairement une forte augmentation de la récolte de bois suisse ou une surexploitation des forêts. L'augmentation de l'utilisation du bois de construction modélisée dans le scénario de base et dans la variante de scénario « part accrue de la construction en bois », peut être compensée par la diminution de l'utilisation du bois énergie dans les bâtiments individuels. La variation des stocks de carbone due à l'utilisation du bois au niveau de l'écosystème forestier dépend de la consommation totale de bois pour les bâtiments, les meubles et autres applications industrielles. L'exploitation n'entraîne pas de diminution des stocks de bois, mais seulement une augmentation légèrement plus faible des stocks dans les écosystèmes forestiers. A part ça, la réduction de l'utilisation du bois pour maximiser les stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers a un intérêt limité compte tenu des risques croissants de dommages dus à la chaleur/sécheresse et de la nécessité d'adapter les espèces d'arbres en conséquence.

F1.6 Quelle est la part territoriale des objectifs d'émissions et des trajectoires de réduction (selon la stratégie climatique à long terme, dans laquelle les émissions négatives sont réservées aux émissions inévitables) dans une perspective de cycle de vie des bâtiments ou du parc immobilier ?

Les émissions GES de la construction sont actuellement de l'ordre de 9 à 11 Mt CO_{2-eq.} par an. Dans cette étude, les objectifs de réduction de 90% par rapport à 1990 fixés par la LCI pour le secteur de la construction sont également appliqués à la part territoriale des émissions à l'étranger. Il reste donc du côté de la construction une valeur finale d'émissions difficilement évitables d'environ 2 Mt de CO_{2-eq.} en 2050, avec des parts territoriales d'environ 1 Mt de CO_{2-eq.} provenant de la production nationale et de produits importés. Dans le scénario de base avec optimisation des bâtiments et production des matériaux de construction avec des facteurs d'émission selon KBOB-Future, cette valeur est nettement dépassée : avec 4,1 Mt CO_{2-eq.}, il reste environ deux fois plus d'émissions GES pour la construction. Pour réduire de moitié la valeur finale, il faut prendre d'autres mesures, voir F1.4.

Conclusion

Les objectifs d'émissions dérivés de la LCI ne sont pas atteints avec les hypothèses retenues pour le scénario de référence. C'est surtout vers la fin de l'horizon temporel, dans les années 2040-2050, que des écarts importants apparaissent. Les émissions difficilement évitables dans le domaine du bâtiment en 2050 peuvent être estimées à 2 Mt CO_{2-eq.} sur la base des objectifs de la LCI. Même en supposant une réduction des émissions dans la production de matériaux de construction, combinée à une forte baisse de la construction neuve, les émissions résiduelles restent à un niveau de 6,5 Mt CO_{2-eq.} Des émissions négatives ou des puits temporaires sont, du point de vue actuel, loin d'être suffisants pour combler cette lacune. De plus, il existe des obstacles techniques et réglementaires. Des mesures



supplémentaires de réduction des émissions, telles que celles proposées dans ce projet, sont donc nécessaires. Leur contribution à la réduction des émissions devrait être analysée plus en détail par la suite, en mettant l'accent sur la remise en état et la rénovation des bâtiments existants et aux chaînes en amont et en aval.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	10
Résumé	17
1 Ausgangslage, Zielsetzung und Vorgehen	32
1.1 Ausgangslage, Motivation und Problemstellung	32
1.1.1 Ausgangslage.....	32
1.1.2 Motivation	32
1.1.3 Übergeordnete Problemstellung.....	32
1.2 Projektziele	33
1.3 Vorgehen	34
1.3.1 Methodisches Vorgehen.....	34
1.3.2 Konkrete Arbeitsschritte	37
2 Grundlagen Gebäudeparkmodellierung, Baumaterialherstellung und energiebedingte Emissionen	43
2.1 Beschreibung des Gebäudeparks	43
2.1.1 Gebäudekategorien	43
2.1.2 Konstruktionstypen	44
2.1.3 Gebäudebestand	45
2.1.4 Heizanlagenverteilung	46
2.2 Neubau- und Erneuerungstätigkeit.....	47
2.2.1 Abriss und Neubautätigkeit.....	47
2.2.2 Aktivität der energetischen Erneuerungen und Stand der erneuerten Gebäude	50
2.3 Grundlagen zur Berechnung der Emissionen Betrieb	51
2.3.1 Energiebedarf Gebäude	51
2.3.2 Scope 1: Direkte Emissionen (fossile Energieträger).....	51
2.3.3 Scope 2: Indirekte Emissionen der Energieträger Fernwärme und Strom.....	51
2.3.4 Scope 3: Emissionen alle Energieträger	52
2.4 Grundlagen zur Berechnung der Emissionen Erstellung	52
2.4.1 Materialeinsatz pro Bauteil und Gebäudeelement	52
2.4.2 Emissionskoeffizienten pro Bauteil und Gebäudeelement nach Phase.....	52
2.4.3 Handhabung biogene Emissionen, temporäre Senken (C-Speicher)	53
2.5 Weitere Grundlagen	53
2.5.1 Ressourcenpolitik Holz, Systembetrachtung, Ökosystem und Gebäudepark.....	53
2.5.2 Neue Baustoffe, Grundlagen	53



3	Basis-Szenario und Szenariovarianten/Sensitivitäten: Annahmen und resultierende Entwicklungen	55
3.1	Definition Basis-Szenario und Szenariovarianten/Sensitivitäten.....	55
3.2	Mengengerüst: Annahmen und resultierende Entwicklungen	56
3.2.1	Entwicklung der Ersatzneubau- und der Neubautätigkeit	56
3.2.2	Entwicklung der EBF	58
3.3	Konstruktionstypen und Materialisierung: Annahmen und Auswirkungen	60
3.3.1	THG-Emissionen Erstellung von verschiedenen Konstruktionstypen von Neubauten	60
3.3.2	Entwicklung der Konstruktionstypen von Neubauten	62
3.3.3	Entwicklung der Gebäudehülle, energetische Neubau- und Erneuerungstätigkeit.....	64
3.3.4	Materialeinsatz Erstellung Bauteile konstant.....	66
3.3.5	Variation der Emissionsfaktoren Erstellung Gebäude.....	66
3.4	Entwicklung der Endenergienachfrage und der Emissionsfaktoren Energie	66
3.4.1	Endenergienachfrage nach Energieträgern	66
3.4.2	Scope 1 Emissionen fossile Energieträger.....	67
3.4.3	Scope 2 und 3 Emissionen Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme: Grundlagen und Abgrenzung	67
3.4.4	Emissionen Scope 2 Energieträger	68
3.4.5	Emissionsfaktoren Energieträger Scope 3.....	69
3.5	Überblick Ergebnisse Varianten	70
4	Zieldefinition Netto-Null Betrieb und Erstellung	73
4.1	Emissionsbudget des Gebäudebereichs (inkl. Emissionen im Ausland), abgeleitet aus den Vorgaben des KIG	73
4.2	Zuordnung des globalen Emissionsbudgets auf den Gebäudebereich der Schweiz.....	76
4.3	Fazit	77
5	THG-Reduktionen Erstellung und Betrieb	78
5.1	Ergebnisse in der Übersicht	78
5.2	Beiträge der verschiedenen Hebel zur Emissionsreduktion.....	79
6	Potenziale Baustoffe mit temporären Senken und Negativemissionen	82
6.1	Grundlagen	82
6.1.1	Holz.....	82
6.1.2	Stroh	83
6.1.3	Karbonatisierter Beton.....	83
6.1.4	Beton mit Pflanzenkohle.....	84
6.2	Annahmen und Prämissen	84
6.2.1	Holz und Biomasse, temporäre Senken.....	84
6.2.2	Pflanzenkohle im Beton.....	85
6.2.3	Karbonatisierter Beton.....	85
6.3	Ergebnis.....	86



6.3.1	Potenzial von NE in karbonatisiertem Beton und Beton mit Pflanzenkohle bei gesicherter Permanenz.....	86
6.3.2	Holz und Biomasse und damit verbundenes NE-Potenzial.....	86
6.3.3	Schlussfolgerungen Einsatz Biomasse.....	88
7	Absenkpfade 2030/2040/2050, THG-Emissionen und Negativemissionen (F1.4)	90
7.1	Emissionen Betrieb.....	90
7.1.1	Grundlagen: Entwicklung der Nutzenergie und der Endenergie nach Energieträger	90
7.1.2	Annahmen und Prämissen	93
7.1.3	Ergebnisse: Schwer vermeidbare THG-Emissionen aus dem Betrieb.....	93
7.2	Emissionen Erstellung pro Konstruktionstyp und Gebäudeelement	95
7.3	Emissionen Erstellung pro Materialgruppe.....	99
7.3.1	Grundlagen.....	99
7.3.2	Annahmen und Prämissen	100
7.3.3	Ergebnisse schwer vermeidbare THG-Emissionen der Erstellung	100
7.4	Emissionen Betrieb und Erstellung sowie NE in der Übersicht.....	102
7.4.1	Ausgangslage und Basis-Szenario	102
7.4.2	Weitergehende Emissions-Reduktionsmassnahmen.....	104
8	Quantifizierung Kohlenstoffvorrat.....	106
8.1	Grundlagen.....	106
8.2	Prämissen.....	106
8.3	Annahmen	106
8.4	Ergebnis.....	107
9	Territoriale Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade.....	110
9.1	Aufteilung territoriale Anteile der THG Emissionen Betrieb	110
9.2	Territoriale Anteile der Materialien und der Emissionen	111
9.2.1	Grundlagen zur Aufteilung territoriale Anteile THG-Emissionen Erstellung (Materialien).....	111
9.2.2	Ergebnis: Territoriale Aufteilung der Emissionen Erstellung	112
9.3	Gesamtdarstellung der Aufteilung der THG-Emissionen Erstellung und Betrieb.....	114
9.4	Schlussfolgerung zur Aufteilung der THGE auf In- und Ausland	116
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	117
<i>F1.1 Zieldefinition: Was bedeutet Netto-Null in Bezug auf die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudeparks Schweiz verursachten THG-Emissionen (THGE) bis 2050 unter Einbezug von Scope 1, 2 und 3?</i>		
<i>F1.2 Welche THGE-Reduktionen und welche Negativemissionen werden von der Erstellung und welche THGE-Reduktionen vom Betrieb erwartet, um Netto-Null im Gebäudebereich in einer Lebenswegbetrachtung zu erreichen?</i>		
<i>F1.3 Wie gross sind die Potenziale bzw. die nachhaltige Verfügbarkeit von Baustoffen, insbesondere der Biomasse-basierten, welche zu Negativemissionen im Gebäudebereich führen.....</i>		



<i>F1.4 Welche Absenkpfade 2030/2040/2050 unter Einhaltung des CO₂-Budgets für den Gebäudebereich gemäss F0.1 und differenziert nach THGE und Negativemissionen ergeben sich daraus, unterschieden nach Gebäudebestand und Neubauten?</i>	<i>119</i>
<i>F1.5 Quantifizierung der Auswirkungen der Absenkpfade auf Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats in verbautem Holz und anderen Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe.</i>	<i>120</i>
<i>F1.6 Wie hoch sind die territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade (gemäss Langfristiger Klimastrategie, in der NET den nicht vermeidbaren Emissionen vorbehalten sind) bei einer Lebenswegbetrachtung von Gebäuden respektive des Gebäudeparks?</i>	<i>121</i>
11 Literaturverzeichnis	122



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BAT	Best available technology
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BFE	Bundesamt für Energie
BLO	Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes
BG	Begleitgruppe
BM	Bilanzmodell
CCS	Carbon Capture and Storage
CRREM	Carbon Risk Real Estate Monitor
DACS	Direct Air Capture and Storage
EBF	Energiebezugsfläche
EF	Emissionsfaktor
EFH	Einfamilienhaus
EN	Europäische Norm
EnDK	Energiedirektorenkonferenz der Kantone
EnFK	Energiefachstellenkonferenz der Kantone
EP 2050+	Energieperspektiven 2050+
ET	Energieträger
GEAK	Gebäudeausweis der Kantone
GHG	Greenhouse Gas
GWR	Gebäude- und Wohnungsregister
GT	Gebäudetechnik
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KIG	Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCI	Life Cycle Inventory
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
NE	Negativemissionen
NET	Negativemissionstechnologie



NGO	Nicht-Regierungsorganisation
NN	Netto-Null
NNBS	Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz
NWG	Nicht-Wohngebäude
PACTA	Paris Agreement Capital Transition Assessment
PCAF	Partnership for carbon accounting financials
SBTi	Science based targets initiative
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
THG	Treibhausgas
THGE	Treibhausgasemissionen
TS	Temporäre Senke, temporäre Speicherung



Begrifflichkeiten

Bestand	Definition umfasst den aktuellen Gebäudebestand inkl. laufender Instandsetzungen und (energetische) Erneuerungen (aber ohne Erweiterungen)
Brutto-Neubau	Summe von Netto-Neubau und Ersatz-Neubau
Ersatzneubau	Ersatz von Flächen, die abgerissen und neu erstellt werden (als abstrakte Differenzbildung, nicht gezwungenermassen mit derselben Fläche am selben Standort). Ist die neue Fläche grösser als die durch Abriss verloren gegangene, trägt dieser Überschuss zum Netto-Neubau bei.
Erstellung	Definition (Bilanzierung, Methodik, Systemgrenzen) gemäss SIA 2032:2020 Die Phase Erstellung umfasst die Phasen Errichtung und Entsorgung.
Gebäudebereich	Umfasst die gesamten Emissionen in einer Lebenszyklusbetrachtung, d.h. die direkten Emissionen des Gebäudesektors sowie die indirekten Emissionen und die Emissionen der vorgelagerten Ketten, die durch die Bereitstellung von Energie und die Erstellung (gemäss Definition von SIA 2023:2020) der Gebäude und Baumaterialien entstehen.
Gebäudesektor	Umfasst die direkten Emissionen der Gebäude (in der Schweiz) gemäss CO ₂ -Gesetz
Langfristig	Bezogen auf die Klimawirkung bedeutet langfristig Zeiträume von mehreren hundert bis mehreren tausend Jahren
Netto-Null	Gleichgewicht zwischen Treibhausgasquellen und Treibhausgasenken. Angestrebt wird zur Zielerreichung Netto-Null eine weitgehende Reduktion der Emissionen und für die verbleibenden schwer vermeidbaren Emissionen ein Ausgleich mit Senken.
Netto-Null ready	Durch NET und/oder temporäre Senken werden die Voraussetzungen geschaffen, dass über den Lebensweg ein Gleichgewicht zwischen Treibhausgasquellen (Emissionen) und Treibhausgasenken (Negativemissionen) erreicht wird, wobei dies durch künftige Massnahmen erfolgen kann (beispielsweise umwandeln von temporären Senken und Negativemissionen)
Netto-Neubau	Netto-Zuwachs an Flächen, d.h. Differenz zwischen dem Ausgangsstand eines Vergleichsjahres und dem Stand des Betrachtungsjahres
Neubau	Erstellung von neuen Gebäuden. Begrifflich zählen dazu auch Erweiterungen an Bestandsgebäuden (z.B. Dachaufstockungen). Aus Gebäudeparcsicht wird zudem unterschieden zwischen Netto-Neubau, Ersatzneubau und Brutto-Neubau
Temporäre Senke	Emissionen werden temporär gespeichert. In diesem Projekt ist vor allem die temporäre Speicherung von biogenem Kohlenstoff in Baumaterialien von Bedeutung. Wenn sichergestellt wird, dass der temporär gespeicherte Kohlenstoff über die Lebensdauer der entsprechenden Materialien dauerhaft gespeichert wird, wird die Temporäre Senke in eine Negativemission überführt.



1 Ausgangslage, Zielsetzung und Vorgehen

1.1 Ausgangslage, Motivation und Problemstellung

1.1.1 Ausgangslage

Im Rahmen des Übereinkommens von Paris hat sich die Schweiz dazu verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen (THGE) bis 2050 auf netto null («Netto Null») zu senken. Die Energieperspektiven 2050+ (EP 2050+) zeigen im Szenario ZERO (Basis sowie Untervarianten) konkrete Absenkpfade für die Endenergienachfrage der Gebäudesektoren und der damit verbundenen THGE auf. Letztere sind auch Bestandteil des Bundesgesetzes über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG). Nicht bzw. nur teilweise erfasst werden in den EP 2050+ bzw. in der langfristigen Klimastrategie der Schweiz die grauen THGE aus der Bereitstellung der Energieträger und der Errichtung und Entsorgung von Gebäuden und ihren Bauteilen. Diese Treibhausgase (THG) weisen bereits aktuell einen grossen Anteil der durch Gebäude direkt und indirekt verursachten Emissionen aus (siehe z.B. Jakob et al. 2016) und aufgrund des Rückgangs der direkten Emissionen aus fossilen Heizanlagen nimmt der Anteil der grauen THGE weiter zu. Diese Emissionen müssen deshalb in einer Gesamtbetrachtung des Gebäudebereichs berücksichtigt werden. Zudem können nur mit solchen Gesamtbetrachtungen zielführende Massnahmen formulieren werden.

1.1.2 Motivation

Politik, Behörden, Bevölkerung, Immobilien- und Baubranche sind sich im Grundsatz mehrheitlich einig: Bis 2050 soll der Schweizer Gebäudesektor keine THGE mehr ausstossen. Auch die Energiebranche stellt sich, zumindest teilweise, auf diese Zielsetzung ein. Was damit gemeint ist, scheint oft nicht klar und ein gemeinsames Verständnis des Begriffs Netto-Null und eine Verständigung über die Systemgrenzen, z.B. was die Bewertung des Stroms betrifft, hat sich noch nicht durchgesetzt.

Mit Verweis auf das Pariser Übereinkommen hat der Bundesrat das Ziel «Netto-Null» THGE bis 2050 beschlossen und der Bund zeigt im Rahmen der EP 2050+ auf, wie dieses Ziel im Energiebereich und sektorübergreifend in seiner langfristigen Klimastrategie erreicht werden könnte. Umsetzungsmassnahmen werden auf verschiedenen Ebenen im Rahmen von laufenden Initiativen, Gesetzesvorlagen und Projekten diskutiert, übergeordnet erarbeitet und vorgeschlagen. Mit Ausnahme des SIA-Effizienzpfades liegt der Fokus in der Schweiz auf dem Betrieb der Gebäude («Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich» (MuKE), «Gebäudeenergieausweis der Kantone» (GEAK), Minergie) bzw. auf einem sektoralen Ansatz (EP2050+, KIG, langfristige Klimastrategie). Herstellung und Transport der verwendeten Baumaterialien sowie der Bauprozess verursachen jedoch einen wesentlichen Anteil der THGE (Röck et al. 2020) und eine Reduktion dieser THGE auf «Netto-Null» ist ebenfalls erforderlich. Bei der sektoralen Betrachtung (EP 2050+, KIG, langfristige Klimastrategie) wird dies auf der Ebene der Industrie (und Transport) thematisiert, jedoch mit einem territorialen und damit unvollständigen Fokus.

Ungeklärt ist zudem eine damit kompatible konkrete Vorgehensweise bezogen auf einzelne Gebäude (und Areale) und deren gesamten Lebensweg, wobei diesbezüglich zwischen den Phasen Betrieb und Erstellung zu unterscheiden ist.

1.1.3 Übergeordnete Problemstellung

In Anbetracht der durch die Forschung belegten Dringlichkeit der negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme und Gesellschaft, (IPCC, 2022) werden die von Wirtschaft und Nicht-Regierungsorganisationen (NGO) angebotenen Initiativen (wie z.B. CRREM, PACTA, PCAF, SBTi) und Gebäudestandards und -label (SIA, GEAK, Minergie, NNBS etc.) eine entscheidende Rolle spielen müssen.



Der erste Schritt dazu ist, möglichst rasch eine Auslegeordnung und Bewertung der bestehenden Definitionen vorzunehmen, um dann die «wirksame» Definition von Netto-Null festlegen zu können. Als Basis für die Entwicklung von anwendbaren Instrumenten (Label, Standards, Empfehlungen und Normen) ist dazu ein Netto-Null-Absenkpfad – im Sinne einer zeitlich variablen Zielsetzung und Anforderung – zu definieren. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da derzeit noch kein Gebäude mit Netto-Null Emissionen erstellt werden kann (Gugerli & Pfäffli, 2020). Die dafür notwendigen technologischen Entwicklungen und die erforderliche Umstrukturierung des (europäischen) Energiesystems werden schätzungsweise noch 10-30 Jahre benötigen, was etwa dem Zeithorizont des Absenkpfeils entspricht. Erste Analysen zeigen die Grössenordnung der heute erreichbaren THG Reduktion für die Erstellung (Näf & Sacher et al. 2021). Das Potenzial für eine weitere Optimierung liegt auf der Ebene der Baumaterialien, die in Zukunft mit einer klimafreundlichen Produktion eine Auswirkung auf die THGE von Erstellung und Betrieb von Gebäuden haben (Aliğ & Frischknecht et al. 2021).

In der Vergangenheit haben unterschiedlich gezogene Systemgrenzen, Definitionen und Berechnungsmethoden im Bereich der energetischen Gebäudebewertung zu Verwirrung und Wirkungsverlust geführt. Um eine Wiederholung dieser Umstände zu verhindern, soll eine frühzeitige und möglichst harmonisierte Definition von Netto-Null THGE im Gebäudebereich und eines entsprechenden Absenkpfeils bestimmt werden, da eine solche auf der Mikro-Ebene (einzelne Gebäude, Gebäudeportfolios und Areale) für die Neu- und Weiterentwicklung der verschiedenen Benchmarks, Label und Normen, aber auch für die allgemeine Diskussion in der Bau- und Energiebranche von hohem Nutzen ist. Diese Definitionen sollen so ausgestaltet werden, dass sie bei der Übertragung auf die Makroebene (Gemeinden/Städte, Kantone, Schweiz) mit den entsprechenden Zielsetzungen kompatibel sind, namentlich mit der langfristigen Klimastrategie sowie mit den EP 2050+ des Bundes.

1.2 Projektziele

Vor dieser Ausgangslage hat das Bundesamt für Energie (BFE) Ende 2022 das vorliegende Projekt ausgeschrieben. Das Ziel des Gesamtprojekts ist es, eine gemeinsame Definition von «Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich» für die Schweiz zu erarbeiten, die von allen Akteuren akzeptiert wird und als Grundlage zur Grenz- und Zielwertsetzung für lebenswegbezogene THGE von Einzelgebäuden verwendet werden kann. Daraus leiten sich die Ziele des Projektteils zu den methodischen Fragen ab (Fragestellung F0 gemäss Ausschreibung), die im Zwischenbericht vom 26. Juli 2023 adressiert wurden (Jakob und Stettler, 2023).

Das Ziel der in diesem Bericht adressierten Fragestellung F1 ist es aufzuzeigen, wie das für den Gebäudesektor definierte Emissionsbudget eingehalten werden kann, welche zusätzlichen Emissionen für den Gebäudebereich in der Schweiz und im Ausland zu erwarten sind, wobei der Fokus auf den Auswirkungen auf die Sektoren Industrie und Energie liegt und welche bottom-up seitigen Voraussetzungen erforderlich sind. Dabei soll die Rolle der in der Fragestellung F2 erarbeiteten Strategien, der technologischen und strukturellen Entwicklungen in den Sektoren Energie und Industrie, der NE und der auf Biomasse basierte Baustoffe aufgezeigt werden.

Mit der top-down Gesamtbetrachtung der Material- und Energieflüsse im Gebäudebereich sollen auf der übergeordneten Ebenen die Anforderungen für eine Zielreduktion, Reduktionspotenziale und deren zeitlicher Verlauf sowie umgekehrt verbleibende nicht vermeidbare Emissionen und in der Folge notwendige Nutzung negativer Emissionen thematisiert werden.

Der Einfluss, der aus F0 vorgeschlagenen methodischen Varianten wird auf der Ebene der top-down Bilanzierung reflektiert. Den in diesem Bericht adressierten top-down Betrachtungen werden entsprechend die in Jakob und Stettler (2023) erarbeiteten Methoden zugrunde gelegt. Wo mehrere Varianten bestehen, soll mit einer Auslegeordnung und Bewertung, die für den Gebäudebereich zur Definition und Prüfung der Zielerreichung optimale Variante definiert werden. Dies umfasst offene Fragen bezüglich der Wahl der Systemgrenze der Bilanzierung, Zielpfad der THG-Absenkung und dabei notwendige Regelungen insbesondere bezüglich der Ansätze zur Anrechnung negativer Emissionen.



Zu beantworten sind insbesondere die folgenden in der Ausschreibung formulierten Forschungsfragen, die in diesem Bericht adressiert werden:

- F1.1 Zieldefinition: Was bedeutet Netto-Null in Bezug auf die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudeparks Schweiz verursachten THG-Emissionen (THGE) bis 2050 unter Einbezug von Scope 1, 2 und 3?
- F1.2 Welche THGE-Reduktionen und welche Negativemissionen werden von der Erstellung und welche THGE-Reduktionen vom Betrieb erwartet, um Netto-Null im Gebäudebereich in einer Lebenswegbetrachtung zu erreichen?
- F1.3 Wie gross sind die Potenziale bzw. die nachhaltige Verfügbarkeit von Baustoffen (insbesondere Biomasse-basierte), welche zu Negativemissionen im Gebäudebereich führen.
- F1.4 Welche Absenkpfade 2030/2040/2050 unter Einhaltung des CO₂-Budgets für den Gebäudebereich gemäss F0.1² und differenziert nach THGE und Negativemissionen ergeben sich daraus, unterschieden nach Gebäudebestand und Neubauten?
- F1.5 Quantifizierung der Auswirkungen der Absenkpfade auf Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats in verbautem Holz und anderen Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe.
- F1.6 Wie hoch sind die territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade (gemäss Langfristiger Klimastrategie, in der NET den nicht vermeidbaren Emissionen vorbehalten sind) bei einer Lebenswegbetrachtung von Gebäuden respektive des Gebäudeparks?

1.3 Vorgehen

1.3.1 Methodisches Vorgehen

F1.1 Zieldefinition

In der Fragestellung F1.1 werden verschiedene Ebenen und Elemente angesprochen, die bei einer Zieleffinition zu berücksichtigen sind. Hierbei handelt es sich zum Teil um methodische und zum Teil um normative Festlegungen. Auf die verschiedenen Ebenen wird nachfolgend näher eingegangen, um die Fragestellung zu strukturieren und um damit eine Beantwortung zu erleichtern.

- Unter Gebäudepark wird die Aggregation aller Gebäude verstanden. Mit Verweis auf die Scopes 1 bis 3 ergibt sich gemäss unserer Interpretation der Begrifflichkeit in der Ausschreibung die Systemgrenze Gebäudebereich.
- Netto-Null für die Scopes 1 bis 3 bedeutet nach unserem Verständnis der Ausschreibung, dass die vermeidbaren Emissionen, d.h. gemäss KIG die Scope 1 und 2 Emissionen und ein Teil der Scope 3 Emissionen, zu vermeiden sind und dass sog. «schwer vermeidbare» Emissionen zu neutralisieren, d.h. aus der Atmosphäre zu entfernen und zu speichern sind (zumindest für einen längeren Zeitraum). Schwer vermeidbare Emissionen, die für den Gebäudebereich relevant sind, entstehen gemäss EP 2050+ namentlich aus der Zementherstellung (chemischer Prozess) und aus der thermischen Verwertung von (Bau-)Abfall. Anzumerken ist, dass es sich bei den als schwer vermeidbar klassierten Emissionen vorwiegend um solche in der Schweiz handelt und, dass solche Emissionen im Vergleich zu heute gängigen Verfahren durchaus deutlich reduziert werden können, zumindest aus Lebenszyklussicht (durch Karbonatisierung und durch Carbon Capture and Storage (CSS)). Dies bedeutet, dass sich der Bedarf an negativen Emissionstechnologien (NET) reduziert.

² F0.1: Welches CO₂-Budget bis 2050 leitet sich aus dem Absenkpfad für den Gebäudesektor (direkte Emissionen) gemäss KIG ab? Welcher Anteil des für die Schweiz noch verfügbaren Emissions-Budgets muss in einer umfassenden Lebenswegbetrachtung für den Gebäudebereich ergänzt werden?



- Netto-Null bis 2050 wird dahingehend interpretiert, als dass die Emissionen ab dem Jahr 2050 netto null sein müssen und dass dazwischen die Emissionen unter einem zu definierenden Absenkpfad bleiben müssen. Dies bedeutet nach unserer Interpretation für die Scopes 1 bis 3 bzw. ihr Total:
 - Für die Periode zwischen heute und 2050 gehen wir davon aus, dass die Scope 1 Emissionen unter dem Absenkpfad Gebäudesektor gemäss KIG bleiben müssen. Die Scope 2 Emissionen müssen mindestens unter dem relativen Absenkpfad des Energiesektors bleiben. Falls die Scope 2 Emissionen verursachenden Energieverbräuche im Gebäudebereich netto steigen (falls Mehrbedarf für Wärmepumpen und Fernwärmeerzeugung möglicherweise nicht durch Stromeffizienz kompensiert werden kann), sind die Scope 2 Emissionen des Gebäudebereichs relativ gesehen stärker zu reduzieren als im KIG vorgegeben. Wie der Absenkpfad zu definieren ist, hängt von den Entwicklungen im Gebäudepark und im Energiesektor ab und damit von Szenario-Annahmen (siehe z.B. die Szenarien ZERO Basis und deren Varianten A, B, und C der EP 2050+ oder die Szenarien der Wärmeinitiative Schweiz (WIS)); im Projekt modelltechnisch abzuschätzen. Die Scope 3 Emissionen (energiebedingt während der Phase B der SN EN 15804:2013+A2:2019 und erstellungsbedingt der Phasen A und C der SN EN 15804:2013+A2:2019) sollten zumindest unter dem Absenkpfad der KIG für den Industriesektor bleiben, möglicherweise deutlich darunter. Absenkpfade für Baumaschinen und Transporte werden an den Absenkpfad Verkehr angelehnt.
 - Ab dem Jahr 2050 sind die Scope 1 und 2 Emissionen null, ein Teil der Scope 3 Emissionen ist stark reduziert und die schwer vermeidbaren Emissionen müssen jeweils neutralisiert werden. Nach dem Prinzip der «Emissionswahrheit» bzw. gemäss UNFCCC betrifft dies die Erstellungs-Emissionen der Phasen A1 bis A5 (gemäss SN EN 15804:2013+A2:2019) der Neubauten im jeweiligen Jahr, die Scope 3 Emissionen der Energiebereitstellung für den Gebäudebestand (B6 betrieblicher Energieeinsatz), die Phase C aller Rückbauten von bestehenden Gebäuden im jeweiligen Jahr und die Erneuerungsaktivität derjenigen Gebäude in der Betriebsphase, die im jeweiligen Jahr Erstellungs-Emissionen verursachen (Betriebsphase B1 bis B5, d.h. Instandsetzung, Erneuerung, Ersatz- oder Add-on Massnahmen wie Wärmedämmungen).

F1.2 THGE-Reduktionen und Negativemissionen Erstellung und Betrieb

Die erzielbaren bzw. erforderlichen THGE-Reduktionen und Negativemissionen (NE) des Gebäudebereichs (also des Gebäudesektors und der durch ihn verursachten Lebensweg-Emissionen) können durch einen Ansatz quantifiziert werden, bei dem sektorale Prozessmodelle mit LCA-Elementen verknüpft werden. Dabei ist zum einen die Dynamik des Gebäudeparks (typischerweise mit einem Gebäudeparkmodell) abzubilden und zum anderen deren indirekten Auswirkungen auf die Sektoren Energie, Industrie (und Transport, wenn auch dieser eine geringere Relevanz aufweist). Diese indirekten Auswirkungen können entweder generisch über Kennwerte abgebildet werden (mittels Emissionsfaktoren und -koeffizienten wie z.B. g CO₂/kWh bzw. kg CO₂/m² Bauteil bzw. kg CO₂/kg Baumaterial, siehe BFE-Projekt GEPAMOD (Jakob et al. 2016)), oder explizit, indem die Flüsse von (wichtigen) Bauelementen bzw. -materialien und deren Produktion konkret modelliert werden (im Kap. 6 wird darauf näher eingegangen).

Die Emissionsreduktion ergibt sich am Ende durch eine Differenzbildung, entweder zu einem Vergleichsjahr (z.B. 1990) oder zu einem Vergleichsszenario (z.B. WWB gemäss EP 2050+), wobei auch die biogenen, die schwer vermeidbaren, die Menge des gespeicherten Kohlenstoffes und die negativen Emissionen gemäss vereinbarter Methodik (siehe Bericht zur Fragestellung F0) separat ausgewertet werden können.

F1.3 Potenziale Baustoffe mit Negativemissionen

Bei der Verwendung von biogenen Baustoffen entstehen entweder direkt NE oder temporäre Senken, die zu einem späteren Zeitpunkt in NE überführt und angerechnet werden können. Zu unterschieden



ist zwischen mineralischen Baustoffen mit einer gesicherten dauerhaften CO₂ Speicherung, die als NE angerechnet werden, und organischen Baustoffen mit potenziellen Negativemissionen, deren Wirkung und Anrechnung davon abhängt, ob eine dauerhafte Speicherung sichergestellt werden kann.

Die Studie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) zur Ressourcenpolitik Holz 2030 zeigt, ausgehend von einer Systembetrachtung, die Potenziale und die Zielsetzung für die Schweizer Holznutzung im Kontext der Klima- und Energiestrategie auf (siehe dazu auch Anhang 1.1). Angestrebt wird im Rahmen einer nachhaltigen Nutzung der Wälder ein Ausbau der Nutzung von Holzprodukten und damit verbunden eine Steigerung des Anteils des Holzbaus und gleichzeitig eine Steigerung der Energieeffizienz bei der Nutzung von Energieholz in der Schweiz. Die Ressourcenpolitik des Bundes geht im Allgemeinen von einer Zunahme an Bauholz, aber auch einem höheren Anteil von Holz mit Schweizer Herkunft aus (Annahme Import Bauholz auf einem Niveau wie bisher, Importe mehrheitlich aus den Nachbarländern DE/AT und FR/IT sowie aus osteuropäischen Ländern). Bei der angestrebten Nutzung von Schweizer Holz wird für den Schweizer Wald eine geringere Zuwachsrate des Kohlenstoff-Lagerbestands (C-Speicher) im Wald als nachhaltig und zielführend definiert. Unter anderem auch im Hinblick auf einen gesunden und resilienten Wald, was zur Vermeidung von Sturmschäden sowie bei der Veränderung durch Krankheiten und Trockenheit und damit einhergehenden möglichen Verlusten sinnvoll ist. Im Rahmen des Treibhausgasinventars werden die Stoffflüsse und damit verbundenen Veränderung seit 1990 auf der Ebene Wald und Holzprodukte sowie Konsumgüter Papier illustriert (siehe Kapitel Holz im Anhang A1.1). Daraus sind Veränderungen im Wald und bei der Holzproduktion und die damit verbundene erhöhte C-Speicherung seit 1990 ersichtlich.

Der Aspekt der zeitlich begrenzten Speicherung von Kohlenstoff durch die Verwendung von Biomasse im Gebäude ist bei der Anrechnungsmethodik zu berücksichtigen. Im Rahmen einer Systembetrachtung Gebäudepark-Wald-Energieholz Schweiz kann ausgehend von den Stoffflüssen ein Gesamtbild der zeitlichen Entwicklung der Speicherung erstellt und eine Beurteilung der so erzielten Wirkung im Zeitraum bis 2050 gemacht werden.

Auf der Ebene der Karbonatisierung von Beton mit biogenem CO₂ (z.B. aus BECCS) und der Verwendung von Pflanzenkohle zur Speicherung von CO₂ in Baustoffen können Potenziale für negative Emissionen eruiert werden. Die Potenziale hängen zum einen von der Verfügbarkeit der Rohstoffe und zum anderen von den Anwendungsmöglichkeiten der Technologien im Baubereich ab. Auch in diesem Bereich gibt es verschiedene methodische Ansätze zur Anrechnung dieser Beiträge (siehe F0.3).

Die Vorteile einer Kaskadennutzung werden im Rahmen der Holzstrategie und durch verschiedene Studien thematisiert. Unter Berücksichtigung der Qualität des Holzes sowie des Kontexts der Klima- und Energiestrategie soll eine Kombination aus der vermehrten Anwendung von Holzbauprodukten und Energieholz angestrebt werden. Mit der Modellierung des Gebäudeparks können zudem zeitliche Effekte und Verschiebungen im Rahmen von Szenarien zusätzlich illustriert werden.

F1.4 Absenkpfade

Die Absenkpfade ergeben sich durch die konzeptionellen Überlegungen (siehe F1.1) und durch modellgestützte Berechnungen (siehe F1.2). Hierbei werden die relevanten Modellparameter (z.B. energetische Erneuerungs- und Substitutionstätigkeit, Rezyklierungs- und Wiederverwendungsanteile) und Inputdaten (Konstruktionsansätze, Emissionskennwerte und Marktanteile/Diffusionen von Baumaterialien und -elementen) so angepasst, dass die unter F1.1 skizzierten bzw. mit der Steuergruppe vereinbarten Pfade eingehalten werden können. Vom Ansatz her bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- zum einen ein normatives Zielszenario und
- zum anderen ein technologiegestütztes Machbarkeitsszenario.

Vor allem im letzteren Fall sind die Ergebnisse des bottom-up Ansatzes (Fragestellung F2) von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der zeitlichen Parallelität der Arbeiten wird ein iterativer Ansatz verfolgt: in einer ersten Runde ist dies ein exploratives Zielszenario, auch um kritische Bereiche zu identifi-



zieren, und in einer zweiten Runde ist dies die Anpassung von Annahmen, auch unter Einzug von Resultaten aus F2.

F1.5 Auswirkungen der Absenkpfade auf Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats

Die Auswirkungen der Absenkpfade auf den Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats im Wald und im Gebäudepark werden analog zum unter F1.4 beschriebenen Vorgehen mit Modellrechnungen zum Gebäudepark und zu den jährlichen Einsatzmengen von Bauholz- und Energieholz sowie deren Kohlenstoffgehalt quantifiziert. Zudem werden die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Gebäudepark sowie die mit der Holznutzung verbundenen Effekte auf die Vorräte im Wald mit einer Systembetrachtung für die Zeitperiode 2023 bis 2050 adressiert. Im Basis-Szenario und im Szenario «mehr Holzbau-Anteile» ist eine Steigerung des Bauholzes zwischen 30-40% enthalten. Der Mehrbedarf wird durch einen abnehmenden Einsatz von Energieholz für Einzelheizungen ausgeglichen und damit die Erntemenge nicht wesentlich erhöht. Dabei wird ein Ausbau der Nutzung von Laubholz als Bauholz angenommen. Für eine abschliessende Beurteilung der Kohlenstoffvorräte im Wald müssen neben Holz im Baubereich auch weitere Holzprodukte wie zum Beispiel Möbel und Papier miteinbezogen werden (siehe dazu auch Anhang A 1.1 Nutzungen und Entwicklung Vorräte Kohlenstoff Wald 1990 bis 2022). Durch die Zunahme von Trockenheit, Hitze und Stürmen entsteht ein wachsendes Risiko für Schäden und Verluste von Kohlenstoffvorräten im Wald und demzufolge eine grössere Unsicherheit in der Prognose der jährlichen Zuwachsraten und Erntemenge an Bau- und Energieholz. Eine Anpassung der Wälder durch eine andere Zusammensetzung an Baumarten und daraus folgenden Konsequenzen für deren Verwendung im Baubereich kann im Rahmen dieser Studie nicht vertieft analysiert werden.

F1.6 Territoriale Anteile. Wie hoch sind die territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade (gemäss Langfristiger Klimastrategie, in der NET den schwer vermeidbaren Emissionen vorbehalten sind) bei einer Lebenswegbetrachtung von Gebäuden respektive des Gebäudeparks?

Die nicht-triviale Frage der territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade betrifft die Scope 2 Emissionen von importierten Sekundärenergieträger (namentlich Strom und Biogas) sowie die Produktion bzw. der Import von Gütern und Dienstleistungen, die Scope 3 Emissionen verursachen. Letztere fallen zu einem wesentlichen Teil im Ausland an. Den Hauptanteil verursachen Emissionen der Produktion zugekaufter Bauteile/-stoffe. Das Fazit zum Anteil der Emissionsziele ausserhalb der Schweiz ergibt sich aus der Analyse der Zusammensetzung der wichtigsten verwendeten Baustoffe und Bauteile im Baubereich und dem Marktanteil der Schweizer Produktion (Grundlagen: Materialflussanalysen, Statistiken Produktion, Import- und Exportstatistik). Für die wichtigsten Baustoffe Beton, Zement, Backstein, Stahl, Holz etc. wird jeweils der Anteil Importe abgeschätzt. Darauf basierend werden die im In- und Ausland anfallenden Emissionen berechnet. Ein Anhaltspunkt für eine Aufschlüsselung der THG-Beiträge von Baustoffen und Bauteilen im In- und Ausland sind auch Ökobilanzdaten, welche Rückschlüsse auf die einzelnen Etappen des Abbaus, der Aufbereitung und der Verarbeitung von Rohstoffen zulassen. So kann für die wichtigsten Baustoffe auch ein Anteil der Emissionen in der Vorkette der Produktion und Emissionen im Ausland eruiert werden.

Hinweise für den Anteil der THGE im Inland im Vergleich zum Total der Erstellung und der Modellrechnung der Gebäudeparkmodellierung Schweiz ergeben sich durch eine Prüfung der Beiträge im Treibhausgasinventar der wichtigsten Schweizer Zementhersteller.

1.3.2 Konkrete Arbeitsschritte

Das Vorgehen zur Beantwortung der Fragestellung F1 wird mit einer Top-down Betrachtung in folgende Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1.1 Methodische Entwicklungen und Festlegungen

AP1.2 Relevanzanalyse

AP1.3 Modellanpassungen und Erweiterungsmodule



AP1.4 Datenrecherchen und -aufbereitungen sowie Szenario-Annahmen

AP1.5 Gebäudepark Modell Simulationen und Top-down Berechnungen

AP1.6 Auswertungen und Beantwortung der Fragestellungen

Auf diese AP wird nachfolgend näher eingegangen:

AP1.1 Methodische Entwicklungen und Festlegungen

Das methodische Vorgehen baut auf den Ergebnissen der Fragestellung F0 zu den methodischen Fragen und auf den Überlegungen im vorstehenden Kapitel zur Fragestellung F1 auf. Um die Fragen quantitativ beantworten zu können, wird ein hybrider Ansatz verfolgt: Zum einen werden der Gebäudepark und die wichtigsten Flüsse von Bauelementen bzw. -materialien explizit abgebildet und deren Produktion bzgl. spezifischen THGE charakterisiert. Zum anderen werden bzgl. THGE weniger relevante Bereiche generisch über Kennwerte abgebildet.

Im Kern des methodischen Vorgehens steht das Gebäudeparkmodell (GPM) von TEP Energy, mit dem die Dynamik des Gebäudeparks explizit abgebildet wird. Das GPM wurde im Rahmen des BFE-Projekts GEPAMOD (Jakob et al. 2016a) bzgl. Grauer Emissionen und Grauer Energie erweitert und Ergebnisse des Projekts dienen auch als Grundlage für die Festlegung der Grenz- und Zielwerte des Effizienzpfades SIA 2040:2017. Das Projekt wurde in der Folge weiterentwickelt und angewendet, u.a. im Rahmen der EP 2050+ (Technischer Bericht der Gesamtdokumentation) und zur Abbildung der Dämmstoffflüsse (Jakob et al. 2016c). Ergänzend werden die Auswirkungen der Veränderungen im Gebäudepark auf die Sektoren Energie, Industrie (und Transport, wenn auch dieser eine geringere Relevanz aufweist) mittels ergänzender Module modelliert:

- Mit dem erweiterten GPM wird die Dynamik im Gebäudepark auf den unterschiedlichsten Ebenen explizit abgebildet. Dies betrifft (i) die Flächennachfrage nach Gebäudetyp (ohne oder mit Suffizienzüberlegungen), (ii) die Neubau-, Ersatzneu- und Erneuerungstätigkeit (Aktivität und Intensität), (iii) Konstruktionsweisen, (iv) Materialisierung sowie (v) gebäudetechnische und geräteseitige Entwicklungen. Eine Verknüpfung zu den Ergebnissen der Fragestellungen F2 wird hergestellt, indem beispielsweise die Relevanz der dort erarbeiteten Strategien dynamisch gewichtet aggregiert werden.
- Die Auswirkung auf den Energiesektor für die Scope 2 und einen kleinen Teil der Scope 3 Emissionen wird über die Nachfrage nach den entsprechenden Energieträgern und eine vereinfachte Modellierung der Strom- und Wärmeerzeugung berechnet. Zu diesem Zweck sind die Emissionsfaktoren der Sekundärenergieträger (Strom, Nah- und Fernwärme, Biogas und ggf. weitere) auf die Scopes 2 und 3 aufzuteilen, d.h. auf direkte Emissionen am Standort der Erzeugung und auf die vorgelagerten Ketten (Extraktion der Energieträger, Erstellung der Umwandlungstechnologien, Transport).
- Die Wechselwirkung mit dem Industriesektor wird über die Stoff- bzw. Materialflüsse und mittels Kennwerten (die sich im Zeitablauf verändern) zu Bauteilen und Materialien abgeschätzt. Die Berechnungskette enthält die Elemente Energiebezugsfläche (EBF) (in m²), Bauteilflächen (über geometrische Verhältnisse), Anteile von Gebäudetypen, Anteile von Konstruktionstypen (pro Gebäudetyp), Zuordnung (in Form von Anteilen) und Charakterisierung von Bauteilarten und Materialisierungen (in kg/m²) und Emissionskennwerten (kg CO_{2eq} pro kg oder pro m² Bauteil). Neben der Festlegung der Anteile von Konstruktionstypen, Bauteilarten und Materialisierungen werden in einem zweiten Schritt Szenarien auch Überlegungen zu Wiederverwendungs- und Rezyklierungsanteile bei der Erstellung angestellt, um Aspekte der Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen. Bei einer Top-down Betrachtung ist bei der Lebenszyklusbetrachtung der Betrachtungshorizont genügend weit auszudehnen, um Cut-off Effekte in Bezug auf das End of Life (Modul C) zu vermeiden.



Alle genannten Berechnungsgrössen und Einflussfaktoren können sich im Zeitablauf zwischen heute und 2050 verändern. Damit können technische (und politische) Massnahmen und Entwicklungen explizit berücksichtigt werden. Für gewisse Ergebnisse sind Referenzpunkte oder -entwicklungen festzulegen. Beispielsweise ergibt sich die Emissionsreduktion durch eine Differenzbildung zu einem Vergleichsjahr (z.B. 1990). Auch die Bilanzierung der Holznutzung kann mit der energetischen Nutzung in der Industrie nicht vollständig isoliert für den Gebäudebereich betrachtet werden; für eine Systembetrachtung ist eine Referenzentwicklung festzulegen (wie ändert sich die Biomasse im Wald mit einer veränderten Holznutzung gegenüber der heutigen Nutzung).

AP1.2 Relevanzanalyse

Um die Berechnungen und Modellarbeiten im Rahmen des vorgegebenen Projektrahmens so zielgerichtet und effektiv wie möglich zu gestalten, wird eine Relevanzanalyse durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen wird entschieden, welche Bereiche beim hybriden Ansatz explizit und welche generisch über Kennwerte abgebildet werden. Grundlagen für diese Relevanzanalysen bilden eigene Vorarbeiten (BFE-Projekte GEPAMOD, EP2050+, LICS, europäische Projekte NewTrends, Agora-Energiewende), durchführende Auswertungen des bestehenden GPM sowie Arbeiten von Dritten (z.B. Mehr et al. 2018 und BAFU 2021 zum Thema Holzfluss und Holznutzungsstrategie sowie generell Materialflussanalysen der EMPA (2016-2019) und der ETH (z.B. Heeren und Hellweg 2018, Pittau, Habert et al. 2022)). Beim aktuellen Kenntnisstand und im Sinne einer Arbeitshypothese wird von folgender Aufteilung ausgegangen:

- Explizite Abbildung: Mauer- und Dachziegel, Beton, Zement, Bewehrungsstahl, mineralische und nicht-mineralische Dämmstoffe (bzw. deren Ausgangsprodukte) und Holz der Bauteile Bodenplatte, Decken, Aussenwände und Dach; Glas sowie Materialien von Rahmen und Unterkonstruktionen (Holz, Kunststoffe, Metalle) von Fenstern und Verglasungen.
- Generische Abbildung über (zu dynamisierende) Kennwerte: Heizanlagen, Gebäudetechnik, Innenwände, weitere Metalle

AP1.3: Modellanpassungen und Erweiterungsmodule

Um die beschriebenen Berechnungen und Auswertungen durchführen zu können, sind zum einen gewisse Anpassungen am bestehenden GPM erforderlich und zum anderen Berechnungsmodule neu zu erstellen. Ersteres betrifft strukturelle Modellanpassungen (Suffizienzüberlegungen, konkrete Materialisierungen von Bauteilen) und Auswertungsroutinen (Aufteilung auf Scopes 1 bis 3, Aufteilung Lebenszyklusphasen A-C), Differenzierung nach Emissionstyp (fossil/biogen, sofort emittiert / gelagert / schwer vermeidbar / negativ).

