



Umweltauswirkungen von Fassaden- begrünungen

Ökobilanz der Fassadenbegrünung
am Triemli-Turm in Zürich

Schlussbericht

Fachstelle nachhaltiges Bauen

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

Stadt Zürich,
Amt für Hochbauten,
Fachstelle Nachhaltiges Bauen
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Autoren:

Alena Frehner, Hanna Kröhnert und Matthias Stucki
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW

Projektbegleitung:

Theres Fankhauser
Michael Pöll
Fachstelle Nachhaltiges Bauen
Amt für Hochbauten

Haftungsausschluss

Dieser Bericht beruht auf als verlässlich eingeschätzten Quellen. Die ZHAW und die Autoren geben keine Garantie bezüglich der Vollständigkeit der aufgeführten Informationen und lehnen eine rechtliche Haftung für Schäden jeglicher Art ab.

Zitervorschlag: Frehner A, Kröhnert H. und Stucki M. 2022. Umweltauswirkungen von Fassadenbegrünungen - Ökobilanz der Fassadenbegrünung am Triemli-Turm in Zürich. Im Auftrag der Stadt Zürich, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil

Zürich, September 2022

Abkürzungen

CED	cumulative energy demand
CNS	Chrom-Nickel-Stahl
CO ₂ -eq.	Kohlendioxid-Equivalent
EPS	Expandiertes Polystyrol
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KVA	Kehrrichtverbrennungsanlage
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
THG	Treibhausgas
TJ	Terajoule
UBP	Umweltbelastungspunkte
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Zusammenfassung

Im Hinblick auf die stetig wachsende Weltbevölkerung geraten Städte und urbane Gebiete zunehmend unter Druck. Als eine der effektivsten Massnahmen, um den negativen Auswirkungen der Urbanisierung auf die Umwelt entgegenzuwirken, gewinnt die Begrünung urbaner Gebiete zunehmend an Bedeutung im Rahmen der Stadtplanung. Dabei zeigen neben Dachbegrünungen insbesondere Fassadenbegrünungen auch einen positiven Effekt auf das Gebäudeklima, da deren isolierende Wirkung im Sommer einen kühlenden Effekt erzeugen, während sie im Winter wärmeisolierend wirken.

Angesichts der zahlreichen Vorteile grüner Dächer und Fassaden wurde am Hochhaus des Triemli-Spitals in Zürich eine Fassadenbegrünung umgesetzt. In der vorliegenden Studie hat die ZHAW eine Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus der Fassadenbegrünung erstellt. Ziel der Studie war es, konsistentes und umfassendes Wissen über den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung von Fassadenbegrünungen zu erhalten, um die wesentlichen Einflussgrössen der Umweltauswirkungen zu identifizieren und Empfehlungen zur ökologischen Optimierung des Einsatzes von Fassadenbegrünungen in der Stadt Zürich zu erarbeiten.

In Zusammenarbeit mit der Stadt Zürich und Projektbeteiligten wurden Primärdaten über den gesamten Lebenszyklus der Fassadenbegrünung erhoben. Die Bezugsgrösse der Analyse wurde als «Fassadenbegrünung Südfassade Triemli-Turm in Zürich über 15 Jahre» festgelegt. Die Umweltbelastungen der Fassadenbegrünung wurden anhand von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), den kumulierten Energieaufwand und die Gesamtumweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit analysiert.

Unter Annahme einer Betriebszeit von 15 Jahren verursacht die Fassadenbegrünung des Triemli-Turms über den gesamten Lebenszyklus THG-Emissionen von 80 t CO₂-eq. Der kumulierte Energieaufwand der Fassadenbegrünung beläuft sich auf 1.3 Terajoule (TJ) oil-eq, wobei der Anteil an nicht-erneuerbarer Energie 75 % beträgt. Bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit verursacht die Fassadenbegrünung eine Gesamtumweltbelastung von 230 Millionen Umweltbelastungspunkten (UBP).

Die Herstellung der Pflanztröge aus Chrom-Nickel-Stahl (CNS) stellt sich deutlich als ökologischer Hotspot der Fassadenbegrünung heraus, mit Beiträgen zwischen 60 % und 77 % an den untersuchten Umweltauswirkungen. Durch eine Verlängerung der Betriebszeit von 15 auf 60 Jahre lassen sich die Umweltbelastungen der Fassadenbegrünung pro Betriebsjahr um 15 % senken. Die Umweltbelastungen können um weitere 30 % reduziert werden, wenn Pflanztröge aus reinem Recycling-CNS verwendet werden.

Auf das Gesamtgebäude bezogen lässt sich abschätzen, dass die Fassadenbegrünung über einen Betriebsraum von 60 Jahren ca. 1 % der Umweltbelastung beiträgt. Somit trägt die Fassadenbegrünung im Kontext eines Gesamtgebäudes nur geringfügig zur Umweltbelastung bei. Nichtsdestotrotz lohnt sich die Minimierung der Umweltauswirkungen von Fassadenbegrünungen, da absolut gesehen Gebäude einen erheblichen Anteil zu den nationalen Emissionen beitragen.

Eine effektive Massnahme zur Optimierung der Umweltbilanz einer Fassadenbegrünung ist die Wahl von Pflanztrög-Materialien mit hohem Recyclinganteil und langer Lebensdauer. Darüber hinaus kann projektspezifisch geprüft werden, ob durch Stockwerk-übergreifende Begrünung die Anzahl benötigter Pflanztröge miniert bzw. durch bodengebundene Kletterpflanzen gänzlich auf den Einsatz von Trögen verzichtet werden kann.

Abstract

With regard to the constantly growing world population, pressure on cities and urban areas is increasing. As one of the most effective measures to counteract the negative effects of urbanisation on the environment, the greening of urban areas is gaining importance in the context of urban planning. Compared to green roofs, green façades have a particularly positive effect on the building climate as they serve as additional insulation, preventing excessive heating of buildings in summer while conserving heat in winter.

In light of the numerous advantages of green roofs and façades, a green façade was implemented on the building of the Triemli Hospital in Zurich. The aim of the current study was to obtain consistent and comprehensive knowledge about the resource consumption and environmental impact for the construction and operation of the façade greening at the Triemli Hospital in order to identify the main influencing parameters of the environmental impact and to develop recommendations for the ecological optimisation of façade greening in the city of Zurich.

In cooperation with the City of Zurich and project participants, primary data was collected on the entire life cycle of the façade greening. The functional unit of the analysis was defined as "façade greening of the south façade of the Triemli Tower in Zurich over 15 years". Greenhouse gas emissions, cumulative energy demand and total environmental impact according to the ecological scarcity method were analysed.

The green façade of the Triemli Tower causes greenhouse gas emissions (GHG emissions) of 80 t CO₂-eq over its entire life cycle. The cumulative energy demand (CED) of the façade greening amounts to 1.3 terajoules (TJ) oil-eq, of which the share of non-renewable energy is 75 %. Assessed with the Ecological Scarcity Method, the greening of the façade causes 227 million eco-points. With 77 %, the production of plant troughs has the largest share of the total environmental impact of the green façade.

The production of chromium-nickel steel (CNS) used for plant troughs was identified as the main ecological hotspot of the façade greening of the Triemli hospital, with a contribution between 60 % and 77 % to the investigated impact indicators. If the service life of the façade is extended from 15 years to 60 years, the environmental impacts of the façade greening could be reduced by around 15 %. Environmental impacts could further be reduced by up to 30 % if the CNS material of the plant troughs is replaced with 100 % recycled steel.

It is estimated that the façade greening contributes about 1 % to the environmental impact of the Triemli Tower. Consequently, façade greening does not represent a substantial environmental hotspot on the whole building level. Still, its environmental impact should be reduced as much as possible, considering the high contribution of buildings to national GHG-emissions in absolute terms.