Zusätzlich zu erstellen sind Module zur Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Industriesektor inkl. Kreislaufwirtschaftsaspekte. Teilweise werden diese Arbeiten in Abhängigkeit der Ergebnisse der Option F0 und der beschriebenen Relevanzanalyse umgesetzt.

AP1.4: Datenrecherchen und -aufbereitungen sowie Szenario-Annahmen

Um die erforderlichen Berechnungen und Auswertungen durchführen zu können, wird zum einen die bestehende Datenbasis des GPM teilweise aktualisiert und erweitert. Letzteres betrifft vor allem die Ausprägung und Materialisierung der Bauteile. Zum anderen sind, insbesondere was künftige Entwicklungen betrifft, spezifische Annahmen zu treffen. Darauf wird wie folgt näher eingegangen:

- Stand und Entwicklung der EBF (m²): gemäss EP 2050+ des BFE, ggf. Annahme von zusätzlichen Suffizienzüberlegungen, jeweils differenziert nach Gebäudetypen und Branche, inkl. strukturelle Verschiebungen im Zeitablauf (z.B. vom Einfamilienhaus (EFH) zum Mehrfamilienhaus (MFH) und zwischen Branchen).
- Bauteilflächen werden im GPM über geometrische Verhältnisse bestimmt. Hierbei wird auch evaluiert, in welchem Masse in einem Netto-Null-Szenario kompakter gebaut werden könnte.



- Stand und Entwicklung der Anteile von Konstruktionstypen (pro Gebäudetyp): generell und auch im Hinblick auf eine Reduktion der Scope 3 Emissionen ist von einer Veränderung der Anteile der vier Konstruktionstypen (Massivbau, Holzbau, Skelettbau und Hybridbau) im Zeitablauf auszugehen. Hierbei wird auf die Ergebnisse und die Kompetenzen aus Fragestellung F2 aufgebaut.
- Stand und Entwicklung der Anteile der verschiedenen Bauteilarten und Materialisierungen (z.B. Wandaufbauten, Fenstertypen) pro Konstruktionstyp: Festlegung pro Konstruktionstyp in Zusammenarbeit mit dem Team der Fragestellung F2 und weiterer Experten und Expertinnen. Hierbei wird zwischen Neubau und Erneuerung des Gebäudebestands unterschieden.
- Charakterisierung von Bauteilarten und Materialisierungen (kg/m²): Die bestehende Datenbasis des GPM wird mittels der neusten Ausgabe der Ökobilanzdaten im Baubereich (KBOB-Empfehlung 2009/1:2022) aktualisiert und mit Ergebnissen aus Analysen der ETH von Bauteilen und Materialien ergänzt. Die Bauteile werden explizit hinsichtlich ihres Schichtaufbaus bzw. ihrer Materialzusammensetzung beschrieben (mit Fokus auf die wichtigsten CO₂-Beiträge). Hierbei wird für den Datenstand heute auf SIA 2032 Anhang D (Update 2020) aufgebaut. Basierend auf den Erkenntnissen und Ergebnissen der Fragestellung F2 und unter Einbezug von Experteneinschätzungen des Fraunhofer ISI werden Anpassungen zum heutigen Stand und Annahmen zu möglichen Entwicklungen vorgenommen (um z.B. angepasste konstruktive Ansätze, neue Materialien, die Wiederverwendung von Bauelementen etc. zu berücksichtigen).
- Stand und Entwicklung von Emissionskennwerten (kg CO_{2eq} pro kg Material oder pro m² Bauteil): Für den heutigen Stand wird auf SIA 2032 Anhang D (Update 2020) und ggf. weitere LCA-Grundlagen aufgebaut. Für die künftige Entwicklung werden für die wichtigsten Materialien (gemäss Ergebnissen der Relevanzanalyse im AP1.2) die Kennwerte dynamisiert, dies basierend auf Auswertungen von Industriesektormodellen. Die CO₂-Reduktion in der Produktion der Baumaterialien wird mit entsprechend reduzierten Emissionskennwerten auf Basis der Studie (Alig et al. 2021) mit «KBOB Future» Werten ergänzt. Hierbei wird, auch im Hinblick auf die Fragestellung F1.6), zwischen verbleibenden Emissionen im In- und Ausland unterschieden (z.B. Optimierung Stahl und Glas vor allem für Importware relevant, Optimierung der Zementproduktion hauptsächlich relevant für Emissionen im Inland). Kennwerte für Materialimporte aus Europa werden durch top-down Auswertungen zu Ergebnissen von bestehenden Dekarbonisierungs-Szenarien dynamisiert, dies unter Einbezug des Fraunhofer ISI, mit dem TEP im Rahmen des FORECAST Modells eine ständige Zusammenarbeit unterhält.

Weitere Szenarioannahmen betreffen für den Gebäudesektor diverse sog. Aktivitätsparameter wie z.B. die jährlichen Raten der Instandsetzung, der (energetischen) Erneuerung und des Ersatzes von Gebäuden, Bauteilen, Heizanlagen und Gebäudetechnikelementen sowie Effizienzentwicklungen bei den diversen Stromanwendungen. Im Hinblick auf die Scope 1 Emissionen sind zudem Annahmen zu den Marktanteilen bei Neubau und Substitution zu treffen (exogen oder mittels GPM endogen). Im Hinblick auf die Scope 2 Emissionen sind Annahmen zum Versorgungsmix von thermischen Netzen, Strom und ggf. weiterer Sekundärenergieträger zu treffen. Hierbei wird ebenfalls zwischen In- und Ausland unterschieden. Datenseitig wird auf die EP 2050+ des BFE aufgebaut, wobei auch Annahmen zum europäischen Stromsystem getroffen wurden. Die sich daraus für die Schweiz ergebenden Emissionsfaktoren wurden durch TEP aus energiewirtschaftlicher Sicht zeitlich hoch aufgelöst für drei Stützjahre bis 2050 berechnet (im Rahmen des Projekts „Vom Zertifikat zur Physik - Wege zu netto-null-kompatiblen Gebäuden“). Die Ergebnisse und Grundlagen jenes Projekts sind veröffentlicht und werden auch in diesem Bericht berücksichtigt.

AP1.5 GPM Simulationen und top-down Berechnungen

Basierend auf der Methodik der Option F0 und den Ergebnissen der AP1.1 (Methodische Festlegungen), AP1.3 (Modellanpassungen und -erweiterungen) und AP1.4 (Datenarbeiten und Szenario-An-



nahmen werden die eigentlichen top-down Berechnungen durchgeführt. Hierbei wird ein iteratives Vorgehen verfolgt, u.a. um Abgleiche mit top-down Betrachtungen (Emissionsbudgets, Absenkpfade, Potenziale, z.B. von erneuerbaren Energien, biogenen Fraktionen wie Holz) zu ermöglichen. D.h. die Modellparameter und Annahmen werden so weit angepasst, bis die top-down Anforderungen eingehalten sind.

Die Berechnungsergebnisse werden nach verschiedenen Ebenen und Differenzierungen ausgewertet, namentlich nach den folgenden:

- (i) Emissionsentwicklung im Zeitablauf
- (ii) Emissionsbudget zwischen zwei Zeitpunkten
- (iii) Differenzierung nach Scope 1 bis 3
- (iv) Bilanzierung nach CO₂-Gesetz (bzw. gemäss UNFCCC) oder
- (v) nach dem Abschreibungsprinzip
- (vi) Unterscheidung der Lebenszyklusphasen gemäss SN EN 15804:2013+A2:2019 (Module A-C: A Erstellungsphase, B Nutzungsphase, C Entsorgungsphase) sowie
- (vii) Differenzierung nach fossilen/biogenen Emissionen und
- (viii) nach emittierten, vermiedenen (reduzierten), schwer vermeidbaren und negativen Emissionen (jeweils gemäss der am Ende in F0 festgelegten Methoden).

AP1.6 Auswertungen und Beantwortung der Fragestellungen

Durch gezielte Auswertungen werden die diversen Fragestellungen beantwortet:

- F1.1: Zieldefinition: Ausgehend von bestehenden GPM-Szenariorechnungen im Rahmen der Wärmeinitiative Schweiz (WIS), den EP 2050+ und dem BFE-Projekt LICS werden in einer ersten Runde die Scope 1 Emissionen berechnet und mit dem Absenkpfad der KIG verglichen. Weil sich die KIG an den EP 2050+ orientiert, ist davon auszugehen, dass nur geringe Anpassungen vorzunehmen sind, damit die Emissionen unter dem Absenkpfad bleiben. Analog wird durch iteratives Anpassen der Modellparameter des Heizsystementscheidungsmoduls sichergestellt, dass die Scope 2 Emissionen unter dem relativen Absenkpfad des Energiesektors bleiben. Bei den Scope 3 Emissionen ist der Abgleich mit dem KIG-Absenkpfad aufwändiger, weil sowohl Gebäudepark bezogene Daten und Annahmen (inkl. Ergebnisse aus Fragestellung F2) als auch Industriesektor bezogene Daten zu variieren sind. Wir gehen davon aus, dass die Reduktionspotenziale aus beiden Sphären weitgehend auszuschöpfen sind (wobei die techno-ökonomische „Machbarkeit“ aus heutiger und künftiger Sicht im Auge zu behalten ist).
- F1.2: Die THGE-Reduktionen werden im Vergleich zum heutigen Emissionslevel berechnet und die Beiträge der NE werden aufgezeigt, indem ein Modellauf (ML) mit und ein ML ohne die Optionen der NET durchgeführt wird (Vergleich von ML ähnlich wie im LICS-Projekt).
- F1.3: Potenziale Baustoffe mit NE: die nachhaltige Verfügbarkeit von Baustoffen wird zum einen aus top-down Sicht beurteilt (bei biogenen Baustoffen aufbauend auf dem Ansatz einer Kaskadennutzung und unter Berücksichtigung der Fragen der Permanenz der Speicherung und der einmaligen Anrechnung). Aus der Frage der nachhaltigen Verfügbarkeit biogener Baustoffe und deren Kaskadennutzung ergeben sich Restriktionen der Energieholznutzung in Gebäuden und im Energiesektor (was auch bei den Szenario-Annahmen bereits unter F1.1 berücksichtigt wird) und in der Verwendung im Bausektor (in diversen Anwendungen, z.B. als Konstruktions- und Oberflächenmaterial). Die Bilanzierung der Biomasse basierten Baustoffe erfolgt gemäss vereinbarter Methodik.
- F1.4: Absenkpfade: durch spezifische Auswertungen werden die THGE nach verschiedenen Kategorien differenziert: Scope 1 bis 3, Beiträge von NE, Entwicklungen im Gebäudebestand und bei Neubauten, Wohn- und Nicht-Wohnbauten etc.



- F1.5: Die Auswirkungen der Absenkpfade auf den Zu- und den Abbau des Kohlenstoffvorrats wird durch eine Auswertung der Stoffflüsse aufgezeigt. Die Zuflüsse zu Kohlenstoffvorräten im Gebäudepark ergeben sich durch den (vermehrten) Einsatz von Baustoffen, die biogenen Kohlenstoff enthalten. Die Abflüsse ergeben sich durch den Rückbau von Gebäuden (charakterisiert durch die erwähnten Gebäude- und Konstruktionstypen) und den Ersatz und die Erneuerung von Bauelementen (z.B. Dach- und Unterkonstruktionen, Holz- und Holz-Metallfenster, Böden). Der Effekte einer veränderten Holznutzung auf das Ökosystem wird ergänzend mit der Betrachtung der Stoffflüsse Energieholz und Bauholz für den Hochbau und deren Bedeutung für die Kohlenstoffvorräte im Wald thematisiert.
- F1.6: Die territorialen Anteile können in absoluten Grössen (in Mt THGE auf dem Territorium der Schweiz) oder als Anteile angegeben werden. In letzterem Fall sind auch die im Ausland anfallenden Emissionen zu bestimmen. Dazu werden für die wichtigsten Baustoffe der Importanteile und darauf aufbauend die in- und ausländischen Emissionen bestimmt, bei den in der Schweiz hergestellten Baustoffe werden zusätzlich Anteile in die Vorkette im Ausland abgeschätzt. Die resultierenden inländischen Emissionen werden mit Emissionen von Branchen des Schweizer Industriesektors verglichen. Die Aufteilung der Scope 3 Emissionen des Stromsektors erfolgt unter Einbezug von Studien zur Umweltbilanz des Strommixes Schweiz (Treeze, 2021) sowie darin genannte Quellen und von TEP («Vom Zertifikat zur Physik»). Bei den synthetischen Gasen wird auf die Annahmen der EP 2050+ abgestützt.



2 Grundlagen Gebäudeparkmodellierung, Baumaterialherstellung und energiebedingte Emissionen

Die Antworten auf die verschiedenen Fragestellungen F1.1 bis F1.6 hängen stark von den Gegebenheiten im Gebäudebereich und von aktuellen und künftigen Veränderungen ab. Mit Gebäudebereich sind hier sowohl der Gebäudepark im engeren Sinn als auch die weiteren Bereiche, die durch den Bau, die Erneuerung und den Betrieb der Gebäude beeinflusst werden, namentlich die Bauindustrie, die Hersteller und die Energielieferanten. Verschiedene Aspekte, die in den verschiedenen Fragestellungen F1.1 bis F1.6 zu beantworten sind, bauen zum Teil auf Ergebnissen von Szenariorechnungen mit dem Gebäudeparkmodell auf. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Grundlagen dargelegt, welche in den späteren Kapiteln für die Beantwortung der verschiedenen Fragestellungen verwendet werden.

2.1 Beschreibung des Gebäudeparks

2.1.1 Gebäudekategorien

Das Gebäudeparkmodell von TEP Energy unterscheidet zwischen drei Gebäudesektoren (Wohnen, Dienstleistungen, Industrie gemäss Struktur der Gesamtenergiestatistik), groben Gebäudetypen (EFH, MFH und Nicht-Wohngebäude (NWG) gemäss Berichterstattung der Kantone zu den CO₂-Emissionen des Gebäudesektors) sowie etwa 16 Gebäudenutzungstypen, die sich an den SIA-Kategorien und an den Wirtschaftsbranchen orientieren (siehe Tabelle 1 und Bericht zum GEPAMOD-Projekt für Details).

Den mengenmässig weitaus grössten Anteil machen die Wohngebäude aus, welche zusammen rund zwei Drittel der Fläche auf sich vereinen. Bei den Nicht-Wohngebäuden sind Bürogebäude (letztere sind in Tabelle 1 in den Nutzungstypen öffentliche Verwaltung, Unternehmens- und andere Dienstleistungen enthalten) und Gebäude des sog. Erziehungswesens (Schulgebäude aller Stufen) hervorzuheben. Eine ebenfalls bedeutsame Gruppe stellen die Gebäude des Industriesektors dar; hierbei handelt es sich um eine relative heterogene Gruppe, in der Bürogebäude, Fabrikationsgebäude (z.B. der Fertigungsbranchen), Lagerhallen und Gebäude mit Hochtemperaturprozessen enthalten sind. Ein Teil dieser Gebäude ist bzgl. Raumwärmeerzeugung weniger bedeutend, entweder weil Abwärme aus Prozessen genutzt wird oder weil sie weniger oder gar nicht beheizt werden (z.B. Lager und teilweise auch Logistik).

In Bezug auf die Netto-Null THGE Thematik weist jede dieser Nutzungsgruppen spezifische Herausforderungen und Potenziale auf. Dazu gehört nebst dem Abriss und Ersatzneubau auch die Nutzung von Gebäuden und ganzen Arealen.



Tabelle 1 Gebäudenutzungstypen des Gebäudeparkmodells von TEP Energy und ihre flächenmässige Bedeutung in der Schweiz

Gebäudenutzungstypen	Anteil an der gesamtschweizerischen EBF
Einfamilienhäuser (EFH)	21%
Mehrfamilienhäuser (MFH)	44%
Nicht-Wohngebäude	35%
<i>Grosshandel</i>	3.0%
<i>Detailhandel</i>	2.5%
<i>Verkehr</i>	0.7%
<i>Beherbergung</i>	1.0%
<i>Gastronomie</i>	1.0%
<i>IKT</i>	0.7%
<i>Finanzwesen</i>	1.7%
<i>öffentliche Verwaltung</i>	1.1%
<i>Erziehungswesen</i>	3.9%
<i>Gesundheitswesen</i>	1.2%
<i>Heime und Soziales</i>	1.2%
<i>Unternehmensdienstleistungen</i>	2.9%
<i>Andere Dienstleistungen</i>	2.3%
<i>Landwirtschaft</i>	0.7%
<i>Industrie</i>	11.0%
Total	100%

Quelle: Berechnungen GPM, TEP Energy

2.1.2 Konstruktionstypen

Der grundlegende Konstruktionstyp bestimmt bei den Neubauten massgeblich die THGE im Bereich «Erstellung». Um diesen Einfluss aufzuzeigen, wurden im GEPAMOD Projekt vier Konstruktionstypen definiert, welche auch in diesem Projekt zu Anwendung kommen.

Analog dem Vorgehen im GEPAMOD Projekt wird jedem der verwendeten Gebäudetypen³ ein unterschiedlicher Mix von Konstruktionstypen zugeordnet.

³ Einfamilienhaus, Bürogebäude, Hotelgebäude, Schulgebäude, Spital- und Pflegeheime, Heime, Kultur- und Freizeitgebäude, Handelsgebäude, Industriegebäude, Verkehrsgebäude, Landwirtschaftsgebäude, Lagergebäude, Sonstige Gebäude.



Tabelle 2 Beschreibung der vier im GPM berücksichtigten Konstruktionstypen.

Konstruktionstyp	Beschreibung
Massivbau	Unter dem Konstruktionstyp „Massivbau“ wurden Gebäude zusammengefasst, welche in ihrer statischen Funktion überwiegend aus Mauerwerk und Beton bzw. Stahlbeton aufgebaut sind. Die Wände bestehen hierbei üblicherweise aus Backsteinen, Kalksandsteinen, Betonsteinen oder auch Porenbetonsteinen. Für Deckenkonstruktionen kommt bei Neubauten zumeist Stahlbeton zum Einsatz, bei Bestandsbauten können diese auch in Holzbauweise vorkommen
Holzbau	Das statische Konstruktionsprinzip wird in Holzständer- oder Holzmassivbauweise erstellt. Sämtliche Haupt-Bauteile, wie Geschossdecken über Terrain, Aussenwand und tragende Innenwände sind mit einer Massivholzschicht oder in Holzständerbauweise erstellt. Untergeschosse im Erdreich sind äquivalent zum „Massivbau“ ausgeführt
Skelettbau	Beim Skelettbau erfolgt die vertikale Lastabtragung überwiegend über einzelne, systematisch angeordnete Stützen, die Aussteifung mehrgeschossiger Gebäude erfolgt über Kerne (Treppenhaus, Lifte) oder über einzelne Wandscheiben. Als Skelettbauweise wurden zwischen typischen Konstruktionen in Beton-, Stahl- oder Holzbauweise unterschieden, wobei bei den nichttragenden Bauteilen und Ausfachungen diverse Konstruktionen möglich sind
Hybridbau	Beim Konstruktionstyp „Hybridbau“ wurde von einer Mischkonstruktion aus Massivbau und Holzbau ausgegangen. Als möglicher Typus kann hier z. B. die Massivbauweise der tragenden Geschossdecken und Innenwände (z. B. aus Stahlbeton) und einer Fassade tragend oder nichttragend in Holzbauweises genannt werden

Quelle: übernommen aus dem Schlussbericht des GEPAMOD-Berichts (Jakob et al. 2016)

2.1.3 Gebäudebestand

Im Jahr 2023 betrug die EBF im Gebäudepark der Schweiz rund 860 Mio. m². Davon entfallen mehr als 40% auf Mehrfamilienhäuser (inkl. Zwei- und Dreifamilienhäuser) und rund ein Drittel auf Nicht-Wohngebäude der Sektoren Industrie- und Dienstleistungen. Einfamilienhäuser machen demgegenüber nur gut 20% der EBF aus.

Relevant für die vorliegende Fragestellung ist zudem die Altersstruktur des Gebäudeparks, zum einen aus energetischen Gründen und zum anderen im Hinblick auf die Frage von Ersatzneubauten.

- Knapp die Hälfte (46%) des heute (2023) noch bestehenden Gebäudeparks wurde bis und mit 1990 erstellt, d.h. in einer Periode vor der Einführung von energetisch anspruchsvollen Dämmvorschriften. Obwohl nicht-vernachlässigbare Teile dieses Gebäudebestands energetisch erneuert wurden, zumindest partiell (siehe Kap. 2.2.2), liegt noch ein beträchtliches Energieeffizienzpotenzial brach. Und auch dasjenige Viertel, welches auf die Periode 1991 bis 2009 entfällt, weist noch ein Energieeffizienzpotenzial auf.
- Gebäude, die bis 1990 erstellt wurden, erreichen während der Betrachtungsperiode ein Alter von mindestens 60 Jahren. Damit sind sie zum einen mögliche Kandidaten für Ersatzneubauten, vor allem aber werden viele Bauteile und Gebäudeelemente erneuert oder ersetzt. Dies gilt auch für die Periode 1991 bis 2009, womit insgesamt bei rund 70% der EBF THGE in der Phase «Erstellung» anfallen werden.



Tabelle 3 EBF-Altersstruktur (in Mio. m²) der groben Gebäudetypen und des Totals des Gebäudeparks (GP) im Jahr 2023

	EFH	MFH	NWG	Total GP	Anteil
Vor 1920	19	52	35	106	12%
1920 bis 1946	12	20	13	45	5%
1947 bis 1975	34	65	39	138	16%
1976 bis 1990	28	45	34	107	12%
1991 bis 2009	63	88	76	228	26%
2010-2019	14	80	72	166	19%
2020 bis 2023	9	32	30	71	8%
Total	179	383	299	861	100%
Anteil	21%	44%	35%	100%	

Quelle: Berechnungen GPM, TEP Energy

2.1.4 Heizanlagenverteilung

Das Gebäudealter beeinflusst auch die Anteile der verwendeten Energieträger, wie eine Erhebung im Rahmen des Projekts MISTEE und die Berichterstattung der Kantone aufzeigt. Immer noch sichtbar ist die ursprüngliche Beheizung mit Holz in den Gebäuden der Vorkriegszeit sowie das Aufkommen des Heizöls danach, welches dann zunehmend durch Gas und später durch WP abgelöst wurde. Bei den NWG haben sich v.a. die leitungsgebundenen Energieträger Gas und Fernwärme stark verbreitet.

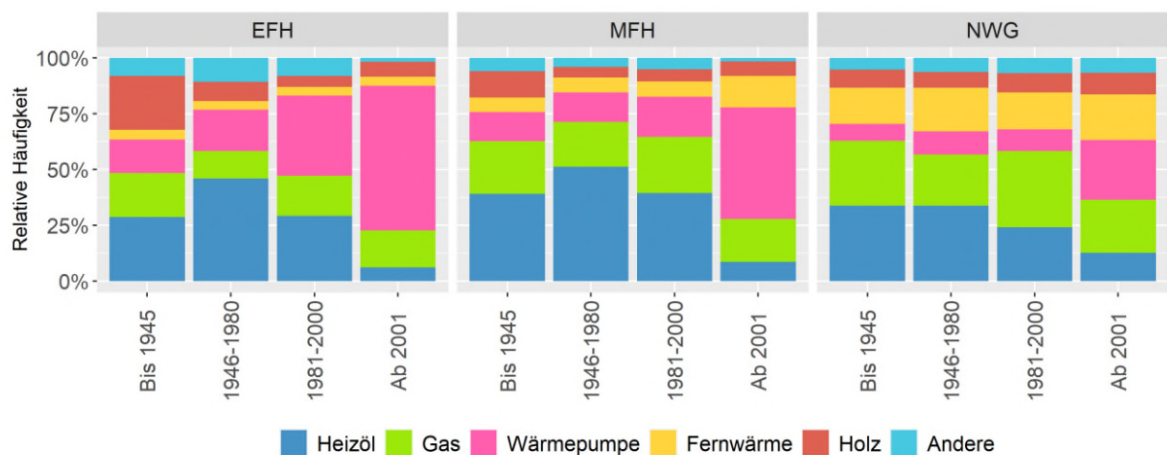


Abbildung 1 Deskriptive Auswertung der Heizsysteme nach Gebäudesektor und Bauperiode. Relative Häufigkeit bezogen auf 19 Kantone und die Stichprobe. Quelle: Übernommen aus dem Schlussbericht des Projekts MISTEE

Die Verteilung der Energieträger wird zudem durch die Gebäudetypen bzw. konkret durch die Gebäudegrösse und die Präferenzen der Eigentümer beeinflusst, wie nachfolgende Tabelle 4 aufzeigt. Bei den Wohngebäuden beträgt der Anteil von Heizöl an der Endenergienachfrage rund 30%, etwas mehr als für Strom (inkl. Haushaltstrom). Bei den EFH verteilt sich der Rest der Nachfrage im Wesentlichen auf Gas, Umweltwärme und Holz, bei den MFH hat Gas eine etwa gleich hohe Bedeutung wie Heizöl, die übrigen Energieträger haben eine untergeordnete Bedeutung. Dasselbe gilt für die Nichtwohngebäude des



Dienstleistungssektors (NWG-DL) und des Industriesektors (NWG-Ind), wobei bei den NWG auf den doppelt so hohen Stromverbrauch im Vergleich zu den WG hingewiesen wird. In diesem Stromverbrauch sind alle Verwendungszwecke inkludiert, also die dem Gebäude im engeren Sinn zuzuordnenden (wie z.B. Lüftung, Klima, Pumpen und auch Beleuchtung) und auch die der Gebäudenutzung (wie z.B. Kochen, Waschen, gewerbliche Kälte, Rechenzentren, Grossgeräte des Gesundheitswesens etc.).

Tabelle 4 Endenergieverbrauch in TWh für die verschiedenen Gebäudetypen und Aufteilung auf Energieträger und Verwendungszwecke (Raumwärme, Warmwasser, Rest)

Energieträger	Gebäudetypen					Davon		
	EFH	MFH	NWG-DL	NWG-Ind+LWT	Alle Gebäude	Raumwärme	Warmwasser	Rest
Heizöl	7.2	10.6	7.1	2.8	28.3	23.8	4.5	0
Gas	3.5	10.8	5.7	2.0	22.3	17.5	4.8	0
Holz	3.0	3.4	2.6	1.1	10.1	8.5	1.6	0
Strom (inkl. GT)	7.8	13.5	13.4	5.9	40.7	5.4	3.6	31.8
Fernwärme	0.5	2.1	1.4	0.4	4.3	4.3	3.4	0
Solar	0.1	0.2	0.2	0.0	0.5	0.5	0.0	0
Biogas	0.9	0.3	0.2	0.1	1.5	1.5	1.5	0
Umweltwärme	4.6	3.5	1.3	0.5	9.6	10.6	0.0	0
								0
Total (TWh)	27.7	44.4	31.8	12.8	117.4	59.6	15.9	31.8

Quelle: Berechnungen GPM, TEP Energy

2.2 Neubau- und Erneuerungstätigkeit

2.2.1 Abriss und Neubautätigkeit

Getrieben durch das Bevölkerungs- und Beschäftigtenwachstum sowie durch ökonomische und strukturelle Gründe stieg die EBF in den vergangenen Jahren kontinuierlich an (siehe auch BFE, 2022). Die Netto-Neubaurate betrug je nach Gebäudetyp 0.5% bis 1.5% pro Jahr, wobei von Jahr zu Jahr deutliche Schwankungen zu verzeichnen sind.

Eine zunehmende Bedeutung erlangte der Abriss von Gebäuden, der häufig an Ort und Stelle zu neuen Gebäuden führte (Ersatzneubau).

Trotz des in mancher Hinsicht bedeutenden Themas ist die Datenlage zum Abriss von Gebäuden in der Schweiz relativ «dünn», unvollständig und von Unsicherheiten geprägt. Gemäss BFS betrug bei den Wohnungen das Verhältnis zwischen «Abgang durch Abbrüche» und «Zugang durch Neubauten» zwischen 1980 und 2008 zwischen 15 und über 30, dies basierend auf sog. «Ad hoc» Auswertungen des GWR (Quelle BFS, Jährlicher baulicher Zugang an Wohnungen nach Typ der Arbeiten, T 9.2.2.2.1). Gemäss dieser Auswertung betrug der Abgang in dieser Periode 1100 bis rund 2700 pro Jahr. Bei einer Neubaurate von 1% bis 1.5% entspricht dies einer Abrissrate 0.1% pro Jahr oder weniger. Basierend auf einer neuen Methodik lässt sich anhand der Daten des BFS für die Periode 2013 bis 2020 eine Abrissrate von 0.07% bis 0.09% berechnen und 2021 eine solche von 0.12%. Da diese Daten nur die bewilligungspflichtigen bzw. dem BFS gemeldeten Abbrüche beinhalten, ist davon auszugehen, dass es sich hier um eine Unterschätzung handelt.

Andere Quellen (zu denen anzumerken ist, dass es sich hierbei nicht um wissenschaftliche Publikationen handelt, siehe Daum 2023 und Banz 2022) gehen von 3000 bis 5000 abgebrochenen Gebäuden (nicht Wohnungen) pro Jahr aus. Bei rund 1.8 Mio. Gebäuden insgesamt entspricht dieser einer Rate



von 0.16% bis 0.28% pro Jahr. Zum Vergleich: wären die Gebäude der Periode 1947 bis 1963 nach 60 Jahren abgebrochen worden, hätte daraus zwischen 2007 und 2023 eine Abbruchrate von 0.5% bis 0.7% pro Jahr resultiert (ausgehend von Tabelle 3 und bezogen auf den gesamten aktuellen Gebäudebestand).

Verlässlichere Daten sind zu den EFH im Kanton ZH und zu den Gebäuden in der Stadt Zürich der Stadt Zürich verfügbar:

- Exemplarisch zeigt die Auswertung der ZKB im Bereich EFH, dass die Abrissrate in etwa die Neubaurate erreicht hat, was bedeutet, dass der Gebäudebestand der EFH nicht mehr weiter zunahm (siehe Abbildung 2). Dies mag ein vorübergehendes Phänomen sein, steht aber exemplarisch für den Trend von EFH in Richtung MFH, begründet durch die bessere ökonomische Nutzung des immer knapper werdenden Baulands. Umgerechnet auf den Bestand der EFH im Kanton ZH im Jahr 2022 in der Höhe von rund 118'700 ergibt sich eine Abbruchrate von rund 0.3% pro Jahr.⁴
- Die Auswertung der Daten der Stadt Zürich zu Neubau und Abbruch zeigen, dass sich ab 2000 v.a. bei den reinen Wohngebäuden das Verhältnis zwischen Neubauten und Rückbauten zunehmend verringert. Bei den EFH hat dieses Verhältnis bereits ab 2000 den Wert von 1 unterschritten (d.h. es wurden mehr EFH abgerissen als neue gebaut wurden) und bei den reinen MFH ist der Gleichstand ab 2015 in etwa erreicht (siehe Abbildung 3). In der Fünfjahresperiode 2018 bis 2023 wurden in der Stadt Zürich rund 1700 Gebäude abgebrochen. Umgerechnet auf den Gebäudebestand des Jahres 2023 in der Höhe von rund 54'400 resultiert eine Abrissrate von 0.6% pro Jahr.

Fazit: In der Stadt Zürich ist die Abbruchrate grob geschätzt in derselben Grössenordnung, wie sie aufgrund einer Lebensdauer der Gebäude von 60 Jahren zu erwarten wäre. Im Kanton ZH ist bei den EFH und bei den übrigen Gebäuden in der Schweiz die Abbruchrate hingegen tiefer.

⁴ Bezogen auf eine konkrete Gebäudekohorte, also ein bestimmtes Segment mit einer spezifischen Bauperiode, würde bei einer Lebensdauer von 60 Jahren eine Abrissrate von 1.67% resultieren (das Inverse von 60, d.h. 1/60). Weil von Gebäudeabbrüchen solche präzisen Informationen nicht vorliegen, namentlich weil die Auswertung der Abbrüche nicht nach Baujahr differenziert wird, wird die Abbruchrate in der Regel von allen Gebäuden aggregiert auf den aktuellen Zeitpunkt des Gebäudebestands bezogen. Da in diesem auch jüngere und ältere Gebäude enthalten sind, ist die so berechnete Abbruchrate tiefer als diejenige, die dem Inversen der Lebensdauer entspricht.

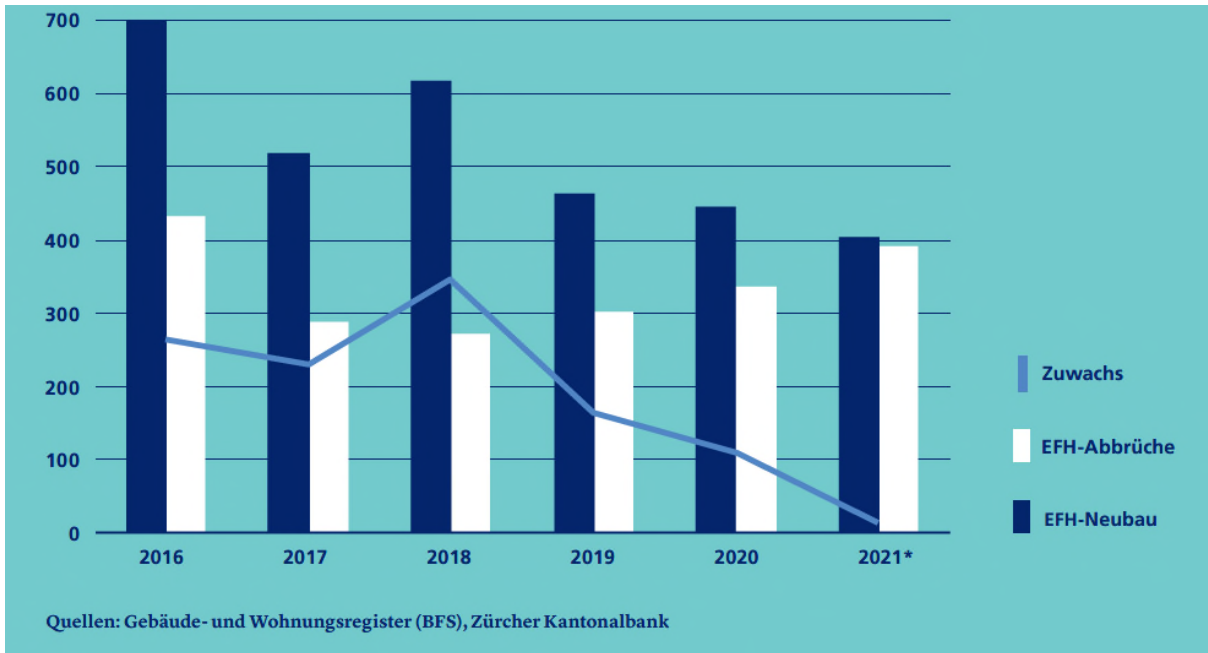


Abbildung 2. Anzahl Neubauten, Abbrüche und Zuwachs bei den EFH im Kanton ZH. Quelle: Übernommen aus «Immobilien aktuell» der ZKB, Ausgabe April 2022.

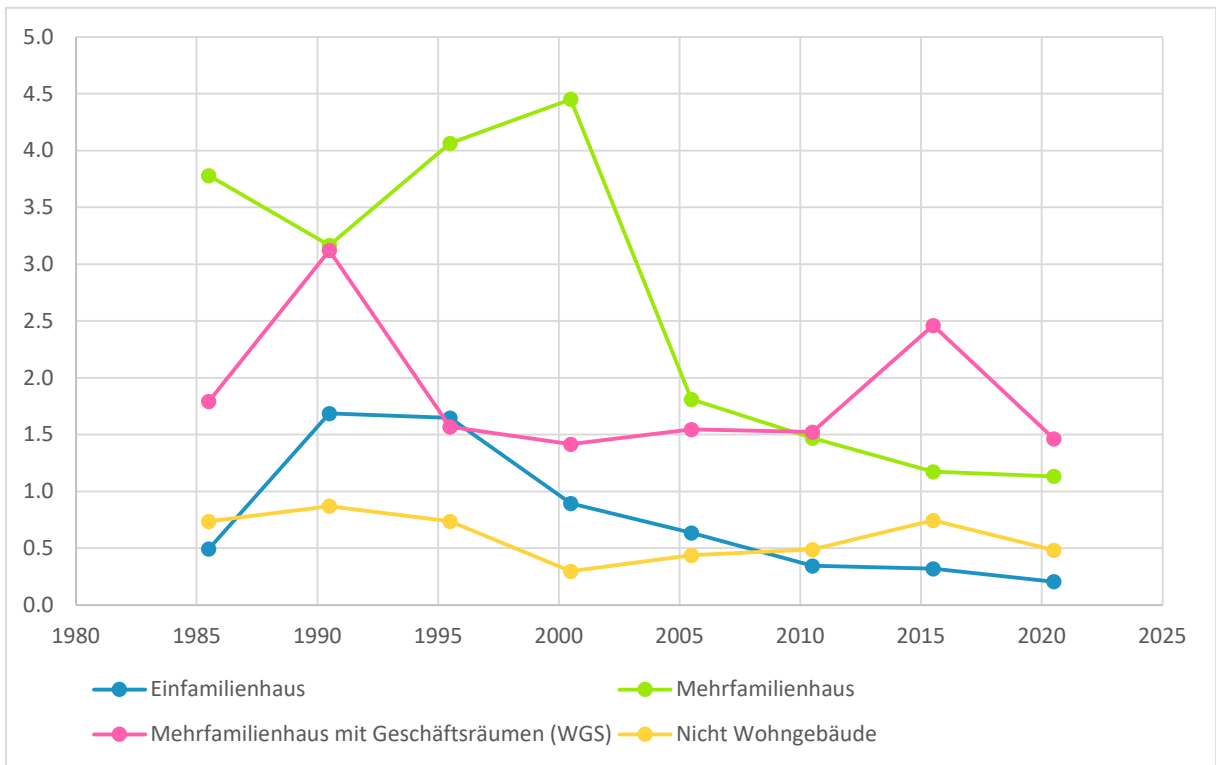


Abbildung 3. Verhältnis der Anzahl Neubauten zur Anzahl der Rückbauten in der Stadt Zürich (gemittelt pro Fünfjahresperiode), differenziert nach 4 Gebäudetypen. Quelle: Stadt Zürich Open Data, Auswertung und Darstellung TEP Energy.



2.2.2 Aktivität der energetischen Erneuerungen und Stand der erneuerten Gebäude

Am häufigsten wurden in der Vergangenheit Fenster erneuert, nämlich zwischen 2% und 3% pro Jahr bei den Gebäuden bis Baujahr 1980, je nach Bauteil und Gebäudekategorie (siehe Tabelle 5, übernommen aus Jakob, Berti und Catenazzi (2024)). Bei den Aussenwänden lag die energetische Erneuerungsrate derselben Bauperioden bei 1% bis 1.5% pro Jahr. Auch im Bereich Dach lag sie in einer ähnlichen Grössenordnung (teilweise etwas höher). Bei den Flachdächern wurde mit knapp 2% bis 2.7% pro Jahr beinahe so häufig erneuert wie im Fensterbereich.

Diese Angaben beziehen sich auf Gebäude der Bauperiode vor 1980, mithin auf Gebäude mit einem ein Alter von mehr als 50 Jahren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Aussenwände etwas weniger häufig erneuert werden, als aufgrund der typischen Lebenserwartung zu erwarten wäre. Hierzu ist anzumerken, dass im Bereich Fassade durchaus Arbeiten umgesetzt werden, jedoch häufig «nur» nicht-energetische Instandsetzungen. Auch im Dachbereich deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Lebensdauer eher mehr als die typischerweise veranschlagten 50 Jahre beträgt.

Tabelle 5 Rate der nicht-energetischen Instandsetzungen und der energetischen Erneuerungen bei Wohn- und Nicht-Wohngebäuden in den Jahren 2011 bis 2019 (teilweise erneuerte Bauelemente gemäss Jakob et al. 2024 nur anteilmässig gezählt). Berechnung der Instandsetzungs- und energetische Erneuerungsraten flächengewichtet mit dem GPM.

Bauperiode	Instandsetzungen			Energetische Erneuerungen			
	EFH	MFH	NWG	EFH	MFH	NWG	
Flachdach	Bis 1946	2.9%	3.1%	2.7%	2.6%	2.5%	2.0%
	1946 - 1970	2.9%	2.7%	2.5%	2.7%	2.3%	1.9%
	1971 - 1980	2.5%	2.4%	2.3%	2.7%	2.3%	1.9%
	1981 - 2000	1.8%	1.8%	1.6%	1.0%	1.0%	0.8%
Steildach	Bis 1946	1.3%	1.3%	1.2%	1.8%	1.6%	1.3%
	1946 - 1970	1.2%	1.2%	1.1%	1.8%	1.5%	1.3%
	1971 - 1980	1.1%	1.0%	1.0%	1.8%	1.5%	1.3%
	1981 - 2000	0.8%	0.7%	0.7%	0.7%	0.6%	0.5%
Aussenwand	Bis 1946	0.8%	0.7%	0.6%	1.4%	1.4%	1.1%
	1946 - 1970	0.7%	0.7%	0.6%	1.4%	1.5%	1.2%
	1971 - 1980	0.7%	0.6%	0.5%	1.4%	1.5%	1.2%
	1981 - 2000	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.6%	0.5%
Fenster	Bis 1946	1.7%	1.5%	1.2%	3.0%	2.8%	2.3%
	1946 - 1970	1.6%	1.3%	1.1%	2.9%	2.7%	2.1%
	1971 - 1980	1.4%	1.2%	0.9%	2.9%	2.7%	2.1%
	1981 - 2000	1.0%	0.9%	0.7%	1.2%	1.1%	0.9%
Kellerdecke	Bis 1946	k.A	k.A	k.A	1.0%	0.9%	0.5%
	1946 - 1970	k.A	k.A	k.A	0.9%	0.8%	0.5%
	1971 - 1980	k.A	k.A	k.A	0.9%	0.8%	0.5%
	1981 - 2000	k.A	k.A	k.A	0.4%	0.3%	0.2%

Quelle: Auswertung TEP Energy (übernommen aus Jakob, Berti und Catenazzi (2024))

Zu ergänzen ist, dass Gebäude, die vor dem Erreichen des energetischen Erneuerungszyklus abgebrochen wurden, nicht in diesen Werten der energetischen Erneuerungsrate enthalten sind. Rechnet



man dafür weitere 0.2% bis 0.8% hinzu, relativiert sich das Bild der langsamen energetischen Gebäudeerneuerung ein wenig.

In den dreissig Jahren von 1991 bis 2020 wurden bei einem sehr grossen Teil der Gebäude die Fenster ersetzt, wobei anzumerken ist, dass es sich in den 1990er Jahren um Zweifachverglasungen handelt. Bei der Aussenwand beträgt der Anteil der Gebäude, bei denen eine energetische Erneuerung durchgeführt wurde, rund ein Drittel und im Dachbereich etwas mehr (v.a. bei den Flachdächern), wie aus den Ergebnissen der statistischen Analysen in Jakob, Berti et al. (2024) abgeleitet werden kann. Diese Daten werden im GPM als Vergleichsgrösse verwendet (im GPM wird durch eine Simulation der Bauteilerneuerung berücksichtigt, dass ein Teil des Energieeffizienzpotenzials bereits realisiert wurde).

2.3 Grundlagen zur Berechnung der Emissionen Betrieb

2.3.1 Energiebedarf Gebäude

Der Energiebedarf der Gebäude wird mit dem Gebäudeparkmodell (GPM) von TEP Energy berechnet. Dieses differenziert nach verschiedenen energetischen Verwendungszwecken und basiert diesbezüglich auf folgenden Grundlagen:

- Raumwärme:
 - Berechnung der Nutzenergie mit der Norm SIA 380/1 unter Einbezug des sog. Energy Performance Gaps (EPG), welcher z.B. bei effizienten Gebäuden von höheren Innenraumtemperaturen als die Norm ausgeht. In die Berechnungen fliessen zahlreiche Parameter wie z.B. Gebäudeform ($A_{H\ddot{u}lle}/A_E$), Effizienz der Gebäudehüllenelemente (ausgehend von den U-Werten pro Bauperiode und der Häufigkeit der durchgeführten energetischen Erneuerungen, u.a. basierend auf den oben erwähnten Stichprobenerhebungen, siehe Kap 2.2.2).
 - Der Endenergieverbrauch ergibt sich dann durch die Division der Nutzenergie mit dem Jahresnutzungsgrad, welcher wiederum vom eingesetzten Heizsystem abhängt. Die Häufigkeit der verschiedenen Heizsysteme im Gebäudepark wurde durch Auswertungen des GWR und der durchgeführten Stichprobenerhebungen ermittelt (Jakob et al. 2024).
- Warmwasser: Bedarf pro Person und Fläche pro Person dividiert durch Jahresnutzungsgrad.
- Übrige Energieanwendungen: basierend auf installierter Leistung pro m^2 und Volllaststunden differenziert nach rund 15 Verwendungszwecken, basierend u.a. auf SIA 2024. Siehe GEPAMOD-Bericht und Berichte Ex-Post Analysen (BFE 2022) für weitere Einzelheiten.

Für weitergehende Beschreibungen der verwendeten Berechnungsgrundlagen wird u.a. auf den Methodenbericht verwiesen, der im Rahmen der Berichterstattung der Kantone zu den CO₂-Emissionen der Gebäude erstellt wurde (Jakob et. al. 2021).

2.3.2 Scope 1: Direkte Emissionen (fossile Energieträger)

Die direkten Emissionen der fossilen Energieträger ergeben sich durch die Multiplikation der berechneten Endenergieverbräuche (siehe oben) und den spezifischen Emissionsfaktoren für Heizöl und Erdgas, welche vom BAFU übernommen werden (BAFU 2019).

2.3.3 Scope 2: Indirekte Emissionen der Energieträger Fernwärme und Strom

Die indirekten Emissionen der Sekundärenergieträger Fernwärme und Strom ergeben sich durch die Multiplikation der berechneten Endenergieverbräuche für diese Energieträger (siehe oben) und ihren spezifischen Emissionsfaktoren. Die Emissionsfaktoren werden je nach angenommener Methodik (siehe nachstehend in den Kapiteln zur Beantwortung der entsprechenden Fragestellungen) aus der KBOB-Liste und aus dem Projekt «Vom Zertifikat zur Physik» (Jakob, Bagemihl et al. 2022) abgeleitet



und/oder durch eigene Analysen ergänzt und berechnet. Der Anteil der indirekten Emissionen, welche dem Scope 3 zuzurechnen ist (siehe nachstehende Kap. 2.3.4), wird vom Gesamtemissionsfaktor in Abzug gebracht.

2.3.4 Scope 3: Emissionen alle Energieträger

Der Anteil der Scope 3 Emissionen am Emissionsfaktor der verschiedenen Energieträger wurde durch Alig et al. 2021 abgeschätzt. Diese Grundlage wird für die Berechnung der gegenwärtigen Scope 3 Emissionen der Energienutzung verwendet. Für künftige Zeiträume werden je nach Szenario eigene Annahmen getroffen (siehe nachstehende Kapitel zur Beantwortung der entsprechenden Fragestellungen).

2.4 Grundlagen zur Berechnung der Emissionen Erstellung

2.4.1 Materialeinsatz pro Bauteil und Gebäudeelement

Die Materialisierung Bauteile und Gebäudeelemente basiert u.a. auf Ergebnissen der Analyse von einzelnen Gebäuden aus Fragestellung F2. Identifizierte alternative Baumaterialien und optimierte Varianten der Bauteile und Gebäudeelemente, die ein Potenzial für tiefe THG-Emissionen aufweisen, wurden in die Liste zur Analyse Gebäudepark aufgenommen.

2.4.2 Emissionskoeffizienten pro Bauteil und Gebäudeelement nach Phase

Eine Liste von Bauteilen und Emissionskennzahlen (EK) mit Kennzahlen zu THG nach Phasen, biogenem Speicher und Materialmengen wurde als Ausgangsbasis für die Analysen des Gebäudeparks ausgearbeitet (siehe weitere Details zum methodischen Vorgehen und zu den Emissionskennwerten in Kapitel 1.3.1). Diese EK, gemässen in kg CO_{2eq}/Bezugsgrösse, werden mit dem Mengengerüst des Gebäudeparkmodells verknüpft, und zwar im Wesentlichen für die folgenden Instanzen, für welche die EK phasengerecht zugeordnet werden:

- Neubau (ab 2023): Phase A1-A3
- Erneuerung des Gebäudebestands: Phase B und Phase C
- Gebäudeabbruch: Phase C

Die Daten für die kommenden Jahre 2050 unterscheiden sich von denjenigen für den heutigen Zeitpunkt. Folgende Grundlagen kommen zur Anwendung:

- Für den Zeitpunkt 2023: KBOB-Empfehlung 2009/1:2022
- Für den Zeitpunkt 2050: «KBOB Future», basierend auf Alig et al. (2021).
- Für die Zeitpunkte dazwischen: linear interpoliert.

Die verwendeten Datengrundlagen für die drei Instanzen und die beiden Zeitpunkte sind in Tabelle 34 im Anhang dokumentiert.