An effective measure to reduce the environmental impact of façade greening consists of choosing troughs made of materials with a high recycling share and long lifetimes. If possible, the number of employed troughs could be minimized, e.g. letting plants grow across multiple storeys. In some cases, plant troughs could even be avoided completely, using ground-based climbing plants.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Ziel und Untersuchungsrahmen	8
2.1	Ziel und Anwendung der Studie.....	8
2.2	Funktionelle Einheit und Systemgrenzen	8
2.3	Datenerhebung, Allokation und Software	12
2.4	Bewertungsmethoden	12
2.5	Sensitivitätsanalysen	12
3	Sachbilanz.....	14
3.1	Fassadenbegrünung des Triemli-Turms (15 Jahre Betriebsdauer).....	14
3.2	Sensitivitätsanalyse: Pflanztrog-Material	16
3.3	Sensitivitätsanalyse: Betriebsdauer	16
4	Resultate der Wirkungsabschätzung	18
4.1	Fassadenbegrünung des Triemli-Turms (15 Jahre Betriebsdauer).....	18
4.2	Sensitivitätsanalyse: Pflanztrog-Material	21
4.3	Sensitivitätsstudie: Betriebsdauer	22
5	Diskussion und Ausblick.....	24
5.1	Datenqualität und Unsicherheiten.....	24
5.2	Anteil der Fassadenbegrünung an den Gesamtumweltbelastungen des Gebäudes	25
5.3	Ökologische Hotspots und Empfehlungen zur Reduktion der Umweltbelastungen von Fassadenbegrünungen	25
5.4	Vergleich mit Literaturwerten	27
5.5	Weitere zu berücksichtigende Aspekte.....	28
5.6	Verwendung der Ergebnisse für zukünftige Projekte.....	29
6	Fazit.....	31
7	Anhang	32
7.1	Literaturverzeichnis	32
7.2	Sachbilanz.....	34

1 Einleitung

Im Hinblick auf die stetig wachsende Weltbevölkerung geraten Städte und urbane Gebiete zunehmend unter Druck. Rund 56 % der Weltbevölkerung leben heute bereits in urbanen Gebieten – ein Anteil, welcher bis 2050 auf 68 % ansteigen dürfte [1]. Auch die Stadt Zürich verzeichnet 2022 einen neuen Bevölkerungsrekord, welcher mit über 140'000 Einwohnerinnen und Einwohner den bisherigen Rekord von 1962 übersteigt [2]. Die Auswirkungen der fortschreitenden Urbanisierung auf die Umwelt sind dabei vielseitig und umfassen primär eine zunehmende Luftverschmutzung, zunehmender städtischer Wärmeinseleffekt, sowie ein deutlicher Rückgang grüner Flächen und biologischer Vielfalt [3]. Als eine der effektivsten Massnahmen, um den negativen Auswirkungen der Urbanisierung auf die Umwelt entgegenzuwirken, gewinnt die Begrünung urbaner Gebiete zunehmend an Bedeutung im Rahmen der Stadtplanung [4–6].

Begrünte Gebäude zeigen weltweit zahlreiche Vorteile bezüglich verschiedener Umweltaspekte. Diese Begrünungen können dabei einerseits negative Auswirkungen auf die Umwelt verringern, durch Reduktion des Energieverbrauchs, verbesserte Wasserwirtschaft aufgrund der Möglichkeit der Grauwasseraufbereitung sowie Verringerung des städtischen Wärmeinseleffekts [7]. Andererseits haben grüne Gebäude positive Auswirkungen auf die Umwelt durch deren Möglichkeit zur Erhöhung der Artenvielfalt [8].

Nebst Dachbegrünungen als einer der häufigsten Arten der Gebäudebegrünung, gewinnt die Fassadenbegrünung zunehmend an Interesse. Dabei zeigen Fassadenbegrünungen im Vergleich zu Dachbegrünungen einen stärkeren Effekt auf das Gebäudeklima [9]. Durch deren isolierende Wirkung erzeugen Fassadenbegrünungen einen kühlenden Effekt im Sommer, während sie im Winter wärmeisolierend wirken [10]. Studien zu diesem Thema haben gezeigt, dass begrünte Fassaden an warmen Tagen bis zu 9 °C kühler bleiben und in kühlen Nächten bis zu 3.5 °C wärmer bleiben, im Vergleich zu nicht-begrünten Wänden [11]. Energieeinsparungen der Innenräume hinter Fassadenbegrünungen können dabei bis zu 20 % erreichen [12].

Angesichts der zahlreichen Vorteile grüner Dächer und Fassaden wurde am Hochhaus des Triemli-Spitals in Zürich eine Fassadenbegrünung umgesetzt. Neben den positiven Effekten der Fassadenbegrünung auf das Gebäudeklima und die Umwelt entstehen während dessen Lebenszyklus auch verschiedene Ressourcenverbräuche sowie umweltschädliche Emissionen, welche in der aktuellen Studie anhand einer Ökobilanz analysiert werden sollen.

Ziel der Studie war es, konsistentes und umfassendes Wissen über den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung für Erstellung, Betrieb und Entsorgung der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital zu erhalten, um die wesentlichen Einflussgrössen der Umweltauswirkungen zu identifizieren und Empfehlungen zur ökologischen Optimierung des Einsatzes von Fassadenbegrünung in der Stadt Zürich zu erarbeiten.

In heutigen Datenbanken und Planungsinstrumenten wie dem ecoinvent v3.8 Datenbestand [13,14] oder den Ökobilanzdaten im Baubereich gemäss Empfehlungen der KBOB [15] fehlen Ökobilanzdaten zu Fassadenbegrünung und anderen Pflanzenanwendungen im Gebäude-Kontext. Die Ökobilanzstudie zur Fassadenbegrünung am Triemli-Spital kann diese Lücke schliessen und Erkenntnisse und Datengrundlagen auch für zukünftige Projekte mit Fassadenbegrünungen liefern.

2 Ziel und Untersuchungsrahmen

Im folgenden Kapitel werden die Ziele und die vorgesehene Anwendung der Studie beschrieben. Darauf folgt die Beschreibung der verwendeten Vergleichseinheit (funktionelle Einheit) sowie die Systemgrenzen, die genutzten Daten, die Bewertungsmethoden und die ausgeführten Sensitivitätsanalysen.

2.1 Ziel und Anwendung der Studie

Im Rahmen des Projektes wird eine Ökobilanz der Fassadenbegrünung am Hochhaus des Triemli-Spitals erstellt, welche sich zum Zeitpunkt der Studie im Bau befindet.

Die konkreten Ziele des Projektes sind

- (1) konsistentes und umfassendes Wissen über den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung für Erstellung und Betrieb der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital zu erhalten,
- (2) die wesentlichen Einflussgrößen der Umweltauswirkungen zu identifizieren und
- (3) Empfehlungen zur ökologischen Optimierung des Einsatzes von Fassadenbegrünung in der Stadt Zürich zu erarbeiten.

Die Ökobilanzstudie richtet sich an die Auftraggebenden der Fachstelle Nachhaltiges Bauen der Stadt Zürich sowie an die mit der Projektumsetzung beauftragten raderschallpartner ag und deren Zulieferer. Die Studie soll die ökologische Optimierung künftiger Fassadenbegrünungen der Stadt Zürich unterstützen.

2.2 Funktionelle Einheit und Systemgrenzen

Die Fassadenbegrünung am Hochhaus des Triemli-Spitals umfasst eine Gesamtfläche von 3'138 m² und ist aufgrund der verbleibenden Betriebsdauer des Triemli-Turms auf eine Gesamteinsatzdauer von 15 Jahren festgelegt. Die funktionelle Einheit dieser Ökobilanz wird folglich definiert als:

«Fassadenbegrünung Südfassade Triemli-Turm in Zürich über 15 Jahre (3'138 m²)»

Das Systembild in Abbildung 3 zeigt die Prozesse, welche in der Ökobilanz berücksichtigt werden. Grundsätzlich können die berücksichtigten Prozesse in drei primäre Lebenszyklusphasen eingeteilt werden, welche unterhalb der Systemgrenze dargestellt sind: Erstellung der Fassadenelemente sowie der grünen Fassade, Unterhalt der grünen Fassade und Entsorgung.

Im ersten Prozess «Produktion Fassadenelemente» innerhalb der ersten Lebenszyklusphase werden die Produktion der einzelnen Fassadenelemente sowie deren Transport von der Produktionsstätte zum Triemli-Spital berücksichtigt. Die technische Ausführung der untersuchten Fassadenbegrünung beruht auf der Verwendung von Pflanzträgern aus Chrom-Nickel-Stahl (CNS) in Kombination mit einem automatisierten Bewässerungssystem (Abbildung 1). Weitere berücksichtigte Fassadenelemente sind das Pflanz-Substrat, die Setzlinge für die Erstbepflanzung sowie eine Rankhilfe für Kletterpflanzen. Die CNS-Pflanzträger sind dabei jeweils mit einer Drainageplatte aus expandiertem Polystyrol (EPS) und einem Kontrollschacht aus Polyvinylchlorid (PVC) ausgestattet. Die Bewässerung erfolgt über ein CNS-Steigrohr sowie über Transportleitungen aus Polyethylen (PE), welche etagenweise alle Pflanzträger miteinander verbinden. Das Bewässerungssystem ist an die Wasserversorgung des Triemli-Spitals

angeschlossen und umfasst ausserdem eine Bewässerungssteuerung, ein Düngermischgerät und ein Durchflussmessgerät. Befüllt werden die Pflanztröge mit einem mineralischen Substrat. Die Bepflanzung ist als eine Kombination von Gehölzen, Kletterpflanzen und Unterbepflanzung konzipiert. Die Rankhilfe besteht aus Edelstahl-Seilen, die an die Aussenmauer des Gebäudes befestigt werden. Ebenfalls Teil der ersten Lebenszyklusphase ist die Erstellung der Fassadenbegrünung. Diese umfasst den Energiebedarf der Hilfsgeräte während der Erstellung. Die verwendeten Hilfsgeräte bestehen dabei aus einem fest am Triemli-Turm installierten Baukran und einem Fassadenlift. Fotos der fertiggestellten Fassadenbegrünung sind in Abbildung 2 gezeigt.

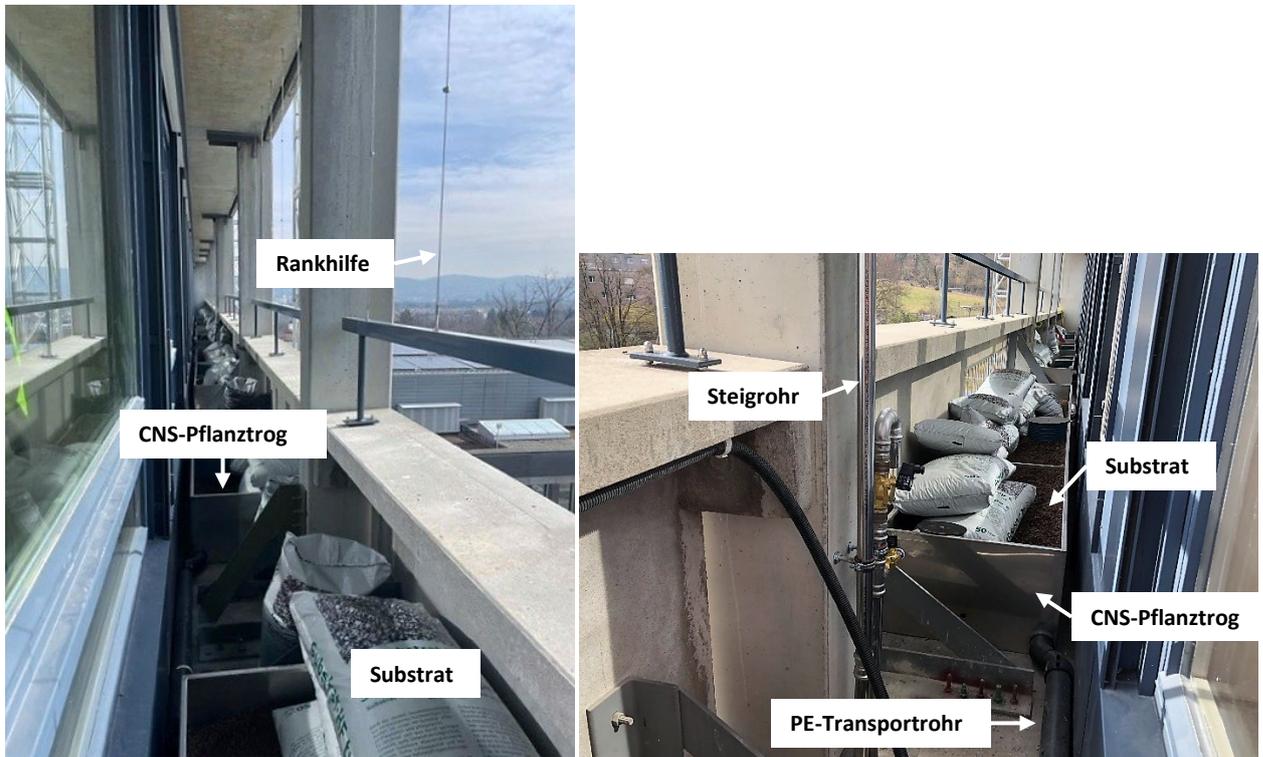


Abbildung 1: Fassadenelemente während der Erstellung der Fassadenbegrünung. Im Bild links sind Pflanztröge, Substrat und die Edelstahlseile der Rankhilfe zu sehen. Im Bild rechts ist nebst Pflanztrögen und Substrat das Edelstahl-Steigrohr des Bewässerungssystems abgebildet. (Fotos: ZHAW)

Die zweite Lebenszyklusphase beschreibt den Unterhalt der Fassadenbegrünung. Einen Prozess bilden dabei die Ersatzpflanzungen. Dies beinhaltet die Produktion der Pflanzen-Setzlinge, welche nach der Erstellung im Laufe des betrachteten Nutzungszeitrahmens eingesetzt werden müssen. Im Weiteren umfasst der Unterhalt der Fassadenbegrünung insbesondere den Wasser- und



Abbildung 2: Fassadenbegrünung des Triemli-Spitals nach Fertigstellung. Das Bild links zeigt eine Aufnahme der Fassade mittels Drohne. Das Bild rechts zeigt eine Nahaufnahme der bepflanzen Pflanztröge. (Fotos: Gaëtan Bally)

Energiebedarf für den Betrieb der Bewässerungsanlage über die gesamte Betriebsdauer. In Bezug auf den Einsatz von Dünger werden sowohl die Dünger-Produktion als auch Emissionen von Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O) und Stickoxiden (NO_x) beim Dünger-Einsatz berücksichtigt.

Die dritte und letzte Lebenszyklusphase beschreibt die Entsorgungsphase und umfasst einerseits den Rückbau der Fassadenbegrünung sowie die Entsorgung der Fassadenelemente. Für den Rückbau wird analog zur Erstellung der Energiebedarf der benötigten Geräte (Baukran, Bühne) berücksichtigt. Bezüglich Entsorgung wird für sämtliche Komponenten der Fassadenbegrünung deren Entsorgung oder Verwertung nach Lebensende in einer Kehrichtverbrennungsanlage, einer Deponie, einer Grüngutanlage oder einer Recyclinganlage berücksichtigt.