Anzumerken ist, dass die zeitliche Verortung von «KBOB Future» auf den Zeitpunkt 2050 eine eher konservative Annahme ist, denn gemäss Alig et al. (2021) sind die dort erarbeiteten Werte bereits für 2030 bis 2040 erreichbar. Zudem zeigt das Fraunhofer ISI auf, dass der Industriesektor in Europa bis 2050 stärker vollumfänglicher dekarbonisiert werden kann (wenn entsprechende Massnahmen ergriffen werden). Auch das KIG geht ab dem Jahr 2040 von einem noch stärker absinkenden Absenkpfad aus. Demzufolge wird im Kap. 7.4.2 zu den im Vergleich zum Basis-Szenario weitergehenden Massnahmen eine zusätzliche Reduktion der CO₂-Emissionen Erstellung angenommen.



2.4.3 Handhabung biogene Emissionen, temporäre Senken (C-Speicher)

Die Aufnahme und Freisetzung von biogenem CO₂ wird separat zu den übrigen THG-Emissionen über den gespeicherten Kohlenstoff in der Biomasse erfasst und ausgewiesen. In den Kennzahlen zu den Bauteilen wird jeweils der gespeicherte Kohlenstoff in kg C für die Analyse des NET-Potenzials ausgewiesen. Dieser Wert wird ausgehend von der Angabe zum Kohlenstoffgehalt gemäss Kohlenstoffspeicher in kg C der unterschiedlichen Bauprodukte Holzbaustoffe, Parkett, Faserplatten und Strohdämmung der KBOB-Grundlage ermittelt (Umrechnung kg C zu kg CO₂ mit Faktor 3.67).

Das ausgewiesene NET-Potenzial durch den Einsatz biogener Baustoffe wird nur bei einer gesicherten dauerhaften Speicherung erreicht. Bis entsprechende technische Möglichkeiten (zu akzeptablen Kosten zur Verfügung) stehen, kann der Einbau von Holzbaustoffen und anderen Biomasse basierten Baustoffen einen zeitlichen Aufschub für die Entwicklung solcher Technologien generieren. Zur Diskussion stehen die folgenden Varianten der Anrechnung des Einsatzes von biogenen Baustoffen:

- Variante 1: keine Anrechnung NET (-1/+1 langfristig wieder freigesetzt, keine Anrechnung)
- Variante 2: Anrechnung der Veränderung an Kohlenstoffvorräte im Gebäudepark mit dem Netto-Zuwachs bis 2050 bei Bauteilen (Ausbaumenge bestimmt mit einer entsprechenden Lebensdauer als Ausgangsbasis für Diskussionen anderer Ansätze)
- Variante 3: Anrechnung rechtlich verbindlicher gesicherter NET (-1/+0.1⁵ langfristige Sicherung mittels DACCS, BECCS und anderen CCS-Lösungen mit geringen Verlusten von 10% der NET).

2.5 Weitere Grundlagen

2.5.1 Ressourcenpolitik Holz, Systembetrachtung, Ökosystem und Gebäudepark

Zur Herleitung der Zielsetzung und der Szenarien der Holznutzung, innerhalb der Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Nutzung der Wälder, wird folgende Literatur berücksichtigt:

- Nutzung des geernteten Holzes – Substitution und Senkenwirkung (Schweiz. Z. Forstwes. 159 (2008) 9: 288–295)
- Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald - Auswertung von Nutzungsszenarien und Waldwachstumsentwicklung (BAFU, 2011)
- Optimierung der Waldnutzung, Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 13.3924 Jans vom, 27. September 2013
- Ressourcenpolitik Holz 2030 - Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz 2021–2026 (BAFU, 2021)
- NID Nation Inventory Report (BAFU, 2024)

Ein Auszug der wichtigsten Informationen zur Schweizer Holznutzung, der damit bedingten Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Verlauf der Zeit sowie der Ressourcenpolitik und Zielsetzungen sind im Anhang 2.1 aufgeführt.

2.5.2 Neue Baustoffe, Grundlagen

Von Seite Herstellern und Anbietern stehen Informationen zur möglichen Senkenwirkung der angebotenen Betonprodukte und möglichen Anwendungsgebieten zur Verfügung:

- Zirkulit, 10 kg CO₂/m³ Beton, Karbonatisierung mit CO₂ aus nicht fossilen Quellen

⁵ Annahme 10% Schlupf und aufwandbedingte Treibhausgasemissionen.



- Klark Klimabeton, 54 kg C/m³ in Form von Pflanzenkohle im Beton⁶ (die Angaben zum C-Speicher basieren auf der Aussage des Herstellers, dass in der Praxis mehr als 200 Kilogramm CO₂ pro Kubikmeter Beton permanent eingelagert werden). Hinweise zu möglichen Ausgangsstoffen für den Ausbau Pyrolyse und Pflanzenkohle sind in Anhang 2.1 aufgeführt.

Darüber hinaus sind kaum Erfahrungswerte aus dem Einsatz und bis dato noch keine Erfahrungswerte aus dem Rückbau vorhanden.

⁶ Der Nachweis der langfristigen Speicherung des biogenen Kohlenstoffs ist noch ausstehend. Die Bilanzierungsregeln der KBOB erlauben das Anrechnen von Negativemissionen bei mit Pflanzenkohle versetztem Beton noch nicht (KBOB et al. 2023).



3 Basis-Szenario und Szenariovarianten/Sensitivitäten: Annahmen und resultierende Entwicklungen

3.1 Definition Basis-Szenario und Szenariovarianten/Sensitivitäten

Die Top-down Betrachtung und ein Zeithorizont von mehreren Jahrzehnten (2023 bis 2050) bedingen das Arbeiten mit Modellen und Szenarien. Das Kapitel 3 besteht aus der Definition eines Basis-Szenario und sowie von Szenariovarianten und Sensitivitäten. Diese beinhalten die Festlegung der grundlegenden Parameter wie Entwicklung EBF, Nettozubau, Entwicklung Konstruktionstypen Neubau, Entwicklung Gebäudehülle und Emissionsfaktoren. siehe Tabelle 4. Dadurch wird der Einfluss, den verschiedene Ansätze zur Reduktion der THG haben, konkret aufgezeigt (typischerweise als Differenzbetrachtung, siehe Tabelle 18).

Tabelle 6 Definition des Basis-Szenario sowie von Szenariovarianten und Sensitivitäten

	Basis-Szenario	Varianten und Sensitivitäten
Alle Scopes	Erhöhung der betrieblichen Energieeffizienz im Bereich Gebäudehülle, Heizanlagen, Gebäudetechnik und Geräte.	n.a.
Scope 1	Keine fossilen Energieträger im Gebäudepark bis 2050	n.a.
Scope 2	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Stromnachfrage für Elektroheizungen/-boiler auf nahe 0, Anstieg WP, Effizienzgewinne übrige Anwendungen Steigende Nachfrage Fernwärme Emissionsfaktoren (EF) stark reduziert 	<ul style="list-style-type: none"> V2.1: EF leicht reduziert (Kap 3.4.4) V2.2: EF konstant (Kap 3.4.4)
Scope 3 Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> Hebel Wahl der Konstruktionstypen Hebel Materialeinsatz Mit Hebel KBOB EF 2050 Ohne Hebel nicht-technische Massnahme Hebel temporäre Senken und Hebel NET werden separat ausgewiesen 	<ul style="list-style-type: none"> V3.1: Varianten Konstruktionstypen (Kap 3.3.1) <ul style="list-style-type: none"> a) Ohne Hebel Konstruktionstypen b) Höherer Anteil Holzbau c) Mehr MFH statt EFH V3.2: Ohne Hebel Materialeinsatz (Kap 3.3.4) V3.3a: Ohne Hebel KBOB EF 2050 (Kap 3.3.5) V3.3b: Nur KBOB EF 2050 (Kap 3.3.5) V3.3c: Weitergehende Reduktion EK Bauelemente V3.4: Mit Hebel nicht-technische Massnahmen: <ul style="list-style-type: none"> a) Weniger Abriss (Kap 3.2.1) b) Weniger EBF (Kap 3.2.1) c) Längere Nutzungszeiten (Kap 3.3.3)
Scope 3 Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> Konstante oder sinkende Nachfrage Emissionsfaktoren (EF) stark reduziert 	<ul style="list-style-type: none"> V3.7: EF leicht reduziert (Kap 3.4.5) V3.8: EF konstant (Kap 3.4.5)

Quelle: TEP Energy



Inhaltlich ist das Basis-Szenario so zu definieren, dass die Zielpfade und Emissionsbudgets möglichst eingehalten werden. Hierbei ist davon auszugehen, dass es sich um sehr anspruchsvolle Ziele handelt, was bei der Annahme der Szenario- und Modellparameter berücksichtigt wird, wobei darauf zu achten ist, dass die Annahmen in einem absehbar realistischen Bereich bleiben.

Zunächst werden die grundlegenden Parameter wie Entwicklung des Zubaus, Entwicklung der EBF Entwicklung Konstruktionstypen Neubau, Entwicklung Gebäudehülle dargestellt, welche das Mengengerüst für die Analyse konstituieren. Mit den angenommenen Emissionsfaktoren können dann die resultierenden Emissionen, wie in Kapitel 7 gezeigt und diskutiert, angenommen werden.

3.2 Mengengerüst: Annahmen und resultierende Entwicklungen

3.2.1 Entwicklung der Ersatzneubau- und der Neubautätigkeit

Weil die Veränderung der Neubautätigkeit einen direkten Einfluss auf die THG-Emissionen Erstellung hat, sind eine saubere Begrifflichkeit und die Bilanzierung der Flächen, die neu erstellt werden, wichtig. Wir gehen von folgenden Definitionen aus (siehe Tabelle 7):

Tabelle 7 Flächendefinition bei Ersatzneubau- und Neubautätigkeit

Netto-Neubau	Netto-Zuwachs an Flächen, d.h. Differenz zwischen dem Ausgangswert eines Vergleichsjahres und dem Stand des Betrachtungsjahres
Ersatzneubau	Ersatz von Flächen, die abgerissen und neu erstellt werden (als abstrakte Differenzbildung, nicht gezwungenermassen mit derselben Fläche am selben Standort). Ist die neue Fläche grösser als die durch Abriss verloren gegangene, trägt dieser Überschuss zum Netto-Neubau bei.
Brutto-Neubau	Summe von Netto-Neubau und Ersatzneubau

Quelle: TEP Energy

Die sich verlangsamende Nachfrage nach Flächen führt dazu, dass die Netto-Neubautätigkeit abnimmt. Diese Abnahme ist kontinuierlich und deutlich, siehe Tabelle 8. Da die Ersatzneubautätigkeit nur leicht zunimmt, nimmt die Brutto-Neubautätigkeit verglichen zur Periode 2023-2030 deutlich ab (um rund 30%). Dieses Ergebnis der Gebäudeparkbetrachtung ist bzgl. der Fragestellung der THGE «Erstellung» von grosser Bedeutung, weil diese (brutto) im selben Mass abnehmen.



Tabelle 8 Netto-Neubau, Ersatzneubau und resultierenden Bruttoneubau für drei Bauperioden bis 2050 (jeweils in Mio. m² pro Jahr) sowie Veränderung zwischen heute und 2050 im Basis-Szenario

	2023-2030	2030-2040	2040-2050	2050/2023	
Gesamter Gebäudepark					
Netto-Neubau	8.8	7.0	5.4	-38%	Netto-Neubau nimmt um-38% ab
Ersatzneubau	2.5	2.5	2.7	5%	Ersatzneubau nimmt zu (5%)
Brutto-Neubau	11.3	9.5	8.1	-29%	Brutto-Neubau nimmt um -29% ab
Einfamilienhäuser					
Netto-Neubau	2.2	1.6	1.2	-43%	Netto-Neubau nimmt um-43% ab
Ersatzneubau	0.3	0.3	0.3	14%	Ersatzneubau nimmt zu (14%)
Brutto-Neubau	2.4	1.8	1.5	-37%	Brutto-Neubau nimmt um -37% ab
Mehrfamilienhäuser					
Netto-Neubau	4.3	3.8	3.1	-29%	Netto-Neubau nimmt um-29% ab
Ersatzneubau	0.9	0.9	1.0	5%	Ersatzneubau nimmt zu (5%)
Brutto-Neubau	5.2	4.7	4.0	-23%	Brutto-Neubau nimmt um -23% ab
Nicht-Wohngebäude					
Netto-Neubau	2.2	1.6	1.1	-52%	Netto-Neubau nimmt um-52% ab
Ersatzneubau	1.4	1.3	1.4	3%	Ersatzneubau nimmt zu (3%)
Brutto-Neubau	3.6	3.0	2.5	-31%	Brutto-Neubau nimmt um -31% ab

Quelle: TEP Energy

Die in Tabelle 8 dargestellten Raten des Basis Szenarios werden nun variiert gemäss *V3.4a Weniger Abriss* und *V3.4b Weniger EBF*:

- Die Variante *V3.4a* unterstellt eine reduzierte Abrissrate. Dies wird erreicht, indem die Lebensdauer der Gebäude, die nach dem Jahr 2024 im dem Basis-Szenario abgerissen werden würden, um 40 Jahre verlängert werden.
- Die Variante *V3.4b* beruht darauf, dass vom Jahr 2025 an die EBF neuer Wohngebäude nur noch 80% des bisherigen Wertes beträgt.

Die Auswirkungen dieser beiden Varianten auf die Netto-, Brutto- und Ersatzneubauraten sind in Tabelle 9 dargestellt.

Die Übersetzung der Raten im Basis Szenario sowie die veränderten Raten auf die Entwicklung der EBF sind im folgenden Kap. 3.2.2 dargestellt.



Tabelle 9 Netto-Neubau, Ersatzneubau und resultierenden Bruttoneubau für drei Bauperioden bis 2050 sowie Veränderung zwischen heute und 2050 für Var 3.4a) und b) [in Mio. m² pro Jahr]

	2023-2030	2030-2040	2040-2050	2050 / 2023	
Weniger Abrissrate (V3.4a)					
Netto-Neubau	8,1	6,1	4,5	-44%	Netto-Neubau nimmt um-44% ab
Ersatzneubau	1,9	1,6	1,8	-5%	Auch Ersatzneubau nimmt ab (-5%)
Brutto-Neubau	10,0	7,7	6,3	-37%	Brutto-Neubau nimmt um (-37% ab)
Weniger EBF (V3.4 b)					
Netto-Neubau	6,9	6,0	4,6	-33%	Netto-Neubau nimmt um-33% ab
Ersatzneubau	2,5	2,5	2,7	5%	Auch Ersatzneubau nimmt ab (5%)
Brutto-Neubau	9,5	8,5	7,3	-23%	Brutto-Neubau nimmt um (-23% ab)

Quelle: TEP Energy

3.2.2 Entwicklung der EBF

Die Entwicklung der EBF im Basis Szenario ergibt sich durch den Bedarf bzw. die Nachfrage nach zusätzlichen Flächen aufgrund steigender Bevölkerungs- und Beschäftigtenzahlen. Entsprechende Annahmen basieren auf dem Bevölkerungsszenario ab, welches auch den Energieperspektiven 2050+ des BFE zugrunde liegt. Gemäss diesem Szenario verlangsamt sich die Nachfrage nach Flächen insbesondere aufgrund der Verlangsamung des Bevölkerungswachstums.

Die EBF steigt von 814 Mio. m² im Jahr 2023 auf 930 Mio. m² im Jahr 2050 (+14%). Der Abriss von bestehenden Gebäuden führt dazu, dass der EBF-Bestand der früheren Bauperioden abnehmen wird (siehe Abbildung 4), wodurch der Anteil der neueren Bauperioden (ab 2020) im Basis-Szenario im Jahr 2050 226 Mio. m², d.h. 25%, ausmacht. Dies bedeutet, dass die Ersatzneubautätigkeit ab 2023 mit rund 100 Mio. m² fast dieselbe Grössenordnung erreicht wie der Netto-Neubau (116 Mio. m²).

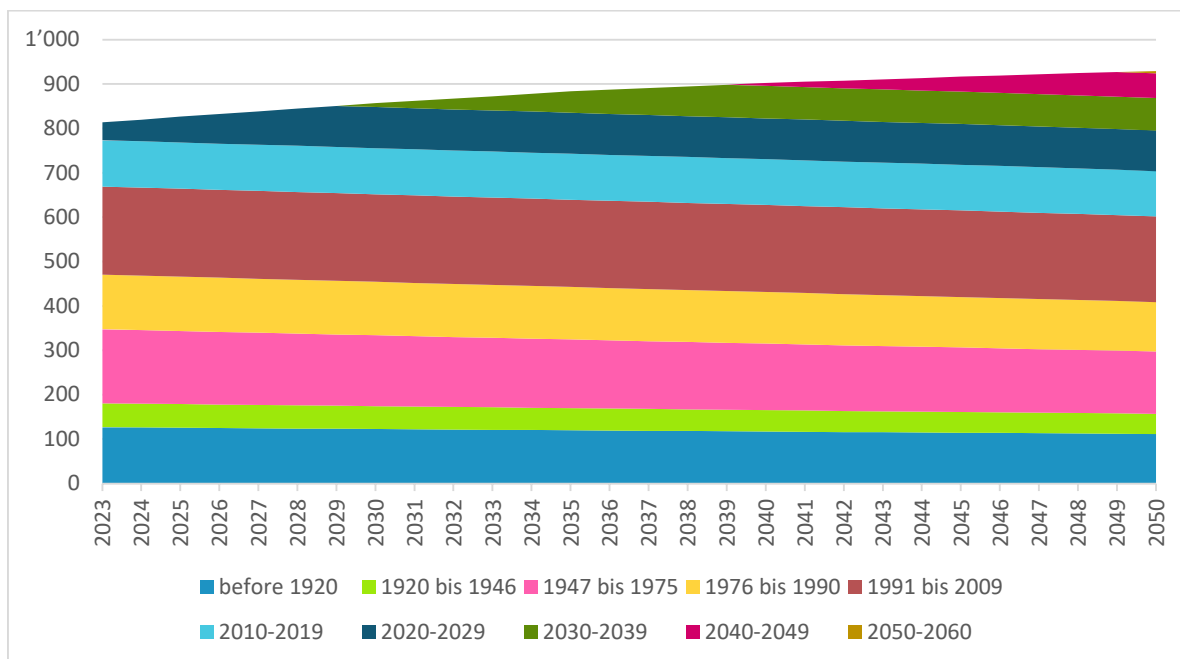


Abbildung 4 EBF-Entwicklung (Mio. m²) aller Gebäudetypen pro Bauperiode, Basis-Szenario



In der Variante V3.4a) *Weniger Abriss*, modelliert durch eine angenommene Zunahme der Lebensdauer der Gebäude von pauschal 40 Jahren, umfassen die Bauperioden 2020 bis 2050 rund 203 Mio. m² EBF statt 226 Mio. m² wie Basis-Szenario (-10%), dies bei gleichbleibender Entwicklung der EBF insgesamt. Die 40 Jahre sind mit der in der GPM-Modellierung angesetzten Lebensdauer der Gebäude zu vergleichen, die v.a. bei Wohngebäuden im Median von deutlich mehr als 60 Jahren ausgeht, siehe Grundlagenbericht zum Effizienzpfad Energie von 2016 des Projekts GEPAMOD.

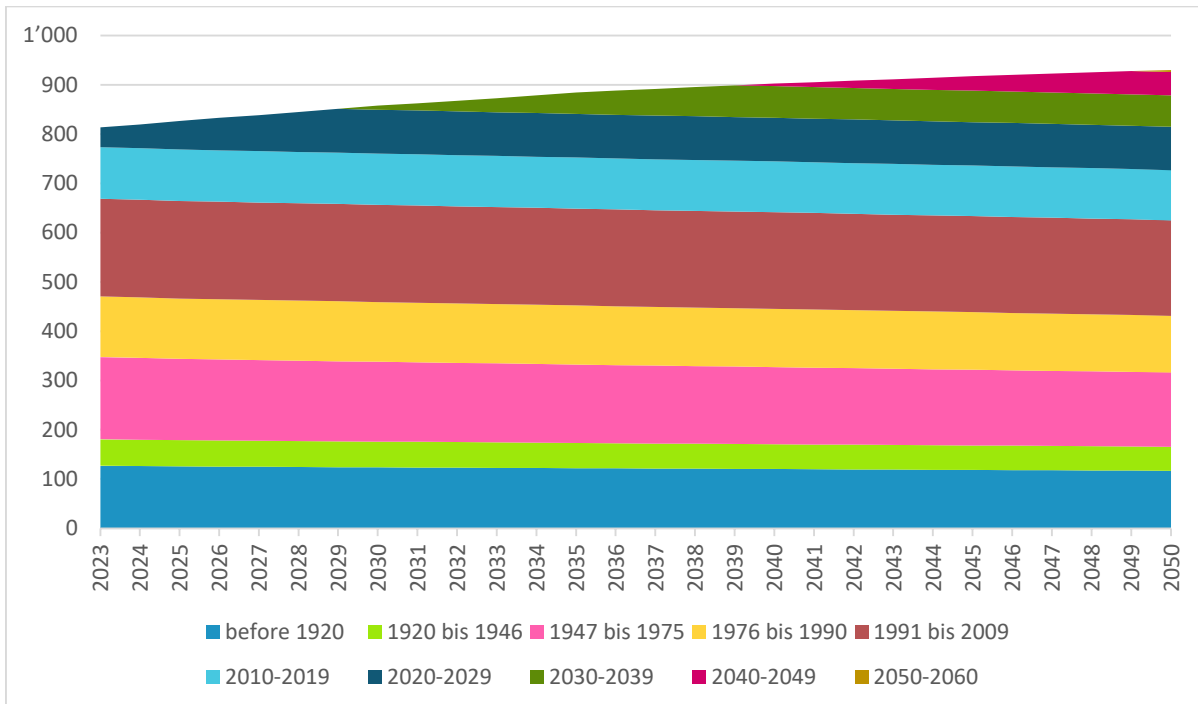


Abbildung 5 EBF-Entwicklung (Mio. m²) aller Gebäudetypen pro Bauperiode, Variante V3.4a *Weniger Abriss*

In Variante V3.4b) *Weniger EBF* liegt der Wert am Ende der Betrachtungsperiode insgesamt bei 899 Mio. m², d.h. rund 3% tiefer als im Basis-Szenario. In dieser Variante umfassen die Bauperioden 2020 bis 2050 rund 195 Mio. m² EBF statt 226 Mio. m² wie im Basis-Szenario, d.h. 14% weniger.

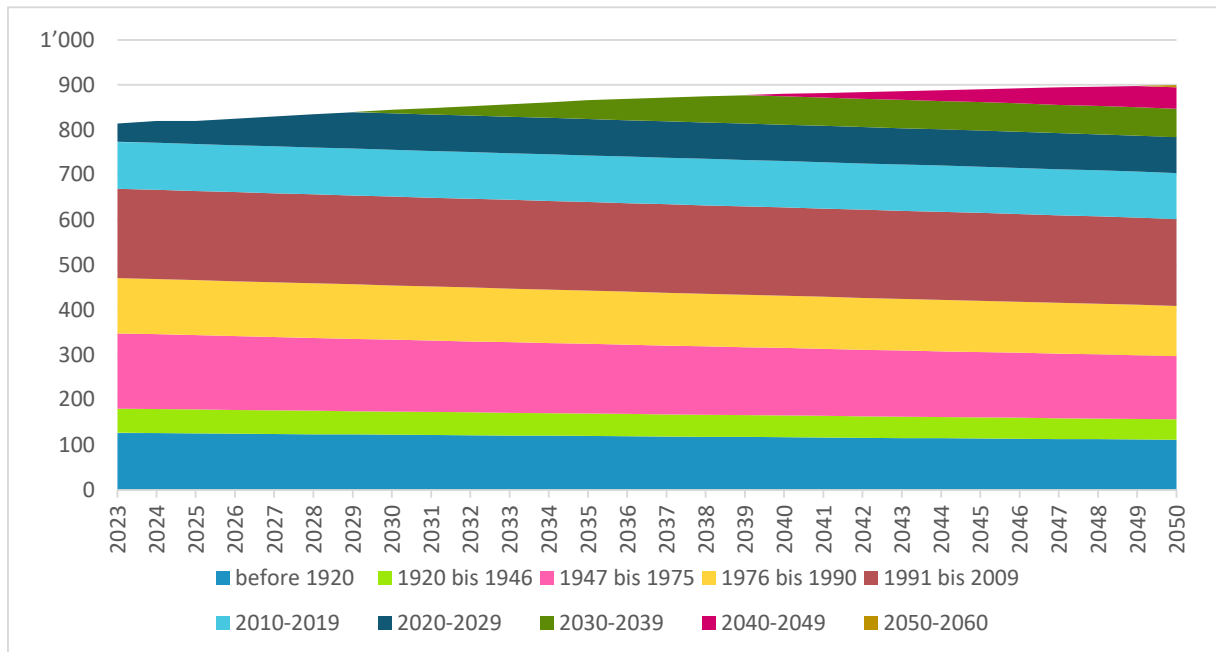


Abbildung 6 EBF-Entwicklung (Mio. m²) aller Gebäudetypen pro Bauperiode, Variante V3.4b Weniger EBF

Würden die beiden Ansätze kombiniert, würde die Neubautätigkeit, gemessen an der EBF der Bauperiode 2020 bis 2050, um mehr als 24% reduziert, dies im Vergleich zum Wert des Basis-Szenario für das Jahr 2050.

3.3 Konstruktionstypen und Materialisierung: Annahmen und Auswirkungen

Neben der Flächenentwicklung ist ein weiteres Kriterium die Entwicklung der Konstruktionstypen von Neubauten, da sich hier durch geeignete Wahl die THG Emissionen Erstellung vermindern lassen.

3.3.1 THG-Emissionen Erstellung von verschiedenen Konstruktionstypen von Neubauten

Vor allem mit Holzbauten lassen sich die Emissionen «Errichtung» (Phasen A1 bis A3) deutlich verringern, namentlich im Bereich Geschossdecken, siehe Abbildung 7. Auch die Konstruktionstypen Skelettbau und Hybridbau weisen etwas tiefere Emissionen «Errichtung» auf im Vergleich zu Massivbauten. In Anbetracht der teilweise geringen Unterschiede lässt sich jedoch bereits an dieser Stelle festhalten, dass allein durch die Wahl der Konstruktionstypen die Emissionen der Bauteile nicht in die Nähe von 0 gebracht werden können. Im Anhang 2 Tabelle 34 findet sich eine Übersicht über die Effizienzkoeffizienten der verwendeten Bauelemente und deren Entwicklung.

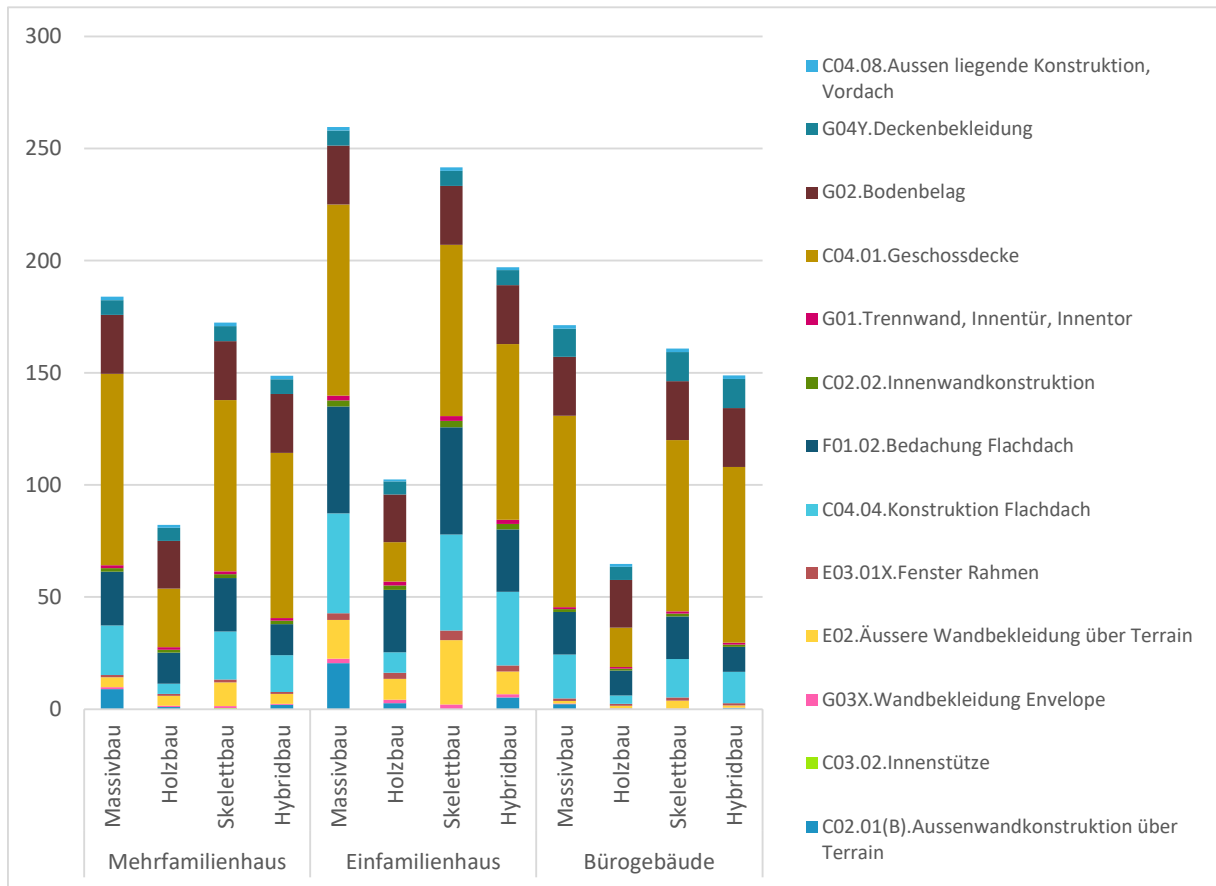


Abbildung 7 THG Emissionen «Erstellung» (kg/m²) der Phase A1 bis A3 derjenigen Bauteile, welche bei den vier Konstruktionstypen variiert wurden, für drei ausgewählte Gebäudetypen. Quelle: KBOB 2016:2022, Annahmen zu Gebäudegeometrien und Berechnungen TEP Energy

Werden statt der aktuellen Emissionskoeffizienten (KBOB 2016:2022) diejenigen von KBOB Future angewendet, reduzieren sich die Emissionen Erstellung bei allen Konstruktionstypen deutlich. Die Emissionen Erstellung betragen dann je nach Gebäudetyp zwischen gut 30 und rund 60 kg/m² (siehe Abbildung 8), also deutlich weniger als 70 bis über 250 kg/m² (siehe Abbildung 7). Zudem ist festzustellen, dass die Unterschiede zwischen den Konstruktionstypen innerhalb eines Gebäudetyps (z.B. EFH, MFH, Bürogebäude) nur noch sehr gering sind. Es ist damit offensichtlich, dass der «Hebel» Wahl des Konstruktionstyps im Wesentlichen wegfällt, sobald die Herstellung von Baumaterialien und Bauelementen zu wesentlichen Teilen dekarbonisiert sein wird.

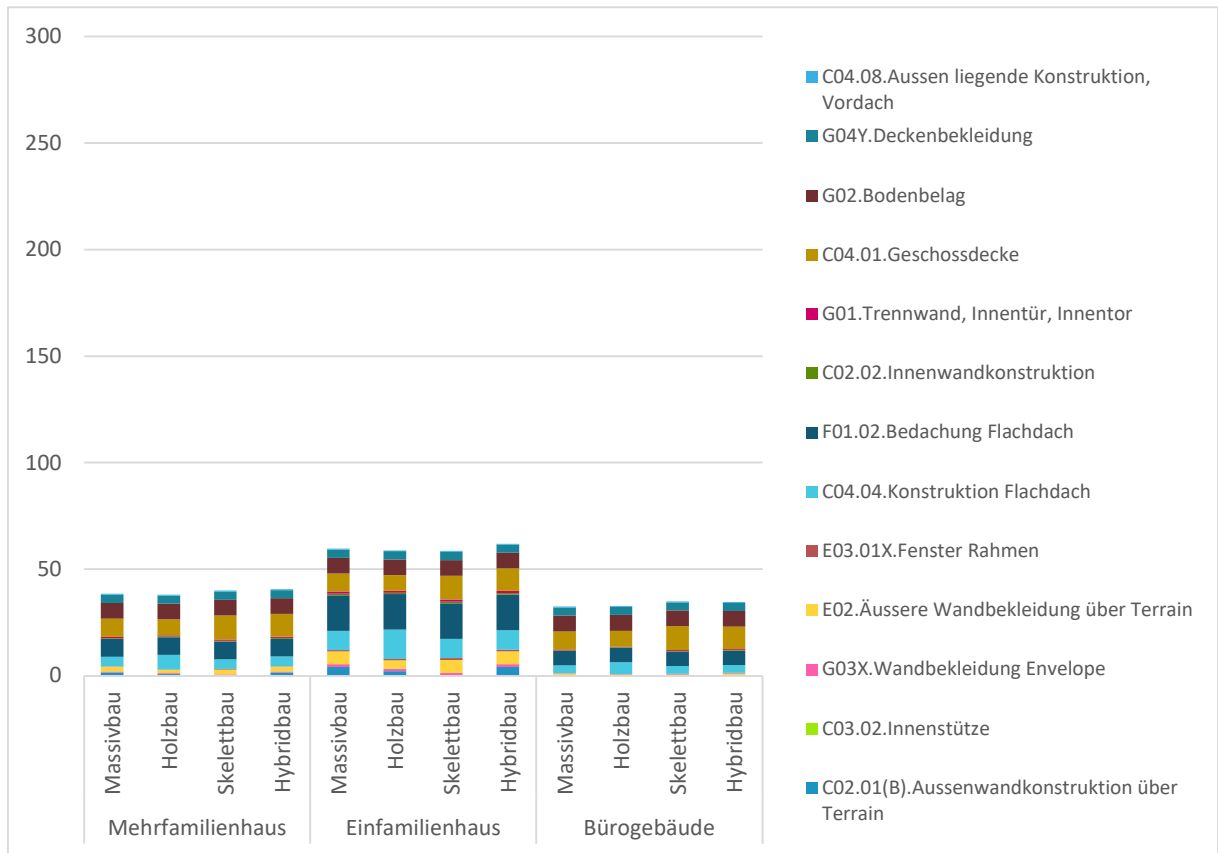


Abbildung 8 THG Emissionen «Erstellung» (kg/m²) der Phase A1 bis A3 derjenigen Bauteile, welche bei den vier Konstruktionstypen variiert wurden, für drei ausgewählte Gebäudetypen. Quelle: «KBOB Future», Annahmen zu Gebäudegeometrien und Berechnungen TEP Energy

3.3.2 Entwicklung der Konstruktionstypen von Neubauten

Um den Effekt der Wahl der Konstruktionstypen auf Ebene Gebäudepark aufzuzeigen, werden Annahmen zu den Anteilen der vier Konstruktionstypen, die im GPM unterschieden werden, getroffen. Die Annahmen unterscheiden sich je nach Gebäudetyp, siehe Tabelle 10 für das Basis-Szenario.

Bei den EFH wird beispielsweise angenommen, dass sich der Marktanteil an Massivbauten bis zum Jahr 2050 auf 34% reduziert, dies ausgehend von geschätzten 80% für den heutigen Zeitpunkt. Gewinnen würden vor allem Holz- und Hybridbauten. Bei den MFH wird eine weniger grosse Veränderung angenommen (z.B. Marktanteil Massivbau von heute rund 84% auf rund 60%). Bei Nicht-Wohngebäuden ist der Marktanteil von Massivbauten bereits heute tiefer, so dass hier ein geringeres Verlagerungspotenzial besteht.



Tabelle 10 Künftige Entwicklung der Konstruktionstypen von Neubauten für ausgewählte Gebäudetypen im Basis-Szenario

	Zeitpunkt	Massivbau	Holzbau	Skelettbau	Hybridbau	Total
Einfamilienhaus	2023	80%	8%	0%	12%	100%
	2050	34%	40%	1%	25%	100%
Mehrfamilienhaus	2023	84%	4%	0%	12%	100%
	2050	59%	15%	1%	25%	100%
Bürogebäude	2023	44%	1%	40%	15%	100%
	2050	25%	5%	50%	20%	100%
Schulgebäude	2023	70%	5%	5%	20%	100%
	2050	30%	20%	10%	40%	100%

Quelle: Dieses Projekt. Annahmen TEP Energy, Carbotech und ETH Zürich

Gegenüber dem der obigen Entwicklung im Basis Szenario Konstruktionstypen wird in der Variante V3.1 unterschieden nach:

- a) Keine Veränderung des Konstruktionstyps
- b) Höherer Anteil Holzbau
- c) Mehr MFH statt EFH

Die Variante V3.1a Keine Veränderung des Konstruktionstyps ist dadurch definiert, dass die relativen Anteile des Konstruktionstyps bis zum Jahr 2050 konstant bleiben, dies im Gegensatz zum Basis-Szenario aus Tabelle 10, und dass die aktuellen KBOB EF 2022 auch im Jahr 2050 angewendet werden.

Bei der Variante V3.1b Höherer Anteil Holzbau entwickelt sich der relative Anteil dynamischer als im Basis-Szenario. Die Werte für die beiden Jahre 2023 und 2050 sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11 Künftige Entwicklung der Konstruktionstypen von Neubauten für ausgewählte Gebäudetypen in der Variante Höherer Anteil Holzbau

	Zeitpunkt	Massivbau	Holzbau	Skelettbau	Hybridbau	Total
Einfamilienhaus	2023	80%	8%	0%	12%	100%
	2050	24%	50%	1%	25%	100%
Mehrfamilienhaus	2023	84%	4%	0%	12%	100%
	2050	49%	25%	1%	25%	100%
Bürogebäude	2023	44%	1%	40%	15%	100%
	2050	20%	15%	45%	20%	100%
Schulgebäude	2023	70%	5%	5%	20%	100%
	2050	30%	20%	10%	40%	100%

Quelle: Dieses Projekt. Annahmen TEP Energy, Carbotech und ETH Zürich



Bei den Schulgebäuden bleibt der Anteil unverändert und entspricht damit dem Basis Szenario.

Der Anteil von Stroh/Strohderivaten an den Baumaterialien zur Dämmung steigt dabei linear von 0% im Basisjahr auf die im Jahr 2050 angenommenen Anteile gemäss Tabelle 12.

Tabelle 12 Anteil von Stroh/Strohderivaten an den Baumaterialien zur Dämmung im Jahr 2050

Bauelement	Massivbau	Holzbau	Skelettbau	Hybridbau
Dämmung Aussenwand	15%	15%	15%	15%
Dämmung Flachdach	20%	20%	20%	20%
Dämmung Steildach	20%	50%	20%	40%

Quelle: Dieses Projekt. Annahmen TEP Energy, Carbotech und ETH Zürich

Bei der Variante V3.1c Mehr MFH wird gegenüber dem Basis-Szenario ab dem Jahr 2023 angenommen, dass 25% der neu entstehenden EFH-EBF dem MFH Gebäudesektor zugeschlagen wird. Dabei wird zudem vereinfacht davon ausgegangen, dass die gesamte EBF gegenüber dem Basis-Szenario unverändert bleibt, um damit einen ceteris paribus Vergleich zu ermöglichen.

Neben den Konstruktionstypen sind auch die Entwicklung der Gebäudehülle im Sinne der energetischen Sanierung und des Neubaus für die Entwicklung der Emissionen relevant. Die Entwicklung der energetisch sanierten Flächen der Gebäudehülle werden im folgenden Kap 3.3.3 dargestellt.

3.3.3 Entwicklung der Gebäudehülle, energetische Neubau- und Erneuerungstätigkeit

Im Bereich Gebäudehülle wird die künftige Entwicklung der Erneuerungstätigkeit endogen im Modell bestimmt, dies aufgrund des Alters der Bauteile sowie der Wirtschaftlichkeit der energetischen Erneuerung im Vergleich zu einer Instandsetzung. Für das Basis-Szenario ergeben die Berechnungen mit dem GPM, dass die energetisch erneuerten Flächen im Bereich Gebäudehülle bei den opaken Bauteilen im Zeitverlauf zunehmen, je nach Bauteil um rund 15% bis 30%, siehe Tabelle 13. Einzig bei den Fenstern ist mit – 4% eine leichte Abnahme zu verzeichnen. Dies ist namentlich durch den Umstand zu erklären, dass Fenster bereits heute zu einem grossen Teil energetisch erneuert sind.

Tabelle 13 Energetisch erneuerte Flächen im Bereich Gebäudehülle im Basis-Szenario (Mittelwert der angegebenen Perioden in Mio. m² Bauteil pro Jahr)

	2023-2030	2031-2040	2041-2050	2041-2050/ 2023-2030
Aussenwandbekleidung	9.2	10.9	12.2	32%
Steildachwärmedämmung	3.3	3.3	3.7	14%
Flachdachwärmedämmung	6.1	6.6	6.9	14%
3-fach Verglasungen Fenster	2.7	2.4	2.6	-4%
Total	21.3	23.1	25.4	19%

Quelle: Berechnungen TEP Energy



Die Werte in Tabelle 13 können als plausibel angesehen werden: Bei einer geschätzten Gebäudehüllenfläche von rund 1400 bis 1500 Mio. m² (ausgehend von der EBF und einem typischen A/EBF-Verhältnis von rund 1.4 bis 1.5) ergibt sich eine energetische Erneuerungsrate von rund 1.5% pro Jahr für die Periode 2023 bis 2030. Dies ist deutlich mehr als die Rate der Periode 2000-2010 (siehe BFE-Synthesebericht Jakob et al. 2014), entspricht jedoch in etwa der Rate der Periode 2011 bis 2020, wie sie gemäss den Stichprobenerhebungen von TEP und UniNE in ca. 20 Kantonen im Auftrag des BFE (Projekt MISTEE) und der Kantone (Berichterstattung zu den CO₂-Emissionen) (Jakob et al. 2024) festgestellt wurde (siehe auch Jakob, Berti und Catenazzi 2024).

Werden dieselben Bauteile bei den Neubauten betrachtet und ins Verhältnis zum Total gesetzt, fällt auf, dass sich Wärmedämmungen und der Einsatz von Fenstern vom Neubaubereich hin zur energetischen Erneuerung des Gebäudebestands verschieben (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14 Energetisch erneuerte Flächen und Neubaufächen im Bereich Gebäudehülle im Basis-Szenario (Mittelwert der angegebenen Perioden in Mio. m² Bauteil pro Jahr)

Aussenwandbekleidung	2023-2030	2031-2040	2041-2050	2041-2050/ 2023-2030
Neubau	5.1	3.4	2.5	-51%
Erneuerung	9.2	10.9	12.2	32%
Total	14.4	14.3	14.7	3%
Steildachwärmedämmung	2023-2030	2031-2040	2041-2050	
Neubau	2.0	1.1	0.7	-66%
Erneuerung	3.3	3.3	3.7	14%
Total	5.3	4.4	4.4	-16%
Flachdachwärmedämmung	2023-2030	2031-2040	2041-2050	
Neubau	3.3	2.3	1.8	-45%
Erneuerung	6.1	6.6	6.9	14%
Total	9.3	8.8	8.7	-7%
Fenster	2023-2030	2031-2040	2041-2050	
Neubau	0.9	0.5	0.3	-67%
Erneuerung	2.7	2.4	2.6	-4%
Total	3.6	2.8	2.9	-20%
Gesamt (alle obigen Bauteile)	2023-2030	2031-2040	2041-2050	
Neubau	11.3	7.3	5.3	-53%
Erneuerung	21.3	23.1	25.4	19%
Total	32.5	30.4	30.7	-6%

Quelle: Berechnungen TEP Energy

Dies erklärt sich vor allem durch die allgemein rückläufige Neubautätigkeit, begründet durch das sich verlangsamende Flächenwachstum (siehe Kap. 2.2) und teilweise auch durch die Erhöhung der Erneuerungstätigkeit, weil sich der erneuerungsbedürftige Teil des Gebäudeparks aufgrund der Altersentwicklung vergrössert.

NB: Bei den übrigen Bauteilen wird auf das Alter und den typischen Lebenszyklus abgestützt; wirtschaftliche Gesichtspunkte werden nicht betrachtet.



In Variation zu den angenommenen Lebensdauern der Bauteile im Basis-Szenario wird bei der Variante *V3.4c Längere Nutzungszeiten* die Lebensdauer der Bauteile pauschal um den Faktor 1.5 verlängert (z.B. von 30 auf 45 Jahre) und bei der Sanierung der Gebäudehülle wird die Sanierungsrate des Basis-Szenarios durch 1.5 geteilt.

3.3.4 Materialeinsatz Erstellung Bauteile konstant

Der Materialeinsatz für die Erstellung der Bauteile ändert sich im Laufe der Zeit im Basis-Szenario. In der Variante *V3.2 Ohne Hebel Materialeinsatz* wird der Materialeinsatz für die Bauteile hingegen auf heutigem Niveau konstant belassen. Die unterstellten Konstruktionstypen hingegen ändern sich hier analog der Entwicklung im Basis-Szenario, wobei es grundsätzlich keine baujahrspezifischen Sensitivitäten nach Konstruktionstyp und Bauteil gibt.

3.3.5 Variation der Emissionsfaktoren Erstellung Gebäude

Im Basis Szenario wird unterstellt, dass sich die spezifischen Emissionsfaktoren KBOB für den Materialeinsatz zum Zielwert «KBOB Future» im Jahr 2050 entwickeln. Für die gebäudebezogenen Bereiche wie Tragwerk, Innenausbau, Gebäudehülle etc. sind die Emissionskoeffizienten (kg CO_{2eq} pro Bezugseinheit) im Anhang 2 in Tabelle 34 dokumentiert.

In der Variante *V3.3a Ohne Hebel KBOB EF 2050* wird jedoch angenommen, dass im Gegensatz dazu die spezifischen Emissionen Erstellungsmaterial Gebäude konstant bleiben. Die Konstruktionstypen- und Bauelement-Entwicklung verbleibt hier jedoch dynamisch wie im Basis-Szenario.

In der Variante *V3.3b Nur KBOB EF 2050* werden für das Jahr 2050 die Emissionsfaktoren «KBOB Future» zugrunde gelegt, wobei zwischen den Jahren 2023 und 2050 interpoliert wird. Jedoch variieren im Gegensatz zum Basis Szenario und der Variante *V3.3a*, bei der Variante *V3.3b* die Bauteile und Konstruktionstypen nicht, sondern verbleiben statisch wie im Jahr 2023.

Nachdem in den obigen Varianten im Wesentlichen auf das Mengengerüst und die Gebäude abgezielt wurde, werden in den kommenden Abschnitten die Emissionsfaktoren der Energieträger eingeführt und variiert.

3.4 Entwicklung der Endenergienachfrage und der Emissionsfaktoren Energie

In den folgenden Abschnitten wird auf die Annahmen und Berechnungsgrundlagen zu den Emissionen der Energieträger eingegangen, wobei zwischen den unterschiedlichen Scopes differenziert wird. Diese Emissionen, welche der Betriebsphase der Gebäude zugeordnet werden, werden zum einen durch die Endenergienachfrage nach den verschiedenen Energieträgern (Kap. 3.4.1) und zum anderen durch die Entwicklung der Emissionsfaktoren bestimmt (Kap. 3.4.2 bis Kap. 3.4.5).

3.4.1 Endenergienachfrage nach Energieträgern

Die Endenergienachfrage nach Energieträgern wird mit dem Gebäudeparkmodell berechnet. Hierzu sind u.a. Annahmen zu Energiepreisen und zu Verfügbarkeiten und Restriktionen von Energieträgern zu treffen. Im Basis-Szenario erfolgt dies unter Berücksichtigung der folgenden Prämissen:

- Bzgl. der Gebäudeenergieeffizienz wird davon ausgegangen, dass der Nutzenergiebedarf von Neubauten künftig etwas geringer sein wird im Vergleich zu den heutigen Neubauvorschriften. Beim Gebäudebestand erhöht sich die Nutz- und Endenergieeffizienz zum einen strukturell (wegen dem Rückbau von ineffizienten Altbauten, welche durch effizientere Neubauten ersetzt werden, siehe Annahmen im Kap. 3.3.1) und zum anderen durch die energetische Gebäudeerneuerung. Letztere wird modellendogen berechnet, dies basierend auf Annahmen zu Lebensdauer, Massnahmenkosten, Förderbeiträgen und Energiepreisen (inkl. CO₂-Abgabe).



- In Neubauten werden fossile Energieträger in Heizanlagen von Gebäuden ab sofort nur noch in geringem Ausmass und nach einer Übergangsfrist gar nicht mehr eingesetzt. Im GPM werden entsprechende Restriktionen gesetzt (ähnlich wie in Iten et al. 2017).
- Auch im Gebäudebestand sollen die fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas nicht mehr verwendet werden. Im Vergleich zum Neubaubereich erfolgt dies mit einer gewissen Verzögerung. Als Ersatz stehen im GPM v.a. Wärmepumpen (WP) und Fernwärme (FW) zur Verfügung, wobei davon ausgegangen wird, dass die räumliche Verfügbarkeit von FW künftig steigen wird. Motiviert durch die angestrebte Nutzung von Holz als Baumaterial wird auch die Nutzung von Energieholz für Heizungen im Gebäudebereich eingeschränkt.
- Es wird davon ausgegangen, dass Elektrodirekt- und -speicherheizungen sowie elektrische Warmwasser-Boiler beinahe vollständig ersetzt werden.
- Bei den übrigen Stromanwendungen Anwendungen, d.h. bei den in Gebäuden verwendeten Geräten und bei der Gebäudetechnik, werden deutliche Effizienzgewinne unterstellt, ähnlich wie bei den EP 2050+ (siehe Kemmler et al. 2021).

3.4.2 Scope 1 Emissionen fossile Energieträger

Im Scope 1 sind die Energieträger Heizöl und Erdgas von Relevanz. Verwendet werden die Emissionsfaktoren Faktenblatts des BAFU, wobei vom Bezugsjahr 2023 ausgegangen wird (BAFU, 2024). Demnach hat Heizöl einen Emissionsfaktor von 265.3 g/kWh und Erdgas von 201.2 g/kWh (beim Erdgas bezogen auf einen Heizwert von 10.4 kWh/m³). Dabei wird angenommen, dass sich die Scope 1 Emissionsfaktoren von Heizöl und Erdgas über die Zeit nicht wesentlich ändern.

3.4.3 Scope 2 und 3 Emissionen Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme: Grundlagen und Abgrenzung

Bei den Sekundärenergieträgern Strom und Fernwärme fallen THG-Emissionen sowohl im Scope 2 als auch im Scope 3 an:

- Unter Scope 2 werden die direkten Emissionen von Kraft- und Heizwerken bilanziert, die bei der Erzeugung der leitungsgebundenen Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme durch die Umwandlung (i.d.R. Verbrennung) von (i.d.R.) fossilen Energieträger entstehen.
- Unter Scope 3 werden die Emissionen der vorgelagerten Ketten der Bereitstellung der Energieträger Strom und Fernwärme bilanziert, d.h. die Emissionen der Extraktion, der Verarbeitung und des Transports von Brennstoffen sowie Emissionen, die bei der Erstellung der Heiz- und Kraftwerke sowie der Verteilinfrastrukturen (z.B. Netze) entstehen.

Datenseitig unterscheiden Lebenszyklusinventare traditionellerweise nicht zwischen den beiden Scopes 2 und 3; auch die Ökobilanzwerte der KBOB weisen nur die Scope 1 Emissionen und die Summe von Scope 1 bis 3 aus. Bei den Sekundärenergieträgern Strom und Fernwärme fallen unter Scope 1 keine Emissionen an, so dass die nachfolgenden Gesamtemissionen die beiden Scopes 2 und 3 umfassen mit Ausnahme der Varianten *V3.7 EF leicht reduziert* und *V3.8 EF konstant*, bei denen die Emissionen Scope 3 variiert werden.

Beim Strom werden die Emissionsfaktoren (Scopes 2 und 3 in der Summe) durch die inländische Produktion und durch den Import bestimmt, wobei es verschiedene Methoden gibt, Produktion, Import, Export und Verbrauch zu bilanzieren. Jakob, Bagemihl et al. (2023) unterschieden hierbei drei Bilanzmodelle (BM) BM2, BM3 und BM4. Im vorliegenden Bericht werden die Daten auf Basis des BM3 unterstellt, welches die Methode ist, nach welcher auch KBOB bilanziert.

Die je nach BM unterschiedlichen Emissionsbeiträge der einzelnen Kraftwerksarten am effektiven Emissionsfaktor Strom sind detailliert im Bericht zum Teilprojekt F4, »*Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich - Grundlagen für die Grenz- und Zielwertsetzung*« im dortigen Kapitel 8.5



dokumentiert. Die dortigen Ergebnisse basieren auf Daten, welche im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ erarbeitet wurden.

Bei der Fernwärme wird ebenfalls davon ausgegangen, dass sich zum einen der Input-Mix bei der Fernwärmeerzeugung in Richtung erneuerbaren Energiequellen entwickelt, wobei diese in zunehmendem Mass durch WP genutzt werden. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass sich die Emissionsfaktoren reduzieren. Bzgl. ersterer wird auf Annahmen von TEP Energy abgestützt und bzgl. letzterer auf die Quelle «KBOB Future». Die entsprechenden Annahmen und die gewichteten Emissionsfaktoren sind für das Basis-Szenario in Tabelle 15 dargestellt. Für die Variante *V2.1 leicht reduziert* wird pauschal angenommen, dass zwischen den Jahren 2023 und 2050 nur eine halb so hohe Reduktion erreicht wird.

Tabelle 15 Annahmen zu Technologie-Anteilen und Emissionsfaktoren bei der Fernwärmeerzeugung im Basis-Szenario

	Technologie-Anteile bei der Fernwärmeerzeugung				Emissionsfaktoren			
	2023	2025	2035	2050	2023	2025	2035	2050
Heizzentrale Gas	5%	5%	5%	0%	302	302	302	302
Heizzentrale Holz	15%	15%	10%	13%	25	24	21	17
Heizkraftwerk Holz	15%	10%	5%	0%	22	21	19	15
Heizzentrale EWP ARA (JAZ 3.4)	10%	10%	15%	25%	46	43	30	14
Heizzentrale EWP GW (JAZ 3.1)	10%	10%	15%	15%	56	54	41	27
Heizzentrale EWP ES (JAZ 3.1)	0%	5%	15%	17%	64	61	45	25
Blockheizkraftwerk Biogas	5%	5%	5%	5%	61	60	57	54
FW mit Nutzung Kehrriechwärme, Durchschnitt Netze CH	40%	40%	30%	25%	67	65	57	47
Total	100%	100%	100%	100%	62	61	54	28

Quelle: KBOB Future und TEP Energy

Auf Basis der in diesem Kapitel beschriebenen Grundlagen werden nachfolgend die konkreten Emissionsfaktoren für die Scopes 2 und 3 berechnet (siehe Kap. 3.4.4 respektive 3.4.5).

3.4.4 Emissionen Scope 2 Energieträger

Für die zeitliche Entwicklung der Scope 2 Emissionsfaktoren im Basis Szenario und in der Variante V2.1 «leicht reduziert» werden die in der Tabelle 16 dargestellten Werte verwendet. Die Darstellung der Werte der Variante V2.2 *EF konstant* entfällt aus Trivialitätsgründen. Folgende Annahmen werden zugrunde gelegt:

- Im Basis-Szenario wird beim Strom auf das BM3 und die Ergebnisse des Teilprojekts F4 für das Jahr 2050 abgestützt.
- Bei der Fernwärme ist der prozentuale Rückgang der Emissionen in der Variante *V2.1 leicht reduziert* halb so gross wie im Basis Szenario.



Tabelle 16 Scope 2 Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme in g/kWh für das Basis-Szenario und Variante V2.1

	2023	2030	2040	2050	2030/2023	2040/2023	2050/2023
Basis-Szenario (stark reduziert)							
Strom	85	53	21	11	-38%	-76%	-87%
Fernwärme	41	39	31	18	-6%	-25%	-58%
Variante V2.1 leicht reduziert							
Strom	85	69	49	35	-19%	-43%	-59%
Fernwärme	41	40	36	29	-3%	-13%	-29%

Quelle: TEP, eigene Berechnungen

3.4.5 Emissionsfaktoren Energieträger Scope 3

Die Emissionen der Bereitstellung der Endenergieträger aller Energieträger werden im Scope 3 (Kategorie 3) des GHG protocols bilanziert. Solche Emissionen fallen bei den fossilen Energieträgern Erdgas und Heizöl, bei den erneuerbaren Energieträgern Holz und Biogas und auch bei den Sekundärenergieträgern Strom und Fernwärme an.

Als Varianten gegenüber der Entwicklung Energieträger im Basis-Szenario «starke Reduktion» werden mit V3.7 *EF leichte Reduktion* und mit V3.8 *EF konstant* die Emissionsfaktoren entsprechend variiert angenommen. Die Entwicklung der Emissionsfaktoren sind in Tabelle 17 dargestellt. Aus Trivialitätsgründen entfällt die Darstellung der Werte der Variante konstante Emissionsfaktoren.



Tabelle 17 Scope 3 Emissionsfaktoren Energieträger in g/kWh für das Basis-Szenario und für die Variante V3.7 leicht reduziert

	2023	2030	2040	2050	2030/2023	2040/2023	2050/2023
Basis Szenario (stark reduziert)							
Heizöl	59	50	39	27	-14%	-34%	-55%
Erdgas	29	27	24	22	-6%	-15%	-24%
Holz	21	17	13	8	-15%	-37%	-59%
Elektrizität	40	41	27	24	4%	-32%	-40%
Kohle	64	61	55	50	-6%	-14%	-22%
Fernwärme	21	19	15	11	-10%	-28%	-48%
Solarthermie	41	38	35	32	-6%	-14%	-22%
Biogas	124	122	120	118	-1%	-3%	-5%
Variante V3.7 leicht reduziert							
Heizöl	59	55	49	43	-7%	-17%	-27%
Erdgas	29	28	26	25	-4%	-9%	-14%
Holz	21	19	17	15	-7%	-17%	-27%
Elektrizität	40	37	32	28	-8%	-19%	-29%
Kohle	64	62	60	57	-3%	-7%	-11%
Fernwärme	21	20	18	16	-5%	-14%	-24%
Solarthermie	41	38	35	32	-6%	-14%	-22%
Biogas	124	123	122	121	-1%	-2%	-2%

Quelle: TEP, eigene Berechnungen

3.5 Überblick Ergebnisse Varianten

Nachfolgend sind im oberen Teil der Tabelle 18 die jährlichen Emissionsmengen des Jahres 2023 sowie des Basis-Szenario und der Varianten für das Jahr 2050 dargestellt. Hierbei sind die Werte, welche gemäss Definition der Szenario-Varianten und -Sensitivitäten tangiert sind, fett hervorgehoben. Im unteren Teil der Tabelle sind die prozentualen Veränderungen im Vergleich zum Basis Szenario dargestellt.

Im Jahr 2023 betragen die jährlichen Emissionen der Phase Betrieb rund 20 Mt, wovon 12 Mt auf direkte Emissionen durch die Verwendung von Öl- und Gasheizungen zurückzuführen sind. Die jährlichen Emissionen Scope 3 Erstellung betragen für das Jahr 2023 9.6 Mt. Im Basis-Szenario werden die Emissionen der Phase Betrieb um rund 90% auf 2.3 Mt reduziert. Die Emissionen der Phase Erstellung reduzieren sich im Basis-Szenario im Jahr 2050 auf 4.1 Mt pro Jahr, d.h. um 57%.

Aus der Analyse der Ergebnisse der Szenario-Varianten und -Sensitivitäten lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten, gegliedert nach den Phasen Betrieb und Erstellung.

Erkenntnisse zur Phase Betrieb:

- Bei den betrieblichen Emissionen ist ein Grossteil der Emissionsreduktion auf die Substitution der fossilen Energieträger in Gebäuden zurückzuführen, d.h. auf die Reduktion der Scope 1 Emissionen.



- Eine Reduktion der Scope 2 Emissionen bedingt im Wesentlichen eine Reduktion der entsprechenden Emissionsfaktoren. Die Endenergieträger Strom und Fernwärme, welche die Scope 2 Emissionen verursachen, gehen bereits im Basis-Szenario stark zurück. Bereits mit der Variante leichte Reduktion wird schon ein grosser Teil des Potentials gehoben. Dies erklärt sich dadurch, dass die absoluten Abweichungen der spezifischen Emissionsfaktoren Strom für das Basis Szenario und die Variante 2.1 *leicht reduziert* nicht ausgeprägt sind.
- Für die Emissionen Scope 3 Energieträger ist im Basis Szenario die Reduktion von 4.4 Mt im Jahr 2023 auf 1.4 Mt im Jahr 2050 sehr signifikant. Die Reduktion der Scope 3 Emissionen der Phase Betrieb sind sowohl auf eine Reduktion der Verwendung von Öl und Gas in Gebäuden als auch auf die Reduktion der Emissionsfaktoren zurückzuführen. Begründung: auch bei konstanten Scope 3 EF (V3.8) gehen die Scope 3 Emissionen der Phase Betrieb im Vergleich zu 2023 zurück, und zwar von 4.5 Mt auf 2.1 Mt.

Erkenntnisse zur Phase Erstellung:

- Die Reduktion der Emissionen Erstellung wird vor allem durch die Reduktion der entsprechenden Emissionsfaktoren und weniger durch weitere Massnahmen verursacht. Beispielsweise haben die Varianten «weniger Abrisse», «mehr Holz» oder «mehr MFH statt EFH» kaum einen Einfluss auf die Scope 3 Emissionen Erstellung.⁷ Es sind vor allem die Varianten mit den spezifischen Emissionsfaktoren «KBOB Future», die einen entscheidenden Einfluss auf die Scope 3 Emissionen haben. Denn sinken diese nicht (V3.3a), so bleiben die Emissionen auf dem Niveau von 9.2 Mt im Jahr 2050 und dies bei gleichzeitiger dynamischer Entwicklung der anderen Parameter wie im Basis Szenario unterstellt. Belässt man hingegen alle Parameter auf dem Level des Jahres 2023 und reduziert lediglich die Emissionsfaktoren KBOB (V3.3b), so hebt diese Variante mit 4.3 Mt fast vollständig das Reduktionspotential des Basis Szenarios mit 4.1 Mt.
- Mit der Verlängerung der Lebensdauer (V3.4c) lässt sich gegenüber dem Basis Szenario (4.1 Mt) noch eine weitere Reduktion auf 3.2 Mt erwirken. Bei den Scope 1 Emissionen bedingt die Variante V3.4 c *Verlängerte Lebensdauer* zwar einen geringfügigen Anstieg gegenüber dem Basis-Szenario von 0.1 Mt, aber im Total über alle Phasen resultiert dennoch eine deutliche Reduktion.

Auf die meisten dieser Erkenntnisse wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen, indem die Annahmen und die Ergebnisse analysiert und begründet werden. Sie bilden die Basis für die Beantwortung der einzelnen Forschungsfragen in den Kapiteln. 4 bis 8.

⁷ Diese Befunde werden in den nachfolgenden Kapiteln weitergehend begründet.



Tabelle 18 THG-Emissionen (Mio. t pro Jahr) aus Betrieb und Erstellung für das Jahr 2023 und das Jahr 2050 für das Basis-Szenario und für verschiedenen Szenariovarianten/Sensitivitäten

	Betrieb				Erstellung	Total
	Scope 1	Scope 2	Scope 3 (Energie-träger)	Total	Scope 3	
Basis 2023	12.2	3.8	4.5	20.5	9.6	30.1
Basis 2050	0.6	0.5	1.3	2.4	4.1	6.5
V2.1 EF Scope 2 leicht reduziert	0.6	1.6	1.3	3.5	4.1	7.6
V2.2 EF Scope 2 konstant	0.6	3.6	1.3	5.5	4.1	9.6
V3.1a Konstante Konstruktionstypen	0.6	0.5	1.3	2.4	9.3	11.7
V3.1b Mehr Holz	0.6	0.5	1.3	2.4	4.1	6.5
V3.1c Shift EFH zu MFH	0.6	0.5	1.3	2.4	4.1	6.6
V3.2 Ohne Hebel Materialeinsatz (konstante Bauteile)	0.6	0.5	1.3	2.4	9.7	12.1
V3.3a Erstellung mit konstanten EF (ohne Future KBOB)	0.6	0.5	1.3	2.4	9.2	11.7
V3.3b Erstellung: nur «KBOB Future»	0.6	0.5	1.3	2.4	4.3	6.7
V3.3c Weitergehende Reduktion EF	Keine Modellrechnung durchgeführt, Effekt abgeschätzt, siehe Kap. 7.4.2					
V3.4a Weniger Abrissrate	0.6	0.5	1.3	2.5	4.0	6.5
V3.4b Weniger EBF	0.5	0.5	1.3	2.4	3.9	6.3
V3.4c Verlängerte Lebensdauer	0.6	0.5	1.4	2.5	3.2	5.7
V3.7 EF ET Scope 3 leicht reduziert	0,6	0,5	1,6	2,7	4,1	6,8
V3.8 EF ET Scope 3 konstant	0.6	0.5	2.1	3.2	4.1	7.4
Abweichung im Vergleich zum Basis-Szenario 2050						
V2.1 EF Scope 2 leicht reduziert	0%	188%	0%	42%	0%	15%
V2.2 EF Scope 2 konstant	0%	562%	0%	124%	0%	46%
V3.1a Konstante Konstruktionstypen	0%	0%	0%	0%	125%	79%
V3.1b Mehr Holz	0%	0%	0%	0%	0%	0%
V3.1c Shift EFH zu MFH	-1%	0%	0%	0%	1%	0%
V3.2 Ohne Hebel Materialeinsatz (konstante Bauteile)	0%	0%	0%	0%	136%	85%
V3.3a Erstellung mit konstanten EF (ohne Future KBOB)	0%	0%	0%	0%	125%	78%
V3.3b Erstellung: nur «KBOB Future»	0%	0%	0%	0%	4%	3%
V3.4a Weniger Abrissrate	2%	1%	1%	1%	-2%	-1%
V3.4b Weniger EBF	-2%	-2%	-2%	-2%	-6%	-4%
V3.4c Verlängerte Lebensdauer	3%	2%	2%	2%	-21%	-13%
V3.7 EF ET Scope 3 leicht reduziert	0%	0%	19%	10%	0%	4%
V3.8 EF ET Scope 3 konstant	0%	0%	60%	33%	0%	12%

Quelle: Berechnungen TEP Energy.



4 Zieldefinition Netto-Null Betrieb und Erstellung

F1.1: Zieldefinition: Was bedeutet Netto-Null in Bezug auf die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudeparks Schweiz verursachten THG-Emissionen (THGE) bis 2050 unter Einbezug von Scope 1, 2 und 3?

Aus klimawissenschaftlicher Sicht ist davon auszugehen, dass das verbleibende Emissionsbudget nur noch sehr begrenzt ist, insbesondere wenn ein Ziel von «well below 2°C» oder gar von max. 1.5°C Erderwärmung eingehalten werden soll. Dieses beschränkte Budget lässt sich mit verschiedenen Ansätzen auf die einzelnen Länder und auf die einzelnen Emissionssektoren allozieren. Wir berechnen das Budget basierend auf zwei Ansätzen: zum einen beziehungsweise auf die Vorgaben des KIG (Kap. 4.1) und zum anderen mit einer Zuordnung des globalen Emissionsbudgets auf den Gebäudebereich der Schweiz (Kap. 4.2).

4.1 Emissionsbudget des Gebäudebereichs (inkl. Emissionen im Ausland), abgeleitet aus den Vorgaben des KIG

Im Art. 4 des KIG werden Richtwerte für einzelne Sektoren vorgegeben. Demnach sollen die Treibhausgasemissionen in der Schweiz in den folgenden Sektoren gegenüber 1990 wie folgt vermindert werden:

- a) Im Sektor Gebäude:
 1. bis 2040: um 82%
 2. bis 2050: um 100%
- b) im Sektor Verkehr
 1. bis 2040: um 57%
 2. bis 2050: um 100%
- c) Im Sektor Industrie
 1. bis 2040: um 50%
 2. bis 2050: um 90%

Da das KIG einen sektoralen Ansatz verfolgt (und nicht einen Lebenszyklus-Ansatz) und da das KIG zudem keine Aussagen zum Energieumwandlungssektor macht, sind zusätzliche Annahmen zu treffen, um das Emissionsbudget für den Gebäudebereich aus den Vorgaben des KIG abzuleiten. Ausgehend von einer inhaltlichen Perspektive wird dabei von folgender Zuordnung ausgegangen:

- Die direkten Emissionen aus der Nutzung von fossilen Energieträgern sollen wie die Vorgaben des KIG bzgl. des Sektors Gebäude reduziert werden.
- Die indirekten Emissionen aus der Bereitstellung von Sekundär-Energieträgern sollen sich am Reduktionspfad der Gebäude orientieren, d.h. das Energiesystem in der Schweiz und in Europa sollen bis 2050 fossilfrei betrieben werden. Dies betrifft die Emissionen «aus dem Kamin» der Energiewandler (Scope 2), nicht jedoch die «grauen Emissionen», d.h. die Emissionen aus der Herstellung von Materialien wie z.B. Windkraft- oder PV-Anlagen (Scope 3, siehe nächster Punkt)
- Die «grauen Emissionen», d.h. die Emissionen aus der Herstellung und Installation von Materialien, Gebäudeelementen, Gebäudetechnik und Energieanlagen (Scope 3, siehe



nächster Punkt) sollen wie die Emissionen des Sektors Industrie sinken. Dies gilt auch für die Emissionen aus der Produktion von Biogas, welche auch dem Scope 3 zugeordnet werden.

Um die Emissionszielpfade für die Emissionen der verschiedenen Scopes zu berechnen, werden konkret folgende Annahmen getroffen:

- Scope 1 (direkte Emissionen Öl und Gas):
 - 1990 bis 2020: 100% der brennstoffbedingten Emissionen der Sektoren Haushalte und Dienstleistungen der CO₂-Statistik des BAFU (Stand Juli 2023). NB: Die Gebäude der Sektoren Industrie und Landwirtschaft sind in der CO₂-Statistik des Bundes nicht enthalten, sie sind jedoch Bestandteil der Systemgrenze dieses Projekts. Mit Verweis auf den Brennstoffverbrauch für Raumwärme und Warmwasser von 13.1 PJ (gemäss BFE-Ex-post Analysen von 2024) emittierten die Gebäude des Industriesektors ca. 0.8 Mt CO₂ im Jahr 2020 (Annahme Emissionsfaktor grob geschätzt).
 - Zwischen 2020 und 2040: linear interpoliert zwischen 2020 und 2040
 - Ab 2040 Absenkpfad KIG, d.h. 18% der Emissionen von 1990 für das Jahr 2040 und 0 Emissionen im Jahr 2050
- Scope 2 (indirekte Emissionen aus der Erzeugung von Strom, FW etc., sofern dies direkte betriebliche Emissionen verursacht):
 - 2020: gleich gesetzt mit den Ergebnissen der Modellrechnungen (rückwärts extrapoliert anhand der Ergebnisse der Jahre 2023 und 2024).
 - 1990 bis 2020: zurückgerechnet ab 2020 unter folgender Annahme: 5% relative Reduktion pro Jahrzehnt ab 1990 (grobe Abschätzung TEP mit Verweis auf eine Reduktion des Emissionsfaktors Strom aufgrund von CO₂-Emissionsreduktionen bei der Stromerzeugung in Europa).
 - Ab 2020 wird der derselbe relative Absenkpfad für Gebäude unterstellt.
- Scope 3 Gebäude:
 - 2020: gleich gesetzt mit den Ergebnissen der Modellrechnungen (rückwärts extrapoliert anhand der Ergebnisse der Jahre 2023 und 2024).
 - 1990 bis 2020: zurückgerechnet aus dem Stand 2020 mit dem Index der Industrie der CO₂-Statistik.
 - Ab 2040 KIG, Sektor Industrie, d.h. 50% des Standes von 1990 im Jahr 2040, 10% im Jahr 2050.
 - Zwischen 2020 und 2040: linear interpoliert.
- Scope 3 Energieträger: ähnlicher Ansatz wie Scope 3 Gebäude, wie folgt:
 - 2020: gleich gesetzt mit den Ergebnissen der Modellrechnungen (rückwärts extrapoliert anhand der Ergebnisse der Jahre 2023 und 2024).
 - 1990 bis 2020: zurückgerechnet aus dem Stand 2020 mit dem Index der Industrie der CO₂-Statistik.
 - Ab 2040 KIG, Sektor Industrie, d.h. 50% des Standes von 1990 im Jahr 2040, 10% im Jahr 2050
 - Zwischen 2020 und 2040: linear interpoliert.

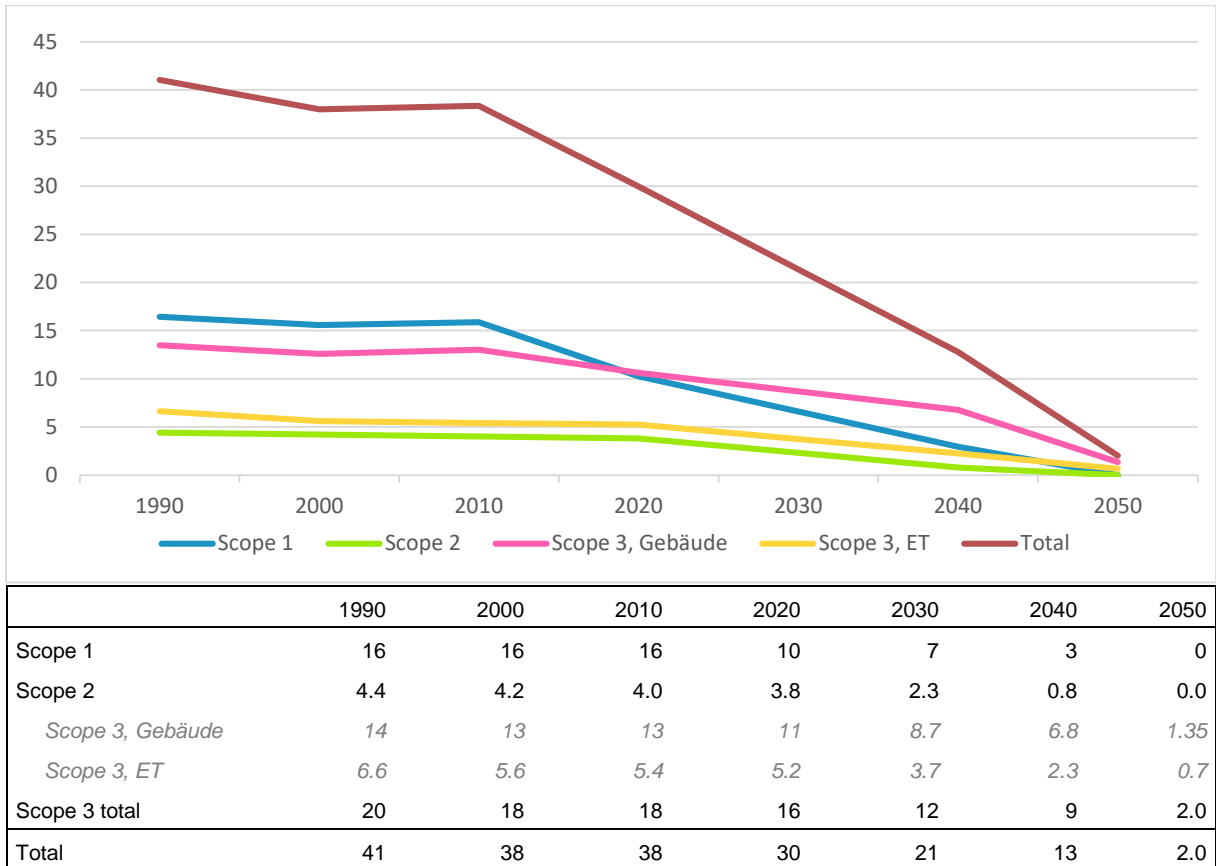


Abbildung 9 Emissionspfad des Gebäudesektors (angenähert durch Scope 1) und des Gebäudebereichs der Schweiz (inkl. Scope 3) in Mio. t CO₂ pro Jahr, abgeleitet aus KIG gemäss den Annahmen im Text. Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy.

Das Emissionsbudget ergibt sich durch die Berechnung der Fläche unter der Kurve der Emissionspfade. Für die Berechnung des Emissionsbudget mit Referenz zu KIG werden folgende Annahmen getroffen:

- Emissionen 1990 bis 2020 wie tatsächlich erfolgt (bzw. wie obenstehend berechnet)
- Emissionen 2020 bis 2050: Fläche unter Ziel-Absenkepfad (Abbildung 9)

Als Ergebnis ergibt sich ein Gesamtbudget für den Gebäudebereich von 1605 Mt. CO_{2äqu.}. Dieses ist etwa 3 mal so gross wie das Budget für Direktmissionen (Scope 1, 595 Mt CO_{2äqu.}).

Für den Gebäudebereich als Ganzes wurden zwischen 1990 und 2020 ca. 1110 Mt CO_{2äqu.} bzw. 448 Mt CO_{2äqu.} (Scope 1) emittiert. Dies bedeutet, dass das Gesamtbudget im Jahr 2020 bereits zu 64% und das der direkten Emissionen zu 75% aufgebraucht war (siehe Tabelle 19). Damit die Vorgaben des KIG eingehalten werden, verbleibt bis 2050 ein Emissionsbudget von rund 500 Mt CO_{2äqu.} insgesamt und rund 150 Mt CO_{2äqu.} für direkte Emissionen (ab 2020). Beim Emissionslevel von 2023 (witterungsneutral) wäre dies bereits nach 16 Jahren (Scope 1) bzw. nach 18 Jahren (alle Scopes) aufgebraucht, d.h. im Jahr 2036 bzw. 2038. Damit es bis 2050 ausreicht, sind die Emissionen gemäss den in Abbildung 9 aufgeführten Pfaden zu senken bzw. darf die Summe der verschiedenen Scopes nicht überschritten werden.



Tabelle 19 Verbleibendes Budget für Gebäudesektor und Gebäudebereich der Schweiz (inkl. Scope 3), abgeleitet aus den Vorgaben des KIG

	Total 1990 bis 2050	Davon bis 2020	Restbudget	Total 1990 bis 2050	Davon bis 2020	Restbudget
Scope 1	595	448	147	100%	75%	25%
Scope 2	174	124	50	100%	71%	29%
Scope 3, Gebäude	591	377	214	100%	64%	36%
Scope 3, Energieträger	259	170	90	100%	65%	35%
Scope 3 total	851	547	304	100%	64%	36%
Total	1.620	1.118	501	100%	69%	31%

Quelle: Berechnungen TEP Energy

4.2 Zuordnung des globalen Emissionsbudgets auf den Gebäudebereich der Schweiz

Wir stützen uns auf den Ansatz von Alvaux et al. (2023) ab, bei dem das Budget im ersten Schritt auf die Emissionssektoren und im zweiten Schritt auf die Länder verteilt wird (dies im Unterschied der meisten übrigen Ansätze, die umgekehrt vorgehen). Das methodische Vorgehen ist in Abbildung 10 dargestellt.

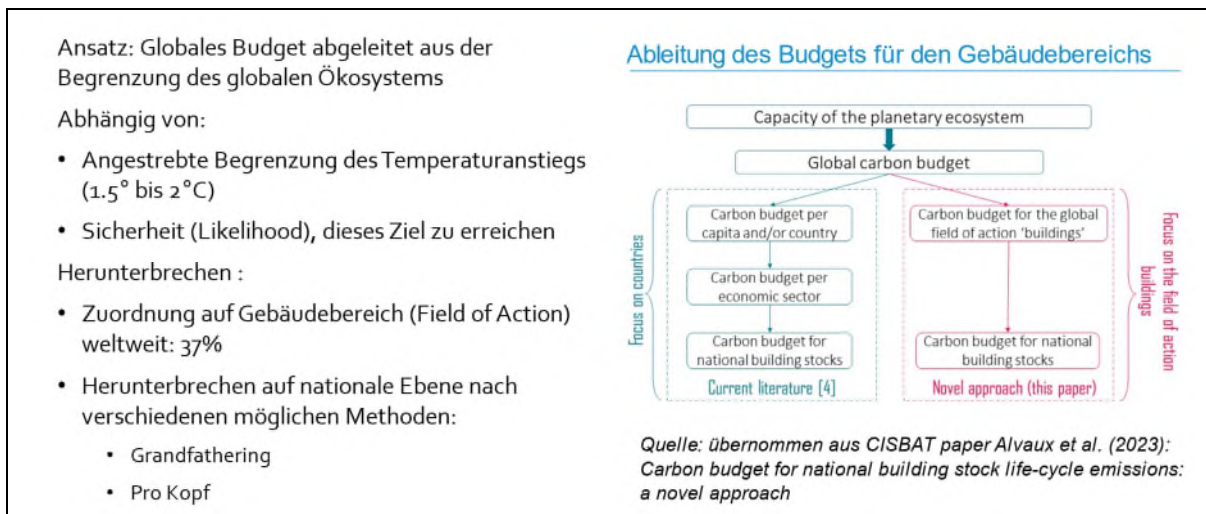


Abbildung 10 Methodisches Vorgehen zum Bestimmen des Emissionsbudgets für den Gebäudereich für die Schweiz ausgehend vom globalen Emissionsbudget.

So heruntergebrochen vom globalen Gesamtbudget beträgt das Budget für den Gebäudebereich (Field of Action für die Schweiz) bei einem Ziel, max. 1.7°C Erwärmung mit 67% Sicherheit zu erreichen, rund 200 Mt (Grandfathering) bzw. 42 Mt (pro Kopf-Ansatz). Im Vergleich zum Wert gemäss KIG (rund 500 Mt) liegen diese Budgetschätzungen rund gut 60% bzw. über 90% tiefer.



Tabelle 20 Verbleibendes Emissions-Budget (Mt CO_{2äqu}) für den Gebäudebereich der Schweiz (inkl. Scope 3), berechnet mit verschiedenen Top-down Ansätzen gemäss Alvaux et al. (2023).

		Grandfathering (GF)			Equal-per-capita (EPC)			Equal-per-capita + carbon debt (EPC-PA)		
Likelihood (%)		50%	67%	83%	50%	67%	83%	50%	67%	83%
Global warming of °C	1.5°C	274	202	130	147	108	70	80.9	42	3
	1.7°C	527	419	311	283	225	167	217	158	100
	2°C	888	744	563	477	399	302	410	333	236

Quelle: Berechnungen TEP Energy gemäss Alvaux et al. (2023)

4.3 Fazit

Netto-Null in Bezug auf die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudebereichs Schweiz verursachten THG-Emissionen bis 2050 unter Einbezug von Scope 1, 2 und 3 bedeutet, dass die Emissionen deutlich stärker gesenkt werden müssten als das KIG vorgibt, wenn das 1.5°C Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% eingehalten werden soll. Die Vorgaben des KIG erlauben in etwa das Einhalten des 2°C-Ziel gemäss dem Grandfathering-Prinzip mit einer Wahrscheinlichkeit von 83%. Das 1.7°C-Ziel wird dabei in etwa mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% eingehalten, hingegen wird das 1.5°C-Ziel klar verfehlt (das verbleibende Budget dürfte mit 274 Mt nur etwa halb so gross sein). Bei den beiden anderen Allokationsansätzen gemäss Alvaux et al. (2023) müssten die Emissionen noch deutlich stärker und rascher gesenkt werden, um die entsprechenden Budgetwerte einhalten zu können.



5 THG-Reduktionen Erstellung und Betrieb

F1.2 Welche THGE-Reduktionen und welche Negativemissionen werden von der Erstellung und welche THGE-Reduktionen vom Betrieb erwartet, um Netto-Null im Gebäudebereich in einer Lebenswegbetrachtung zu erreichen?

Diese Frage wird beantwortet, indem zunächst eine Übersicht über die Emissionspfade des Basis-Szenario gegeben wird (Kap. 5.1). Anschliessend wird in die einzelnen Bereiche tiefer eingetaucht, um die verschiedenen Reduktionsbeiträge («Hebel») sichtbar zu machen (Kap. 5.2).

5.1 Ergebnisse in der Übersicht

In Abbildung 11 sind zum einen die Emissionen der Vergangenheit (bis 2020) und des aus dem KIG abgeleiteten Pfads dargestellt (gemäss Darlegungen im Kap. 4.1). Zum anderen sind die mit dem GPM berechneten Emissionen im Vergleich dargestellt (ab 2020). Hierbei ist bzgl. des Niveaus folgender Hinweis zu beachten: Die Scope 1 Emissionen der CO₂-Statistik beinhalten nur Gebäude des Haushalt- und Dienstleistungssektors und sind nicht witterungsbereinigt, die mit dem GPM berechneten Emissionen umfassen alle Gebäude (inkl. Industrie- und Landwirtschaftssektor) und sind witterungsbereinigt.

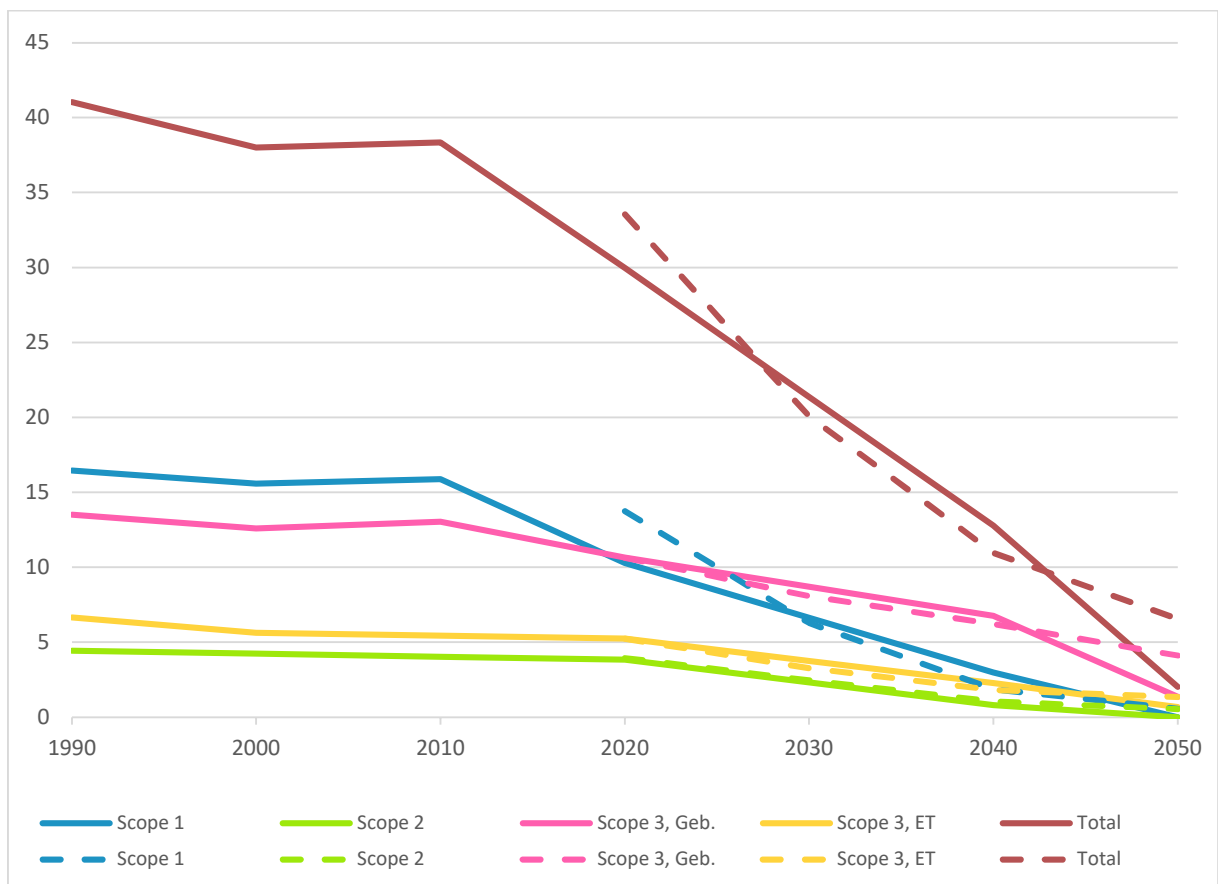


Abbildung 11 Emissionspfade der Scopes 1 bis 3 des Basis-Szenario im Mt. CO₂ äqu. im Vergleich zu den entsprechenden Zielpfaden gemäss KIG. Legende: durchgezogene Linien: Emissionspfade gemäss Abbildung 9 und davorstehende Erläuterungen), gestrichelte Linien: Berechnungen GPM (dieses Projekt, Basis Szenario). Abkürzungen: Geb. = Gebäude, ET= Energieträger.



Festhalten lassen sich folgende Ergebnisse:

- Im Jahr 2020 lagen die gesamten Emissionen über alle Scopes gerechnet etwas über dem aus dem KIG abgeleiteten Zielpfad (siehe Kap. 4.1). Hauptgründe für die Abweichung im Jahr 2020 sind die Emissionen des Scopes 1, begründet durch Unterschiede zwischen Statistik und Modell bzgl. Witterung (Effekt: ca. 12%) und bzgl. Systemgrenze (Effekt Industriegebäude ca. 0.8 Mt CO₂).
- Die Ziele werden bis 2040 weitgehend eingehalten und teilweise leicht unterschritten.
- Die Ziele 2050 werden verfehlt, es verbleiben Rest-Emissionen von jährlich ca. 6.5 Mio. t CO_{2eq}.

Fazit: Im Jahr 2050 verbleiben gemäss den Berechnungsergebnissen also Rest-Emissionen von ca. 6.5 Mio. t CO_{2 äqu.} pro Jahr. Dabei entfallen 4.1 Mt auf die Scope 3 Emissionen der Gebäude, 1.3 Mt auf die Scope 3 Emissionen der Energieträger und 1.1 Mt auf die Scope 1 und 2 Emissionen.

5.2 Beiträge der verschiedenen Hebel zur Emissionsreduktion

Die zu erwartenden THGE-Reduktionen von der Erstellung und vom Betrieb sowie die erforderlichen Negativemissionen (NE) werden zwischen heute (2023) und 2050 dargestellt, zum einen aufgeteilt auf die drei Scopes und zum anderen auf die Bereiche Betrieb und Erstellung (siehe Tabelle 21). Daraus wird ersichtlich:

- Bei den Scope 1 Emissionen, also den Emissionen aus der Verbrennung von Heizöl und Erdgas, lässt sich eine Reduktion auf beinahe Null erreichen. Gestützt auf die getroffenen Annahmen verbleiben gemäss Berechnungen mit dem GPM am Ende der Betrachtungsperiode rund 5% der Emissionen gegenüber dem Stand 2023.
- Bei den Scope 2 Emissionen ist ebenfalls eine hohe Reduktion zu erwarten. Allerdings ist diese mit 88% etwas geringer und damit verbleiben im Jahr 2050 noch rund 14% der Emissionen des Stands von 2023. Dies hat damit zu tun,
 - dass die Nachfrage nach Energieträgern mit Scope 2 Emissionen, insbesondere Elektrizität für Wärmepumpen (dezentral und in Fernwärme-Zentralen), zunimmt.
 - dass die Emissionsfaktoren der Scope 2 Energieträger nicht auf 0 abnehmen, siehe Tabelle 16 im Kap. 3.4.4.
- Bei den Scope 3 Emissionen ist die Reduktion ebenfalls ausgeprägt, wenn auch etwas weniger weitreichend im Vergleich zu den Scope 2 Emissionen. Zu unterscheiden ist zwischen:
 - Scope 3 Gebäude, d.h. Emissionen aus Konstruktion, Erneuerung und Rückbau der Gebäude. Hier ist eine Reduktion von knapp 60% zu verzeichnen. Dies ist zum einen auf die festgestellte Reduktion der Bautätigkeit zurückzuführen (siehe Kap. 2.2.1 und 3.2.1 und zum anderen auf die Annahmen zu Konstruktionstypen, Bauteileinsatz und -materialisierung (Kap. 3.3.1 - 3.3.4) sowie auf die Reduktion der Emissionsfaktoren Erstellung (Kap. 2.4.1 und Tabelle 34 im Anhang). Gegenläufig zur reduzierten Bautätigkeit im Neubaubereich wirkt die Mengenausweitung bei der Erneuerung des Gebäudebestands von rund 25%; dies ist in der erwähnten Reduktion von 60% bereits eingerechnet.
 - Scope 3 Energie, d.h. Emissionen in der Bereitstellung von Energieträgern und Energieinfrastruktur. Diese Emissionen reduzieren sich zum einen durch die Reduktion der Energienachfrage der Gebäude (siehe Kap. 7.1.1), sichtbar gemacht durch den Hebel «Scope 3 EF konstant». Zum anderen wird für die vor- und nachgelagerten Ketten der Energieträgerbereitstellung ebenfalls eine Reduktion der Emissionen durch die Optimierung der Prozesse und die Dekarbonisierung der verwendeten Energie angenommen.

Bei den Emissionen der Scopes 1 und 2 ergibt sich eine Emissionsreduktion von 93% und bei den Emissionen des Scopes 3 eine solche von 62%. Über alle drei Scopes zusammen ergibt sich eine



Reduktion zwischen 2023 und 2050 von 78%. Trotz dieser deutlichen Emissionsreduktionen verbleiben am Ende der Betrachtungsperiode im Basis-Szenario im Jahr 2050 rund 6.5 Mt pro Jahr. Diese stammen zum grössten Teil aus dem Bau und der Erneuerung der Gebäude (insgesamt rund 4.1 Mt, pro Jahr, ohne Emissionen Erstellung aus der Nutzung von Energieträgern während der Betriebsphase) und zu einem geringeren Teil aus dem Betrieb der Gebäude (rund 2.4 Mt. pro Jahr, wobei knapp 1.1 Mt den Scopes 1 und 2 zuzuordnen ist und knapp 1.3 Mt. pro Jahr dem Scope 3 der Energieträger).

Mit diesen Ergebnissen ergibt sich für das Jahr 2050 im Basis-Szenario ein Bedarf an Negativemissionen von rund 6.5 Mt pro Jahr. Dies würde die aus dem KIG abgeleiteten Beträge von 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr bei weitem übersteigen. Deshalb sind nebst den im Basis-Szenario berücksichtigten Hebeln weitere Massnahmen wichtig, um den Bedarf an NE auf ein darstellbares Mass zu reduzieren (z.B. abgeleitet aus dem KIG oder gemäss Potenzialbetrachtungen im Kap. 6). Die Beiträge solcher Massnahmen werden im Kap. 6 abgeschätzt; weitere sind ggf. im Nachgang an dieses Projekt zu eruieren.

Tabelle 21 Entwicklung der THGE (Mt pro Jahr) je pro Scope zwischen 2023 und 2050 und THGE-Reduktionen (%) im Basis-Szenario. Hinweis: Die Summe von gerundeten Werten ist u.U. nicht exakt identisch mit der gerundeten Summe.

	2023	2030	2040	2050	2030/2023	2040/2023	2050/2023
Scope 1	12.2	6.3	1.9	0.6	-48%	-85%	-95%
Scope 2	3.8	2.5	1.1	0.5	-35%	-72%	-86%
Scope 1+2	16.0	8.7	2.9	1.1	-45%	-82%	-93%
Scope 3, Gebäude	9.6	8.1	6.2	4.1	-16%	-35%	-57%
Scope 3, Energieträger	4.5	3.3	1.8	1.3	-27%	-60%	-70%
Scope 3	14.2	11.3	8.0	5.4	-20%	-43%	-62%
Total	30.1	20.1	10.9	6.5	-33%	-64%	-78%
Erforderliche Negativemissionen				-6.5			

Quelle: Berechnungen TEP Energy

Werden einzelne Reduktionsbeiträge weiter aufgeteilt, zeigt sich, dass vor allem die Reduktion der direkten Emissionen (Scope 1) und die Reduktion der Emissionsfaktoren Erstellung grosse Hebel darstellen (siehe Abbildung 12). Die Reduktion der Scope 1 Emissionen wird durch die weitgehende Ablösung der fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas erreicht. Mit der Reduktion der Emissionsfaktoren Erstellung ist die Reduktion der Emissionen aus der Herstellung von Baumaterialien und -elementen gemeint (siehe Kap. 7.2 und Kap 7.3 für eine weitere Aufschlüsselung). Nennenswerte Beiträge sind auch durch die Reduktion der Scope 2 Emissionen zu erreichen, wobei hier nicht die Reduktion der Energienachfrage entscheidend ist (deshalb ist der Beitrag «Scope 2, EF konstant praktisch 0), sondern die Dekarbonisierung der Erzeugung von Fernwärme und Strom. Auch durch eine angepasste Bauweise und geeignete Materialisierung ist eine Reduktion zu erreichen; dies wird durch den Hebel «Scope 3, ET EF konstant» sichtbar.

Hinweis: im Beitrag «Scope 3 Gebäude EF KBOB konstant» sind mehrere Effekte subsummiert, namentlich auch der Effekt der geringeren Bautätigkeit (ca. -30% von 4.35 Mt gemäss Tabelle 29, d.h. ca. -1.3 Mt) und der erhöhten Erneuerungstätigkeit (ca. +25% von 5.24 Mt, d.h. ca. +1.3 Mt). Der ausgewiesene Effekt von rund 0.6 Mt ist also der Wahl der Konstruktionstypen und der Materialisierung bei den Bauteilen zuzuordnen (zum Vergleich: 0.6 Mt entsprechen knapp 15% der Emissionen Erstellung der Neubauten im Jahr 2023). Hierbei ist zu betonen, dass die Wahl von emissionseffizienteren



Konstruktionstypen vor allem gegenwärtig und in naher Zukunft einen Wirkungshebel darstellt (siehe auch Kap. 3.3 zu den Sensitivitäten); gegen 2050 nähern sich die spezifischen Emissionen zwischen den verschiedenen Konstruktionstypen an (siehe Abbildung 8).

NB: Nebst der Reduktion der Emissionen Erstellung erzeugt die Erhöhung des Holzkonstruktionsanteils und die Verwendung von biogenen Baustoffen temporäre Senken (und NE bei Sicherstellung der Permanenz); dies dürfte künftig die Hauptmotivation für solche Konstruktionstypen und Materialien darstellen.