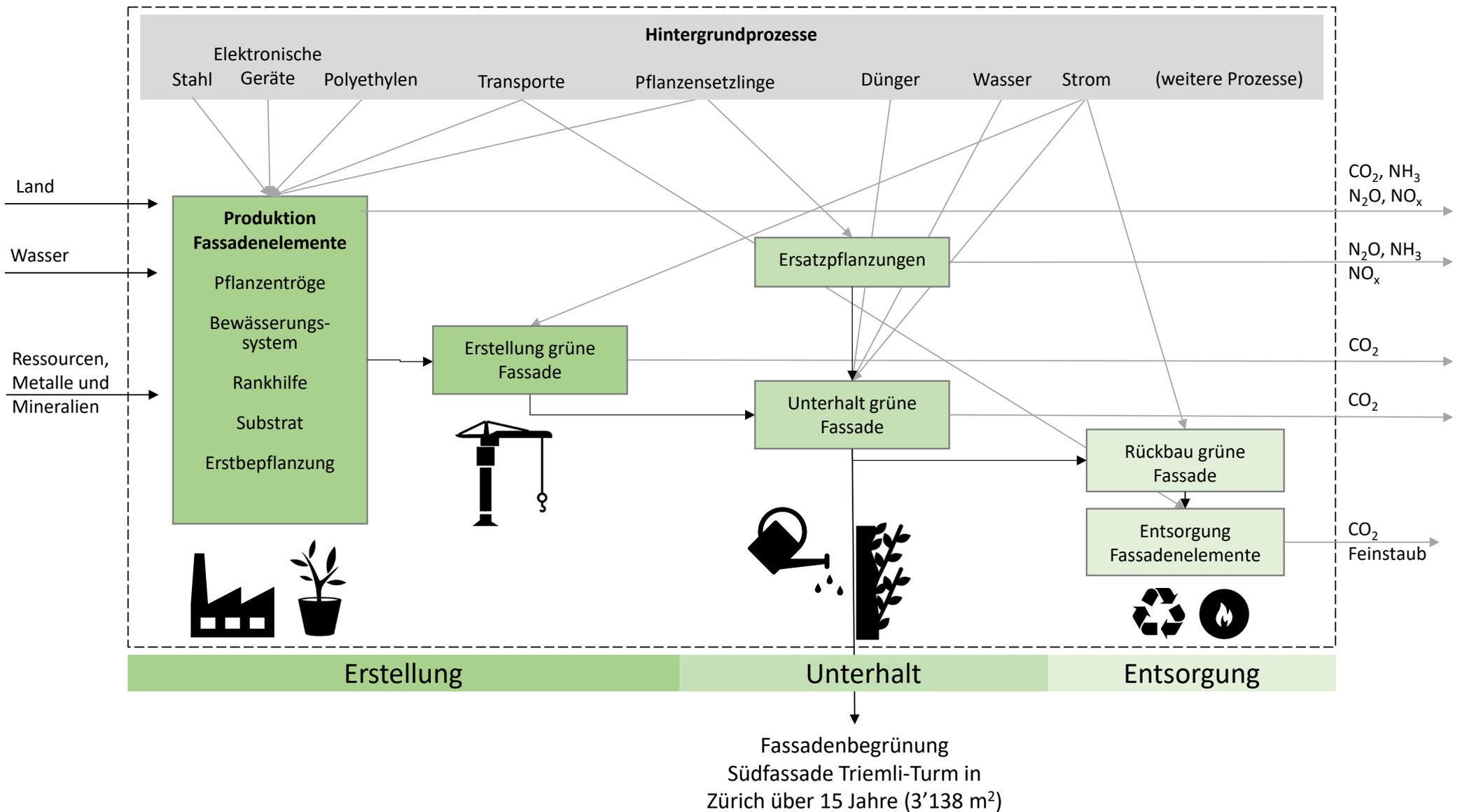


Abbildung 3: Systemgrenze und berücksichtigte Prozesse für die Bewertung der Umweltauswirkungen der Fassadenbegrünung am Hochhaus des Triemli-Spital, eingeteilt in die Lebenszyklusphasen Erstellung, Unterhalt und Entsorgung. Elementarflüsse aus der Natur fließen von links in das System und verlassen es nach rechts als Emissionen in die Natur. Hintergrundprozesse sind in der grauen Box dargestellt. Die Darstellung von Elementarflüssen, Emissionen und Hintergrundprozessen ist nicht abschliessend, sondern stellt eine Auswahl der jeweils relevanten Aspekte dar.

2.3 Datenerhebung, Allokation und Software

Die Vordergrunddaten für die Sachbilanz der Fassadenbegrünung am Hochhaus des Triemli-Spitals basieren auf spezifischen Angaben der Stadt Zürich, der raderschall partner ag sowie des Herstellers der Pflanztröge. Die Vordergrunddaten wurden mittels eines Fragebogens und direktem Austausch mit den Ansprechpartnern sowie mithilfe von zur Verfügung gestellten Produktdatenblättern erhoben. In Einzelfällen wurden Annahmen getroffen, zum Beispiel in Hinblick auf Materialzusammensetzung der Hilfsgeräte wie Bewässerungssteuerung und Düngemischgerät.

Allokation im Rahmen einer Ökobilanz beschreibt die Zuordnung der Input- oder Output Flüsse von Prozessen zu Produkten im Falle eines Multi-Output Prozesses, wenn in einem Prozess mehrere Produkte entstehen. Im Vordergrundsystem der vorliegenden Ökobilanzstudie sind keine Multi-Output Prozesse enthalten, weshalb keine Zuordnung nach Allokationsregeln nötig ist. Eine Ausnahme bildet die Bereitstellung der Hilfsgeräte (Baukran, Fassadenlift), welche bei der Erstellung und dem Rückbau verwendet werden. Diese wurde vollumfänglich dem Umbau des gesamten Triemli-Turms bzw. dem zukünftigen Rückbau des Turms zugeschrieben und daher in der Ökobilanz der Fassadenbegrünung nicht berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass sowohl Baukran als auch Fassadenlift unabhängig von der Fassadenbegrünung zum Einsatz kommen und dass die Einsatzdauer im Zusammenhang mit der Fassadenbegrünung im Vergleich zur restlichen Einsatzdauer vernachlässigbar ist.

Die Ökobilanz wird mit der Ökobilanzsoftware SimaPro v9 [16] modelliert und ausgewertet, wobei Daten der ecoinvent v3.8 Datenbank [14,17] verwendet werden. Das verwendete Systemmodell für die Modellierung der Hintergrunddaten von ecoinvent ist «Allocation cut-off by classification», welches die die Umweltauswirkungen des Rezyklierens dem produzierten Rezyklat anrechnet.

2.4 Bewertungsmethoden

Die Umweltauswirkungen respektive der Ressourcenverbrauch der Fassadenbegrünung werden anhand von drei Wirkungsabschätzungsmethoden bewertet:

- **Gesamtumweltbelastung** gemäss der in der Schweiz etablierten und vom Bundesamt für Umwelt unterstützten Methode der ökologischen Knappheit [18] in der aktualisierten Version 2021.
- **Treibhausgasemissionen** (THG-Emissionen) gemäss IPCC 2021 [19] mit einem Zeithorizont von 100 Jahren. Diese Auswertung entspricht dem CO₂-Fussabdruck und wird auch Klimabilanz oder Klimafussabdruck genannt.
- **Kumulierter Energieaufwand** (KEA, «Graue Energie») nach Frischknecht et al. [20] mit Angabe des Totals und der nicht-erneuerbaren Energie, welche fossile und nukleare Energiequellen beinhaltet.

Generell erfolgt die Beurteilung der Umweltauswirkungen der Fassadenbegrünung in Anlehnung an die standardisierten Ökobilanzmethoden gemäss der Norm ISO 14040 [21]. Ausgenommen davon ist die Bewertung der Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit. Die Methode gewichtet verschiedene Umweltauswirkungen anhand des «Distance to Target»-Prinzips in eine aggregierte Zahl und ist damit nicht ISO-konform.

2.5 Sensitivitätsanalysen

Um die Resultate auf deren Robustheit und Verlässlichkeit zu prüfen, können in Ökobilanzstudien Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. In der vorliegenden Studie wurde in diesem

Zusammenhang zum einem der Einsatz von alternativen Pflanztrög-Materialien und zum anderen eine verlängerte Betriebsdauer untersucht:

- Alternative Pflanztrög-Materialien:
 - Polyethylen (PE)
 - Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)
 - Faserzement
 - Recyclingstahl (Recyclinganteil 100%)
- Verlängerte Betriebsdauer der grünen Fassade von 15 auf 60 Jahre

Die Sensitivitätsanalyse bezüglich der Pflanztrög-Materialien ist für die vorliegende Ökobilanzstudie daher relevant, da verschiedene Materialien für die Fassadenbegrünung am Hochhaus des Triemli-Spitals zur Auswahl standen [22]. Nach der gewählten CNS-Variante war die zweite Priorität Pflanztröge aus PE oder aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Ausserdem wurden Szenarien für Pflanztröge aus Faserzement (Alternative seitens Pflanztrög-Hersteller) und Recyclingstahl betrachtet. Massgebend für die Wahl des Pflanztrög-Materials waren im Falle des Triemli-Turms die Brandschutzvorschriften, da es sich beim zu begrünenden Hochhaus um ein Spitalgebäude handelt. Die Sensitivitätsanalyse erlaubt eine Bewertung der Umweltauswirkungen einer Fassadenbegrünung mit alternativen Pflanztrög-Materialien, für mögliche zukünftige Projekte.

Die Sensitivitätsanalyse bezüglich der verlängerten Betriebsdauer ist relevant, da die Betriebsdauer einer grünen Fassade in der Regel deutlich länger als 15 Jahre ist. Die 15 Jahre im Falle der Fassadenbegrünung am Hochhaus des Triemli-Turms ergeben sich aufgrund der voraussichtlich verbleibenden Betriebsdauer des Triemli-Turms. Es ist jedoch möglich, dass der Triemli-Turm, und damit einhergehend auch die Fassadenbegrünung, länger als 15 Jahre in Betrieb bleiben werden. Für Neubauten wird die Betriebsdauer einer Fassadenbegrünung in der Regel jener des Gebäudes gleichgesetzt. Für die Sensitivitätsanalyse wird gemäss der Norm SIA 2032 [23] eine Betriebsdauer eines Gebäudes von 60 Jahre angesetzt. Diese Sensitivitätsanalyse erlaubt eine differenzierte Bewertung der vorliegenden Fassadenbegrünung und deren Anwendung auf mögliche zukünftige Projekte der Stadt Zürich.

3 Sachbilanz

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Sachbilanz der untersuchten Fassadenbegrünung, sowohl für das Grundszenario über 15 Jahre also auch für die durchgeführte Sensitivitätsanalyse. Eine umfassende Auflistung aller Sachbilanzdaten und der verwendeten ecoinvent v3.8 Hintergrunddatensätze ist im Anhang (Kapitel 7.2) gegeben.