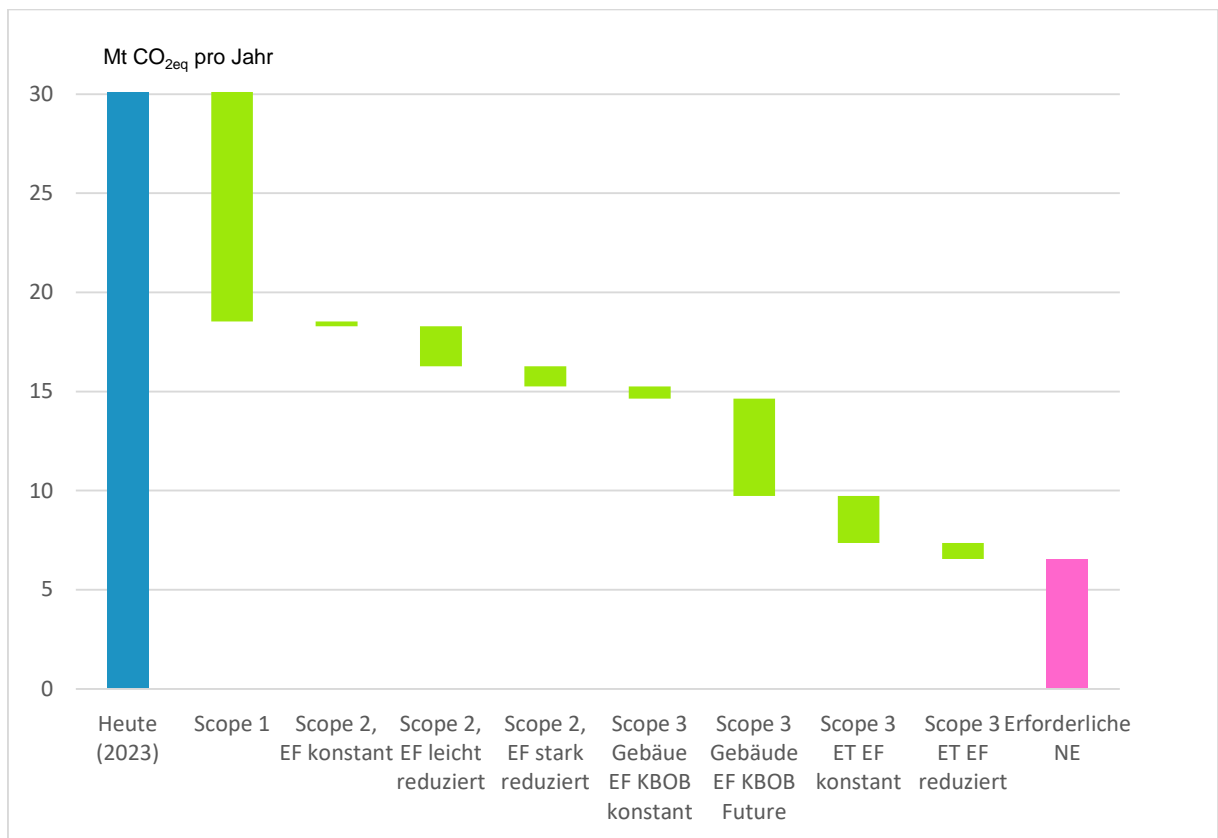


Abbildung 12 THGE des Gebäudebereichs in der Schweiz im Jahr 2023 (Mt pro Jahr) und Beiträge zur Reduktion der THGE zwischen 2023 und 2050 mittels verschiedener Hebel in den Bereichen Scope 1 bis 3 (erforderliche Negativemissionen: verbleibende Emissionen nach Umsetzen aller Hebel, siehe letzte Säule in pink). ET = Energieträger, EF = Emissionsfaktor. Quelle: Berechnungen TEP Energy

Fazit: Unter Berücksichtigung dieser Reduktionsansätze sind die Emissionen auch im Jahr 2050 deutlich über 0, nämlich bei ca. 6.5 Mt/Jahr, d.h. im Basis-Szenario wären Negativemissionen (NE) in dieser Höhe erforderlich (zu leisten durch den Gebäudebereich mittels als NET anrechenbaren Baumaterialien oder mittels NET ausserhalb des Gebäudebereichs). Um den Bedarf an NE zu reduzieren, sind weitere Hebel erforderlich, wie zum Beispiel die vollständige Eliminierung der fossilen Energieträger in Gebäuden und bei der Erzeugung von Sekundärenergieträgern die weitergehende Reduktion der Grauen Emissionen bei der Materialherstellung, die Wiederverwendung von Bauteilen, die Verlängerung der Nutzungs- und Lebensdauer, Suffizienz u.a.m. (siehe Kap. 7.4.2, Text und Abbildung 25).



6 Potenziale Baustoffe mit temporären Senken und Negativemissionen

F1.3 Wie gross sind die Potenziale bzw. die nachhaltige Verfügbarkeit von Baustoffen (insbesondere Biomasse-basierte), welche zu Negativemissionen im Gebäudebereich führen?

Das Hauptaugenmerk bei der Analyse der Potenziale von Baustoffen mit temporären Senken bzw. Negativemissionen liegt auf den Biomasse-basierten Stoffen. Im Fokus steht dabei Holz. Ergänzend thematisiert wird Stroh als Variante mit dem mengenmässig höchsten Potenzial im Vergleich zu weiteren Möglichkeiten zum Einsatz von Biomasse als Baumaterial. Als weitere Produkte zu nennen sind Hanf, Jute, Zellulose, Zuckerrohr-basierte Kunststoffe, etc. Neben der direkten Verwendung von Biomasse sind neue Baumaterial mit NET-Potenzial im Bereich der Betonanwendungen auf dem Markt (siehe Kapitel 2.5.2).

Für die folgenden Baustoffe wird nachfolgend das Potenzial Negativemissionen analysiert:

- Holz als Baustoff
- Stroh als Dämmstoff
- Karbonatisierter Beton (Beton mit forciert karbonatisiertem Betongranulat)
- Beton mit Pflanzenkohle

Entscheidend ist auf der einen Seite die Verfügbarkeit der Baustoffe, und auf der anderen Seite deren Einsatzmöglichkeiten im Gebäudepark. Für die Biomasse-basierten Baustoffe stellt sich zudem die Frage der Absicherung der Permanenz. Ist diese sichergestellt, können temporäre Senken in NE überführt werden.

6.1 Grundlagen

6.1.1 Holz

Gemäss der Schweizer Ressourcenpolitik Holz (BAFU, 2021) und weiteren Analysen zu Nutzung und Verfügbarkeit der Ressource Holz (siehe Anhang 2.1) könnte im Rahmen einer nachhaltigen Nutzung von Schweizer Wäldern die Nutzung von Bauholz erhöht werden. Eine leichte Erhöhung der Erntemenge wäre ohne eine Einbusse der Kohlenstoffvorräte möglich, die Erntemenge lag in vergangenen Jahren unter dem jährlichen natürlichen Zuwachs. Andererseits könnte auch ein Teil des heutigen Energieholzes als Baustoff verwendet werden, dies beispielsweise durch die Förderung der Verarbeitung von Laubholz zu Baustoffen. Die Nutzung von Energieholz könnte noch etwas effizienter gestaltet und mit einer insgesamt höheren Holzernte erhöht werden. Die folgenden Eckpunkte für die Modellierung leiten sich aus den analysierten Grundlagen ab (siehe Kapitel 2.5):

- Die aktuelle Menge Ernteholz liegt etwa im Bereich von 5-6 Mio. m³ Holz (BAFU, 2021). Die Obergrenze einer nachhaltigen Nutzung des Schweizer Waldes liegt im Bereich von 7-8 Mio. m³ Holz; eine Erhöhung der Erntemenge in diesem Bereich kann mit einer nachhaltigen Nutzung vereinbart werden.
- Laubholz wird aktuell vor allem als Energieholz eingesetzt. Durch den Ausbau der Verarbeitung und durch die Nutzung als Bauholz kann ein Beitrag zur Steigerung der stofflichen Nutzung erzielt werden. Eine gewisse Steigerung der Holzernte und damit verbunden der Energie- und Bauholznutzung wäre innerhalb der definierten Grenzen einer nachhaltigen Nutzung des Schweizer Waldes möglich. Die Steigerung könnte bis 2030 umgesetzt und ab diesem Zeitpunkt beibehalten werden (sofern durch den Klimawandel bedingt keine grösseren Verluste von Waldflächen und Holzzuwachs auftreten). Im vorliegenden Projekt wird keine



Steigerung der Erntemengen für den Hochbau angestrebt und ein Mehrbedarf an Bauholz wird durch eine reduzierte Menge Energieholz für Einzelheizungen ausgeglichen.

- Seitens BAFU wird eine Steigerung in der Grössenordnung von 30% von Holzendprodukten als Zielwert der Ressource Holzendprodukte definiert. Diese Grössenordnung wird auch für die Steigerung der Verwendung von Bauholz im Basis-Szenario hinterlegt.
- Der Ausbau von Energieholz ist auch Ziel der Ressourcenplanung des BAFU. Um genügend Energieholz als erneuerbare Alternative beim Ersatz fossiler Energieträger für die Industrie zur Verfügung zu stellen, sind bei der Nutzwärme für Gebäude, soweit möglich, andere erneuerbare Lösungen vorzuziehen, wie zum Beispiel mit erneuerbarem Strom betriebene Wärmepumpen und thermische Netze. Holzenergie ist auch für den Ersatz von Erdgas bei der Dekarbonisierung der Fernwärme, insbesondere für die Spitzenlast von FW-Anlagen, relevant. Aufgrund dieser Überlegungen wird in diesem Projekt nur beschränkt ein Ausbau von Holzenergie in dezentralen Holzheizungen angestrebt (siehe Abbildung 1). Stattdessen soll Holz vor allem in der Fernwärmeversorgungen zur Dekarbonisierung des Gebäudebereichs eingesetzt werden, hierbei vor allem zur Deckung der Spitzenlast.

Im Basis-Szenario wird eine Erhöhung des Anteils Holzbau in den einzelnen Gebäudekategorien unterstellt. Damit erhöht sich der Einsatz von Bauholz um etwa 30%. Ein zweites, stärker forciertes Szenario wird gemäss der BAFU-Zielsetzung mit einer längerfristigen Steigerung um 40% definiert. Das höhere Niveau des Endverbrauchs von Bauholz wird dabei für den gesamten Zeitraum 2030 bis 2050 auch bei sinkender Bautätigkeit anvisiert.

6.1.2 Stroh

Als Anwendung mit hohem Einsatzpotenzial im Gebäudebereich wird die Strohdämmung betrachtet. Aktuell sind erst geringe Mengen Stroh im Baubereich im Einsatz. D.h. deren verstärkter Einsatz würde in den nächsten Jahren zu einem Aufbau der im Gebäudepark verbauten Strohmenge führen. Der Output aus dem Gebäudepark, d.h. der Rückfluss, steigt erst in einer späteren Phase an, wenn Strohdämmungen das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und ersetzt werden müssen. Typischerweise ist das erst nach 2050 der Fall.

Stroh wird in der Schweiz allerdings häufig importiert, da die lokale Produktion den Bedarf für Tierhaltung und andere Anwendungen häufig nicht abdeckt (Giger, 2022). Strohprodukte werden aus Nachbarländern, für Strohbauten aber auch über grössere Distanzen, geliefert (zum Teil vorgefertigte Elemente mit Strohdämmung aus Osteuropa). Stroh wird in der Modellierung als beschränkt verfügbarer Rohstoff für Dämmungen von Fassaden und Dächern lediglich im Rahmen der Sensitivität mit steigendem Marktanteil bei Wohnbauten berücksichtigt. Im Basis-Szenario wird ein weiterhin geringer Anteil angenommen.

Fazit: Der Einsatz von Stroh ist mit einem Einsatz von Biomasse aus dem Ausland verbunden, was ggf. den Netto-Null-Zielen dieser Länder widerspricht.

6.1.3 Karbonatisierter Beton

Neue Betonprodukte mit karbonatisiertem Betongranulat sind derzeit bereits im Einsatz (biogenes CO₂ aus der Reinigung von Rohbiogas). Es besteht ein Potenzial zum weiteren Ausbau dieser NET und der Verwendung von biogenem CO₂ auch aus BECCS für die Karbonatisierung von Betongranulat. Gemäss Herstellerangaben ist der karbonatisierte Beton als Hochbaubeton NPK A, NPK B und NPK C inklusive den wasserdichten Betonsorten nach SIA 272 erhältlich und wie Primärbeton und Recyclingbeton einsetzbar.



Limitierend ist für den Einsatz:

- Der Ausgangsstoff biogenes CO₂ (aus Rohbiogasreinigung oder BECCS): Technologie ist im Anfangsstadium, das Potenzial gross, aber im betrachteten Zeitraum für die Skalierung offen (Annahme bis 2050 ausreichend).
- Betonanwendungen im Hochbau: Diese sind abhängig von der Bauaktivität im Bereich Neubau und dem damit verbundenen Materialbedarf.

Ein Wiederfreisetzen des chemisch gebundenen CO₂ kann praktisch ausgeschlossen werden, denn Betongranulat wird kaum auf +1200°C erhitzt werden. Deshalb kann die Frage des Recyclings hier abschliessend positiv beantwortet werden.

6.1.4 Beton mit Pflanzenkohle

Neue Produkte mit Pflanzenkohle im Beton sind verfügbar und bereits im Einsatz. Es besteht ein Potenzial zum weiteren Ausbau der Pyrolyse von Biomasse und zur Zumischung der hergestellten Pflanzenkohle zum Beton. Die Permanenz der Speicherung ist noch nicht gesichert. Damit ist eine Voraussetzung für die Anrechnung als NET, nämlich eine rechtsverbindliche Absicherung der Permanenz der Speicherung, noch nicht gegeben. Einsatzbereich und Einschränkungen der Einsatzgebiete sind gemäss Herstellern noch in Abklärung.

Limitierend ist für den Einsatz:

- Das Ausgangsmaterial Biomasse: Angenommen wird eine Pyrolyse für die Bereiche Grünschnitt und teilweise für Holzabfälle aus Sägereien (hier besteht Konkurrenz zu einer vollständigen energetischen oder einer stofflichen Verwendung).
- Betonanwendung im Hochbau und Qualitätsanforderungen: Abhängig von der Bauaktivität im Bereich Neubau (Netto-Neubau und Ersatzneubau). Zu beachten sind ggf. bautechnische Einschränkungen des Einsatzes und Veränderungen der übrigen Rezeptur der Bauteile, bei denen ein Einsatz möglich ist.

Zur Handhabung des Recyclings stehen für die erst neu eingesetzte Technologie kaum Informationen zur Verfügung. Die Frage der Permanenz ist nicht abschliessend geklärt und gemäss KBOB-Bilanzierungsregeln ist das hier ausgewiesene NET-Potenzial nur bei einer rechtlichen Absicherung anrechenbar.

6.2 Annahmen und Prämissen

6.2.1 Holz und Biomasse, temporäre Senken

Die Aufnahme und Freisetzung von biogenem CO₂ wird separat zu den übrigen THG-Emissionen erfasst und mit der aufgenommenen Kohlenstoffmenge in kg C ausgewiesen. Der Kohlenstoffgehalt der Bauteile basiert auf den Angaben zum Kohlenstoffgehalt in kg C von Holzprodukten und Strohdämmungen gemäss der KBOB Ökobilanzdaten KBOB (2022); (Umrechnung stöchiometrisch kg C zu kg CO₂ mit Faktor 3.67).

Das ausgewiesene Potenzial von NE durch den Einsatz biogener Baustoffe wird nur bei einer gesicherten dauerhaften Speicherung erreicht. Der Einbau von Holzbaustoffen und anderen Biomassebasierten Baustoffen generiert ein Zeitfenster für die Entwicklung benötigter Technologien. Für den Einsatz von biogenen Baustoffen und für eine Einordnung der Spannbreite der möglichen NET-Wirkung stehen die folgenden Varianten zur Diskussion:

- Keine Anrechnung als NE (-1/+1 nach Ende der Nutzungsdauer wieder freigesetzt, deshalb keine Anrechnung).
- Maximaler NE-Effekt (-1/+0.1 langfristige Sicherung der Permanenz).



- Die folgenden Massnahmen auf der Seite Output Holz aus dem Gebäudepark ergeben Möglichkeiten zur dauerhaften Speicherung:
- Altholz-Verbrennung mit CCS (BECCS): CO₂-Abscheidung (Annahme zur Effizienz: 90%), dauerhafte Speicherung CO₂ im Untergrund oder im Beton (die gesamte abgeschiedene Menge CO₂ wird als dauerhaft gespeichert und damit als NE verrechnet).
- Altholz-Pyrolyse und Gewinn von Pflanzenkohle: Annahme Pyrolyse mit 50% Freisetzung Kohlenstoff und 50% verbleibender Menge Kohlenstoff in der Pflanzenkohle (C-Speichermenge). Die Dauerhaftigkeit der Speicherung bei einer Beimischung zum Beton ist nicht bekannt. Ein Nachweis der Permanenz ist noch zu erbringen (das NET-Potenzial ist gemäss KBOB nur mit einer rechtlichen Sicherung anrechenbar).

Mögliche Fehleinschätzungen und Doppelzählungen beim NET-Potenzial ergeben sich durch die gleichzeitige Anrechnung auf der Seite Input und Output der Biomasse im Gebäudepark und darüber hinaus durch einen Verkauf von NET-Zertifikaten. Eine Anrechnung der Wirkung von NET vorab (z.B. zum Zeitpunkt des Aufbaus von temporären Senken durch den Einsatz von Holz), verbunden mit einer gesetzlichen und/oder rechtlichen Sicherung der Permanenz, steht einer zweiten NET-Anrechnung zum Zeitpunkt der Ausführung der Sicherung gegenüber (z.B. mittels Einsatz von BECCS bei der energetischen Nutzung von Altholz, Output Holz). Regelungen zur Vermeidung von Doppelzählungen und zur Handhabung von Zertifikaten sind erforderlich. Dies zeigt das Beispiel des Verkaufs von Zertifikaten ausserhalb des Gebäudesektors für das gespeicherte CO₂ in karbonatisiertem Beton.

6.2.2 Pflanzenkohle im Beton

Für die Variante Pflanzenkohle sind Fragen zur Zulassung und zu Einsatzmöglichkeiten offen. Die Technologie der Pyrolyse hat sich in kurzer Zeit etabliert. In der Schweiz sind mehrere Anlagen in Betrieb und zusätzliche sind geplant. Es wird mit einem Potenzial von 71 kt Pflanzenkohle für das Substrat Rinde und 44 kt für Einstreu und weitere Abfallprodukte gerechnet. In der Stadt Basel werden gemäss Medienmitteilung zurzeit bereits etwa 170 t Pflanzenkohle aus Grünschnitt produziert. Teilweise wird in Pyrolyseanlagen auch Abfallholz aus Sägereien verwendet. Die Verfügbarkeit hängt von der Konkurrenz mit anderen Einsatzgebieten von Pflanzenkohle und einer vollständig energetischen oder stofflichen Nutzung der Ausgangsstoffe ab.

Aufgrund der veränderten Produkteigenschaften des Betons und weil vertiefte Abklärungen im Rahmen dieser Studie nicht möglich waren, wird hier konservativ mit einem beschränkten Einsatzbereich und maximal 20% Marktanteil bei Betonbauteilen gerechnet. Hierbei handelt es sich um eine vorläufige grobe Annahme, die keine Aussage bezüglich des tatsächlichen Potenzials darstellt.

6.2.3 Karbonatisierter Beton

Der Einsatz von karbonatisiertem Beton ist gemäss Produkthersteller in vielen Bereichen möglich. Limitierende Faktoren sind die lokal verfügbare Menge an Recycling-Granulat für die Karbonatisierung, sowie der Aufbau von Anlagen zur Abscheidung von CO₂ und die Speicherung des abgeschiedenen CO₂ (BECCS). Die Realisierbarkeit einer Karbonatisierung am Standort der Betonabfallströme und der Aufbereitung von Altbeton zu Recyclinggranulat wird für die erwartete Abriss-Beton-Output-Menge als limitierender Faktor betrachtet. Aus diesem Grund wird für eine Karbonatisierung beim Recycling der mögliche Marktanteil von karbonatisierten Betonprodukten auf maximal 50% geschätzt.

Der Einsatz von Beton nimmt im Verlauf der Zeit mit der geringeren Neubauaktivität ab. Gemäss Angaben der Hersteller können mit karbonatisiertem Beton ein Speicherwert und damit Negativemissionen von 10 kg CO₂/m³ erzielt werden. Zum Vergleich: Das Herstellen von neuem Beton mit karbonatisiertem Betongranulat verursacht 90 bis 200 kg CO₂-eq/m³.



6.3 Ergebnis

6.3.1 Potenzial von NE in karbonatisiertem Beton und Beton mit Pflanzenkohle bei gesicherter Permanenz.

Die folgende Tabelle 22 zeigt das Potenzial der NE des Baustoffes Beton im Verlauf der Zeit unter den getroffenen Annahmen bzgl. Ausbau der Technologien und Marktanteile der beiden Produkte. Die Berechnungen erfolgten durch das GPM. Die Ergebnisse in Tabelle 22 beziehen sich auf das Basis-Szenario.

Im Vergleich zu den gesamten Emissionen der Erstellung von rund 9.6 Mt (9'600 kt) CO₂äqu. pro Jahr im Jahr 2023 und von 4.1 Mt (rund 4100 kt) CO₂äqu. pro Jahr im Jahr 2050 für den Bau und die Erneuerung der Gebäude, d.h. ohne Scope 3 Emissionen der Energieträger (siehe Tabelle 21), sind die NE Potenziale (Beton mit karbonatisiertem Betongranulat) sowie die temporären Senken (Pflanzenkohlebeton) relativ gering (auch 2050 deutlich weniger als 5%).

Tabelle 22 Analyse der NE-Potenziale im Bereich der Betonprodukte und Bauteile (Beton Input und Output basierend auf dem Basis-Szenario gemäss GPM-Berechnungen). Emissionen berechnet nach dem Investitionsprinzip. Quelle: Carbotech

	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Beton Input und Output Gebäudepark						
Beton Input Gebäudepark (Mio. t)	12.84	10.96	10.41	6.21	5.67	5.64
Beton Output Gebäudepark (Mio. t)	2.70	2.78	2.73	2.71	2.75	2.83
Pflanzenkohle in Beton						
Annahme Marktanteil Betonprodukte (%)	0%	2%	5%	10%	15%	20%
Input Beton mit Pflanzenkohle (Mio. t)	0	0.22	0.52	0.62	0.85	1.13
NE in Mt CO ₂ *	0	-0.019	-0.044	-0.053	-0.072	-0.096
Karbonatisierung Beton						
Annahme Marktanteil Betonprodukte	0%	5%	10%	20%	30%	40%
Beton karbonatisiert (RC-Granulat) (Mio. t)	0	0.55	1.04	1.24	1.70	2.26
NE in Mt CO ₂	0	-0.002	-0.004	-0.005	-0.007	-0.010

* Die Frage der Permanenz ist damit nicht abschliessend geklärt und gemäss KBOB- Bilanzierungsregeln ist das hier ausgewiesene Potential an NE nur bei einer rechtlichen Absicherung anrechenbar

6.3.2 Holz und Biomasse und damit verbundenes NE-Potenzial

Die nachfolgende Tabelle 23 zeigt den Einsatz der biogenen Baustoffe Holz und Stroh und die damit verbundenen temporären Senken bzw. das NE-Potenzial, welches durch eine (rechts-)verbindliche Absicherung einer permanenten Speicherung realisiert werden kann. Es wird unterteilt zwischen den bis 2050 möglichen Massnahmen zur Sicherung des anfallenden Altholzes auf der einen Seite sowie



dem Einbau von Biomasse als «zukünftige Potenziale» auf der anderen Seite. Letzteres bedingt die Gewährleistung einer anschliessenden Lösung zur langfristigen Speicherung beziehungsweise der Nichtwiederfreisetzung. Die im Basis-Szenario definierte Zunahme beim Anteil Holzbauten führt zu einer Zunahme der Holzbaustoffe von 30%, als Sensitivität wurde eine Zunahme um 40% sowie ein zusätzlicher Einsatz von strohbasiereten Bauelementen durch Förderung betrachtet.

Mit sinkender Bauaktivität im Bereich Neubauten impliziert das Ziel einer Steigerung des Holzinputs um 30% bzw. 40% eine starke Erhöhung der relativen Quote von Holzbauten bzw. von Gebäuden mit mehr Bauelementen aus Holz. Grund: Bei gleichbleibender Quote würde die Bauholzmenge parallel zur rückläufigen Bauaktivität demgegenüber sinken.

Tabelle 23 Input und Output Baustoffe, Materialflüsse Holzprodukte und Stroh sowie damit verbundene Veränderungen im Ökosystem (C-Gehalt Holzprodukte 0.41 kg C pro kg)

	Szenario	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Holz und Stroh Input und Output Altholz und Stroh Gebäudepark							
Holzprodukte Input Gebäudepark in Mio. t	Steigerung 30%	0.60 - 0.65	0.87	0.84	0.90	0.85	0.85
	Steigerung 40%		0.96	0.93	0.97	0.92	0.91
Stroh Input Gebäudepark in Mio. t	Minimale Quote	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Förderung Stroh		0.083	0.082	0.122	0.109	0.114
Altholz Output Gebäudepark in Mio. t (Stroh nicht relevant)	GPM Output	-0.38	-0.39	-0.39	-0.46	-0.46	-0.45
Abschätzung Energieholz in Mio. t	Veränderung Bedarf	2.80			2.60		2.20
<p>Ökosystem Wald: Ein Ausbau an Bauholz wird im Basis Szenario zu einem grossen Teil ausgeglichen durch eine Reduktion von Energieholz. Ein vorübergehender Ausbau der CH-Holzernte erfolgt im Rahmen einer nachhaltigen Nutzung des Waldes (natürlicher Zuwachs>= Holzernte). Unter der Voraussetzung, dass der übrige Holzkonsum auf einem vergleichbaren Niveau bleibt, ergibt sich durch den Gebäudebereich kein Verlust von Kohlenstoffvorrat im Wald. Der jährliche Zuwachs des Speichers im Wald fällt jedoch geringer aus als in den Vorjahren (siehe dazu auch Illustrationen zur Holznutzung und Aufzeichnungen der Entwicklung Kohlenstoffvorräte der Senken im Anhang A1).</p>							

Quelle: Berechnungen TEP Energy, Carbotech



Tabelle 24 Herleitung der temporären Senken bzw. der Potentiale von NE der Biomasse-basierten Baustoffe ausgehend von Input- und Output-Mengen an Holzprodukten und Stroh und deren Kohlenstoffgehalt in kt C (Umrechnung stöchiometrisch kt C zu kt CO₂ mit Faktor 3.67). Variante 1 zeigt den Effekt CCS zum Zeitpunkt der Entsorgung (Anrechnung bei der Umsetzung CCS), Variante 2 die Anrechnung bei einer rechtlich verbindlichen Sicherung der Permanenz beim Einbau (Anrechnung einer zukünftigen Umsetzung).

	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Variante 1:						
NE durch Einsatz von CSS in der Entsorgung Altholz in Mt CO₂						
Altholz Menge Abriss/Ersatz in Mt Material	-0.38	-0.38	-0.39	-0.46	-0.46	-0.45
Kohlenstoff Speichermenge im Altholz in Mt C	-0.16	-0.16	-0.16	-0.19	-0.19	-0.19
Annahme Einsatz CCS in der Entsorgung Altholz KVA	0%	5%	10%	20%	30%	50%
<i>NE-Potenzial Altholz mit Einsatz CCS Mt CO₂eq</i>	0	-0.03	-0.06	-0.14	-0.21	-0.35
Variante 2:						
NE durch Einbau Holz/Stroh unter der Annahme einer rechtlich verbindlichen Sicherung der Permanenz zu 100%, in Mt CO₂						
Holz Input Baumaterial in Mio. t Holz	0.60-0.65 (mehr Holz)	0.87 (0.96)	0.84 (0.93)	0.90 (0.97)	0.85 (0.92)	0.85 (0.91)
Stroh Input Baumaterial in Mio. t Stroh	<0.001 (mehr Stroh)	<0.001 (0.083)	<0.001 (0.082)	<0.001 (0.122)	<0.001 (0.109)	<0.001 (0.114)
<i>NE-Potenzial in Mt CO₂eq bei einer rechtlich verbindlichen Sicherung Permanenz</i>	-0.821 (Szenario mehr Holz/Stroh)	-1.14 (-1.60)	-1.15 (-1.54)	-1.23 (-1.66)	-1.16 (-1.56)	-1.16 (-1.60)

Quelle: Berechnungen TEP Energy, Carbotech

Möglichkeiten zur Sicherung einer dauerhaften Speicherung von Kohlenstoff im Anschluss an den Einsatz Biomasse-basierter Baustoffe im Gebäude ergeben sich z.B. bei der Verbrennung von Altholz verbunden mit CCS-Technologien und anderen Verfahren. NB: Doppelzählungen sind zu vermeiden. Die NE, die mit einer rechtlich verbindlichen Sicherung der Permanenz zum Zeitpunkt des Einbaus der Biomasse verbucht werden, stehen später, d.h. beim tatsächlichen Einsatz der CCS-Technologien zur Sicherung und Vermeidung der Re-Emissionen, nicht mehr zur Verfügung.

6.3.3 Schlussfolgerungen Einsatz Biomasse

Aus der Modellierung des Gebäudeparks ergeben sich unterschiedliche Handlungsfelder im Kontext der Baustoffe und der Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke:

- Ein Ausbau des Holzbaus soll innerhalb der Grenzen der nachhaltigen Nutzung der Wälder erfolgen. Bei den gewählten Anteilen Holzbau und Konstruktionselemente mit Holz sind die mit dem GPM berechneten Mengen voraussichtlich damit kompatibel. Die Veränderung beim Konsum weiterer Holzprodukte (z.B. Möbel, Papier) und Veränderungen der Wälder durch Trockenheit und Hitze können nicht im Rahmen des Projektes beurteilt werden.



- Nutzung von Energieholz: Die strategische Re-Positionierung, d.h. der Einsatz als Spitzenlastenergie in thermischen Netzen und im Industriebereich anstelle des Ersatzes fossiler Einzelheizungen durch Holzfeuerungen in Gebäuden, wird bestätigt.
- Re-use von Holzbauteilen kann als ein möglicher Beitrag zur Deckung von Holzbedarf betrachtet werden (Hier fehlen die Grundlagen für eine Einschätzung der Mengen, daher wird mit bis zu 5-10% direkt weiter einsetzbarer Balken als grobe quantitative Abschätzung gerechnet).
- Notwendigkeit des Aufbaus einer verarbeitenden Industrie (Branche), die Schweizer Holz verwendet, um Baumaterialien und -elemente zu produzieren.
- Aufgrund der Schadstoffbelastung erfolgt ein Recycling nur in beschränktem Umfang innerhalb definierter Bereiche. Die Entsorgung belasteter Altholz-Fraktionen erfolgt schadstoffbedingt zu grossen Teilen über die KVA. Das Optimierungspotential weiterer Kaskaden, zum Beispiel die Verarbeitung von Altholz zu Spanplatten, ist beschränkt und wurde im Rahmen der Studie nicht weiterverfolgt.
- BECCS: Ein grosses Potential für NE liegt in Technologien zum Abscheiden und Speichern von CO₂ in der Verbrennung von Altholz und Energieholz (Kehrichtverbrennung und Zementwerke für Altholz, Holzheizkraftwerke für Energieholz)

Abschliessend ein Hinweis zur Herkunft der Holzprodukte: Grundsätzlich könnte eine Erhöhung des Holzbauanteils auch über höhere Importe gelöst werden. Eine Übernutzung der Wälder im Ausland und damit verbundene negative Effekte auf Kohlenstoffvorräte in Wäldern könnte allerdings wohl nur schwer kontrolliert und vermieden werden. Die getroffenen Szenario-Annahmen zur Erhöhung des Holzbauanteils liegen deshalb innerhalb der Möglichkeiten einer nachhaltigen Nutzung von Schweizer Holz, verbunden mit der Annahme, dass keine Reduktion des C-Speichers im Wald stattfindet (die Erhöhung Bauholz wird weitgehend kompensiert durch eine Reduktion Energieholz für Einzelgebäude). Schäden durch Trockenheit und Hitze und die damit verbundenen Konsequenzen einer Anpassung der Baumarten in Wäldern sowie Veränderungen bei der Ernte sind nicht adressiert.



7 Absenkpfade 2030/2040/2050, THG-Emissionen und Negativemissionen (F1.4)

F1.4 Welche Absenkpfade 2030/2040/2050 unter Einhaltung des CO₂-Budgets für den Gebäudereich gemäss F0.1⁸ und differenziert nach THGE und Negativemissionen ergeben sich daraus, unterschieden nach Gebäudebestand und Neubauten?

7.1 Emissionen Betrieb

7.1.1 Grundlagen: Entwicklung der Nutzenergie und der Endenergie nach Energieträger

Die Emissionen der Scopes 2 und 3 werden durch den Endenergieverbrauch verursacht, weshalb dieser nachfolgend aufgeteilt auf die verschiedenen Energieträger dargestellt wird (Abbildung 14 weiter unten). Grundlage dafür ist die zu deckende Nutzenergie, welche vor allem bei der Raumwärme abnehmend ist (siehe Abbildung 13 und Tabelle 25). Die Nutzenergie Warmwasser nimmt hingegen zu, dies aufgrund der steigenden EBF im Bereich Wohnen. Die restliche Nutzenergie, d.h. Strombasierte Anwendungen im Bereich Gebäudetechnik (Beleuchtung, Lüftung/Klima, Pumpen etc.) und Geräte (Haushaltgeräte, gewerbliche Grossgeräte, IKT, gewerbliche Kälte) nimmt hingegen ab, wobei anzumerken ist, dass hier Nutzenergie definitorisch mit Endenergie gleichgesetzt ist.

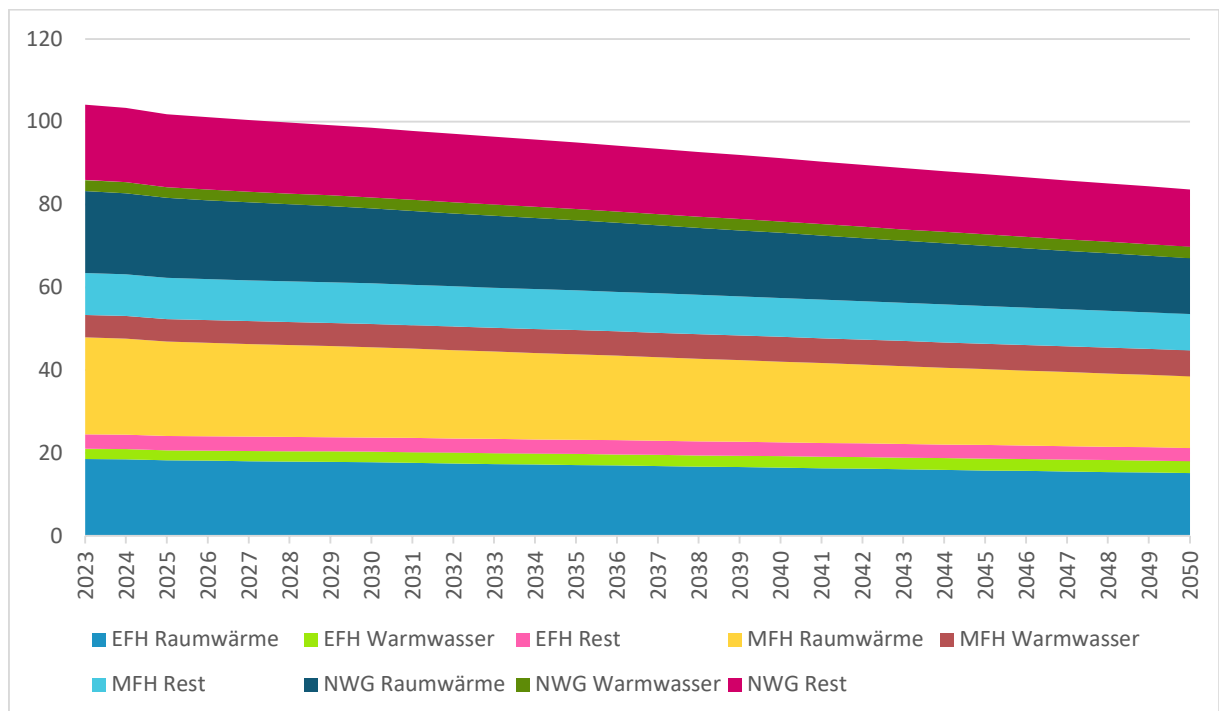


Abbildung 13 Entwicklung Nutzenergiebedarfs in TWh pro Jahr für EFH, MFH und NWG im Basis-Szenario, aufteilt auf Raumwärme, Warmwasser und Rest (strombasierte Anwendungen für Gebäudetechnik (Beleuchtung, Lüftung/Klima, Pumpen etc.) und Geräte (Haushaltgeräte, gewerbliche Grossgeräte, IKT, gewerbliche Kälte etc.)

⁸ F0.1: Welches CO₂-Budget bis 2050 leitet sich aus dem Absenkpfad für den Gebäudesektor (direkte Emissionen) gemäss KIG ab? Welcher Anteil des für die Schweiz noch verfügbaren Emissions-Budgets muss in einer umfassenden Lebenswegbetrachtung für den Gebäudereich ergänzt werden?



Die Endenergie geht (etwas) stärker zurück als die Nutzenergie (vgl. Abbildung 13 mit Abbildung 14 und Tabelle 25 mit Tabelle 26), weil ein Grossteil der feuerungsbasierten Systeme mit einem Nutzungsgrad von in der Regel weniger als 90% (im Bestand) ersetzt wird durch Systeme, die entweder einen höheren Nutzungsgrad haben (Übergabestation FW) oder deren JNG per Definition =1 ist (WP).

Tabelle 25 Nutzenergie von EFH, MFH und NWG, aufgeteilt auf Raumwärme, Warmwasser und Rest (Strombasierte Anwendungen im Bereich Gebäudetechnik (Beleuchtung, Lüftung / Klima, Pumpen etc.) und Geräte (Haushaltgeräte, gewerbliche Grossgeräte, IKT, gewerbliche Kälte, etc. im Basis-Szenario.

		2023	2030	2040	2050	2030/2023	2040/2023	2050/2023
EFH	Raumwärme	18,6	17,7	16,5	15,1	-5%	-11%	-18%
	Warmwasser	2,4	2,6	2,8	2,9	6%	14%	20%
	Rest	3,5	3,5	3,4	3,2	-2%	-4%	-9%
MFH	Raumwärme	23,4	21,8	19,5	17,3	-7%	-17%	-26%
	Warmwasser	5,4	5,6	6,0	6,3	4%	10%	15%
	Rest	10,1	9,8	9,4	8,8	-3%	-7%	-13%
NWG	Raumwärme	19,8	18,1	15,7	13,5	-8%	-21%	-32%
	Warmwasser	2,7	2,6	2,7	2,8	-1%	2%	3%
	Rest	18,2	16,8	15,3	13,8	-8%	-16%	-24%
Total	Raumwärme	61,8	57,6	51,7	45,9	-7%	-16%	-26%
	Warmwasser	10,5	10,9	11,5	11,9	3%	9%	13%
	Rest	31,8	30,1	28,0	25,8	-6%	-12%	-19%
	Total	104,1	98,5	91,2	83,6	-5%	-12%	-20%

Quelle: Berechnungen TEP Energy

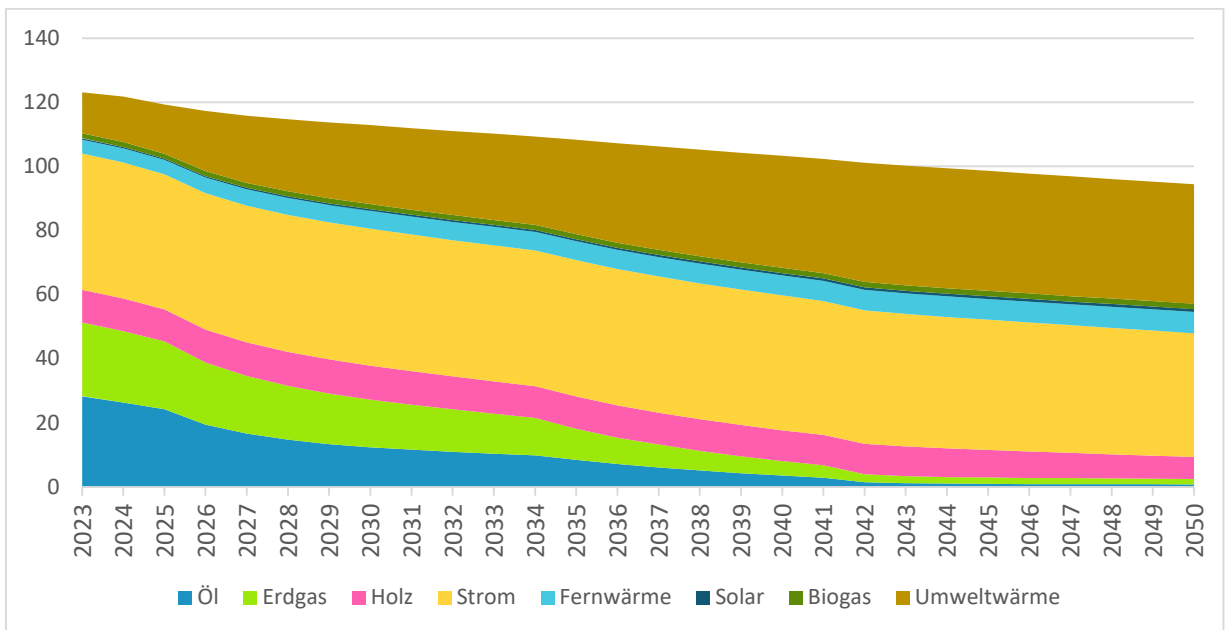


Abbildung 14 Entwicklung des Endenergiebedarfs des gesamten Gebäudeparks pro Energieträger (in TWh) im Basis-Szenario



Tabelle 26 Endenergie (in TWh) des gesamten Gebäudebestands (obere Tabellenhälfte) und separat für die Neubauten ab Baujahr 2020 im Basis-Szenario, aufgeteilt nach Energieträger.

	2023	2030	2040	2050	2030/ 2023	2040/ 2023	2050/ 2023
Gesamter Gebäudebestand							
Heizöl	28.3	12.4	3.5	0.8	-56%	-88%	-97%
Erdgas	23.0	14.9	4.5	1.7	-35%	-80%	-93%
Holz	10.2	10.6	9.6	6.8	4%	-6%	-33%
Strom	42.6	42.7	42.1	38.6	0%	-1%	-9%
Fernwärme	4.3	5.5	6.2	6.6	29%	45%	54%
Solar	0.4	0.6	0.7	0.9	37%	80%	114%
Biogas	1.5	1.6	1.6	1.7	1%	6%	9%
Umweltwärme	12.8	24.7	35.0	37.2	92%	173%	191%
Total	123.1	112.9	103.3	94.4	-8%	-16%	-23%
Total ohne Strom	80.6	70.2	61.2	55.8	-13%	-24%	-31%
Neubau ab 2020							
Heizöl	0.2	0.3	0.2	0.1			
Erdgas	0.3	0.4	0.4	0.2			
Holz	0.2	0.7	0.8	0.8			
Strom	2.1	4.7	7.2	8.4			
Fernwärme	0.1	0.3	0.4	0.6			
Solar	0.0	0.1	0.1	0.2			
Biogas	0.1	0.2	0.2	0.3			
Umweltwärme	0.8	2.1	3.9	5.4			
Total	3.8	8.7	13.3	16.0			
Total ohne Strom	1.6	4.0	6.1	7.6			

Quelle: Berechnungen TEP Energy

Bei der Gebäudekohorte der Neubauten mit Baujahr ab 2020 steigt die Endenergie aufgrund des Flächenwachstums stark an, dies v.a. bei den Energieträgern Strom (für Wärmepumpen, v.a. aber auch für Gebäudetechnik und Geräte) und Umweltwärme, in geringerem Mass auch bei der Fernwärme (siehe Abbildung 15).

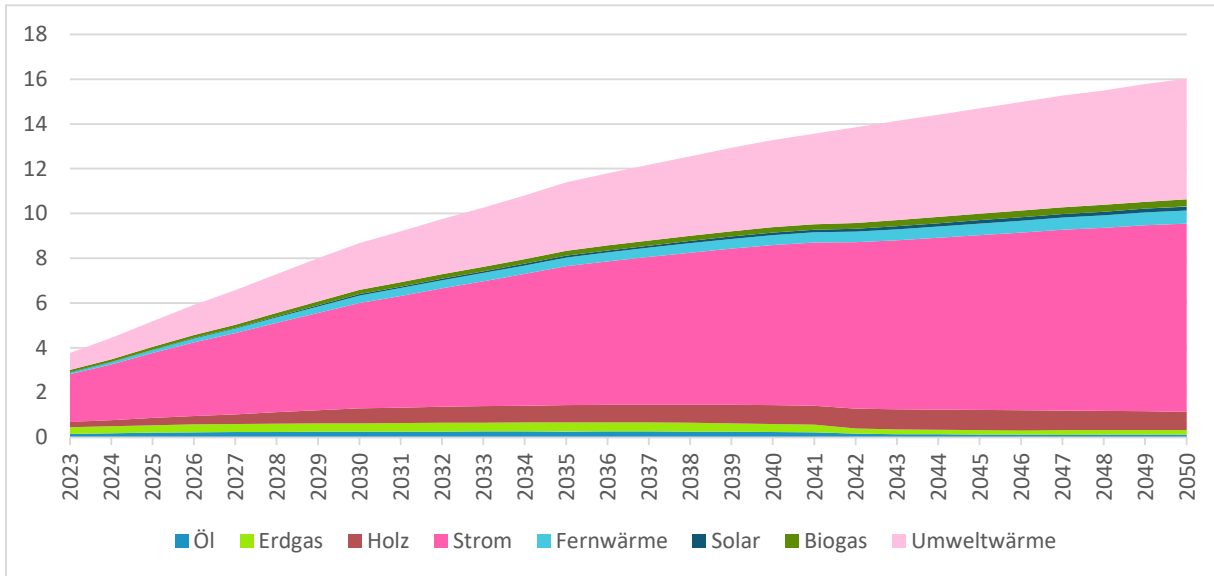


Abbildung 15 Entwicklung Endenergie (in TWh) der Neubauten (ab 2020) pro Energieträger im Basis-Szenario.
Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy (dieses Projekt)

7.1.2 Annahmen und Prämissen

Ähnlich wie im Projekt «Auswirkungen eines subsidiären Verbots» und wie bei EP 2050+ wird davon ausgegangen, dass fossil befeuerte Heizanlagen in Neubauten zeitnah verboten werden und dass bei der Anlagenerneuerung starke Anreize gesetzt werden, um auf erneuerbare Energien umzusteigen. Es wird davon ausgegangen, dass fossile Heizanlagen spätestens ab 2050 nicht mehr betrieben werden dürfen, durch die verkürzten Lebensdauern ist dies im Modell praktisch schon vorher erreicht.

7.1.3 Ergebnisse: Schwer vermeidbare THG-Emissionen aus dem Betrieb

Aufgrund der getroffenen Annahmen eines Verbots der Neuinstallation von fossilen Heizungen und einer forcierten Verkürzung der Lebensdauer in den Jahren 2028 und 2037 findet bis 2050 ein praktisch kompletter fade-out der Nutzung fossiler Energieträger und der damit verbundenen Scope 1 Emissionen statt (Abbildung 16). Abgesehen von möglichen Härtefällen im unteren einstelligen Prozentbereich sollte der Gebäudesektor damit 2050 keine Scope 1 Emissionen mehr ausstossen.

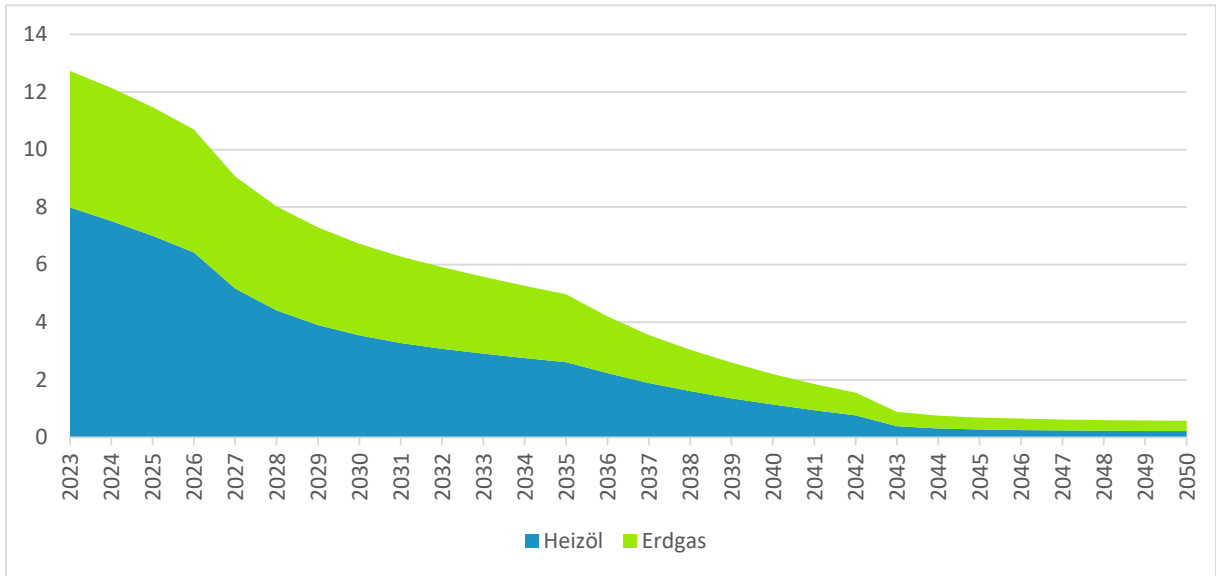


Abbildung 16 Entwicklung der Scope 1 Emissionen pro Energieträger im Basis-Szenario in Mt CO₂eq pro Jahr. Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy (dieses Projekt).