3.1 Fassadenbegrünung des Triemli-Turms (15 Jahre Betriebsdauer)

Eine Übersicht der Sachbilanzdaten, die sich für die Erfüllung der funktionellen Einheit «Fassadenbegrünung Südfassade Triemli-Turm in Zürich über 15 Jahre (3'138 m²)» ergeben, ist in Tabelle 1 gegeben.

Insgesamt kommen 209 CNS-Pflanztröge in drei unterschiedlichen Grössen zum Einsatz, welche zusammen eine Lauflänge von 642 m aufweisen. Laut Zulieferer beträgt das durchschnittliche Gewicht pro laufenden Meter 17.2 kg, woraus sich eine Gesamtmenge von 11 t Stahl für die Pflanztröge ergibt. Gefüllt sind die Pflanztröge mit insgesamt 125 m² Substrat mit einem Gesamtgewicht von 106 t. Für die Begrünung werden 4632 Pflanzensetzlinge von über 100 verschiedener Pflanzenarten verwendet. Diese lassen sich gemäss Projektunterlagen in die drei übergeordneten Kategorien «Gehölz», «Kletterpflanzen» und «Unterbepflanzung» einteilen.

Der Transport von Bewässerungswasser erfolgt über ein Steigrohr aus ca. 200 kg CNS sowie insgesamt 588 kg PE-Rohren, welche etagenweise die Pflanztröge miteinander verbinden. Für die Steuerung des Bewässerungssystems wird insgesamt 240 kg Elektrokabel eingesetzt.

Der jährliche Bedarf an Bewässerung ergibt sich aus der Expertenabschätzung eines täglichen Wasserbedarfs von 5 l pro m² Vegetationsfläche. Der jährliche Strombedarf beruht auf eigenen Abschätzungen zur Leistungsaufnahme der elektronischen Komponenten der Bewässerungsanlage.

Bei der Modellierung der Sachbilanz in Simapro werden für die Bereitstellung von Materialien, Strom und Leitungswasser sowie für die Entsorgung aller Materialien weitestgehend ecoinvent v3.8 Datensätze verwendet. Während für Strom, Leitungswasser und Entsorgung Schweiz-spezifische Sachbilanzmodelle vorhanden sind, wird für die meisten Materialien und Komponenten (z.B. CNS, PE, Kabel) auf globale bzw. europäische Datensätze zurückgegriffen. Pflanzensetzlinge werden teils mit dem generischen Datensatz für Schweizer Obstbaumsetzlinge, teils mit einem an der ZHAW erstellten Datensatz für Begoniensetzlinge angenähert [24].

Tabelle 1: Sachbilanzdaten ausgewählter Komponenten der Fassadenbegrünung des Triemli-Turms über 15 Jahre.

Lebensphase	Unterprozess	Input	Menge	Einheit	Anmerkung/Modellierung
Produktion	Pflanztröge	CNS	11039	kg	Tröge, modelliert mit generischem CNS-Datensatz (Recyclinganteil ~55%)
		EPS	884	kg	Drainageplatten: modelliert mit generischem Datensatz für Polyesterol-Platten (Recyclinganteil 10%)
	Bewässerungssystem	PE	588	kg	Transportrohre, modelliert mit generischen Datensatz für PE mit hoher Dichte (Recyclinganteil 0%)
		CNS	200	kg	Steigleitung: modelliert mit generischem CNS-Datensatz (Recyclinganteil ~55%)
		Stromkabel	240	kg	Steuerleitungen: modelliert mit generisches Kabel-Datensatz (66% Kupfer, 34% Kunststoff-Hülle)
		PVC	409	kg	Kontrollschächte in Pflanztrögen: modelliert mit generischen PVC-Datensatz (Recyclinganteil 0%)
	Rankhilfe	CNS	72.6	kg	modelliert mit generischem CNS-Datensatz (Recyclinganteil ~55%)
	Substrat		125	m ³	Mineralisches Substrat; Gesamtgewicht 106250 kg; Modelliert als Mischung aus Ziegel, Kies und Kompost
	Pflanzen	Gehölz	616	St	Modelliert als Obstbaumsetzling (CH)
		Kletterpflanzen	656	St.	Modelliert zu 50% als Begoniensetzling und zu 50% als Obstbaumsetzling
Unterbepflanzung		3360	St.	Modelliert als Begoniensetzling (CH)	
Erstellung		Strom	1040	kWh	Energiebedarf Fassadenlift und Baukran, modelliert als Schweizer Verbraucherstrommix
Transport		LKW-Transport	10421	tkm	Transportdistanzen: 50 km für Pflanztröge, 90 km für restliche Fassadenkomponenten
Unterhalt	Wasser	Leitungswasser	791862	kg/Jahr	Wasser zur Bewässerung
	Strom	Strom	219	kWh/Jahr	Energiebedarf des Bewässerungssystems, modelliert als Schweizer Verbraucherstrommix
	Dünger	NPK-Dünger	30.0	kg/Jahr	Modelliert als 15-15-15 NPK-Dünger, zzgl. Emissionen durch Dünger-Einsatz
		Ersatz-Pflanzen	3	%/Jahr	Modelliert analog zum Pflanzenmix für die Erstbepflanzung
Rückbau		Strom	1040	kWh	Energiebedarf Fassadenlift und Baukran, modelliert als Schweizer Verbraucherstrommix
Entsorgung		CNS	11312	kg	100% recycelt (nur Transport zur Recyclinganlage modelliert)
		PE	588	kg	Modelliert mit PE-Entsorgungsdatensatz für CH: Transport und Entsorgung zu 99% in KVA
		EPS	884	kg	Modelliert mit EPS-Entsorgungsdatensatz für CH: Transport und Entsorgung zu 99% in KVA
		PVC	409	kg	Modelliert mit PVC-Entsorgungsdatensatz für CH: Transport und Entsorgung zu 99% in KVA
		Stromkabel	240	kg	Modelliert mit Elektrokabel-Entsorgungsdatensatz für CH: Transport und Entsorgung in KVA
		Grünabfall	2150	kg	Modelliert mit Grünabfall-Datensatz für CH: 19% Biogasanlage, 36% Kompostierung, 45% KVA
		Substrat	106250	kg	Modelliert mit Inert-Abfall-Datensatz für CH: 100% Inert-Deponie

3.2 Sensitivitätsanalyse: Pflanztrög-Material

Die untersuchten Pflanztrög-Materialien sowie deren spezifisches Gewicht pro laufenden Meter und das sich ergebende Gesamtgewicht für die Fassadenbegrünung am Triemli-Turm sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Angaben zum spezifischen Gewicht wurden dabei aus der Bewertungsmatrix der Stadt Zürich übernommen (PE, GFK) bzw. aus Herstellerangaben (Faserzement). Im Falle der Faserzement-Pflanztröge wurde für den Transport der Tröge das höhere Gewicht berücksichtigt. Die verwendeten Hintergrunddatensätze für alle Materialien finden sich in der detaillierten Sachbilanz-Auflistung im Anhang (Kapitel 7.2.2).

Tabelle 2: Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchte Pflanztrög-Materialien, Gewicht pro laufenden Meter Pflanztrög und Gesamtgewicht der Tröge für die gesamte Fassadebegrünung des Triemli-Turms.

	Trog-Material	spez. Gewicht	Gesamtgewicht
Grundszenario	CNS	17.2 kg/lm	11039 kg
Alternative Materialien	CNS, 100% Recyclingstahl	17.2 kg/lm	11039 kg
	PE	17.0 kg/lm	10910 kg
	Faserzement	80.0 kg/lm	51343 kg
	GFK	21.0 kg/lm	13478 kg

3.3 Sensitivitätsanalyse: Betriebsdauer

Für das Grundszenario über 15 Jahre wird angenommen, dass die Fassadenkomponenten über den gesamten Zeitraum von 15 Jahren einsetzbar sind und dementsprechend nicht ersetzt werden müssen. Einzige Ausnahme bilden die Pflanzen, für welche innerhalb der ersten 15 Betriebsjahre eine Ersatzrate von 3 % pro Jahr angesetzt wird. Dagegen spielt bei einer Betriebsdauer von 60 Jahren die Instandhaltung, d.h. der Ersatz von Komponenten, eine Rolle. Für die Sensitivitätsanalyse wurden daher die Komponenten der Fassadenbegrünung in Komponenten mit 30 Jahren Lebensdauer und Komponenten mit 60 Jahren Lebensdauer eingeteilt. Die Einteilung erfolgte in Anlehnung an das SIA-Regelwerk [23] und ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Für eine Betriebsdauer der Fassadenbegrünung von 60 Jahren wurde angenommen, dass im Rahmen der Instandhaltung ein Komplettersatz aller Komponenten mit einer Lebensdauer von 30 Jahren erfolgt. Dieser berücksichtigt sowohl die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der Ersatzkomponenten. Dies schliesst die Pflanzen und das Substrat ein, für welche ein Komplettersatz nach 30 Jahren angenommen wurde.

Tabelle 3: Angenommene Lebensdauern einzelner Komponenten der Fassadenbegrünung.

	30 Jahre Lebensdauer	60 Jahre Lebensdauer
Pflanztröge	EPS-Drainageplatten (PE-Pflanztröge)	CNS-Pflanztröge
Bewässerungssystem	PE-Transportrohre	CNS-Steigrohr
	Steuerleitungen (Kabel)	Messgeräte
	PVC-Kontrollschächte	
Bepflanzung	Pflanzen	
	Substrat	
Rankhilfe		CNS-Komponenten

Neben den CNS-Trögen aus dem Grundszenario wurden in der Sensitivitätsanalyse auch PE-Tröge berücksichtigt, welche gemäss Bewertungsmatrix [22] auch für die Fassadenbegrünung am Triemli-Spital in Frage gekommen wären. Dabei wurde für PE-Pflanztröge eine Lebensdauer von 30 Jahren angenommen, im Gegensatz zu CNS-Pflanztrögen, für welche eine Lebensdauer von 60 Jahren oder mehr erwartet werden kann.

4 Resultate der Wirkungsabschätzung

Im folgenden Kapitel werden die Wirkungsabschätzungsergebnisse der Ökobilanz aufgezeigt. Die Resultate sind in 3 Unterkapitel aufgeteilt, wobei zuerst die Umweltauswirkungen für das Grundszenario einer 15-jährigen Betriebsdauer aufgezeigt werden. Abgebildet sind dabei die Treibhausgasemissionen, der kumulierte Energieaufwand und die Gesamtumweltbelastung. Danach wird ausserdem in zwei verschiedenen Sensitivitätsanalysen auf die Materialien der Pflanztröge sowie auf die Betriebsdauer der grünen Fassade eingegangen.

4.1 Fassadenbegrünung des Triemli-Turms (15 Jahre Betriebsdauer)

Über den gesamten Lebenszyklus und für eine Betriebsdauer von 15 Jahren verursacht die Fassadenbegrünung eine Gesamtumweltbelastung von 227 Millionen Umweltbelastungspunkten (UBP) (Abbildung 4). Dies entspricht einer Gesamtumweltbelastung von rund 72'300 UBP pro Jahr und m² Fassadenfläche bzw. rund 353'600 UBP pro Jahr und Laufmeter Pflanztrög.

Mit 77 % weist die Produktion der Pflanztröge den grössten Anteil der Gesamtumweltbelastung der grünen Fassade auf. Innerhalb der Pflanztrög-Produktion sind es hauptsächlich THG-Emissionen, Luftschadstoffe und Schwermetallemissionen ins Wasser, welche die Gesamtumweltbelastung dominieren. Verursacht werden die Umweltwirkungen allesamt primär durch die CNS-Produktion.

Nach der Pflanztrög-Produktion weist die Produktion des Bewässerungssystems die zweithöchste Gesamtumweltbelastung auf, mit einem Anteil von 10 % der Gesamtfassade. Innerhalb des Bewässerungssystems wird die Gesamtumweltbelastung durch die Schwermetallemissionen in die Luft dominiert, welche durch die Produktion des im Kabel enthaltenen Kupfers entstehen. Weiter sind innerhalb der Gesamtumweltbelastung des Bewässerungssystems die THG-Emissionen und die Luftschadstoffe relevant, verursacht durch die Produktion der verschiedenen Kunststoff-, Stahl-, und Kabelkomponenten.

Unterhalt der grünen Fassade sowie Rückbau und Entsorgung haben jeweils einen Anteil von 4 % der Gesamtumweltbelastung der grünen Fassade. Innerhalb der letzten Lebenszyklusphase wird die Gesamtumweltbelastung durch die THG-Emissionen dominiert, welche fast ausschliesslich der Entsorgung der Drainageplatten, Transportrohre und Kontrollschächte zuzurechnen sind.

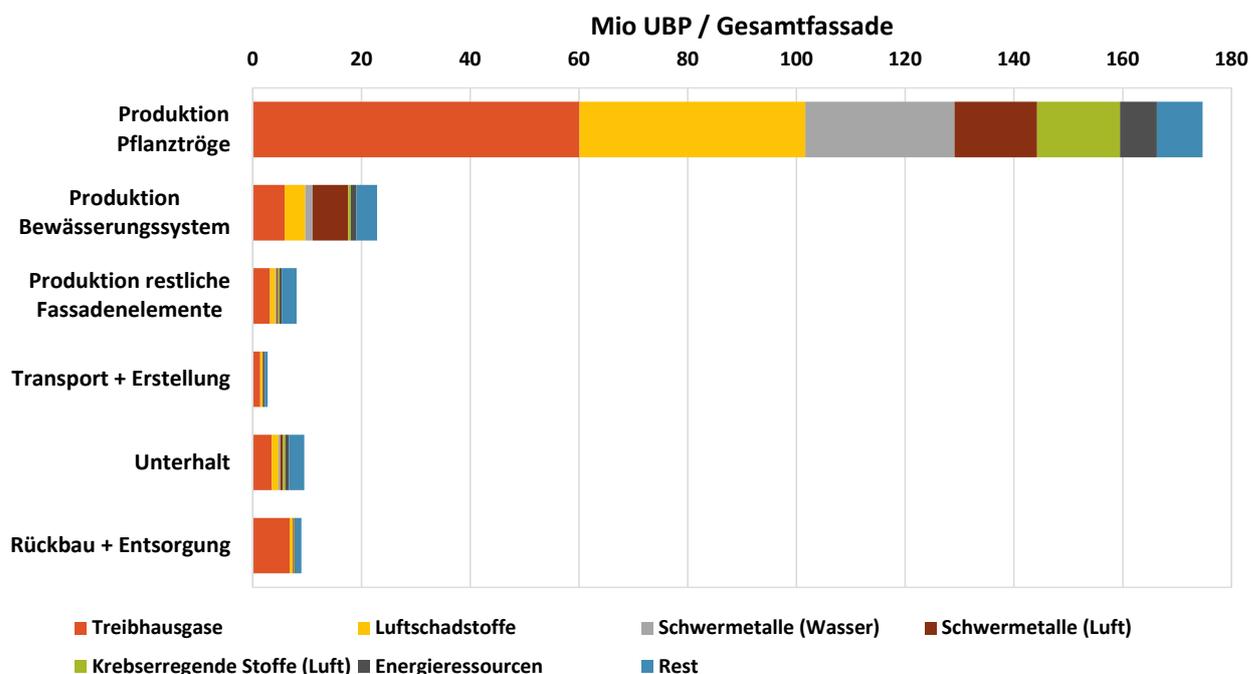


Abbildung 4: Gesamtumweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit [18], in Mio UBP für die Fassadenbegrünung mit einer Betriebsdauer von 15 Jahren. Dargestellt sind die verschiedenen Prozesse, aufgeteilt in die relevantesten Wirkungskategorien.

Der kumulierte Energieaufwand der grünen Fassade ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Fassadenbegrünung benötigt einschliesslich allen Lebenszyklusphasen für eine Betriebsdauer von 15 Jahren insgesamt 1.4 TJ oil-eq kumulierten Energieaufwand (KEA, Englisch: CED), mit einem Anteil erneuerbarer Energien von 25 %. Die entsprechenden relativen Ergebnisse sind 0.449 GJ oil-eq pro Jahr und m² Fassadenfläche bzw. 2.20 GJ oil-eq pro Jahr und Laufmeter Pflanztrög.

Der relevanteste Prozess für den KEA ist die Produktion der Pflanztröge, welche einen Anteil von 65 % aufweist. Innerhalb der Pflanztrög-Produktion ist es, ähnlich wie bei den THG-Emissionen, primär die CNS-Produktion, welche 60 % des KEA verursacht, zusammen mit der Produktion der EPS-Drainageplatten, welche 6 % zum KEA beitragen.

Nebst der Produktion der Pflanztröge ist ausserdem der Unterhalt der Fassadenbegrünung für 16 % des KEA verantwortlich. Dieser Prozess wird als einziger durch den erneuerbaren Energieaufwand dominiert, was auf die in der Biomasse der Pflanzen gespeicherte Energie zurückzuführen ist. Der Beitrag der Pflanzen am KEA ergibt sich durch deren Brennwert und trägt 12 % zum gesamten KEA der Fassadenbegrünung bei. Das Bewässerungswasser ist für weitere 3 % des für den Unterhalt benötigten KEA verantwortlich.