Im Jahr 2023 betragen die Scope 2 Emissionen aus der Nutzung von Energieträgern 3.8 Mt pro Jahr, also deutlich weniger als die Scope 1 Emissionen. Bei konstanten Emissionsfaktoren verbleiben die Emissionen mit 3.6 Mt auf hohem Niveau und sinken nur leicht ab (siehe Tabelle 18). Diese Entwicklung lässt sich bei konstanten Emissionsfaktoren direkt auf die Nutzung der Endenergie der entsprechenden Energieträger zurückführen. Nur bei einer Reduktion der Emissionsfaktoren, d.h. bei einer Dekarbonisierung namentlich der Strom- und Fernwärmeerzeugung, lassen sich die Scope 2 Emissionen reduzieren. Im Basis-Szenario resultiert mit den getroffenen Annahmen je nach Energieträger eine Reduktion von 80% bis 90%, so dass am Ende der Betrachtungsperiode die Scope 2 Emissionen 0.5 Mt ausmachen.

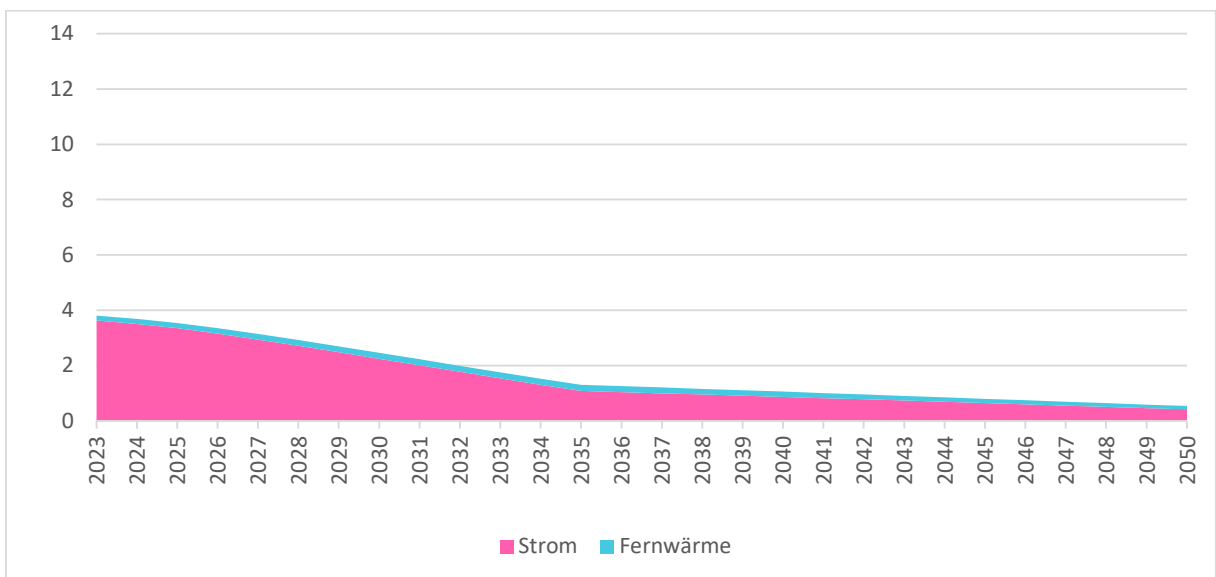


Abbildung 17 Entwicklung der Scope 2 Emissionen der Energieträger Strom und Fernwärme im Basis-Szenario sowie mit Variation der Emissionsfaktoren in Mt pro Jahr. Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy (dieses Projekt).



Im Jahr 2023 betragen die Scope 3 Emissionen aus der Energieträgernutzung (vorgelagerte Ketten) rund 4.5 Mt pro Jahr, d.h. etwas mehr als die Scope 2, aber deutlich weniger als die Scope 1 Emissionen. Scope 3 Emissionen treten bei allen Energieträgern auf, auch bei den erneuerbaren. Durch den Rückgang fossiler ET und durch eine allgemeine Reduktion der Scope 3 Emissionsfaktoren sinken die Scope 3 Emissionen der Energieträger bis 2050 auf 1.3 Mt ab (siehe Abbildung 18), dies unter der Annahme von konstanten Emissionsfaktoren für die übrigen Energieträger, namentlich Strom.

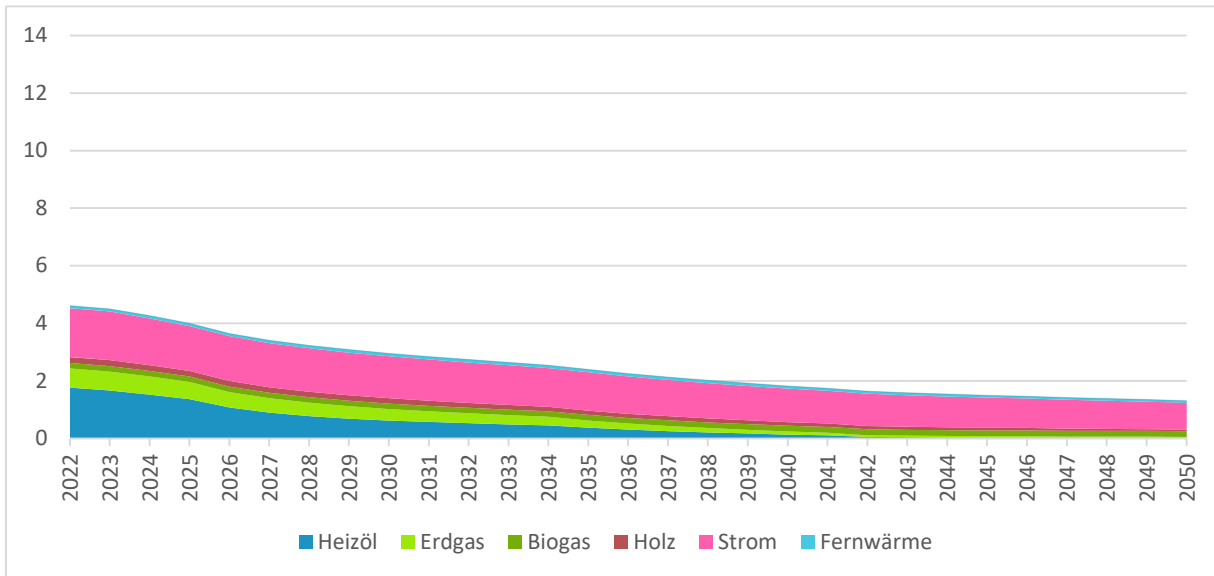


Abbildung 18 Entwicklung der Scope 3 Emissionen (Mt CO_{2eq} pro Jahr) pro Energieträger im Basis-Szenario in Mt pro Jahr. Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy (dieses Projekt)

7.2 Emissionen Erstellung pro Konstruktionstyp und Gebäudeelement

Durch eine Anpassung der Konstruktionsweisen im Bereich Neubau und durch einen veränderten Einsatz von Bauelementen und Materialien lassen sich die Emissionen Erstellung deutlich reduzieren. Das Ergebnis in diesem Bereich wird allerdings auch stark durch die reduzierte Neubautätigkeit mitgeprägt (der Brutto-Neubau geht im Bereich Wohngebäude um über 40% zurück, siehe Kap 2.2.1).

Bei konstanten Emissionsfaktoren resultiert damit ein Rückgang der Emissionen Erstellung aus dem Bereich Gebäude Neubau und Erneuerung (ohne Scope 3 Emissionen der Nutzung von Energieträgern) von rund -4%. Der Reduktionsbeitrag des Rückgangs der Emissionsfaktoren beträgt, zusammen mit der Dynamik der Bau- und Erneuerungstätigkeit, 46%. Insgesamt werden die Emissionen Erstellung aus dem Bereich Gebäude um rund 57% reduziert. Damit verbleiben im Jahr 2050 Emissionen der Erstellung von Gebäuden in der Höhe von rund 4.1 Mt pro Jahr, siehe Tabelle 27.

Tabelle 27 Entwicklung Scope 3 in Mt/a. Beiträge durch die Hebel Konstruktionstypen, Reduktion Emissionsfaktoren (EF) und kombinierter Effekt (jeweils inkl. Effekt der Dynamik Gebäudepark).

	2023	2050	2023/2050
Nur Hebel Konstruktionstypen und Gebäudeelemente*	9.6	9.2	-4%
Nur Hebel EF KBOB 2050 *	9.6	5.2	-46%
Hebel Konstruktionstypen und KBOB 2050 *	9.6	4.1	-57%
* Inklusive des Effekts der reduzierten Brutto-Neubautätigkeit und der erhöhten Erneuerungstätigkeit			

Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy, dieses Projekt



In Abbildung 19 sind die Emissionsbeiträge der verschiedenen Gebäudeelemente für die Jahre 2023 und 2050 sowie die Reduktion in % dargestellt, jeweils separat für die Hebel «Konstruktionstypen und Gebäudeelemente», «Hebel EF 2050» sowie für die beiden Hebel zusammen (auch hier ist die reduzierte Brutto-Neubautätigkeit bei der Interpretation zu berücksichtigen). Hierbei fällt auf, dass eine starke Reduktion vor allem im Bereich Konstruktion zu verzeichnen ist (obere Hälfte der Abbildung bis zum Gebäudeelement «Balkon»). Dies lässt sich durch folgende Einflussfaktoren begründen:

- Diese Elemente betreffen v.a. den Brutto-Neubau und sind damit besonders von dessen Reduktion (von über 40% im Wohnbereich) betroffen.
- Im Bereich Konstruktion ist die Reduktion der Emissionsfaktoren gemäss der verwendeten Grundlage (Alig et al.2021) besonders ausgeprägt.
- Bei den übrigen Gebäudeelementen nimmt die Aktivität im Bereich Erneuerung zu (und nur im Bereich Brutto-Neubau ab), so dass bei einzelne Gebäudeelementen sogar eine leichte Zunahme zu verzeichnen ist, wenn die Emissionsfaktoren nicht reduziert werden.



	2023	Nur Hebel Konstruktionstypen und Gebäudeelemente		Nur Hebel Emissionsfaktoren		Hebel Konstruktionstypen / Gebäudeelemente und Emissionsfaktoren	
		2050	Reduktion 2050/2023	2050	Reduktion 2050/2023	2050	Reduktion 2050/2023
Aushub	0	0	-36%	0	-100%	0	-100%
Baugrubenabschluss	219	67	-69%	62	-72%	19	-91%
Pfählung	122	52	-57%	29	-76%	12	-90%
Fundament	435	300	-31%	89	-79%	61	-86%
Konstruktion Aussenwand unter Ter	118	77	-35%	29	-76%	23	-80%
Konstruktion Aussenwand über Ter	206	138	-33%	58	-72%	29	-86%
Innenwände	257	159	-38%	91	-65%	46	-82%
Stützenkonstruktion	6	3	-47%	2	-76%	1	-85%
Decken	820	268	-67%	238	-71%	64	-92%
Konstruktion Flachdach	144	94	-35%	38	-74%	23	-84%
Dämmung Kellerboden/decke	27	20	-24%	5	-80%	4	-85%
Konstruktion Steildach	16	10	-35%	8	-49%	5	-70%
Balkon	0	0	0%	0	-68%	0	0%
Elektro	410	460	12%	164	-60%	167	-59%
Heizung	42	49	16%	17	-60%	19	-54%
Heizverteilung	123	138	12%	49	-60%	51	-59%
Wärmeabgabe	189	207	9%	76	-60%	83	-56%
Lüftung	265	314	18%	106	-60%	124	-53%
Abluft Bad/Küche	78	84	7%	31	-60%	33	-58%
Sanitär	317	352	11%	127	-60%	132	-58%
Dämmung Aussenwand über Terrai	497	665	34%	224	-55%	268	-46%
Fensterrahmen	602	664	10%	225	-63%	230	-62%
Fensterglas	555	632	14%	145	-74%	203	-63%
Sonnenschutz	718	806	12%	374	-48%	412	-43%
Dämmung Flachdach	494	595	21%	213	-57%	282	-43%
Dämmung Steildach	201	203	1%	143	-29%	131	-35%
Trennwände	1104	1179	7%	764	-31%	624	-43%
Bodenbeläge	852	867	2%	496	-42%	428	-50%
Wandbekleidung Innenwände	346	355	3%	286	-17%	294	-15%
Wandbekleidung Innen	112	116	3%	87	-22%	91	-19%
Deckenbekleidung Unterdach	62	64	2%	38	-39%	43	-32%
Bekleidung Zwischendecken	267	270	1%	193	-28%	193	-28%
Dämmung gegen unbeheizt	30	28	-6%	13	-56%	13	-58%

Abbildung 19 Entwicklung der Scope 3 Emissionen pro Gebäudeelement im Basis-Szenario in kt pro Jahr. Dargestellt sind die Emissionen das Jahr 2023 sowie für 2050, jeweils für die Hebel «Konstruktionstypen und Gebäudeelemente», «Hebel KBOB EF 2050» und «Konstruktionstypen / Gebäudeelemente und KBOB EF 2050», jeweils inklusive des Effekts der reduzierten Brutto-Neubautätigkeit. Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy (dieses Projekt).



In Tabelle 28 sind die Emissionen Erstellung auf zwei Bereiche zusammengefasst. Der erste enthält die Konstruktionselemente (Aushub bis Balkon in Abbildung 19) und der zweite die übrigen Gebäudeelemente (Gebäudetechnik, Gebäudehülle, Innenausbau). Daraus wird folgendes ersichtlich:

- Mit dem Hebel Konstruktionstypen und Gebäudeelemente lassen sich v.a. Emissionen des Bereichs Konstruktion reduzieren (um -50%, wobei dies insbesondere durch die verminderte Bautätigkeit unterstützt wird). Bei den übrigen Gebäudeelementen steigen die Emissionen, was auf die Erneuerung des Gebäudebestands zurückzuführen ist. Insgesamt resultiert bei den Emissionen 2050 eine Reduktion von 4% im Vergleich zu den Emissionen von 2023.
- Wenn die Emissionsfaktoren gemäss «KBOB Future» reduziert werden, reduzieren sich die Emissionen Erstellung um knapp -46%, wobei auch hier die Reduktion im Bereich Konstruktion (-73%) deutlich höher ist als bei den übrigen Gebäudeelementen (-38%).
- Qualitativ zeigt sich dieses Muster auch, wenn die beiden Hebel kombiniert werden, d.h. im Basis-Szenario. Gesamthaft resultiert eine Reduktion von knapp -60%. Deutlich höher ist die Reduktion im Bereich Konstruktion (-88%), deutlich geringer bei den übrigen Gebäudeelementen.

Tabelle 28 Entwicklung der Scope 3 Emissionen in Mt für die Jahr 2023 und 2050, jeweils für die strukturellen Gebäudeelemente (Konstruktion) und für die übrigen Gebäudeelemente (Gebäudetechnik, Ausbau und Gebäudehülle). Dargestellt sind die Hebel «Konstruktionstypen und Gebäudeelemente», «Hebel EF 2050» und «Konstruktionstypen/Gebäudeelemente und KBOB 2050

	Nur Hebel Konstruktionstypen und Gebäudeelemente			Nur Hebel Emissionsfaktoren (Reduktion gemäss «KBOB Future»)			Hebel Konstruktionstypen / Gebäudeelemente und Emissionsfaktoren		
	2023	2050	2050/2023	2023	2050	2050/2023	2023	2050	2050/2023
Konstruktion	2.37	1.19	-50%	2.37	0.65	-73%	2.37	0.29	-88%
Ausbau / Ausstattung	7.27	8.05	11%	7.27	4.53	-38%	7.27	3.82	-47%
Total	9.64	9.24	-4%	9.64	5.18	-46%	9.64	4.11	-57%

Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy, dieses Projekt

Für das Basis-Szenario werden die Emissionen Erstellung auf die beiden Gebäudesegmente Neubau (Bauperiode ab 2020) und Bestand (Bauperiode davor) aufgeteilt, dies separat für die Konstruktionselemente (Aushub bis Balkon in Abbildung 19) und für die übrigen Gebäudeelemente (Gebäudetechnik, Gebäudehülle, Innenausbau). Daraus wird der ersichtlich, dass die Emissionsreduktion im Bereich Neubau mit -81% deutlich höher ist im Vergleich zum Bestand (-38%), siehe Tabelle 29.

Hierzu ist anzumerken, dass weitergehende Massnahmen wie z.B. die Verlängerung der Lebensdauer bzw. der Nutzungszeit sowie die Wiederverwendung von Bauteilen, Gebäudeelementen und Materialien noch nicht eingerechnet sind. Solche Massnahmen wären besonders wichtig, weil der bis heute erstellte Gebäudebestand im Jahr 2050 die grosse Mehrheit der Emissionen Erstellung ausmacht (3.3 von 4.1 Mt CO_{2eq} pro Jahr).



Tabelle 29 Entwicklung der Scope 3 Emissionen im Basis-Szenario in Mt pro Jahr. Dargestellt sind die Emissionen das Jahr 2023 sowie für 2050, jeweils für die strukturellen Gebäudeelemente (Konstruktion) und für die Gebäudeelemente Ausbau und Ausstattung

	Neubau ab 2020			Bestand (erstellt bis 2020)			Gesamtbestand		
	2023	2050	2050/2023	2023	2050	2050/2023	2023	2050	2050/2023
Konstruktion, Struktur	2.32	0.27	-88%	0.05	0.02	-70%	2.37	0.29	-88%
Ausbau / Ausstattung	2.02	0.56	-72%	5.24	3.26	-38%	7.27	3.82	-47%
Total	4.35	0.83	-81%	5.29	3.28	-38%	9.64	4.11	-57%

Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy, dieses Projekt

7.3 Emissionen Erstellung pro Materialgruppe

7.3.1 Grundlagen

Der Verlauf der THG-Emissionen wird auf Basis der erarbeiteten Grundlagen und des Basis-Szenarios mit den darin getroffenen Annahmen zur Dekarbonisierung der Baumaterialien und der Energieträger bestimmt.

Geringere Bauaktivitäten in der Periode ab 2030 und Optimierungen der Bauteile und Gebäude führen zu einem sinkenden Bedarf an Baumaterialien für Neubauten. Bedingt durch den wachsenden Gebäudebestand steigt der Materialbedarf für die Erneuerung weiter an.

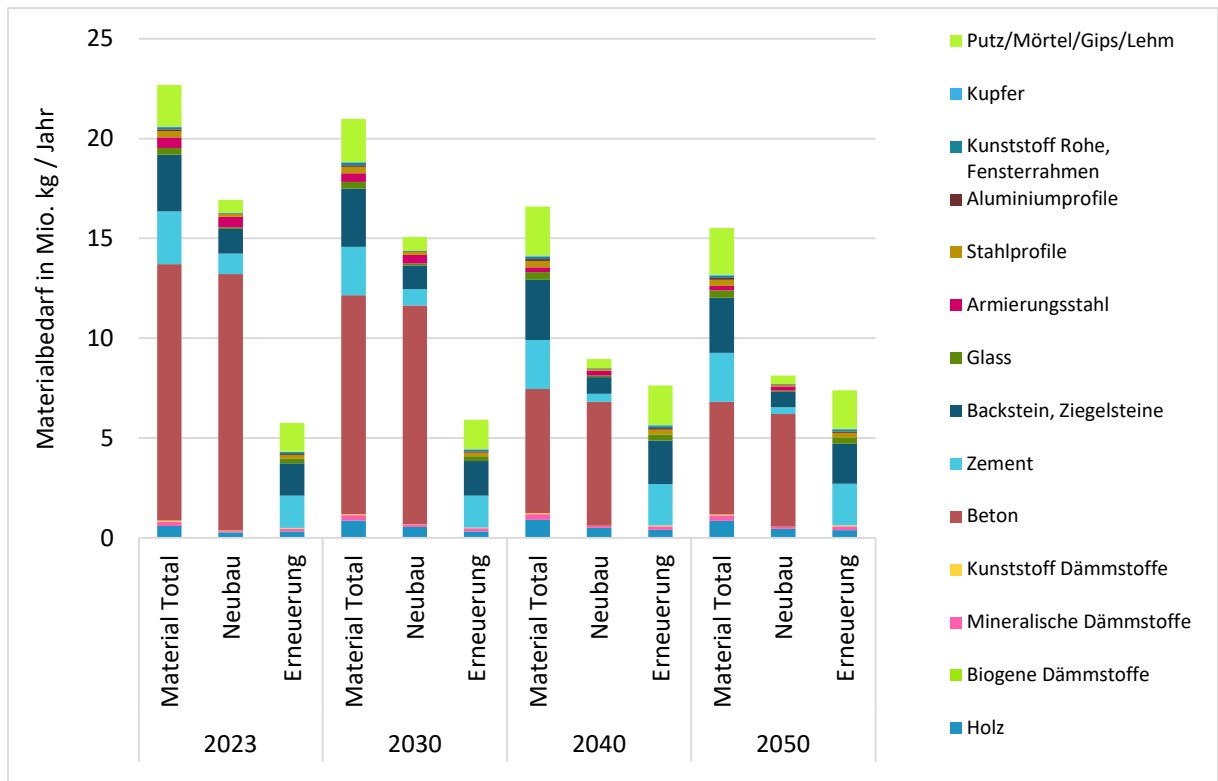


Abbildung 20 Bedarf Baumaterial Input, IST-Zustand 2023 und Entwicklung bis 2050. Quelle: dieses Projekt



7.3.2 Annahmen und Prämissen

Die Dekarbonisierung der Baumaterialien erfolgt im Umfang der Dekarbonisierung gemäss «KBOB Future» (Alig et al 2021), die verbleibenden Emissionen werden als schwer vermeidbare Emissionen betrachtet. Die Reduktion des Energieverbrauchs und die Umstellung der Energieträger auf erneuerbare Energie erfolgt im Rahmen des definierten Basis-Szenario.

7.3.3 Ergebnisse schwer vermeidbare THG-Emissionen der Erstellung

Die Entwicklung der THG-Emissionen hängt zum einen von den oben skizzierten Materialflüssen und zum anderen von den getroffenen Massnahmen der Dekarbonisierung auf Seiten der Hersteller der Baumaterialien ab. Die nachfolgenden Graphiken zeigen für den oben illustrierten Einsatz von Baumaterial den Verlauf der THG-Emissionen über die Zeit auf, einmal ohne (Abbildung 21) und einmal mit (Abbildung 22) den in Kapitel 2.4 aufgeführten Effekten einer Dekarbonisierung bei der Produktion Baumaterial. Der Ausgangswert 2023 liegt berechnungsbedingt etwas unter dem Total von 9.6 Mt CO₂ der Erstellung (siehe Tabelle 21); in der Betrachtung der Aufwände der Materialproduktion konnten weitere Schritte der Verarbeitung für die einzelnen Bauteile noch nicht miteingerechnet werden.

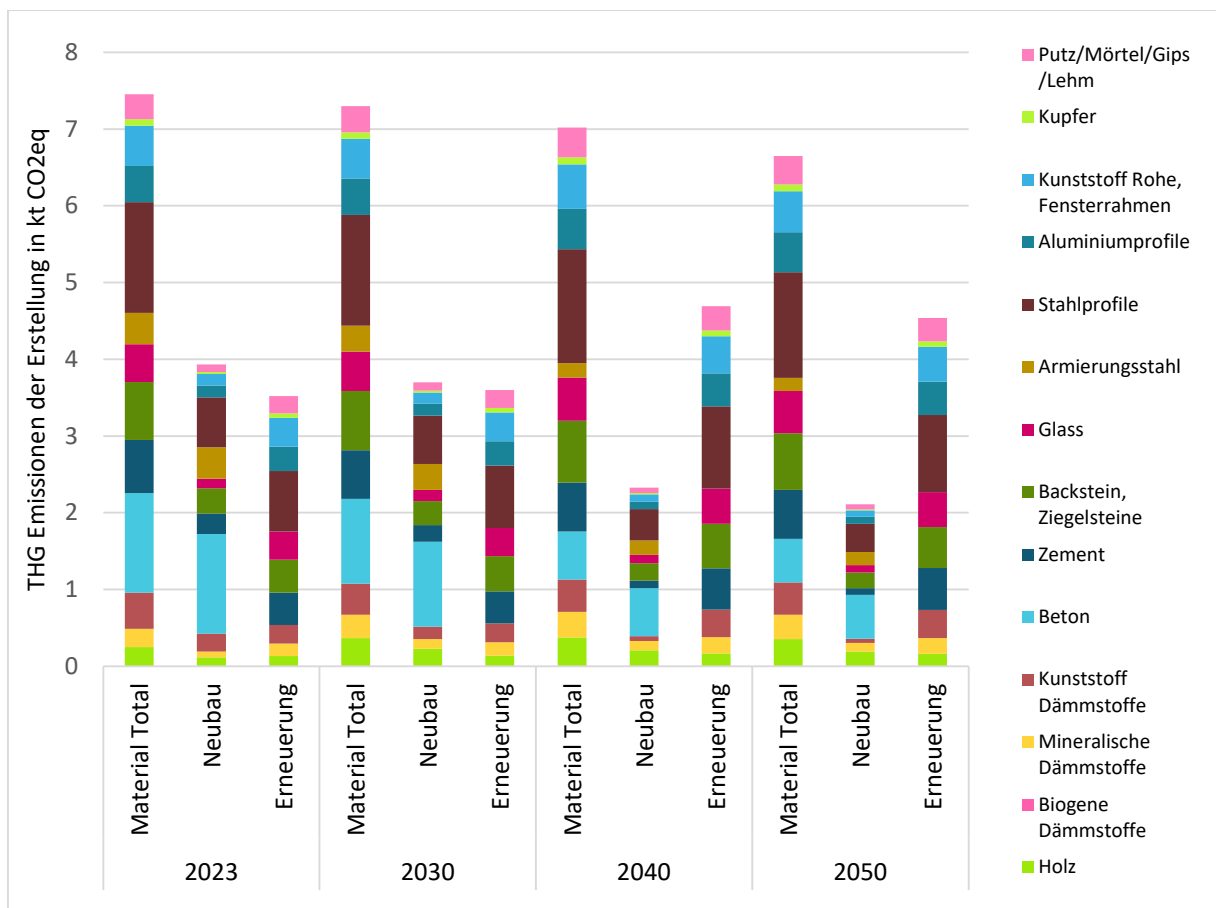


Abbildung 21: THG-Emissionen Erstellung aus der Produktion von Baumaterialien (Mt CO₂eq pro Jahr), für die IST-Situation 2023 und die Entwicklung bis 2050 im Szenario mit konstanten Emissionsfaktoren für die Produktion der Baumaterialien. Quelle: TEP/Carbotech, dieses Projekt.

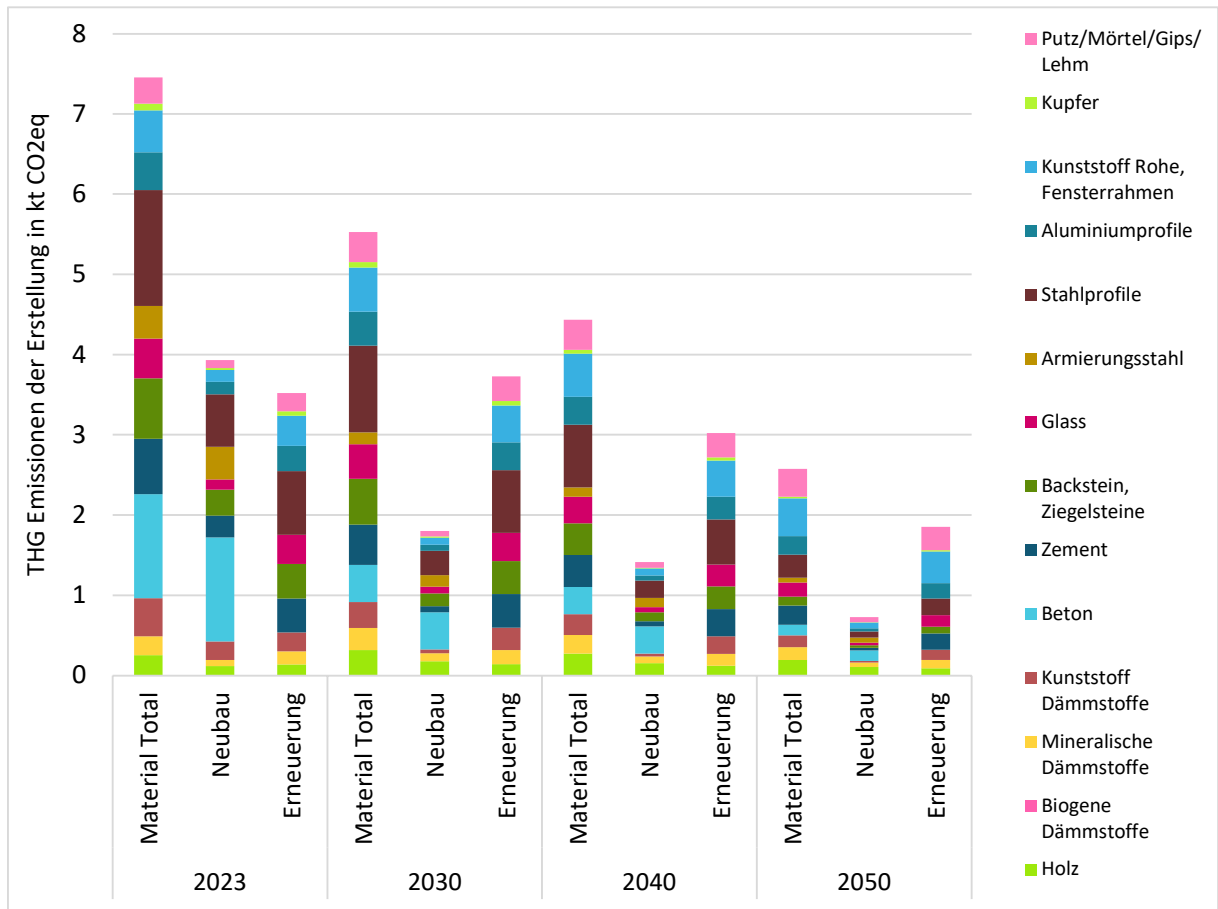


Abbildung 22: THG-Emissionen Erstellung aus der Produktion von Baumaterialien (Mt CO₂eq pro Jahr) für den IST-Zustand 2023 und die modellierte Entwicklung bis 2050 im Basis-Szenario mit einer kontinuierlichen Dekarbonisierung der Baumaterialien («KBOB Future» Werte Umsetzung zu 50% bis 2040 und zu 100% bis 2050). Quelle: TEP/Carbotech, dieses Projekt.

Im Jahr 2050 ergeben sich inklusive der Emissionen der weiteren Verarbeitung der Baumaterialien THG-Emissionen aus der Phase Erstellung im Bereich von 2.6 Mt CO₂, mit etwa 0.7 Mt CO₂ für Neubauten und 1.9 Mt für die Erneuerung von Bauteilen im Gebäudebestand. Nicht eingerechnet sind in diesem Wert folgende Vermeidungsmöglichkeiten:

- Einsatz von wiederverwendeten Bauteilen anstelle einer Neuproduktion
- Verlängerung Lebensdauer, durch spezifische Massnahmen, wie zum Beispiel Sanierungen durch Inlining bei Kunststoffrohren von Bodenheizungen und weiteren Rohrleitungen
- Suffizienz, reduzierte Erneuerungsraten und weniger Flächen (EBF) in Neubauten
- Massnahmen auf der Seite der Entsorgung (CCS in der Kehrlichtverbrennung)



7.4 Emissionen Betrieb und Erstellung sowie NE in der Übersicht

7.4.1 Ausgangslage und Basis-Szenario

Im Jahr 2023 betragen die Emissionen aus dem Gebäudebereich gemäss den vorstehend erläuterten Annahmen und Berechnungen rund 30 Mt. Dabei entfallen rund 12 Mt auf direkte Emissionen durch die Nutzung von fossilen Energieträgern, siehe Abbildung 23. Weitere bedeutende Emissionsfrachten sind ebenfalls der Phase Betrieb zuzuordnen, nämlich die Scope 2 Emissionen durch die Nutzung von Sekundärenergieträgern (Strom, Fernwärme, insgesamt rund 3 Mt) und durch die Scope 3 Emissionen aus der Nutzung aller Energieträger (gut 3 Mt). Die Emissionen Erstellung aus der Errichtung und der Erneuerung der Gebäude betragen 2023 rund 11 Mt, liegen also in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Scope 1 Emissionen.

Insgesamt fallen dann die Emissionen bis 2050 auf rund 6.5 Mt (siehe auch Tabelle 21 weiter oben), wobei der grösste Teil davon auf Emissionen der Erstellung entfällt. Im Bereich Scope 1 und 2 verbleiben weniger als 1 Mt. Um auf netto null Emissionen zu kommen, werden daher faktisch im Jahr 2050 6.5 Mt Negativemissionen notwendig. Hiervon können auf Basis der in Tabelle 30 aufgeführten und hier bilanzierten Werte 1.6 Mt (Potenzial NE) (bzw. 1.9 Mt in der Sensitivität) angerechnet werden, so dass im Jahr 2050 noch ein Defizit von 4.9 Mt zur Erreichung des Zielwertes von 6.5 Mt im Basis Szenario bestehen bleibt, welches in Abbildung 23 dargestellt ist.

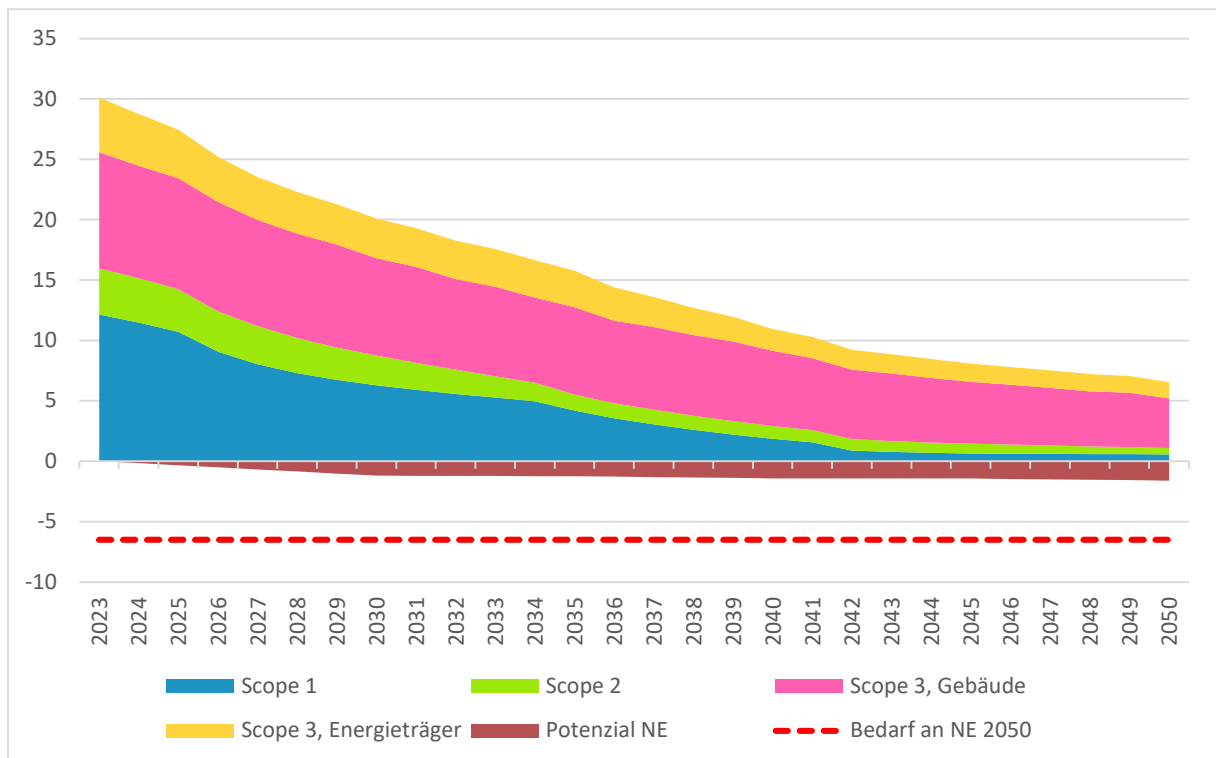


Abbildung 23: Entwicklung der brutto THG-Emissionen (Mt CO_{2eq} pro Jahr) pro Scope und der NE im Zeitverlauf bis 2050 im Basis-Szenario (d.h. mit einer kontinuierlichen Dekarbonisierung der Baumaterialien («KBOB Future» Werte Umsetzung bis 2050), Emissionsfaktoren Scope 3 stark reduziert.

Die in Abbildung 23 aufgeführten Summenwerte negativer Emissionen unter der Annahme gesicherter Permanenz der Speicherung wie in Kap. 6.3 dargestellt, setzen sich aus den Werten in Tabelle 30 zusammen:



Tabelle 30 NE Potential zwischen den Jahren 2023 und 2050 in Mt CO_{2eq}

	2023	2030	2035	2040	2045	2050
NE Pflanzkohle in Beton aus Tabelle 22	0	-0.02	-0.04	-0.05	-0.07	-0.10
NE-Potenzial Holz/Stroh (Szenario mehr Holz) aus Tabelle 24	-0.82	-1.14 (-1.60)	-1.15 (-1.54)	-1.23 (-1.66)	-1.16 (-1.56)	-1.16 (-1.60)
Entsorgung Altholz CCS aus Tabelle 24	0	-0.04	-0.06	-0.14	-0.20	-0.35
Summe NE (Szenario mehr Holz)	-0.82	-1,20 (1,64)	-1,25 (-1,64)	-1,42 (-1,85)	-1,44 (-1,84)	-1,61 (-2,05)

Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy, Carbotech

Als Zwischenfazit lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass alle verfügbaren Hebel genutzt werden. Reduzieren sich beispielsweise die EF Scope 2 und Scope 3 der Energieträger lediglich «leicht» anstelle «stark», so verbleiben im Jahr 2050 immerhin noch 8.2 Mt anstelle von «nur» rund 6.5 Mt, siehe Abbildung 24.

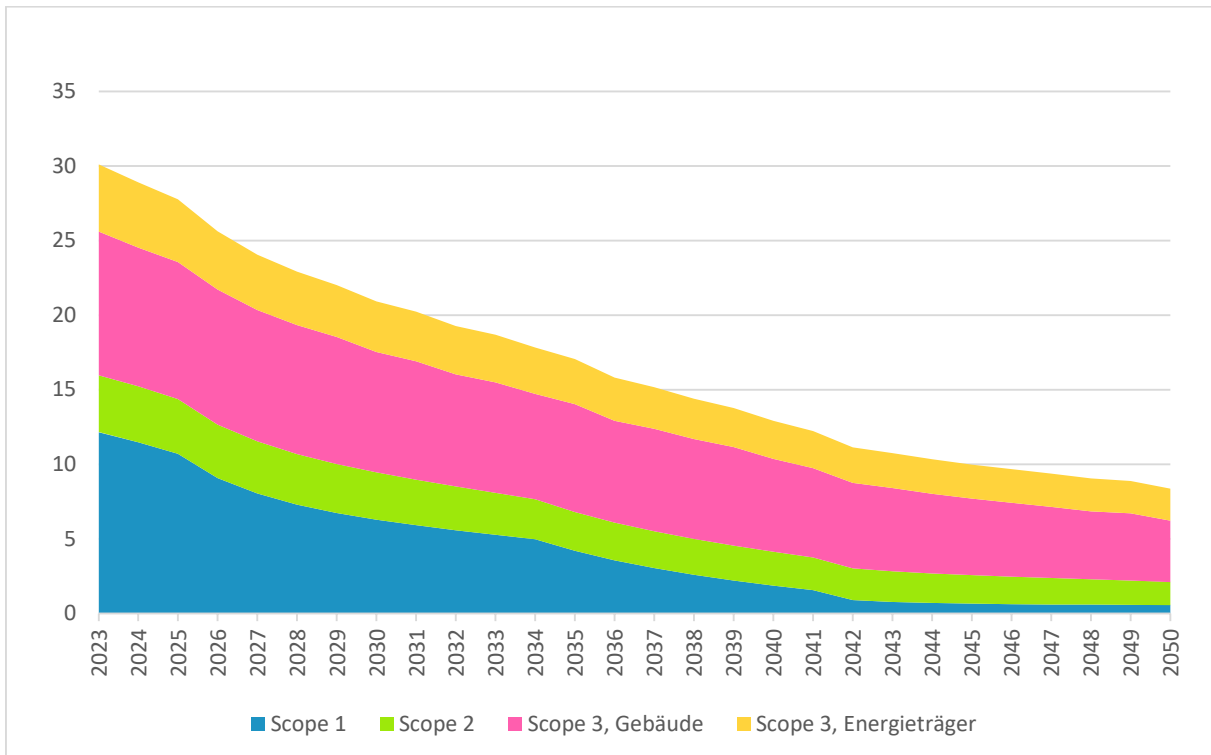


Abbildung 24: Entwicklung der brutto THG-Emissionen (Mt CO_{2eq} pro Jahr) pro Scope bis 2050 im Fall der Sensitivität mit nur einer leichten Reduktion der Scope 2 und 3 EF Energieträger.



7.4.2 Weitergehende Emissions-Reduktionsmassnahmen

Im Basis-Szenario wird das vom KIG für das Jahr 2050 abgeleitete Reduktionsziel nicht erreicht und es verbleiben im Jahr 2050 brutto THGE in der Höhe von rund 6.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Dies würde die vom KIG abgeleiteten Beträge von 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr bei weitem übersteigen. Deshalb sind nebst den im Basis-Szenario berücksichtigten Massnahmen noch weitere Hebel notwendig, deren Wirkung teilweise grob quantifiziert wird und teilweise im Nachgang von diesem Projekt weitergehend abzuschätzen sind. Folgende heutige und künftige best practice und best available technology (BAT) Ansätze im Gebäudebereich (d.h. ohne DACS) werden bzgl. Wirkung auf Basis der Tabelle 18 und weiteren Berechnungsgrundlagen dieses Projekts abgeschätzt:

- Vollständige Eliminierung der fossilen Energien in Gebäuden.
Zusatz-Effekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.6 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Vollständige Eliminierung der fossilen Energien bei der Erzeugung der Sekundärenergieträger Fernwärme und Strom (z.B. durch den Einsatz von Wärmepumpen, Biomasse, grünem Wasserstoff oder anderen fossilfreien bzw. erneuerbar erzeugten Energieträgern).
Zusatz-Effekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Halbierung der Scope 3 Emissionen der Energieträger.
Zusatz-Effekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.6 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden und Bauteilen, z.B. durch die umsichtige Planung von Gebäudeerneuerungen, Systemtrennung und wenn möglich Wiederverwendung von Bauteilen die Verbesserungen der Reparierbarkeit bei Bauteilen, Gebäudetechnik, Gebäudeausstattung etc.
Zusatzeffekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.85 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Weitere Reduktion der spezifischen Emissionen von Baumaterialien und Gebäudeelementen um 50% (über die Annahmen von «KBOB Future» hinaus).
Zusatzeffekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr.
- Flächenreduktion (Suffizienz) und weniger Abriss- und Ersatzneubau gemäss Annahmen bei den Sensitivitätsrechnungen.
Zusatzeffekt im Vergleich zum Basis-Szenario: ca. 0.3 Mt CO_{2eq} pro Jahr.

Unter Berücksichtigung von Überlagerungseffekten reduzieren sich die Betriebsemissionen um rund 1.7 Mt CO_{2eq} pro Jahr und die Emissionen Erstellung um rund 2.7 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Damit betragen die Brutto-Emissionen im Jahr 2050 rund 2 Mt CO_{2eq} pro Jahr (statt 6.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr wie im Basis-Szenario). Diese Emissionen lassen sich durch NE im Gebäudebereich ausgleichen (siehe Tabelle 30). Dies bedeutet zum einen, dass das Netto-Null Ziel im Gebäudebereich grundsätzlich erreichbar ist und zum anderen, dass alle verfügbaren Hebel in Bewegung gesetzt werden müssen, da es sich um eine «Punktlandung» ohne nennenswerte Spielräume handelt.



Abbildung 25: THG-Emissionen 2023 (Mt CO_{2eq} pro Jahr) Reduktion pro Hebel bis 2050 für das Basis-Szenario und die weitergehenden Massnahmen sowie Bedarf an NE in 2050. Quelle: TEP Energy, 2024



8 Quantifizierung Kohlenstoffvorrat

F1.5 Quantifizierung der Auswirkungen der Absenkpfade auf Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats in verbautem Holz und anderen Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Zur Quantifizierung des Kohlenstoffvorrats in verbautem Holz wurden mit dem Gebäudeparkmodell bzgl. der Holznutzung zwei Varianten berechnet. Darüber hinaus ergeben sich weitere Kohlenstoffvorräte aus dem Einsatz von Stroh sowie weiteren biogenen Anteilen. Die Bilanzierung des Kohlenstoffvorrats im Gebäudeparkmodell basiert auf dem Input und Output biogener Baumaterialien durch die Bauaktivitäten Neubau, Ersatz von Bauteilen und Abriss und der damit verbundenen Veränderung des Kohlenstoffvorrats im Gebäudebestand.

Der Steigerung beim Einsatz Bauholz steht im Basis-Szenario eine Reduktion von Energieholz gegenüber. Damit wird ein Teil des Anstiegs von Bauholz durch eine Verschiebung von energetischer zu einer stofflichen Nutzung abgedeckt.

8.1 Grundlagen

Ausgangsbasis sind die gemeinsamen Grundlagen des Basis-Szenario mit Annahmen zu Bauaktivitäten, Abriss und Anteilen Holzbau in unterschiedlichen Bereichen und den daraus resultierenden Ergebnissen der Berechnungen mit dem Gebäudeparkmodell.

8.2 Prämissen

Eine Erhöhung des Holz- und Stroheinsatzes im Gebäudebereich ist nur im Rahmen einer nachhaltigen Nutzung sinnvoll. Dies wird berücksichtigt...

- ...durch eine massvolle Erhöhung der Holznutzung aus Schweizer Wäldern: Die Nutzung erfolgt nachhaltig (natürlicher Zuwachs \geq Ernte), sodass die Grenzen zum Erhalt der C-Speichermenge in Wäldern nicht überschritten werden. Die Erhöhung des Einsatzes von Bauholz kann zu einem wesentlichen Teil durch eine Reduktion von Energieholz für Einzelheizungen erfolgen.
- ...durch eine massvolle Steigerung des Einsatzes von Stroh im Baubereich. Dies bedingt die Einfuhr von Stroh für Dämmungen oder ähnlichen Produkten. Angenommen wurde eine limitierte Einfuhr mit Fokus auf Regionen mit Strohüberschuss (Nachbarländer und Osteuropa).

Die Erhöhung der Importe ohne Sicherung der Anbaubedingungen und der Konditionen der Bewirtschaftung von Wäldern wird nur in geringem Rahmen als zielführend betrachtet (fehlende Sicherung einer nachhaltigen Nutzung von Wäldern und Zielkonflikte mit dem Ausbau von Holzbau in Nachbarländern, Konflikte bezüglich der Nutzung der anfallenden Mengen Stroh).

8.3 Annahmen

Die folgenden Eckpunkte Modellierung leiten sich aus den Grundlagendokumenten in Kapitel 2.5 sowie den zu Holz definierten Grundlagen in Kapiteln 6.1.1 ab:

- Die Obergrenze der nachhaltigen Nutzung Wald liegt im Bereich von 7 bis 8 Mio. m^3 Holz. Zum Vergleich: Die Menge Ernteholz lag in den vergangenen Jahren bei 5-6 Mio. m^3 Holz (BAFU, 2021). Die angenommene Erhöhung der Erntemenge kann demnach mit einer nachhaltigen Nutzung vereinbart werden (d.h. ohne Rückgang der Kohlenstoffvorräte im Wald). Ein massvoller Ausbau beim Energieholz und ein gleichzeitiger moderater Ausbau Bauholz sind ohne Verringerung des Waldbestandes möglich.



- Eine Steigerung von Holzendprodukten in der Grössenordnung von 30% bis zum Jahr 2030 wird vom BAFU als Zielwert Ressource Holzendprodukte im Rahmen einer nachhaltigen Waldnutzung gegenüber 2012 bis 2017 postuliert. Erste Schritte in Richtung Ausbau sind mutmasslich bereits erfolgt.
- Laubholz wird aktuell vor allem als Energieholz eingesetzt. Durch die Ausweitung der Nutzung als Bauholz anstelle von energetischer Nutzung kann ein Beitrag zur Steigerung des Holzanteils bei Neubauten erreicht werden. Bei den Annahmen im GPM wird ein Rückgang des Energieholzeinsatzes in Einzelheizungen um ca. 0.8 Mio. t verzeichnet, sodass der Mehrbedarf von Bauholz mit 0.2-0.3 Mio. t gut abgedeckt werden kann.
- Eine effizientere Nutzung und ein massvoller Ausbau von Energieholz sind Ziele der Ressourcenplanung. Lösungen für den Betrieb von Gebäuden sollen soweit möglich im Bereich Niedertemperatur mit anderen Technologien gelöst werden, so dass genügend Holz für Industrieanwendungen mit höheren Temperaturen verfügbar ist.