Weiter trägt die Produktion des Bewässerungssystems 10 % zum KEA bei. Aufgeteilt auf die relevanten Unterprozesse stammen davon 4 % aus der Produktion der PE-Transportrohre und je 2 % aus der Produktion der Kabel für die Steuerleitung sowie der Produktion der PVC-Kontrollschächte. Die Produktion der restlichen Fassadenelemente (Pflanzen, Dünger und Rankhilfe) verursachen 5 % des KEA. Die übrigen Prozesse Transport der Fassadenelemente, Erstellung und Rückbau der Fassade sowie Entsorgung der Fassadenelemente tragen zusammen 4 % zum KEA bei.

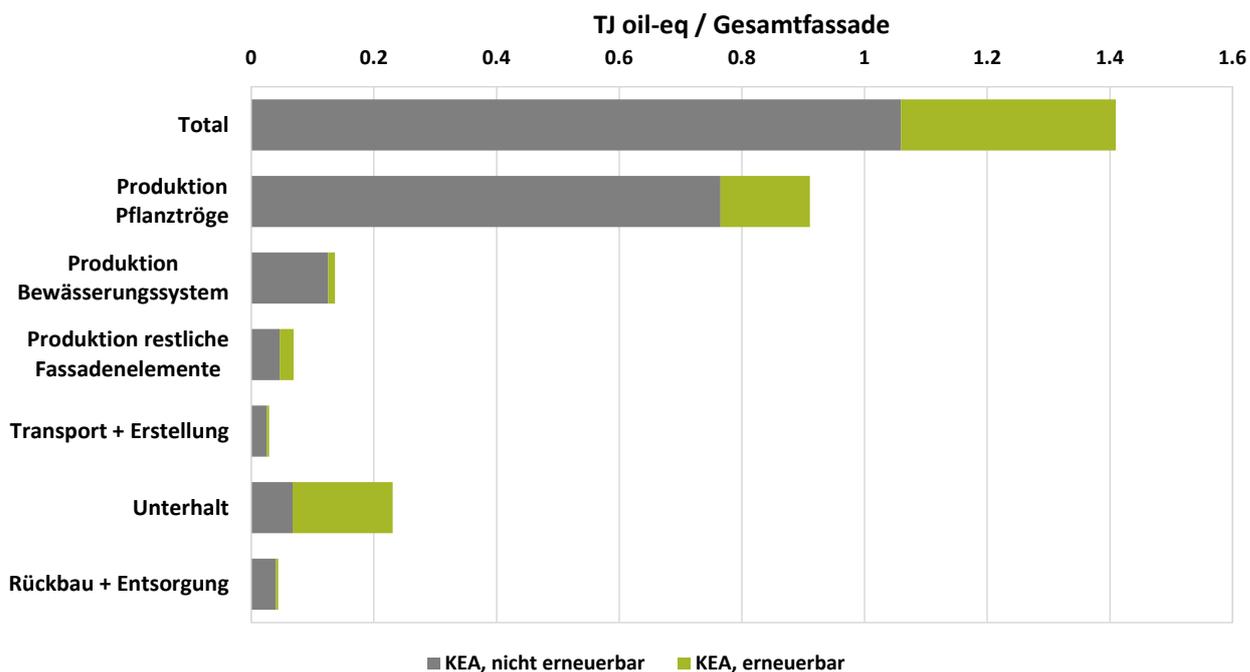


Abbildung 5: Kumulierter Energieaufwand nach Frischknecht et al. [7], in Terajoule oil-eq für die Fassadenbegrünung mit einer Betriebsdauer von 15 Jahren. Dargestellt sind totaler kumulativer Energieaufwand, nicht erneuerbarer und erneuerbarer Energieaufwand, aufgeteilt in die verschiedenen Prozesse.

Die Treibhausgasbilanz der gesamten grünen Fassade über eine 15-jährige Betriebsdauer ist in Abbildung 6 abgebildet. Insgesamt verursacht die Fassadenbegrünung THG-Emissionen von 80.1 t CO₂-eq. Dies entspricht 1.86 kg CO₂-eq. pro Jahr und m² Fassadenfläche bzw. 9.08 kg CO₂-eq. pro Jahr und Laufmeter Pflanztrög.

Bezüglich den Lebenszyklusphasen verursacht die Produktion der Fassadenelemente mit 69 t CO₂-eq knapp 86 % der gesamten THG-Emissionen. Hauptquelle der THG-Emissionen bei der Produktion der Fassadenelemente stellt die Produktion der CNS-Pflanztröge dar (2. Ring in Abbildung 6) mit knapp 60 t CO₂-eq (75 % der gesamten THG-Emissionen). Aufgeteilt in die Unterprozesse innerhalb der Pflanztrog-Produktion, erklärt sich der hohe Anteil der Gesamtreibhausgasemissionen primär durch die energie-intensive Produktion von CNS, welche 71 % der Emissionen verursacht, sowie die Produktion der Drainageplatten aus Styropor, welche 4 % der Emissionen verursacht. Aus der ersten Lebenszyklusphase trägt nebst der Produktion der Pflanztröge weiter das Bewässerungssystem 7 % zu den THG-Emissionen bei. Haupttreiber des Bewässerungssystems sind dabei die Produktion der Kabel für die Steuerleitung, die Produktion der Transportrohre aus PE, die Produktion der CNS-Steigleitungen und die Produktion der Kontrollschächte aus PVC. Restliche Beiträge der THG-Emissionen stammen innerhalb der ersten Lebenszyklusphase zudem zu 3 % aus der Produktion der Pflanzen und < 1 % aus der Produktion des Dachsubstrats und Rankhilfen.

Die Lebenszyklusphase, welche die zweithöchste Menge an Treibhausgasen verursacht, ist die Entsorgung der Fassadenelemente. Mit 6.7 t CO₂-eq macht die Entsorgung 8 % der insgesamt emittierten Treibhausgase aus. Hauptursache dieser Emissionen sind dabei die Verbrennung der Kunststoff-Komponenten wie die EPS-Drainageplatten, die PE-Transportrohre und die PVC-Kontrollschächte.

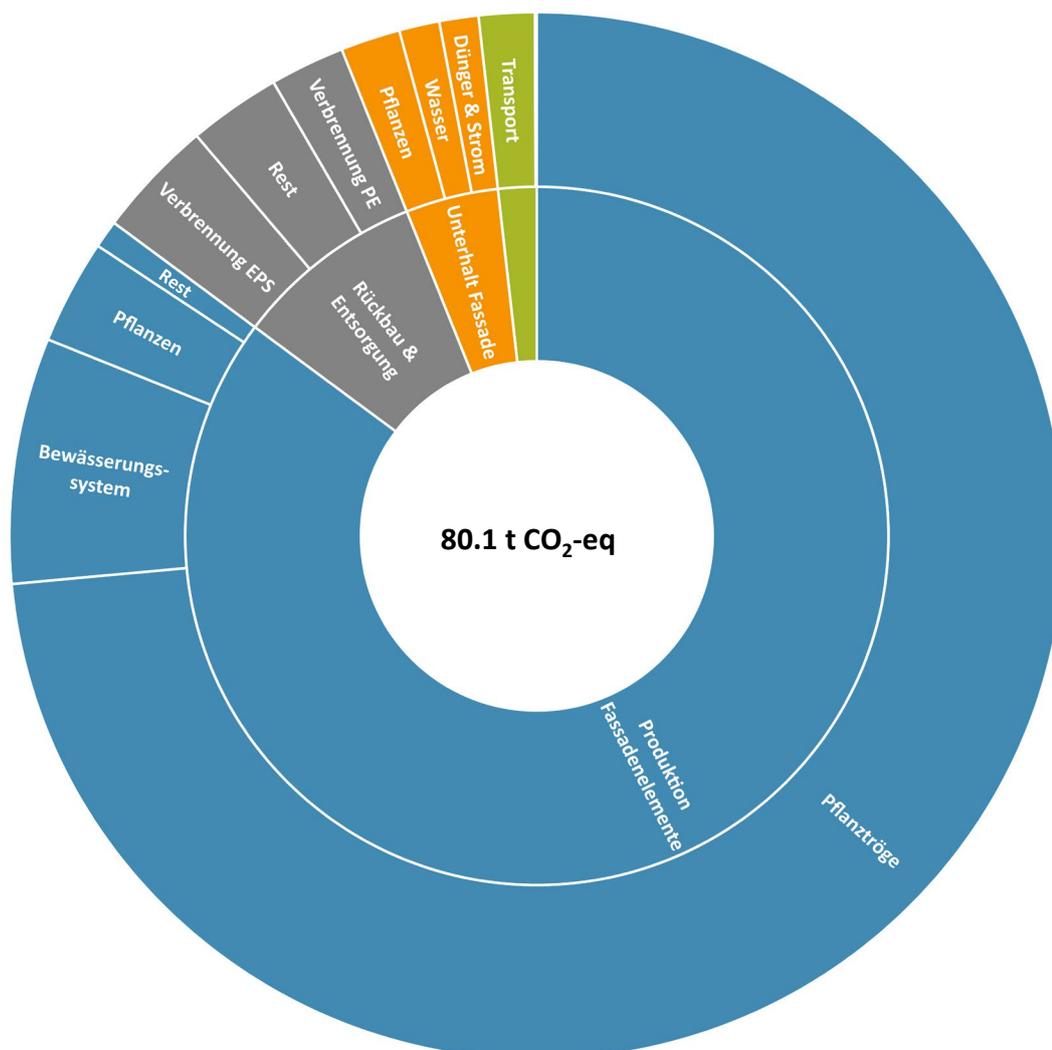


Abbildung 6: Treibhausgasbilanz der begrünten Fassade über eine Betriebsdauer von 15 Jahren, nach IPCC 2021 [6]. Aufgeteilt sind die THG-Emissionen in die Lebenszyklusphasen, sowie in die Hauptprozesse pro Lebenszyklusphase.