Im Basis-Szenario wird eine weitere Zunahme des Anteils an Holzbau in unterschiedlichen Neubau-Gebäudekategorien bis 2050 hinterlegt. Damit verbunden steigt der Bauholz-Endverbrauch in einer ersten Phase von 2023 bis 2030 um 30% an (was im Sinn des Zielwerts der Ressourcenpolitik 2030 ist), nimmt aber im Anschluss zwischen 2040 und 2050 durch die sinkende Bauaktivität wieder ab. In der Szenario-Variante *V3.1b Mehr Holz* wird eine Erhöhung des Einsatzes von Holz um bis zu 40% für den Holzverbrauch 2030 angenommen und in den Folgejahren eine konstante Nutzung in der Zeitspanne bis 2050 hinterlegt.

8.4 Ergebnis

Die nachfolgende Tabelle 31 zeigt die im Zeithorizont von 2022 bis 2050 erwarteten Kohlenstoffflüsse in kt C auf der Ebene der Bauelemente für das Basis-Szenario sowie für die Szenario-Variante *V3.1b Mehr Holz*

Als Input ausgewiesen sind die Kohlenstoffmengen der eingesetzten Materialien in Neubauten sowie die Kohlenstoffmengen der benötigten Ersatzbauteile der Sanierung des Gebäudebestandes (Aufbau / Zunahme des Kohlenstoffvorrats). Als Output ausgewiesen werden die Kohlenstoffmengen der anfallenden Mengen an Altholz / Stroh beim Abriss und beim Ersatz von Bauteilen im Rahmen der Sanierungen (Abriss/Ausbau).



Tabelle 31 Quantifizierung Zu- und Abnahme des Kohlenstoffvorrates im Gebäudepark (Holz und Stroh).

Summe Stoffflüsse Holz/Stroh 2023 bis 2050	Input			Output	Netto	Netto
	Kohlenstoff Zu- und Abbau in kt C	Bauteil Neubau	Bauteil Ersatz	Total	Abriss/ Ausbau	C-Zuwachs Basis-Szenario
Konstruktion Aussenwand	292	0	292	-14	278	336
Innenwände	417	0	417	-50	367	585
Stützenkonstruktion	23	0	23	-3	20	19
Decken	2165	0	2165	-142	2023	2325
Flachdach	145	0	145	-3	142	197
Dämmung Aussenwand	46	0	46	0	46	638
Fensterrahmen	337	1265	1602	-1257	346	357
Dämmung Steildach	18	76	94	-84	9	294
Trennwände	92	294	386	0	386	392
Bodenbeläge	462	1780	2242	-2675	-433	-434
Wandbekleidung innen	43	113	156	-114	42	52
Unterdach Deckenbekleidung	305	549	854	-557	298	296
Zwischendecken Bekleidung	37	52	89	-15	74	79
Summe in kt C	4'854	4'128	8'982	-5'086	3'896	5'455
<i>Umrechnung in kt CO₂*</i>	<i>17'799</i>	<i>15'135</i>	<i>32'931</i>	<i>-18'648</i>	<i>14'285</i>	<i>20'003</i>

Quelle: Annahmen und Berechnungen TEP Energy, Carbotech

Die Netto-Veränderungen beim Kohlenstoffvorrat im Gebäudepark ergeben sich durch die Differenz der Zunahme beim Neubau und der Abnahme durch Abriss. Bei der Erneuerung und beim Bauteilersatz wird an dieser Stelle vereinfacht eine ausgeglichene Bilanz der Zu- und Abnahme angenommen.

Über den Zeithorizont bis 2050 liegt die Zunahme beim Neubau 180% bis 195% höher als die beim Abriss anfallende Abnahme der Kohlenstoffmengen. Die 3.9 – 5.4 Mt Kohlenstoff, die so zusätzlich zwischen 2023 und 2050 eingebaut werden, entsprechen temporären Senken bzw. Negativemissionen (bei Sicherung der Permanenz) in der Höhe von etwa 14 bis 20 Mt CO₂ oder 0.5 bis 0.7 Mt CO₂ pro Jahr (bezogen auf die 27 Jahre zwischen 2023 und 2050). Voraussetzung für eine Anrechnung der temporären Senken als NE durch eine Erhöhung des Kohlenstoffvorrates im Gebäudepark ist gemäss den Überlegungen in Kapitel 6 eine gesetzliche oder rechtsverbindliche Sicherung (technisch umgesetzt zum Beispiel über eine BECCS-Lösung bei der Entsorgung von Altholz⁹, d.h. ein Abscheiden des CO₂ und eine langfristig sichere Speicherung).

Die Bedeutung der Zunahme und Abnahme des Kohlenstoffvorrats, ausgedrückt als C-Speicher, ist in der nachfolgenden Abbildung für das Basis-Szenario mit weiteren Details zu den modellierten Bauteilen illustriert.

⁹ Vorzugsweise im Inland, da ein Export ins Ausland mit größeren Unwägbarkeiten verbunden ist.

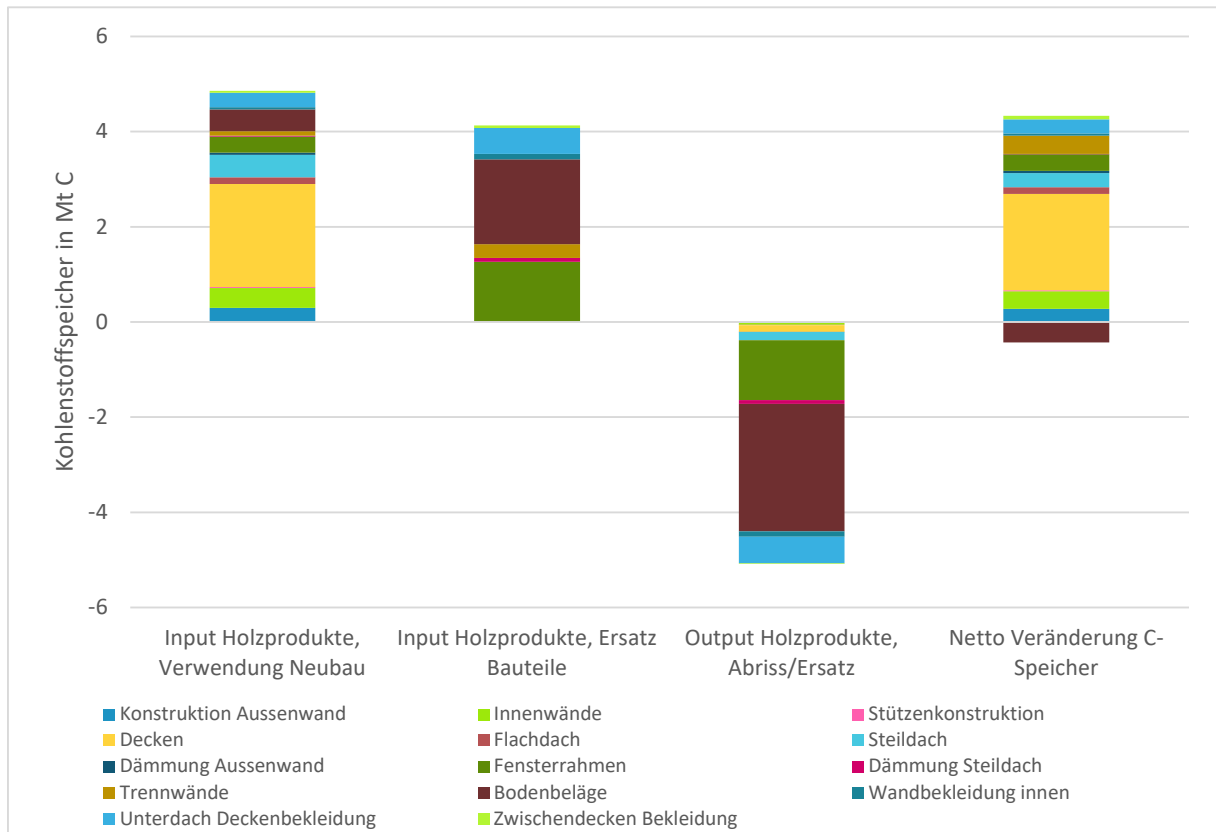


Abbildung 26: Input und Output von Holz in der Szenario-Variante *V3.1b Mehr Holz* und dadurch erzielter Zuwachs des Kohlenstoffspeichers (Berechnung in Mt C). Bei einem gleichwertigen Ersatz bei der Sanierung entspricht der C-Gehalt der ausgebauten Menge dem Wert der neu verwendeten Produkte. Der Zuwachs ergibt sich aus der Differenz zwischen Neubau, Erneuerung und Abriss.

Die Graphik der Veränderung der Kohlenstoffspeicher zeigt die unterschiedlichen Einsatzgebiete von Holz. Grössere Effekte ergeben sich aus dem Zuwachs im Neubau mit der verbauten Menge Holz in Geschossdecken, Innenwänden und Deckenbekleidungen. Bei der Erneuerung wird mit einem gleichwertigen Ersatzprodukt kein Zuwachs erzielt, die Speichermenge des ausgebauten Bauteils entspricht der Menge im neu eingebauten Bauteil.

Ein Szenario mit verstärktem Re-use statt Ersatz wurde nicht gerechnet, da der C-Gehalt der wiederverwendeten Bauteile als identisch mit einem neuen Produkt angenommen wird. Eine Veränderung ergibt sich durch den Re-use bei der Nutzung der Wälder durch den geringeren Bedarf Holz für die Neuproduktion und damit Spielraum für mögliche alternative Holznutzungen.

Im Kontext Ökosystem-Gebäudepark bedeutet eine Erhöhung der C-Speicher im Gebäudepark nur beschränkt eine Verschiebung hin zu einem geringeren Zuwachs der Vorräte auf der Seite der Wald-Ökosysteme. Der Mehrbedarf wird mehrheitlich durch eine sinkende Menge Energieholz abgedeckt. Im Ökosystem Wald führt eine leichte Erhöhung der Ernte nicht zu einer Einbusse der Kohlenstoffvorräte (natürlicher Zuwachs \geq Erntemenge). Der jährliche Zuwachs an Kohlenstoffvorrat im Wald liegt mit der Erhöhung der Erntemengen jedoch etwas unter dem verzeichneten Zuwachs der Vorjahre. Die Nutzung von Holz innerhalb der gesetzten Rahmenbedingungen ist auch im Hinblick auf die anstehende Veränderung der Wälder zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Hitze und Trockenheit sinnvoll, da der Fokus auf die Maximierung der Vorräte im Wald auch Risiken in Form von Verlusten durch Sturm und Trockenheit mit sich bringen würde.



9 Territoriale Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade

F1.6 Wie hoch sind die territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade (gemäss langfristiger Klimastrategie, in der NET den nicht vermeidbaren Emissionen vorbehalten sind) bei einer Lebenswegbetrachtung von Gebäuden respektive des Gebäudeparks?

Zur Bestimmung der territorialen Anteile wurde im ersten Schritt im vorhergehenden Kapitel für das Basis-Szenario die Entwicklung der THG-Emissionen für Betrieb und Erstellung und die verbleibenden Emissionen mit den Massnahmen im Basis-Szenario analysiert. Der Anteil schwer vermeidbarer Emissionen im Jahr 2050 wurde ausgehend von diesen Berechnungen bestimmt.

Die Absenkpfade THG-Reduktion Betrieb und Erstellung sind in Kap. 4 definiert, die Anteile der Emissionen In- und Ausland werden nachfolgend bestimmt und daraus die territorialen Anteile der Emissionsziele abgeleitet. Nachfolgend sind die dazu verwendeten Grundlagen, Prämissen und Annahmen sowie Resultate aufgeführt.

Die Zuordnung der territorialen Anteile basiert auf den nachfolgenden Grundlagen, Prämissen und Annahmen.

9.1 Aufteilung territoriale Anteile der THG Emissionen Betrieb

Für die THG-Emissionen aus dem Betrieb wird die nachfolgende Verteilung territorialer Anteile angenommen (Tabelle 32).

Tabelle 32 Zuordnung der territorialen Anteile der THG-Emissionen (Scopes 1-3)

	Inland	Ausland	Anmerkungen
Scope 1			Direkte Emissionen
Erdgas	100%	0%	Emission aus lokaler Verbrennung
Heizöl	100%	0%	Emission aus lokaler Verbrennung
Scope 2			Kraft- bzw. Heizwerksemissionen Strom- und Fernwärmeerzeugung
Fernwärme	100%	0%	Nur nationale Erzeugung
Strom	gemäss separater Bilanzierung ¹⁾	gemäss separater Bilanzierung ¹⁾	Berücksichtigung der Stromimporte gemäss KBOB
Scope 3			Emissionen der Vorkette
Heizöl	10%	90%	Produktion weitgehend im Ausland
Erdgas	10%	90%	Produktion weitgehend im Ausland
Holz	50%	50%	Vorkette hälftig im In- und Ausland
Strom	gemäss separater Bilanzierung ¹⁾	gemäss separater Bilanzierung ¹⁾	Berücksichtigung der Stromimporte gemäss KBOB
Fernwärme	100%	0%	Nur nationale Erzeugung
Solar	25%	75%	Produktion PV-Module vornehmlich im Ausland
Biogas	50%	50%	Vorkette hälftig im In- und Ausland

1) siehe Kap. 2.3.3 und Kap. 2.3.4

Quelle: Annahmen Carbotech und TEP Energy



9.2 Territoriale Anteile der Materialien und der Emissionen

Im diesem Unterkapitel sind die Emissionen aus Erstellung der Gebäude dargestellt, zunächst ohne die Emissionen Erstellung Energieträger. Die Gesamtbilanz inklusive aller Scopes finden sich im darauffolgenden Unterkapitel 9.3

9.2.1 Grundlagen zur Aufteilung territoriale Anteile THG-Emissionen Erstellung (Materialien)

Für die erfassten Materialkategorien wird jeweils der Anteil Inland- und Ausland-Produktion ausgewiesen und ausgehend von dieser Verteilung eine Zuordnung für den anfallenden Anteil der THG-Emissionen im Ausland gemacht. Folgende Annahmen wurde dabei getroffen:

- Emissionen der Produktion der importierten Baumaterialien fallen zu 100% im Ausland an.
- Kunststoffe: Für die Produktion von Kunststoffen und von Schaumstoffen (z.B. geschäumte Dämmstoffe wie EPS) werden Ausgangsstoffe, wie zum Beispiel Kunststoff-Granulate, im Ausland hergestellt und importiert. Damit fällt ein relevanter Anteil der THG-Emissionen in der Vorkette der Produktion im Ausland an, d.h. beim Abbau und der Herstellung der verwendeten Ausgangsstoffe.
- Die Emissionen der Entsorgung von Baustoffen fallen gleichermassen für Importware und die Schweizer Produktion zu 100% in der Schweiz an.
- Die Verteilung THG-Emissionen von Metallen ist nicht proportional zu den Produktionsanteilen Schweiz/Ausland. Bei Primärmaterial fallen gegenüber Sekundärmaterial höhere THGE-Anteile an. Für Armierungsstahl mit hohem Anteil Elektrostahl fallen zudem die länderspezifischen Bedingungen und eingesetzten Stromprodukte ins Gewicht.
- Im Bereich Aluminium und Kupfer erfolgt nur eine Endverarbeitung in der Schweiz, der Anteil der Emissionen wird auf maximal 20% geschätzt.

Die nachfolgende Tabelle 33 beschreibt die Materialkategorien und die Zuordnung der THG-Emissionen. Für die zukünftige Produktion wird ein ähnlicher Anteil Inland Ausland angenommen und damit eine vergleichbare Dekarbonisierung der Produktion Inland und Ausland angenommen.



Tabelle 33 Anteile Inlandproduktion und Import Ausland, Herleitung Emissionen Zuordnung In-/Ausland (Markt- und Importanteil aus Erneuerung/ Erweiterung Ökobilanzdaten KBOB 2016 sowie Grundlagen Strategie Holz)

	Marktanteil Produktion Inland in Prozent	Effekte Zuordnung THG-Emissionen Vorkette und Ort der Endverarbeitung	Anteil THG-Emissionen Ausland
Holz	50%	Nicht relevant	50%
Weitere biogene (Stroh als Beispiel Dämmstoff)	Annahme wie Holz 50%	Annahme wie Holz	Annahme wie Holz 50%
Dämmstoffe mineralisch	75% (75% Steinwolle, 80% Glaswolle)	Nicht relevant	25%
Dämmstoffe Schaumstoffe	86% EPS 55% XPS 55% PUR	Vorkette Schweizer Produktion: THG-Emissionen Ausgangsstoffe und Treibgase Produktion Ausland	45%
Beton	83% Zement 86% Sand/Kies 81%	Nicht relevant	17% Zement 14% Sand/Kies 19%
Zement	86%	Nicht relevant	14%
Mineralische Baustoffe (Backsteine, etc.)	89% 85% Backsteine und Dachziegel (13% Natursteine)	Nicht relevant	11%
Glass	0%	Nicht relevant	100%
Armierungsstahl	55% (Elektrostahl)	CH Produktion Elektrostahl (keine Produktion Primärstahl). Importe Elektrostahl aus Europa (Annahme etwas höhere Emissionen im Vergleich zur CH-Produktion)	50%
Stahl	Abgeleitet von Anteilen weitere Metalle (CH keine Produktion Primärmaterial, Recycling und Endverarbeitung)		80%
Aluminium	Abgeleitet von Anteilen weitere Metalle (CH keine Produktion Primärmaterial, Recycling und Endverarbeitung)		80%
Kunststoffe	Annahme wie PUR		45%
Kupfer	Abgeleitet von Anteilen weitere Metalle (CH keine Produktion Primärmaterial, Anteile am Recycling und Endverarbeitung)		80%
Diverse (Putz, Gips etc.)	Annahme wie mineralische Baustoffe		11%

Quelle: Annahmen Carbotech und TEP Energy

9.2.2 Ergebnis: Territoriale Aufteilung der Emissionen Erstellung

Die territoriale Aufteilung der THG-Emissionen Erstellung ist für die Jahre 2023 und 2050 nachfolgend dargestellt. Im Basis-Szenario wird mit einer Reduktion der Emissionen in der Produktion der wichtigsten Baumaterialien bis 2050 gerechnet «KBOB Future». Demgegenüber ist die Entwicklung für das Szenario konstante Emissionsfaktoren «KBOB 2021» dargestellt. Mit Optimierung der Gebäude und Bauteile werden Materialmengen und damit Emissionen im Inland und im Ausland reduziert. Die



Reduktion der THG-Emissionen im Basis-Szenario mit «KBOB Future» zeigt den zusätzlichen Effekt der geplanten Dekarbonisierung auf der Seite der Produktion der Baumaterialien.

Es sei hier angemerkt, dass die Summe der in Abbildung 27 dargestellten Emissionen nur die wichtigsten Baumaterialien enthält. Das Total dieser Materialien ist mit 2.6 Mt geringer als das Total sämtlicher Baumaterialien, das sich auf 4.1 Mt beläuft (siehe Tabelle 18).

Um sicherzustellen, dass die notwendigen Schritte bei den Herstellern der Baumaterialien erfolgen, sind Zielsetzungen bzgl. THG-Emissionen für die Produktion im Inland und Ausland der wichtigsten Baumaterialien und entsprechend Vorgaben für die Einfuhr von Baumaterialien notwendig¹⁰.

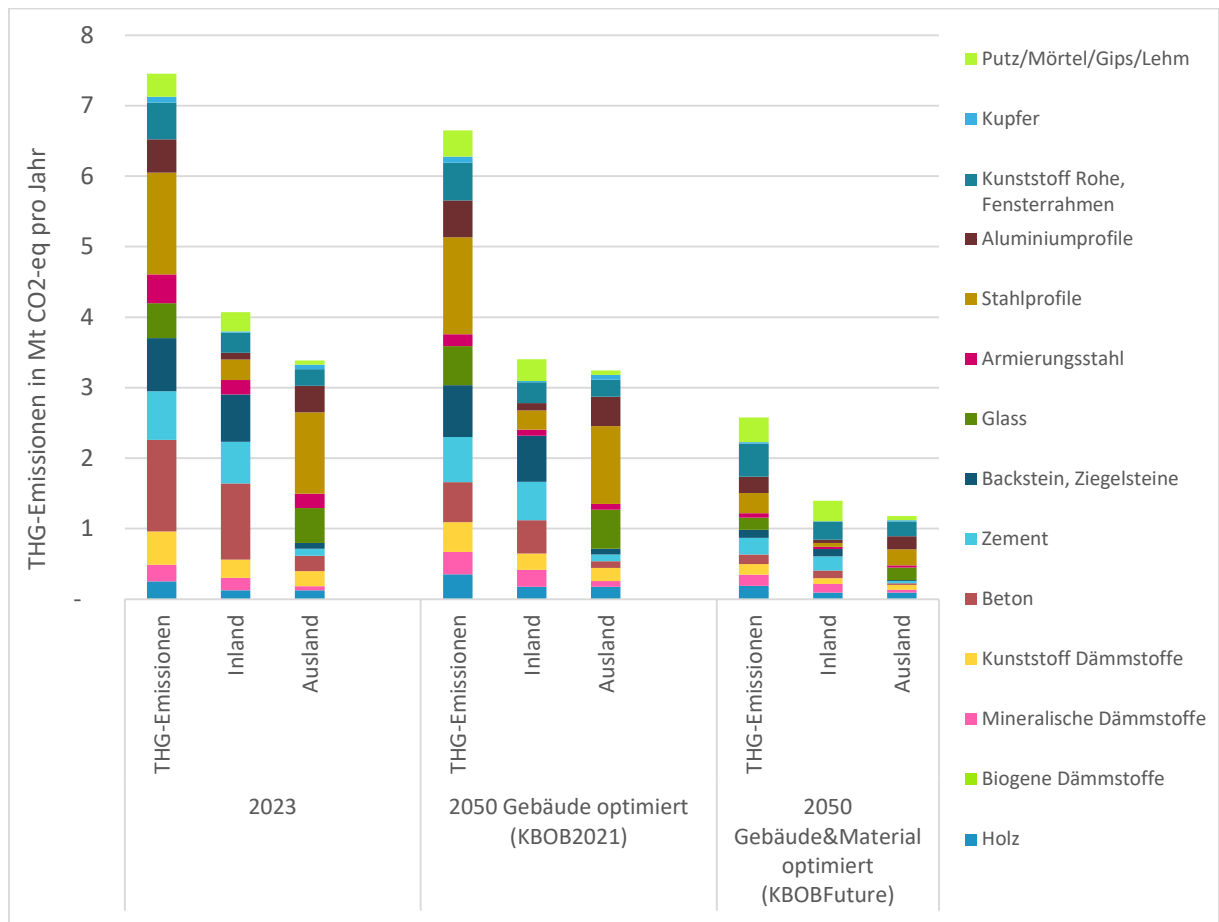


Abbildung 27: THG-Emissionen der Baumaterialien und Anteile Inland und Ausland im IST-Zustand 2023 und für die Perspektive der THG-Emissionen für das Jahr 2050 für das Szenario mit konstanten Emissionsfaktoren «KBOB2021» und mit abnehmenden Emissionsfaktoren gemäss dem Basis-Szenario mit einer Dekarbonisierung der Produktion Baumaterial «KBOB Future».

¹⁰ Relevant sind geplante Schritte zur Dekarbonisierung der Industrie in der EU und deren Handhabung beim Carbon Border Adjustment Mechanism CBAM (European Commission, 2023).



9.3 Gesamtdarstellung der Aufteilung der THG-Emissionen Erstellung und Betrieb

In den folgenden Darstellungen (Abbildung 28 bis Abbildung 30) sind die Gesamtemissionen der wichtigsten Materialien Gebäudeerstellung und des Betriebes aufgeteilt nach Scopes und nach Gestehungsort Inland / Ausland darstellt.

Im Ausgangsjahr der Betrachtung 2023 betragen die Gesamtemissionen gemäss Tabelle 21 knapp 30 Mt CO₂eq/a. Diese bestehen noch zu weit über einem Drittel aus den Scope 1 Emissionen von Heizöl und Erdgas, welche naturgemäss zur Gänze im Inland anfallen. An zweiter Stelle mit etwas weniger als einem Drittel der gesamten THGE folgen die Scope 3 Emissionen der Baumaterialien, welche wiederum grob hälftig auf das Inland und das Ausland entfallen. Die restlichen Emissionen entfallen auf Scope 2 und 3 Emissionen der Energieträger, welche in der Summe mehrheitlich dem Ausland zugeordnet werden.

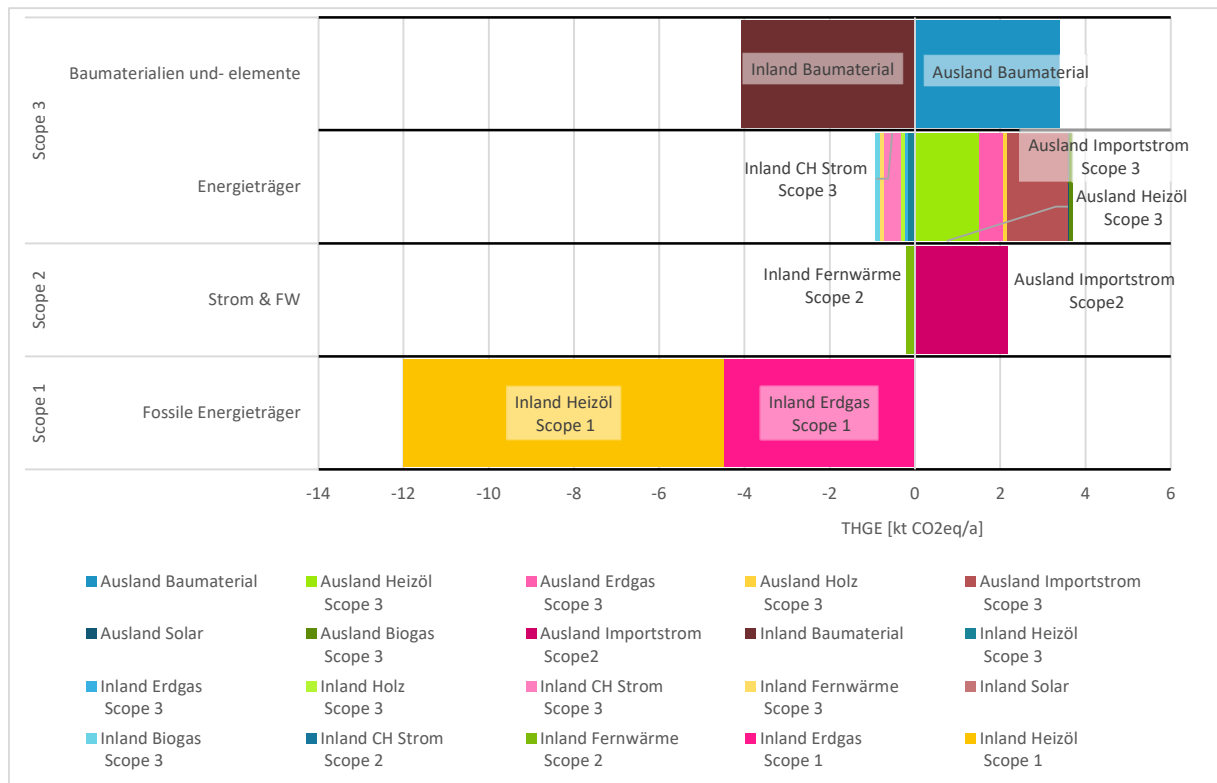


Abbildung 28: Zuordnung des Emissionsbudgets der verschiedenen Quellen des Gebäudebereichs auf die Scopes 1 bis 3 und auf die Territorien Inland und Ausland. Status Quo: Jahr 2023 *Quelle: Eigene Darstellung.*

Gegenüber dem Ausgangsjahr sind im Jahr 2050 die THGE (Abbildung 29) stark zurückgegangen. Dies unter der Annahme dass sich die Emissionen Baumaterialien gemäss «KBOB Future» entwickeln. In der Summe aus Erstellung und Betrieb betragen diese dann noch ca. 5 Mt CO₂eq/a. Für den Betrieb wird hier die Entwicklung der Emissionsfaktoren Energieträger gemäss Basis Szenario unterstellt. Von den Gesamtemissionen entfallen ca 3/5 auf das Inland und 2/5 auf das Ausland. Knapp die Hälfte der Inlandsemissionen gehen auf die Baumaterialien Gebäude zurück. Die Emissionen Scope 1 sind von vormals 12 Mt CO₂eq auf unter 0.5 Mt CO₂eq /a gesunken. Die Energieträgeremission werden von Scope 3 Emissionen mit knapp 1 Mt CO₂eq im Inland dominiert, welche sich gegenüber dem Ausgangsjahr verdoppelt haben. Dies ist auf die Verdopplung der erzeugten inländi-



schen Strommenge zurückführen, wohingegen sich die aus dem Ausland importierte Strommenge im selben Zeitraum halbiert hat.

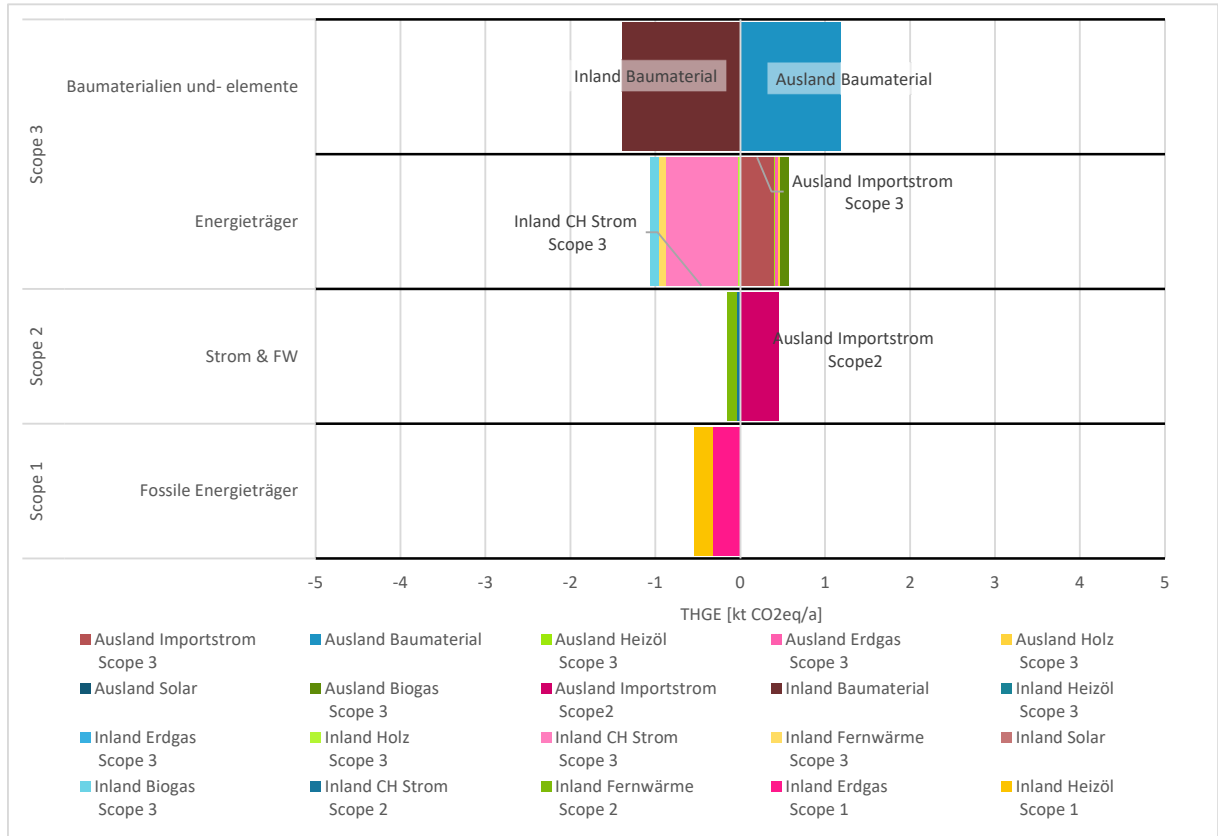


Abbildung 29 Zuordnung des Emissionsbudgets der verschiedenen Quellen des Gebäudebereichs auf die Scopes 1 bis 3 und auf die Territorien Inland und Ausland. Basis Szenario Jahr 2050 «KBOB Future» Quelle: Eigene Darstellung

In der folgenden Abbildung 30 sind die Emissionen der wichtigsten Baumaterialien Erstellung gemäss Szenario «KBOB EF 2021» dargestellt. Zudem wurden für die Entwicklung der Emissionsfaktoren Energieträger hier analog ein Verbleib auf dem Ausgangsniveau angenommen. Dies hat zur Folge, dass die Gesamtemissionen dann noch auf einem Niveau von über 10 Mt CO₂eq/a verbleiben und sowohl für die Erstellung als auch für den Betrieb im Jahr 2050 etwa hälftig im Inland und im Ausland anfallen.

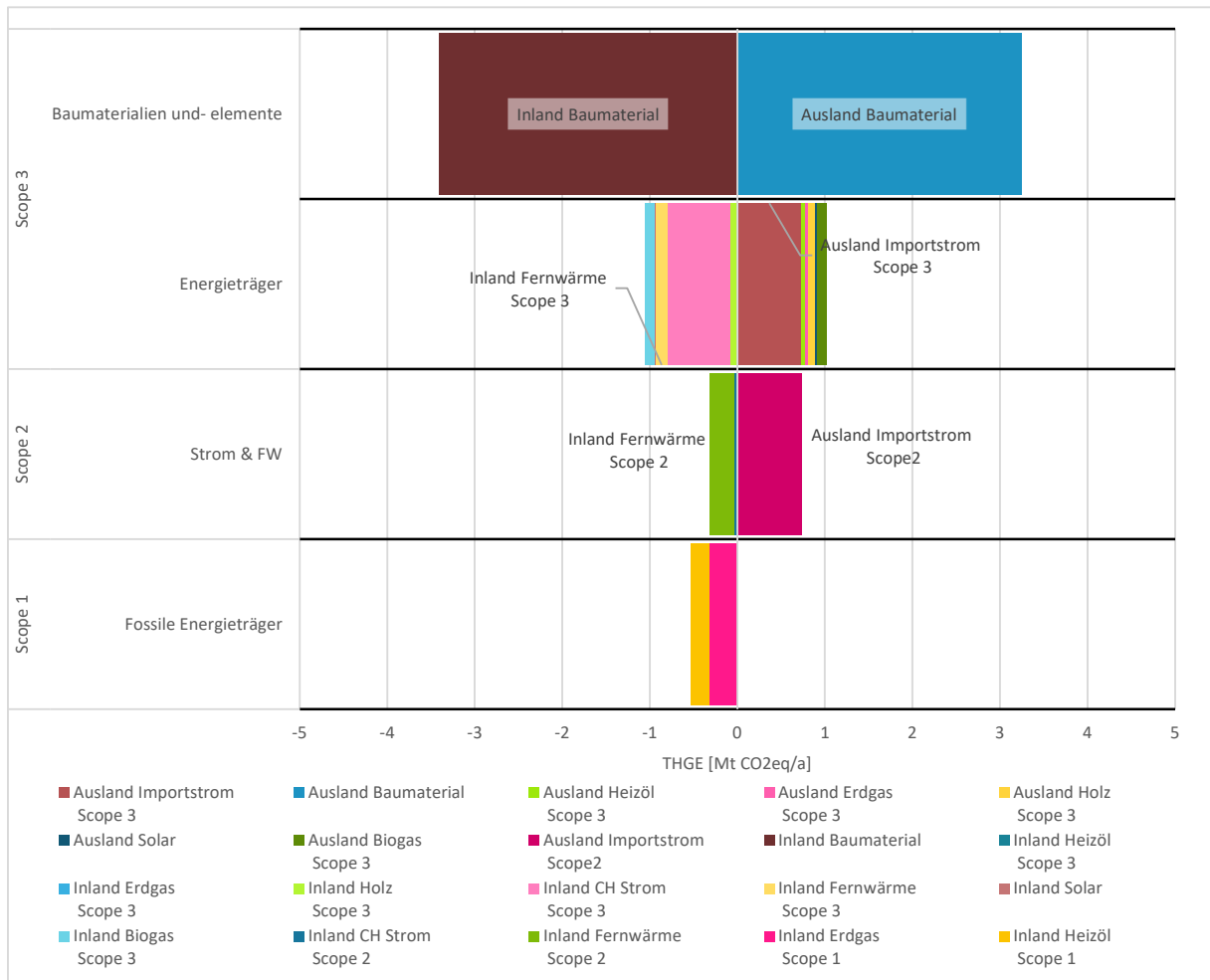


Abbildung 30 Zuordnung des Emissionsbudgets der verschiedenen Quellen des Gebäudebereichs auf die Scopes 1 bis 3 und auf die Territorien Inland und Ausland. Szenario 2050 «KBOB EF 2021»
Quelle: Eigene Darstellung

9.4 Schlussfolgerung zur Aufteilung der THGE auf In- und Ausland

Die THG-Emissionen der Erstellung liegen aktuell in der Grössenordnung von 9 - 11 Mt CO₂eq, davon wird fast die Hälfte der Emissionen der Produktion im Ausland zugeordnet. Die Verminderungsziele für den Sektor Industrie von 90% gegenüber 1990 gemäss der Vorgabe des KIG werden als Massstab für die Reduktion der THG-Emissionen der Erstellung im Inland und Ausland verwendet. Damit bleibt ein Endwert schwer vermeidbarer Emissionen auf der Seite der Erstellung von etwa 2 Mt CO₂eq im Jahr 2050 mit je etwa 1 Mt CO₂eq für den Teil Inlandproduktion und Importware aus dem Ausland.

Im Basis-Szenario wird dieser Wert deutlich überschritten und entsprechend auch das Inlandziel für die Reduktion im Bereich Baumaterialien. Die im Kap. 7.4.2 dargelegten Überlegungen sind sinngemäss auf die Bereiche Inland und Ausland anzuwenden.



10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch die in diesem Bericht beschriebenen Top-down Betrachtungen, mit denen die eingangs formulierten Forschungsfragen beantwortet werden, lassen sich einige aufschlussreiche Schlussfolgerungen ziehen. Wir strukturieren sie bezugnehmend auf diese Forschungsfragen wie folgt:

F1.1 Zieldefinition: Was bedeutet Netto-Null in Bezug auf die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudeparks Schweiz verursachten THG-Emissionen (THGE) bis 2050 unter Einbezug von Scope 1, 2 und 3?

Aus klimawissenschaftlicher Sicht soll ein Ziel von «well below 2°C» oder gar von max. 1.5°C Erderwärmung eingehalten werden. Daraus folgt, dass das verbleibende Emissionsbudget sehr begrenzt ist. Dieses beschränkte Budget lässt sich mit verschiedenen Ansätzen auf die einzelnen Länder und auf die einzelnen Emissionssektoren allozieren. Bezugnehmend auf die Vorgaben des Bundesgesetzes über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG) soll der Trend der Emissionen zwischen 2010 und 2023 bei den Scopes 1 und 2 bis 2050 fortgeführt und damit bis auf 0 abgesenkt werden. Bei den Emissionen des Scopes 3 muss der Trend ab 2040 verstärkt nach unten abgesenkt werden.

Das für die Periode 1990 und 2050 zur Verfügung stehende Emissionsbudget ist bis dato (2023) zu rund 70% bis 75% aufgebraucht und das Restbudget bis 2050 beträgt für den Gebäudebereich noch rund 510 Mt. Wird das Emissionsbudget für den Gebäudebereich der Schweiz mittels Zuordnung des globalen Emissionsbudgets bestimmt, beträgt dieses je nach Allokationsansatz und Wahrscheinlichkeitsanforderung sogar nur noch 200 Mt CO_{2eq} oder weniger. Dies bedeutet, dass die Zielpfade im Vergleich zu den Vorgaben des KIG noch deutlich rascher abgesenkt werden müssten. Umgekehrt formuliert ermöglichen die Vorgaben des KIG nur das Einhalten des 2°C-Ziel gemäss dem Grandfathering-Prinzip, dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 83%. Das 1.7°C-Ziel wird dabei mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% eingehalten, hingegen wird das 1.5°C-Ziel aber klar verfehlt. Bei den beiden anderen Allokationsansätzen gemäss Alvaux et al. (2023) müssten die Emissionen noch deutlich stärker und rascher gesenkt werden, um die entsprechenden Budgetwerte einhalten zu können.

F1.2 Welche THGE-Reduktionen und welche Negativemissionen werden von der Erstellung und welche THGE-Reduktionen vom Betrieb erwartet, um Netto-Null im Gebäudebereich in einer Lebenswegbetrachtung zu erreichen?

Die Top down Betrachtungen, u.a. mittels der Verwendung des Gebäudeparkmodells, ergeben, dass die oben formulierten Zielsetzungen bis ca. 2040 in etwa eingehalten werden könnten. Voraussetzung dafür sind eine konsequente Abkehr von fossilen Energieträgern nach dem Ende der Lebensdauer der entsprechenden Heizanlagen, eine Dekarbonisierung der Fernwärme sowie eine deutliche Reduktion der Emissionen bei der Herstellung von Baumaterialien und -elementen. Hilfreich erweist sich hierbei der Umstand, dass sich die Neubautätigkeit gegenüber heute deutlich verlangsamt (um rund die Hälfte). Umso bedeutender werden die THG-Emissionen, die aus der Sanierung des Gebäudebestands entstehen.

Ab 2040 verlangsamt sich der Absenkpfad der Emissionen Erstellung, so dass im definierten Basis-Szenario im Jahr 2050 noch Rest-Emissionen von 4.1 Mt übrigbleiben (von rund 20 Mt im Jahr 1990). Weitere rund 2.4 Mt verbleiben bei den Scope 2 und den Scope 3 Emissionen. Sofern nicht weitere Massnahmen unterstellt werden, müssten entsprechend rund 6.5 Mt CO_{2eq} mittels Negativemissionstechnologien (NET) neutralisiert werden, was die vorgesehenen NET-Beiträge gemäss KIG von 2 Mt CO_{2eq} bei weitem überschreitet. Solche weitergehenden Reduktionsmöglichkeiten werden in der Fragestellung F1.4 erörtert.



F1.3 Wie gross sind die Potenziale bzw. die nachhaltige Verfügbarkeit von Baustoffen, insbesondere der Biomasse-basierten, welche zu Negativemissionen im Gebäudebereich führen.

Die NET Potenziale auf der Ebene der Baustoffe wurden, ausgehend von den Annahmen zur Verfügbarkeit und zu Einsatzmengen im Gebäudepark, identifiziert, und zwar für das Basis-Szenario im Zeitraum 2023 bis 2050. Bei den Biomasse-basierten Baustoffen Holz und Stroh sowie bei der Verwendung von Pflanzkohle im Beton sind aufgrund offener Fragen der Permanenz der Speicherung methodische Fragen der Anrechnung zu berücksichtigen. Das ausgewiesene Potenzial entspricht dem Maximalwert der Anrechnung im Sinne der in Teilbericht F0 definierten Variante mit rechtlich verbindlicher Sicherung. Demgegenüber wird in der Minimalvariante langfristig die volle Freisetzung und somit kein NET Potenzial angerechnet.

Beton NET Potenziale, forcierte Karbonatisierung und Einsatz Pflanzkohle

Mit zwischen 2023 und 2050 abnehmender Neubautätigkeit sinkende Beton-Einsatzmengen erwartet. Im Basis-Szenario ergibt sich ein Rückgang von jährlich 12 Mt Beton auf 5.5 Mt Beton im Jahr 2050. Demgegenüber wächst die anfallende Menge Altbeton aus dem Rückbau von etwa 2.7 auf 2.8 Mt. Sofern der anfallende Altbeton weitgehend dem Recycling zugeführt und nach einer forcierten Karbonatisierung wieder im Beton für den Hochbau verwendet wird, kann dadurch pro Jahr im Jahr 2050 ein NET-Ausgleich von etwa -12 kt CO_{2eq} erreicht werden. Als alternative NET-Variante beim Beton wird die Zugabe von Pflanzkohle betrachtet. Sofern in 20% der Betonanwendungen ein Einsatz von Pflanzkohle möglich wäre, könnte ein NET Potenzial von etwa -94 kt CO_{2eq} im Jahr 2050 erreicht werden. Aufgrund offener Fragen der Permanenz ist hier für die Anrechnung eine gesetzgeberische oder rechtlich verbindliche Sicherung zu berücksichtigen. Das Beton-NET Potenzial von beiden Varianten zusammen¹¹ von etwa -100 kt CO_{2eq} steht im Basis-Szenario einem verbleibenden Wert THG-Emissionen der Erstellung von insgesamt über 4100 kt CO_{2eq} gegenüber, d.h. der mögliche NET Beitrag aus dem Betonbereich beträgt ca. 2-3%. Bezogen auf die Emissionen Erstellung aus dem Beton von rund 200 kt CO_{2eq} im Jahr 2050 stellen die NET im Betonbereich etwa 50% dar. Dieser Anteil ist so hoch, da im Basis-Szenario die Emissionen aus der Betonherstellung gemäss den Annahmen («KBOB Future») durch den Einsatz von CCS sehr viel geringer sind.

Biomasse-basierte NET Potenziale, Baustoffe Holz und Stroh

Die Kohlenstoffvorräte der eingesetzten Biomasse bieten ein hohes NET-Potenzial. Die Voraussetzung für eine Anrechnung dieser temporären Senken ist jedoch die Sicherung der Permanenz der Speicherung. Sofern bis 2050 Kapazitäten für die Behandlung von Altholz/-stroh zur Sicherung der Permanenz mit CSS bereitgestellt werden, kann bis 2050 im Rahmen der anfallenden Abriss- Altholzmenge ein NET-Potenzial in der Grössenordnung von -0.3 Mt CO_{2eq} generiert werden (Altholz aus Abriss und aus der Erneuerung von Bauteilen). Mit höherem Holzbauanteil und Stroheinsatz kann abhängig von den jährlichen Bauaktivitäten ein Wert bis zu -1.6 Mt CO₂ NET erzielt werden. Bei Anrechnung zum Zeitpunkt des Neubaus (bei rechtlich verbindlicher Sicherung der Permanenz) ist zur Vermeidung von Doppelzählungen die Anrechnung von Altholz mit CCS auszuschliessen.

Anzumerken ist, dass der Holz-Input in den Gebäudepark innerhalb der Grenzen nachhaltiger Nutzung Schweizer Wälder liegt – auch bei der forcierten Holzbau-Szenario-Variante. Gemäss Modellrechnungen der steigende Bauholzbedarf durch eine sinkende Menge an Energieholz ausgeglichen werden. Aus den Modellergebnissen lässt sich folgern, dass der limitierende Faktor für Bauholz nicht so sehr auf der Seite des Walds bzw. des Bauholzangebotes liegt, sondern mehr auf Seite des Gebäudeparks bzw. der Bau- und Immobilienwirtschaft zu verorten ist. Für diese stellt die Veränderung in Richtung Holzbauweise eine grosse Herausforderung bzw. eine (branchen-)strukturelle Veränderung dar.

¹¹ Hierbei wird davon ausgegangen, dass die beiden Varianten nicht bei den gleichen Gebäuden zur Anwendung kommen (rund 50% des Neubaus sind der einen Variante und rund 20% der anderen Variante zugeordnet), so dass es keine Überschneidungen gibt.



Das NET-Potenzial von Altholz von $-0.3 \text{ Mt CO}_{2\text{eq}}$ bzw. von bis zu $-1.6 \text{ Mt CO}_{2\text{eq}}$ bei Sicherung der Permanenz steht im Jahr 2050 im Basis-Szenario ein erwarteter Wert verbleibender THG-Emissionen Erstellung von etwa $4.1 \text{ Mt CO}_{2\text{eq}}$ gegenüber. Selbst wenn Lösungen zur Sicherung der Permanenz gefunden werden, so müssen zwingend weitere THG-Vermeidungsmassnahmen wie z.B. eine weitere Reduktion der Neubautätigkeit oder die Wiederverwendung und Reparierbarkeit von Bauteilen und darüber hinaus noch weitere NET-Lösungen generiert werden.

NET-Zertifikate, mögliche Doppelzählungen und Regelungsbedarf

Aufgrund der bereits stattfindenden öffentlichen Kommunikation einzelner Hersteller zum Verkauf von NE-Zertifikaten ist künftige ein Handel mit solchen Zertifikaten zu erwarten. Diesbezüglich sind jedoch noch Regelungen zu entwickeln und umzusetzen, um drohende Doppelzählungen zu vermeiden: Bei einem Verkauf von NET-Zertifikaten sollen daher keine weiteren NET Potenziale beim Einsatz der Materialien angerechnet werden dürfen.

F1.4 Welche Absenkpfade 2030/2040/2050 unter Einhaltung des CO_2 -Budgets für den Gebäudebereich gemäss F0.1¹² und differenziert nach THGE und Negativemissionen ergeben sich daraus, unterschieden nach Gebäudebestand und Neubauten?

Die Emissionen des Gebäudebereichs in der Höhe von rund $30 \text{ Mt CO}_{2\text{eq}}$ pro Jahr stammen zum Startzeitpunkt der Betrachtung (Jahr 2023) in etwa je hälftig aus den Scopes 1 & 2 sowie aus Scope 3. Bei Ersteren handelt es sich um Emissionen, die während der Betriebsphase der Gebäude ausgestossen werden und bei Letzteren um solche, die während der Errichtung und der Entsorgung anfallen. Die Schlussfolgerungen zu den Absenkpfeilen werden entsprechend differenziert, zudem wird zwischen Neubau und Bestand unterschieden.

- Bei den Emissionen der Scopes 1 und 2 basiert der Absenkpfad vor allem auf dem Ersatz der fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas durch WP und Fernwärme. Motiviert durch die angestrebte Nutzung von Holz als Baumaterial wird auch Energieholz reduziert. Durch die Dekarbonisierung der FW- und der Stromerzeugung reduzieren sich auch die Scope 2 Emissionen, beim Strom auch aufgrund der reduzierten Nachfrage (ermöglicht durch Effizienzgewinne im Bereich Geräte und Gebäudetechnik). Aufgrund der durchgeführten Modellrechnungen und der dabei getroffenen Annahmen lässt sich folgern, dass die Summe der Scope 1 und 2 Emissionen bis 2050 weitgehend reduziert werden kann.
- Bei den Scope 3 Emissionen tragen die folgenden grundsätzlichen Effekte zum Absenkpfad bei:
 - Deutlich reduzierte Bautätigkeit, weshalb sich die jährlichen Emissionen der Erstellung des Bereichs Neubau, der 2023 die Mehrheit der Erstellungs-Emissionen ausmacht, um etwa 40% reduzieren (7.4 von $12.5 \text{ Mt CO}_{2\text{eq}}$ pro Jahr)
 - Weil der Zuwachs an Neubauten pro Jahr im Verlauf der Zeit aufgrund der erwarteten Verlangsamung des Bevölkerungswachstums abnimmt, erhält der Unterhalt und die Instandsetzung und Erneuerung von Gebäuden ein höheres Gewicht. Die erhöhte Erneuerungstätigkeit aufgrund des wachsenden Anteils des Gebäudeparks, bei welchem die Bauelemente aufgrund ihres Alters annahmengenäss zu ersetzen sind, ist mit entsprechenden Emissionen Erstellung verbunden. NB: in diesem Bereich besteht im Vergleich zum Neubaubereich weniger relatives Reduktionspotenzial (gemäss verwendeten Grundlagen).
 - Gebäudeseitige Massnahmen, d.h. Wahl von emissionsärmeren Konstruktionstypen, Gebäudeelementen und Materialien, wobei diese v.a. im Neubaubereich Wirkung zeigen (der Effekt beträgt ca. 20%)

¹² F0.1: Welches CO_2 -Budget bis 2050 leitet sich aus dem Absenkpfad für den Gebäudesektor (direkte Emissionen) gemäss KIG ab? Welcher Anteil des für die Schweiz noch verfügbaren Emissions-Budgets muss in einer umfassenden Lebenswegbetrachtung für den Gebäudebereich ergänzt werden?



- Reduktion der Scope 3 Emissionen der Bereitstellung von Endenergie und Sekundär-energie (hauptsächlich Fernwärme und Strom für WP), wobei sich diese sowohl durch die Reduktion der Nachfrage als auch durch die Reduktion der spezifischen Emissionen reduzieren lassen (beispielsweise PV- und Windanlagen).
- Industrieseitige Massnahmen, d.h. Reduktion der spezifischen Emissionsfaktoren von Materialien und Gebäudeelementen. Basierend auf «KBOB Future» reduzieren sich die Emissionen Erstellung um rund zwei Drittel

Aus diesen Ergebnissen lässt sich auch folgern, dass ein wesentlicher Teil des Absenkpfeils der Scope 3 Emissionen also nicht direkt durch die Immobilienwirtschaft (Gebäudeeigentümer, Investoren, Bewirtschafter, Planer) beeinflusst wird, sondern durch exogene Entwicklungen (abflachender Flächenbedarf wegen weniger starkem Bevölkerungswachstum) und durch Beiträge der Sektoren Energie und Industrie. Entsprechend wichtig ist es, dass diese Sektoren dekarbonisiert werden (und dass dies auch beim Import von Energie und Produkten berücksichtigt wird). Dies ist jedoch nur zu erreichen, wenn der Gebäudesektor im engeren Sinn Energieeffizienz und Dekarbonisierungs-massnahmen umsetzt, denn die Potenziale an erneuerbaren Energien und von emissionsarmen Pro-dukten sind begrenzt bzw. kostenintensiv. Deshalb kann auch unter der Prämisse einer weitgehenden Dekarbonisierung der Sektoren Energie und Bauindustrie auf die gebäudeseitigen Massnahmen nicht verzichtet werden.

Anzumerken ist, dass ein Teil der gebäudeseitigen Massnahmemöglichkeiten in den Betrachtungen des Basis-Szenario noch nicht abgebildet ist, nämlich die Verlängerung der Lebensdauer bzw. der Nutzungszeit sowie die Wiederverwendung von Bauteilen, Gebäudeelementen und Materialien. Solche Massnahmen wären besonders wichtig, weil der bis heute erstellte Gebäudebestand im Jahr 2050 die grosse Mehrheit der Emissionen Erstellung ausmacht (3.1 von 3.9 Mt CO_{2eq} pro Jahr). Dabei handelt es sich um Emissionen aus der Erneuerung und dem Ersatz von Materialien und Gebäude-elementen der Gebäudetechnik sowie des Innen- und Aussenausbau.

Die Wirkung weiterer Hebel, die eine noch weitergehende Reduktion der Emissionen Erstellung erlauben, sind noch abzuschätzen:

- Weitere Reduktion der spezifischen Emissionen von Baumaterialien und Gebäudeelementen (über die Annahmen von «KBOB Future» hinaus)
- Flächenreduktion (Suffizienz)
- Verbesserungen Reparierbarkeit und
- Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen
- Systemtrennung und Wiederverwendung von Bauteilen
- Aufbau von Carbon Capture und Storage (CCS) auf der Seite der Entsorgung zur Vermeidung THG-Emissionen.

Ohne solche weitergehenden Massnahmen würde im Jahr 2050 ein relativ grosser Bedarf an Emissionsneutralisierung durch NET entstehen (in der Höhe von rund 6.5 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Dies würde die durch das KIG vorgesehenen Beträge von 2.5 Mt CO_{2eq} bei weitem übersteigen.

F1.5 Quantifizierung der Auswirkungen der Absenkpfade auf Zu-/Abbau des Kohlenstoffvorrats in verbautem Holz und anderen Baumaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Im Basis-Szenario sind in den analysierten Gebäudekategorien steigende Holzbau-Anteile hinterlegt (siehe Kapitel 3). Die so erzielte Erhöhung liegt gegenüber 2023 bei etwa 30%. Mit einer Szenario-Variante *höherer Anteil Holzbau* wurde der Bauholzeinsatz auf 40% erhöht und eine Förderung von Strohdämmungen ab 2030 bis 2050 hinzugenommen. Daraus abgeleitet ergibt sich über den Zeithorizont bis 2050 eine 180% bis 195% höhere Zuwachsmenge der eingespeicherten Kohlenstoffvorräte in Neubauten, dies im Vergleich zur erwarteten Menge der Abnahme beim Abriss. Über die Zeitspanne



2023 bis 2050 bedeutet dies ein Netto-Zuwachs von 3.9 bis 5.5 Mt Kohlenstoff im Gebäudepark. Dies entspricht einem NET-Potenzial in Höhe von 14 bis 20 Mt CO_{2eq} bzw. einem Zuwachs von knapp 0.5-0.7 Mt CO_{2eq} pro Jahr. Voraussetzung für die Anrechnung temporärer Senken als NE sind, wie unter F1.3 beschriebenen, die rechtsverbindliche Sicherung der Permanenz sowie die Vermeidung von potenziellen Doppelzählungen.

Auf der Ebene Ökosystem-Gebäudepark erfordert die eine Erhöhung der Bauholznutzung nur eine beschränkte Erhöhung der Schweizer Holzernste. Ein Grossteil des steigenden Bauholzbedarfs kann durch die verminderte Nutzung von Energieholz ausgeglichen werden. Eine Veränderung durch eine höhere Holzbaurrate liegt innerhalb der Grenzen einer nachhaltigen Nutzung (nachwachsende Menge >= Ernte). Die angestrebte Erhöhung der Erntemenge gemäss der Ressourcenpolitik Holz führt zwar zu einem geringeren Zuwachs der Kohlenstoffvorräte in Wald-Ökosystemen, aber eine angepasste Holznutzung ist sowieso sinnvoll im Hinblick auf die erforderliche Anpassung der Ökosysteme wegen der aktuell verzeichneten Hitze- und Trockenheitsschäden und der damit verbundenen Verluste von Biomasse

F1.6 Wie hoch sind die territorialen Anteile der Emissionsziele und Absenkpfade (gemäss Langfristiger Klimastrategie, in der NET den nicht vermeidbaren Emissionen vorbehalten sind) bei einer Lebenswegbetrachtung von Gebäuden respektive des Gebäudeparks?

Die Frage der territorialen Anteile stellt sich vor allem für die relevanten Emissionsbeiträge bei der Herstellung der Baumaterialien. Die THG-Emissionen der Gebäudeerstellung liegen aktuell in der Grössenordnung von 9-11 Mt CO_{2eq} pro Jahr (gemäss dem Investitionsprinzip), davon wird fast die Hälfte der Emissionen der Produktion Baumaterialien dem Ausland zugeordnet. Die Verminderungsziele von 90% gegenüber 1990 für den Sektor Bauindustrie gemäss Vorgabe KIG werden in dieser Studie gleichermassen auf die territorialen Anteile angewendet. Damit bleibt ein Endwert schwer vermeidbarer Emissionen auf der Seite der Erstellung von etwa 2 Mt CO_{2eq} im Jahr 2050 mit je etwa 1 Mt CO_{2eq} für die Inlandproduktion und für die Importware. Im Basis-Szenario mit Gebäudeoptimierung und Herstellung der Baumaterialien mit Emissionen gemäss «KBOB Future» wird dieser Wert überschritten, es verbleiben mit 4.1 Mt CO_{2eq} etwa doppelt so hohe THG-Emissionen. Eine Halbierung des Endwertes erfordert weitere Massnahmen wie z.B. eine umfangreiche Reduzierung der grauen Emissionen von Baumaterialien, der vollständige Verzicht auf fossile Brennstoffe in Gebäuden und bei der Energieproduktion, die Verlängerung der Bauteil- und Gebäudenutzungsdauer sowie die Einführung von CCS in der Entsorgung.



11 Literaturverzeichnis

Alig M., Frischknecht R., Krebs L., Ramseier L., Stolz Ph. (2021). LCA of climate friendly construction materials - Final report v2.0. treeze Ltd. on behalf of Bundesamt für Energie BFE, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich AHB.

BAFU et al (Hrsg.) 2024: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2022, National Inventory Document

BAFU (2024). Faktenblatt CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, April.

BAFU (2019). Faktenblatt CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz

BAFU et al. (Hrsg.) 2021: Ressourcenpolitik Holz 2030. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz 2021–2026. Umwelt-Info Nr. 2103: 76 S.

BAFU et al. (Hrsg.) 2007: CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft, Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz.

BFE (2022). Ex-Post-Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2021 nach Verwendungszwecken. Autoren: Prognos, Infrac und TEP Energy GmbH, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Bern

Binz et al. (2014). Energieeffizientes Bauen – Konzepte, Kriterien, Systeme. Faktor-Verlag, Zürich.

Breton und Blanchet et al., (2018). Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches.

European Commission (2023). CBAM Carbon Border Adjustment Mechanism. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

Fankhauser und Smith et al., (2021). "The meaning of net zero and how to get it right"

Frischknecht R. und K. Pfäffli (2023, in Vorbereitung). Bilanzierung von Negativemissionen (NET) im Bauwesen. Laufendes Projekt Stadt Zürich.

Giger S. (2022). Stroh wird 2022 Mangelware sein. Bauernzeitung, Artikel publiziert Online 4. April 2022.

Gugerli H., Pfäffli K. (2020). Netto-Null ist heute noch nicht erreichbar. <https://www.espazium.ch/>

Heeren N. and Hellweg S. (2018). *Tracking Construction Material over Space and Time Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows.*

Iten, Jakob, Wunderlich, Sigrist, Catenazzi, & Reiter. (2017). *Auswirkungen eines subsidiären Verbots fossiler Heizungen – Grundlagenbericht für die Klimapolitik nach 2020.* Infrac, TEP Energy i.A. BAFU.

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, the Working Group II contribution. 27 February 2022



Jakob M., Berti D. und Catenazzi C. (2024). Energetische Erneuerungsraten im Gebäudebereich in der Periode von 2010 bis 2020 – Synthesebericht zu Gebäudehülle und Heizungsanlagen für Wohngebäude und Nicht- Wohngebäude. TEP Energy i.A. Bundesamt für Energie, Bern.

Jakob M., Bagemihl J. et al (2023): *Vom Zertifikat zur Physik – Wege zu netto-null-kompatiblen Gebäuden*. TEP Energy i.A. Amt für Hochbauten Stadt Zürich.

Jakob, M., Ménard, M., Catenazzi, G., Müller, J., Schmid, J., Weinberg, L., Zulliger, D., Roost, M., Lamster, J., & Wüthrich, T. (2022). *Low-Invest-Cost Sanierungen (LICS). Potenziale und Limitationen von bestehenden und neuen Lösungen für Low-Invest-Cost Sanierungen zur Erreichung eines tiefen CO2- Grenzwerts bei Bestandsbauten*. TEP Energy, Low-Tech Lab und Studio Durable i.A. BFE.

Jakob, M., Reiter, U., Catenazzi, G., Sunarjo, B., Lienhard, L., Müller, A., Steinmann, S., Herbst, A., & Nägeli, C. (2020). *Erneuerbare- und CO2-freie Wärmeversorgung Schweiz: Eine Studie zur Evaluation von Erfordernissen und Auswirkungen*. TEP Energy und ECOPLAN i.A. AEE SUISSE, Wärmeinitiative Schweiz (WIS).

Jakob, M., Catenazzi, G., Looser, R., Melliger, M., Morf, M., & Schneider, S. (2018). *Rechenhilfe II für 2000-Watt-Areale – Schlussbericht inklusive Methodik Einfluss Kundenparkplätze*. TEP Energy, Planungsbüro Jud, Gugerli Dolder GmbH i.A. BFE Energie.

Jakob, M., Looser, R., & Catenazzi, G. (2017). *Entwicklung der Energiekennzahlen für Haushalte – historische und bauperiodenspezifische Betrachtung*. TEP Energy i.A. Minergie Schweiz.

Jakob, M., Catenazzi, G., Forster, R., Martius, G., & Nägeli, C. (2016a). *Erweiterung des Gebäudeparkmodells und Herstellung der Kompatibilität des SIA Effizienzpfades mit langfristigen energiepolitischen Zielen (Projekt GEPAMOD)*. TEP Energy, Lemon Consult i.A. Bundesamt für Energie (BFE).

Jakob, M., Catenazzi, G., Melliger, M., Forster, M., Martius, G., & Ménard, M. (2016b). *Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik*. Bundesamt Für Energie, 145. <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/42510.pdf>

Jakob M., Rubli, S., & Sunarjo, B. (2016c). *Urban Mining Potenzial - Dämmmaterialien im Gebäudepark der Schweiz*. TEP Energy and Energie- und Ressourcen-Management on behalf of City of Zurich.

Jakob M. (2008): *Grundlagen zur Wirkungsabschätzung der Energiepolitik der Kantone im Gebäudebereich*. CEPE ETH Zürich.

Jakob, M., Jochem, E., Honegger, A., Baumgartner, A., Menti, U.-P., & Plüss, I. (2006). *Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten*. CEPE ETHZ, Amstein + Walthert, Hochschule für Technik und Architektur Luzern i.A. Bundesamt für Energie.

Jakob, M., Jochem, E., & Christen, K. (2002). *Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen bei Wohngebäuden*. CEPE, HBT, ETH Zürich i.A. Studie im Auftrag des Forschungsprogramms EWG des Bundesamts für Energie (BFE).

KBOB (2022), *Ökobilanzdaten im Baubereich KBOB / ecobau / IPB 2009/1:2022, Version 2* https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html



Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Dambeck, H., Falkenberg, H., Lübbers, S., Brutsche, A., Tschumi, D., Thurau, J., Ess, F., Thormeyer, C., Althus, H.-J., Cox, B., Notter, B., Jakob, M., Reiter, U., Catenazzi, G., ... Lienhard, L. (2021). *Energieperspektiven 2050 + Technischer Bericht Gesamtdokumentation der Arbeiten*. Prognos, INFRAS, TEP Energy und Ecoplan i.A. BFE.

Mehr J., Vadenbo C, Steubing B, Hellweg S. (2018). Environmentally optimal wood use in Switzerland – Investigating the relevance of material cascades.

Näf P., Sacher P., Dinkel F., Stettler C. (2021): Klimapositives Bauen. Ein Beitrag zum Pariser Ab-senkpfad. Forschungsprojekt von Nova Energie und Carbotech mit Unterstützung von Energie Schweiz und BAFU.

Pfäffli A. K. (2020). Graue Energie und Treibhausgasemissionen von wiederverwendeten Bauteilen: Methodik und Berechnung in Varianten am Fallbeispiel Gebäude K118 in Winterthur. im Auftrag der ZHAW und des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich.

Pittau, Habert et al. (2022). *Holzbau als Kohlenstoffspeicher– Potenzial des Schweizer Gebäudeparks – Synthesebericht*. ETH Zürich

SN EN 15804:2013+A2:2019, Module A-C

Stettler C. (2019): *Ökobilanz Stabschichtholz, KBOB-Datengrundlage*. Carbotech-Studie für FAGUS.

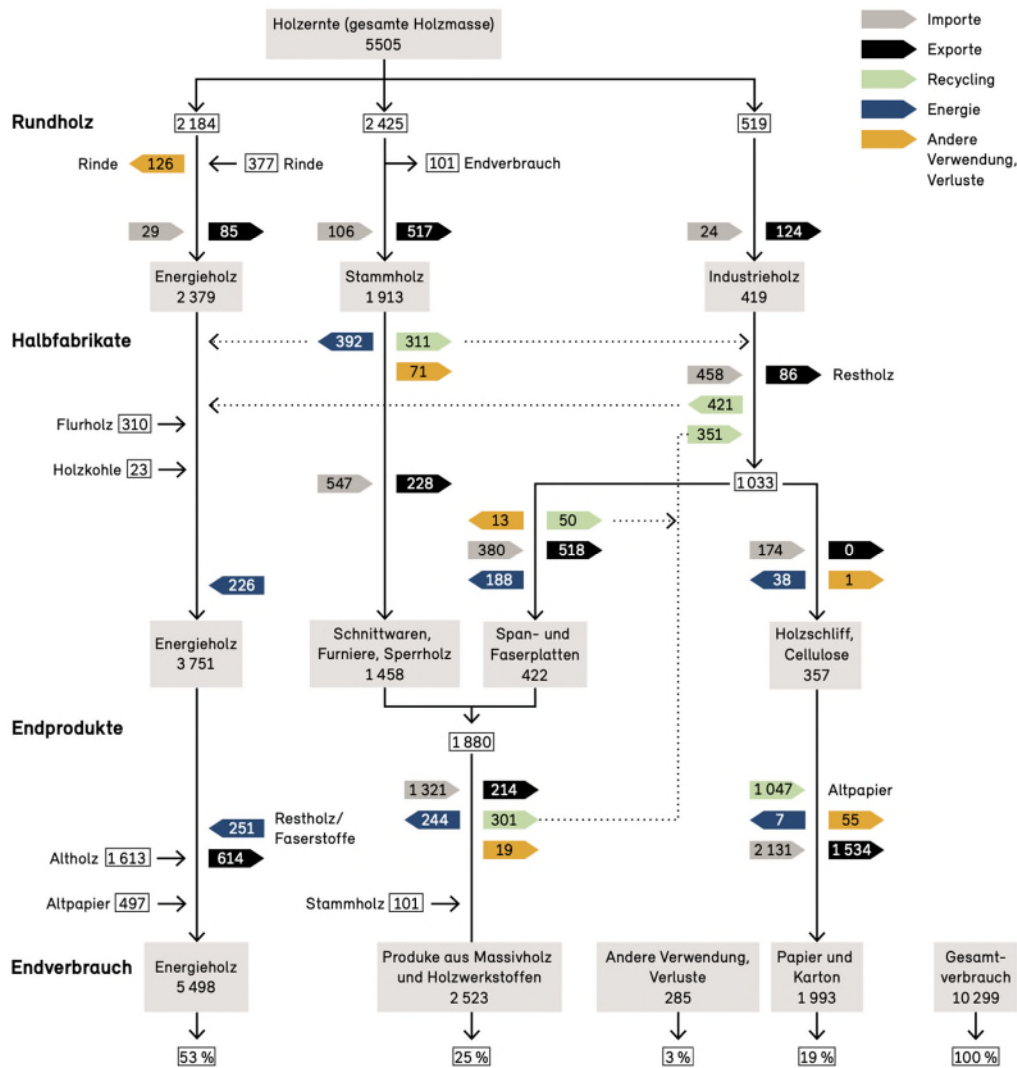


Anhang 1 Verfügbarkeit Ressourcen

A1.1 Holz

Die nachfolgende Graphik zeigt die im Rahmen der Ressourcenstrategie Holz verwendeten Illustrationen der Holzflüsse der Schweiz auf. Diese umfasst über den Bedarf Bauholz und Energieholz hinaus auch weitere Holzprodukte für Möbel, Innenausbau und Konsumgüter.

Abbildung 6
Holzflüsse in der Schweiz 2019 in 1000 m³ feste Holzmasse



Berechnungen ohne Lager. Kleinere Abweichungen sind auf Rundungen zurückzuführen.
Quelle: Berechnungen und Schätzungen BAFU, Abt. Wald

Abbildung 31: Holzflüsse Schweiz



Daraus abgeleitet sind die darauffolgenden Zielwerte zum Ausbau der stofflichen Holznutzung, zu den Anteilen Schweizer Holz für Holzprodukte und zur Nutzung Energieholz.

Zielindikatoren und -größen der Ressourcenpolitik Holz 2021–2030

Ziele 2021–2030	Zielindikatoren	Zielgrößen
1. Die Verwendung von Schweizer Holz und Holzprodukten nimmt zu	Holzendverbrauch Schweiz, stofflich (ohne Papier-/Kartonprodukte) Quelle: Neubauer-Letsch u. a. 2015	Steigerung der Nachfrage nach stofflichen Holzprodukten um 30 % von 3,07 Mio. m ³ (2012) auf 4,0 Mio. m ³ (2030)
	Anteil Schweizer Holz am Holzendverbrauch Schweiz, stofflich Quelle: Neubauer-Letsch u. a. 2015 und 2020	Steigerung des Einsatzes von Schweizer Holz am gesamten stofflichen Holzendverbrauch Schweiz von rund 35 % (2012) auf 40 % (2030, bezogen auf 4,0 Mio. m ³)
	Produktion von Schnittholz und von Holzwerkstoffen, Schweiz Quelle: BFS 2020 Quelle: BAFU 2020	Steigerung der produzierten Menge von Schnittholz und von Holzwerkstoffen mit Holz aus Schweizer Wäldern im Verhältnis zur Entwicklung der Nachfrage nach Holzprodukten
	Genutztes Energieholz Quelle: BAFU 2020	Ausschöpfen des Energieholz-Nutzungspotenzials von rund jährlich 6 Mio. m ³ oder 16 TWh Endenergie
	Nutzungsgrad Quelle: BFE 2020	Steigerung der Effizienz

Abbildung 32: Zielwerte Ressourcenpolitik Holz 2030

Mit den CO₂-Effekten unterschiedlicher Strategien der Holznutzung und mit der Frage der optimalen Erntemengen und Nutzung Holzprodukte setzen sich ältere Studien auseinander (BAFU, 2007). Darin wird im Rahmen von Szenarien der Effekt unterschiedlicher Strategien auf den Zuwachs an Speicher im Wald und unterschiedliche Mengen Holzernte und Nutzung Holzprodukte analysiert. Die nachfolgenden Szenarien zeigen die dazu getroffenen Annahmen zum Ausbau der Nutzung der Ressource Holz:



Um die Effekte im ausländischen Wald möglichst vernachlässigen zu können, wird von einem konstanten Aussenhandel auf der Basis des Jahres 2000 ausgegangen. Es wurden die folgenden Szenarien definiert und dem Zustand 2000 gegenübergestellt:

Konstanter Aussenhandel

Tab. 11 > Kurzbeschreibung der Szenarien

	Ausgangswert 2000 [Mio. m ³]	Zuwachs optimiert [Mio. m ³]		Kyoto optimiert [Mio. m ³]	Baseline [Mio. m ³]	Reduzierte Waldpflege [Mio. m ³]
Nutzung:						
Holznutzung Schweiz	5.0 ¹	8.2 ² + 90 %		8.5 ² + 75 %	5.9 ² + 20 %	3.0 ² - 40 %
		Bau	Energie			
Verbrauch						
Konstruktion, Ausbau, Holzprodukte	2.5 ³	4.5 + 80 %	2.5 ± 0 %	4.5 + 80 %	3.0 + 20 %	1.9 - 25 %
Waldenergieholz	1.3 ⁴	2.8 + 120 %	4.9 + 340 %	2.1 + 65 %	1.5 + 20 %	0.2 - 80 %
Aussenhandel⁵		Konstant		Konstant	Konstant	Konstant
Export	1.4	1.4		1.4	1.4	1.4
Import	2.2	2.2		2.2	2.2	2.2

¹ Nach Forststatistik Jahr 2000.

² Verwertbare Holzleistungen: Drehholz, Rinde, Restlag, siehe Anhang 4.

³ Hofer 2004.

⁴ BFS/BUNZLI 2000.

⁵ Aus dem Verbrauch und dem Aussenhandel kann nicht auf die Nutzungsmenge geschlossen werden, weil noch Restholz anfällt.

⁶ OZD 2001; Ohne Holz- und Zellstoffe sowie Papier und Karton.

Abbildung 33: Zielwerte Ausbau, Kyoto optimiert als Variante mit einem Fokus auf die Zielerreichung Klimaschutz

Ein Bild zum Verlauf der Kohlenstoffvorräte im Wald zeigt die Analyse der Landnutzung mit den Effekten der CO₂ Aufnahme und Freisetzung im Treibhausgasinventar auf (BAFU, 2024).



Table 6-1 CO₂ emissions and removals in the LULUCF sector broken down by (1) CO₂ removals due to carbon gains in living biomass, (2) CO₂ emissions due to carbon losses in living biomass, (3) net CO₂ changes in dead organic matter, (4) net CO₂ changes in organic and mineral soils, and (5) net CO₂ changes in Harvested wood products. Mean indicates the mean value 1990 to 2022. Positive values refer to emissions; negative values refer to removals.

LULUCF	Unit	1990	1995	2000	2005	2010
Gains in living biomass	kt CO ₂	-13'131	-13'188	-12'756	-12'937	-13'338
Losses in living biomass	kt CO ₂	11'742	9'648	17'908	11'752	11'934
Net change in dead organic matter	kt CO ₂	164	-441	-401	-1'485	-1'566
Net change in mineral and organic soils	kt CO ₂	-704	46	299	90	218
LULUCF (excluding HWP)	kt CO ₂	-1'929	-3'934	5'051	-2'581	-2'752
Net change in Harvested wood products (HWP)	kt CO ₂	-1'119	-443	-700	-690	-426
Total LULUCF	kt CO ₂	-3'047	-4'377	4'350	-3'271	-3'178

LULUCF	Unit	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Mean
Gains in living biomass	kt CO ₂	-13'362	-13'401	-13'440	-13'432	-13'419	-12'896	-12'594	-12'605	-12'867	-12'642	-13'068
Losses in living biomass	kt CO ₂	11'525	11'849	11'077	10'881	11'505	12'916	12'111	12'358	12'620	13'202	11'528
Net change in dead organic matter	kt CO ₂	-609	183	146	-83	-2	-434	-717	-946	-1'542	-864	-525
Net change in mineral and organic soils	kt CO ₂	499	695	682	557	516	522	426	457	586	704	204
LULUCF (excluding HWP)	kt CO ₂	-1'947	-675	-1'535	-2'076	-1'400	109	-773	-735	-1'204	400	-1'861
Net change in Harvested wood products (HWP)	kt CO ₂	76	-90	-70	-27	7	-54	83	24	-132	-35	-312
Total LULUCF	kt CO ₂	-1'870	-765	-1'605	-2'104	-1'393	54	-690	-712	-1'336	365	-2'173

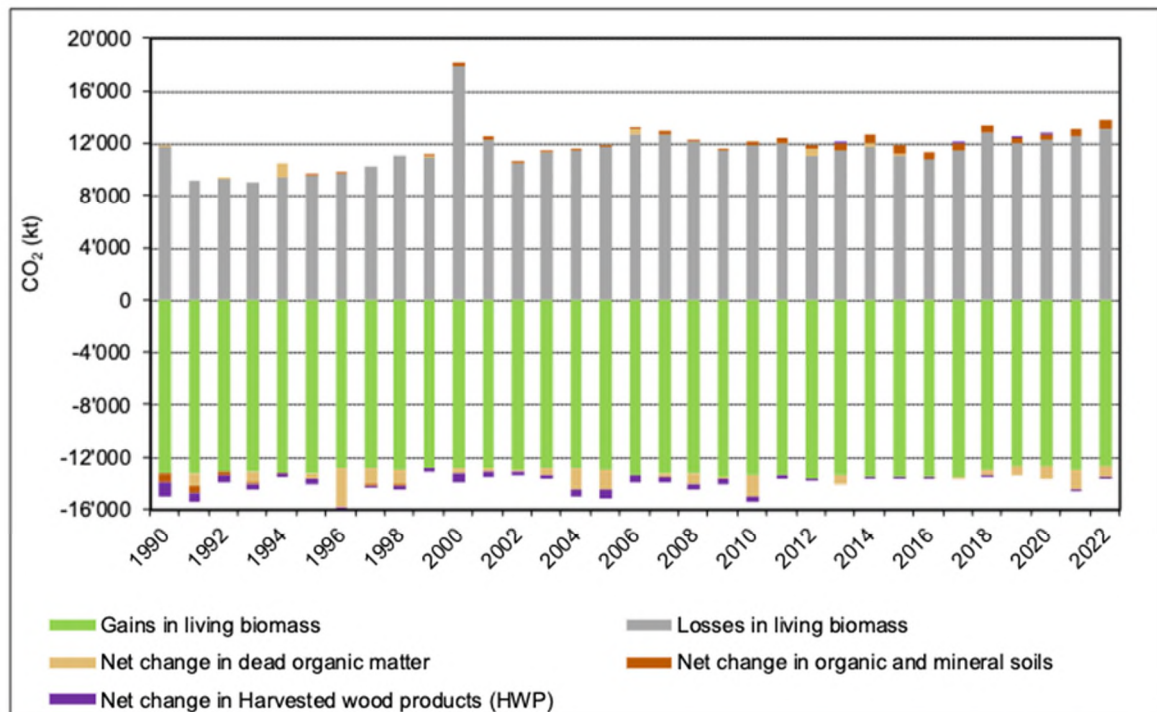


Figure 6-1 CO₂ emissions and removals in the LULUCF sector (in kt CO₂) broken down by (1) carbon gains in living biomass, (2) carbon losses in living biomass, (3) net changes in dead organic matter, (4) net changes in organic and mineral soils, and (5) net changes in Harvested wood products. Positive values refer to net emissions, negative values refer to net removals.

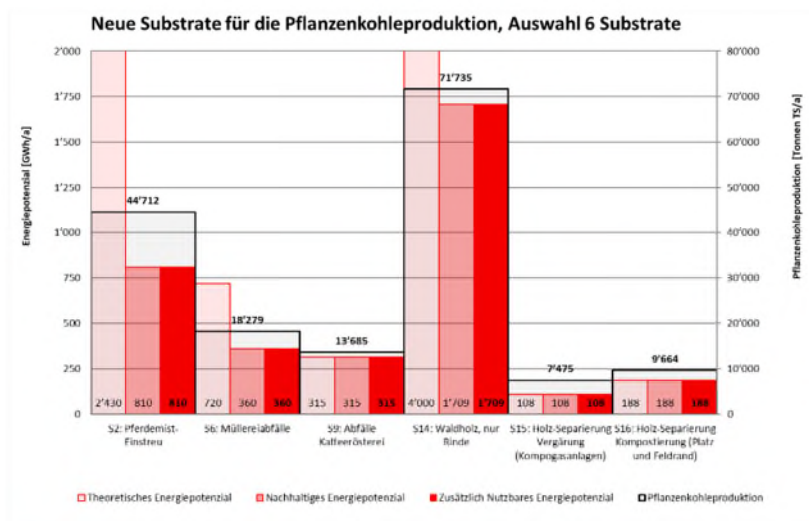


Eine Verschiebung und damit Reduktion an CO₂ in der Atmosphäre kann abhängig vom Zuwachs C-Speicher in der Summe von Wald und Holzprodukten erzielt werden.

- Erhöhung Speichermengen (+): Aufforstung, optimiertes Waldmanagement, Förderung langlebiger Produkte und Kaskaden in der Verwendung der Holzprodukte sowie neue Methoden Verbrennung BECCS/Pyrolyse zur Speicherung (Abwägen Effekte geringerer Verfügbarkeit erneuerbarer Energie und fehlender Ersatz fossiler Brennstoffe)
- Negative Effekte Speichermengen (-): Abholzung, nicht nachhaltige Nutzung Holz und Abnahme Speicher, Zunahme Einsatz für kurzlebige Holzprodukte und direkte Verbrennung (Abwägen Effekte höhere Verfügbarkeit erneuerbare Energie und Substitution fossiler Brennstoffe)

Auf einer strategischen Ebenen sind Überlegungen zur Holznutzung notwendig, um den Nutzen einer stofflichen Verwendung (Substitution von Baustoffen und Erhöhung der Kohlenstoff-Speichermengen im Gebäudepark) und den Nutzen einer direkten energetischen Nutzung (Substitution fossile Energie) abzuschätzen. Angestrebt wird mit dem Zielwert Holzendprodukte eine Erhöhung der stofflichen Nutzung. Benötigt wird ein Ausbau der verarbeitenden Industrie für eine stoffliche Nutzung insbesondere von Laubholz, d.h. eine Produktion Baustoffe für eine Verwendung von Laubholz im Gebäudebereich. Es laufen Förderprogramme zur Erhöhung der Produktion Holzwerkstoffe und Laubholznutzung im Bau.

A1.2 Pflanzenkohle



Die Grafik zeigt das Potenzial von sechs untersuchten Arten von Biomasse: Am grössten ist das nachhaltige energetische Potenzial von Rinde: rund 1'700 GWh pro Jahr. Wird aus den Substraten nicht nur Energie hergestellt, sondern gleichzeitig auch Pflanzenkohle, dann halbiert das den Energieertrag. Aus dem Energieträger Waldholz-Rinde liessen sich in diesem Fall pro Jahr 71'735 t Pflanzenkohle und rund 850 GWh Energie gewinnen. In der Grafik wird das «nachhaltige» Energiepotenzial jeweils mit dem «zusätzlich nutzbaren» Energiepotenzial gleichgesetzt. Das ist nicht ganz korrekt, denn ein (kleiner) Anteil der Substrate wird heute schon energetisch genutzt, wenn z.B. Kaffeerösterei-Abfälle in einer Kehrlichtverbrennungsanlage verbrannt werden. Grafik: Schlussbericht Pyrochar

Quelle: 11278-BIOENERGIE_Neue Biomassen_2023.02.16_BFE_Vogel_D.pdf

BFE, 2023



Anhang 2 Grundlagen Emissionen Erstellung

Tabelle 34 Emissionskoeffizienten pro Bauteil für die Zeitpunkte 2022 (erste drei Spalten), für die Zukunft gemäss «KBOB Future» und Differenz zwischen den beiden Zeitpunkten in %

ID			Phase A1-A3	Phase B	Phase C	Phase A1-A3	Phase B	Phase C	2050/	
Element	ID_Bat	Element	Option	[kgCO2eq/uni	[kgCO2eq/uni	[kgCO2eq/uni	2050[kgCO2é	2050[kgCO2é	2050[kgCO2é	2022
				té]	té]	té]	q/unité]	q/unité]	q/unité]	
B06.01		Nicht kontaminierter Aushub								
	1.1		Aushub maschinell / Excavation mécanique	0.4	-	-	-	-	-	-100%
B06.04		Baugrubenabschluss								
	2.1		Talutage (considérer un volume d'excavation	-	-	-	-	-	-	
	2.2		Blindage de fouille, paroi berlinoise, étayé	185	-	8	54	-	2	-71%
	2.3		Blindage de fouille, paroi moulée, 400 mm	467	-	31	118	-	6	-75%
	2.4		Blindage de fouille, paroi de palplanche, étay	96	-	1	29	-	-	-69%
B07.02		Pfählung								
	8.1		Mikrobohrpfahl (Annahme 1.5 m Pfählung pr	53	-	-	14	-	-	-73%
	8.2		Ortbetonverdrängungspfahl (Annahme 1.5 m	173	-	-	37	-	-	-78%
	8.3		Vorgefertigter Betonpfahl (Annahme 1.5 m P	49	-	-	11	-	-	-77%
	8.4		Pas pieux de fondation	-	-	-	-	-	-	
C01.03		Bodenplatte								
	3.1		Dalle en béton 30cm comme fondation plate	190	-	31	37	-	7	-80%
	3.2		Dalle en béton 30cm comme fondation plate	115	-	11	25	-	2	-78%
C02.01(A)		Aussenwandkonstruktion unter Terrain								
	4.1		25cm béton + isolation	172	-	35	38	-	22	-71%
	4.2		25cm béton non isolé	95	-	14	25	-	10	-67%
C04.04X		Konstruktion Flachdach unter Terrain								
	18.1		30cm béton + isolation	200	-	59	37	-	8	-82%
	18.2		30 cm béton non isolé	120	-	25	26	-	4	-80%
	18.3		Aucun sous-sol	-	-	-	-	-	-	
C02.01(B)		Aussenwandkonstruktion über Terrain								
	5.1		Parois béton 20cm	72	-	6	16	-	1	-78%
	5.2		Parois brique 17.5cm	51	-	3	11	-	1	-79%
	5.3		Backstein 32cm, teils 25cm	-	-	-	-	-	-	
	5.4		Bruch- oder Ziegelsteine, innere Täferung	-	-	-	-	-	-	
	5.5		Parois bois massif 10cm	4	-	2	1	-	0	-74%
	5.6		Maçonnerie monolithique isolante (49cm)	106	-	4	45	-	1	-58%
	5.7		Briques concept	88	-	4	14	-	1	-84%
	5.8		Ossature bois (750mm) - <6m	17	-	4	7	-	2	-54%
	5.9		Ossature bois traditionnelle 350mm inkl. bep	8	-	1	-	-	-	-100%
	5.10		Reused wood	-	-	2	-	-	0	-83%
	5.11		Earthquake walls concrete 20cm 150kg/m3 r	86	-	5	18	-	1	-79%
	7.1		Choice of structural system - substitutes abo	-	-	-	-	-	-	
	7.2		Piliers béton 20x20cm	9	-	0	2	-	0	-79%
	7.3		Piliers béton préfabriqué 20x20cm	18	-	1	3	-	0	-80%
	7.4		35x22cm 1 Stütze alle 3.4m Aussenwand	27	-	2	8	-	1	-68%
G03X		Wandbekleidung Envelope								
	31.1		enduit intérieur	6	6	0	4	5	1	-23%
	31.2		Plaques de plâtre	5	5	0	3	4	1	-19%
	31.3		Enduit	7	7	0	6	6	0	-14%
	31.4		Enduit en terre	10	11	1	10	10	0	-9%
	31.5		Holzbekleidung, Anstrich und Unterkonstrukt	2	3	0	2	2	1	-9%
E02		Äussere Wandbekleidung über Terrain								
	20.1		Verputz (ohne Dämmung)	-	-	-	-	-	-	
	20.2		Dämmputz	-	-	-	-	-	-	
	20.3		Isolation thermique extérieure laine de roche	31	33	2	17	18	1	-45%
	20.5		Isolation thermique extérieure EPS, enduit	25	36	11	13	17	3	-54%
	20.7		Revêtement bois, ventilé	17	19	2	8	10	2	-50%
	20.8		Revêtement fibrociment, ventilé	38	40	2	16	17	1	-57%
	20.10		Revêtement pierre naturelle, ventilé	41	44	3	20	21	1	-53%
	20.12		Revêtement métra, ventilé	68	78	9	37	47	9	-40%
	20.13		Revêtement verre, ventilé	65	67	2	22	23	1	-66%
	20.14		Double paroi en briques 11.5cm et laine de r	80	85	5	22	23	1	-72%
	20.15		Système de facade aluminium / verre	242	257	15	129	141	12	-45%
	20.16		Bottes de paille dans ossature bois et enduit	40	44	4	17	19	2	-56%
E03.01		Fenster								
	21.1		Cadre de fenêtre en aluminium	118	133	15	70	73	3	-45%
	21.2		Cadre de fenêtre en bois	31	36	6	9	12	3	-68%
	21.3		Cadre de fenêtre bois-métal	59	66	7	16	20	4	-70%
	21.4		Cadre en matière synthétique (PVC) 2	53	64	10	19	23	4	-64%
	25.1		Triple vitrage	49	53	4	13	17	5	-67%
E03.04	29.1	Sonnenschutz, Wetterschutz								
	29.2		Protection solaire, stores à projection avec n	66	68	2	34	34	0	-49%
	29.3		Protection solaire, stores vénitiens avec mot	59	60	1	31	32	0	-47%
	29.3		Protection solaire, contrevent sur enrouleur z	74	75	1	38	38	0	-49%



ID	ID_Bat	Element	Option	Phase A1-A3 [kgCO2eq/uni t€]	Phase B [kgCO2eq/uni t€]	Phase C [kgCO2eq/uni t€]	Phase A1-A3 2050[kgCO2é q/unité]	Phase B 2050[kgCO2é q/unité]	Phase C 2050[kgCO2é q/unité]	2050/ 2022
	10.2		Dalle en béton 40cm	171	-	12	37	-	3	-79%
	10.3		Holzbalkendach	101	-	3	33	-	1	-68%
	10.4		Bois massif 23cm	18	-	5	6	-	1	-69%
	10.5		Sparren-Holzflachdach	-	-	-	-	-	-	
	10.6		Béton 24 cm	81	-	7	18	-	1	-78%
	10.7		Béton optimized thickness 18cm	58	-	4	13	-	1	-78%
	10.8		Wood concrete composite KLARK+Swiss w	25	-	2	6	-	1	-75%
	10.9		Dowellam CH origin 12cm	5	-	1	1	-	0	-65%
C04.05		Konstruktion geneigtes Dach								
	11.1		Solvages en bois	21	-	2	12	-	1	-45%
	11.2		Holzbalkendach 760mm	13	-	3	6	-	2	-54%
G04X		Deckenbekleidung Envelope								
	32.1		enduit	6	6	0	4	5	1	-23%
	32.2		Plaque de plâtre	5	5	0	3	4	1	-19%
	32.3		Bois 60mm	8	10	2	4	5	1	-54%
F01.02		Bedachung Flachdach								
	24.1		Isolation EPS et végétation	40	88	48	19	53	34	-40%
	24.2		Isolation PUR et végétation	39	82	44	17	51	34	-37%
	24.3		Kork 40mm, Kies oder Erde	-	-	-	-	-	-	
	24.4		Isolation laine de roche et végétation	66	100	33	33	64	30	-36%
	24.5		Isolation paille souffé et gramitherm	21	52	31	10	40	30	-22%
	24.6		Kies, Abdichtung, XPS 400mm	166	219	53	30	49	19	-77%
F01.03		Bedachung geneigtes Dach								
	26.1		Old	-	-	-	-	-	-	
	26.2		Laine de verre et tuiles en terre cuite	34	37	2	23	24	1	-36%
	26.3		Isolation paille souffé et gramitherm	25	27	2	19	20	1	-26%
	26.4		Isolation en paille 760mm (Finition en PV no	35	41	6	25	30	6	-26%
C02.02		Innenwandkonstruktion								
	6.1		20cm béton	72	-	6	16	-	1	-78%
	6.2		15cm béton	50	-	4	11	-	1	-78%
	6.3		15cm briques	43	-	2	9	-	0	-79%
	6.4		15cm briques calcaires	40	-	3	28	-	1	-33%
	6.5		Briques 17cm be2226	39	-	2	6	-	0	-84%
	6.6		Bois ossature? Avec laine de roche - <6m	32	-	7	14	-	4	-53%
	6.7		Innenwand Stampflehm	24	-	2	13	-	2	-42%
	6.8		Dowellam CH origin	8	-	1	3	-	1	-65%
G03		Wandbekleidung								
	30.1		enduit	11	12	1	8	9	2	-23%
	30.2		Gipsfaserplatte et enduit	39	41	1	37	37	0	-9%
	30.3		Kalkputz	20	21	1	18	18	0	-14%
G01		Trennwand, Innentür, Innentor								
	27.1		Plaque de plâtre cartonée (2x12,5mm) + pli	28	29	1	15	17	2	-42%
	27.2		Plaque de plâtre cartonée (4x12,5mm) et pli	39	40	1	34	35	2	-12%
	27.3		Briques 12cm	50	52	2	23	23	0	-55%
	27.4		Innenwand Stampflehm	13	14	1	11	13	2	-2%
C04.01		Geschossdecke								
	9.1		25cm béton	86	-	8	19	-	2	-78%
	9.2		Eléments de bois (24cm)	7	-	3	3	-	1	-64%
	9.3		Bois-béton mixte 13cm-9cm	28	-	5	7	-	1	-77%
	9.4		Brettsper Holz 22cm - <6m	30	-	8	14	-	4	-54%
	9.5		Holzbalkenlage mit Gewichts-Verfüllung	-	-	-	-	-	-	
	9.6		24.5cm béton	83	-	7	18	-	1	-78%
	9.7		18cm béton (optimized thickness)	61	-	5	13	-	1	-79%
	9.8		Wood concrete composite KLARK+Swiss w	25	-	2	6	-	1	-75%
	9.9		Dowellam CH origin 12cm	5	-	1	1	-	0	-65%
C04.01		Geschossdecke								
	28.1		Linoleum sans support	8	8	1	6	6	0	-26%
	28.2		Parquet sans support	12	13	1	8	8	0	-34%
	28.3		Parquet avec support et isolation EPS acous	28	31	3	12	13	1	-57%
	28.4		Céramique avec support et isolation EPS ac	35	42	7	17	19	1	-56%
	28.5		Parquet et laine de verre	25	29	5	8	9	1	-70%
	28.6		Parquet, laine de roche et anhydrite	12	14	2	7	8	1	-44%
	28.7		Unterlagsboden Anhydrit geschliffen und Ste	10	12	2	7	8	1	-34%
	28.8		Stampflehm Boden und Holzwole	11	13	2	8	9	1	-31%



ID	ID_Bat	Element	Option	Phase A1-A3 [kgCO2eq/uni t€]	Phase B [kgCO2eq/uni t€]	Phase C [kgCO2eq/uni t€]	Phase A1-A3 2050[kgCO2é q/unité]	Phase B 2050[kgCO2é q/unité]	Phase C 2050[kgCO2é q/unité]	2050/ 2022	
G02		Bodenbelag									
	33.1		enduit	6	6	0	4	5	1	-23%	
	33.2		Plaques de plâtre	5	5	0	3	4	1	-19%	
	33.3		Faux-plafonds techniques plaques de plâtre	13	14	0	12	13	1	-8%	
	33.4		Faux-plafonds techniques métal	27	28	0	13	13	0	-54%	
	33.5		Kalkputz	7	7	0	6	6	0	-14%	
	33.6		Aucun revêtement	-	-	-	-	-	-		
G04Y		Deckenbekleidung									
	19.1		Béton et dispositif antichute en métal	162	170	8	49	50	2	-70%	
	19.2		Dalle en bois et dispositif antichute en métal	90	95	5	31	32	1	-66%	
C04.08		Aussen liegende Konstruktion, Vordach									
D01		Elektroanlage									
	12.1		Habitation	10	13	3	4	5	1	-65%	
	12.2		Bureau	23	24	1	9	9	0	-61%	
	17.1			0	1'140	1'140	-	-	-	-100%	
D05.04		Wärmeverteilung									
	22.1		Corps de chauffe	6	7	0	3	3	-	-60%	
	22.2		Chauffage au sol	3	5	2	1	2	0	-68%	
	22.3		Chauffage et refroidissement au plafond	6	6	0	2	2	0	-60%	
D05.05		Wärmeabgabe									
	23.1			0	4	4	0	2	2	0	-60%
D07X		Lufttechnische Anlage									
	15.1		Bureau	30	31	1	12	12	0	-60%	
	15.2		habitation	14	14	0	6	6	0	-60%	
D08		Wassertechnische Anlage									
	16.1		Bureau	4	5	1	1	2	0	-65%	
	16.2		Habitation	11	13	2	4	5	0	-62%	

Quelle: Annahmen KBOB, KBOB Future, ETHZ, Carbotech und TEP Energy (dieses Projekt)