Der Unterhalt der grünen Fassade stellt mit 3.3 t CO₂-eq die Lebenszyklusphase mit den dritthöchsten THG-Emissionen dar. Spezifisch der Ersatz der Pflanzen von jährlich 3 % und die Düngung der Pflanzen sind die Hauptursache der anfallenden Emissionen während des Unterhaltes (2.7 % der gesamten THG-Emissionen). Wasser zur Bewässerung sowie Strombedarf des Bewässerungssystems tragen zusammen 1 % zu den gesamten THG-Emissionen der grünen Fassade bei. Die übrigen Lebenszyklusphasen, Transport der Fassadenelemente, Erstellung und Rückbau der Fassade sind zusammen für 1.8 % der gesamten THG-Emissionen verantwortlich.

4.2 Sensitivitätsanalyse: Pflanzrog-Material

Aus den Wirkungsabschätzungsergebnissen in Kapitel 4.1 geht hervor, dass die Produktion der Pflanztröge die Umweltbelastungen bezüglich allen analysierten Wirkungskategorien deutlich dominiert. Grund dafür ist CNS, welcher das Hauptmaterial der Pflanztröge darstellt. Aufgrund des hohen Einflusses des Pflanzrog-Materials wird im Folgenden das Resultat der Wirkungsabschätzung auf dessen Sensitivität bezüglich weiteren Pflanzrog-Materialien getestet. Dafür wurden nebst dem Grundszenario, mit Pflanztrögen aus CNS, weitere vier Szenarien für eine Fassadenbegrünung mit unterschiedlichen Pflanzrog-Materialien gerechnet. Die vier Alternativszenarien umfassen eine Fassadenbegrünung mit Pflanztrögen aus Polyethylen (PE), Faserzement, glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und Recyclingstahl.

In Abbildung 7 sind die THG-Emissionen sowie die Gesamtumweltbelastung der fünf Fassadenszenarien mit den unterschiedlichen Pflanzrog-Materialien abgebildet. Alle Szenarien beziehen sich auf eine Betriebsdauer von 15 Jahren. Während bezüglich der Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit das Grundszenario mit CNS-Pflanztrögen die höchsten Werte aufweisen, zeigt dieses Grundszenario im Vergleich zu den vier Alternativszenarien die zweitiefsten THG-Emissionen. Die tiefsten Emissionen ergeben sich für die Fassadenbegrünung mit Pflanztrögen aus Recyclingstahl. Im Vergleich zu dem Grundszenario mit CNS-Pflanztrögen, zeigt das Recyclingstahl-Szenario eine um einen Faktor 2 tiefere Gesamtumweltbelastung. Auch die THG-Emissionen dieses Szenarios sind über einen Faktor 2 tiefer als das Grundszenario. Während die Produktion der Pflanztröge im Grundszenario 77 % der Gesamtumweltbelastung und 75 % der THG-Emissionen verursachen, hat die Pflanzrog-Produktion mit Recyclingstahl mit jeweils 51 % und 44 % einen deutlich geringeren Anteil.

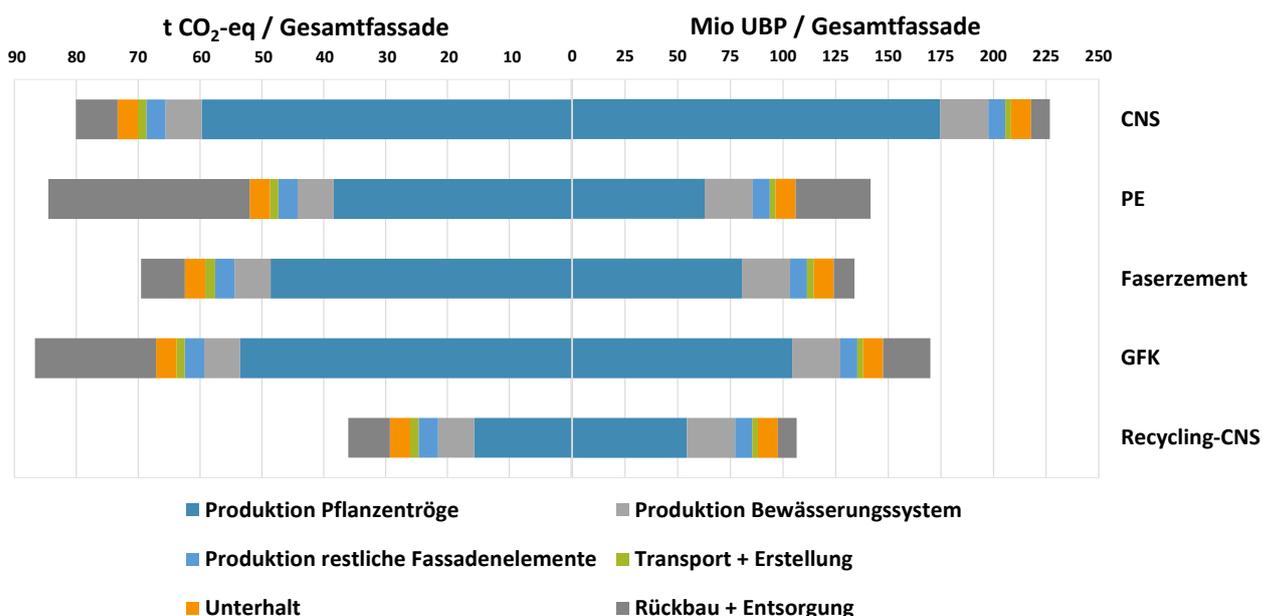


Abbildung 7: Treibhausgasbilanz in t CO₂-eq und Gesamtumweltbelastung in Mio UBP, für eine Fassadenbegrünung mit Standard-CNS-Trögen, sowie die alternativen Pflanzrog-Materialien PE, Faserzement, GFK und Recyclingstahl. Unterteilt sind die Umweltwirkungen jeweils in die verschiedenen Prozesse und beziehen sich auf eine Betriebsdauer von 15 Jahren.

Das Szenario mit Faserzement-Pflanztrögen zeigt bezüglich Gesamtumweltbelastung sowie Treibhausgasbilanz die zweittiefsten Auswirkungen. Im Vergleich zum Grundszenario mit CNS-Trögen ist dessen Gesamtumweltbelastung rund 40 % tiefer, während die THG-Emissionen 13 % tiefer ausfallen. Dieser Unterschied ist fast ausschliesslich auf die tieferen Emissionen während der Produktion der Faserzementtröge zurückzuführen, während die Entsorgung des Faserzements ähnliche Werte wie jene der CNS-Entsorgung aufweist.

Die Gesamtumweltbelastung einer grünen Fassade mit PE-Pflanztrögen fällt 38 % tiefer aus, im Vergleich zu der Fassade mit CNS-Trögen. Die Produktion der PE-Pflanztröge zeigt dabei eine knapp dreimal tiefere Gesamtumweltbelastung, verglichen mit der Produktion der CNS-Tröge. Die Entsorgung der PE-Tröge in einer Kehrichtverbrennungsanlage hingegen verursacht eine viermal höhere Gesamtumweltbelastung als die Entsorgung der CNS-Tröge. Auch bezüglich Treibhausgasbilanz verursacht die Entsorgung der PE-Trögen unter den fünf analysierten Pflanztrög-Materialien die grösste Menge CO₂-eq, welche hauptsächlich während der Verbrennung des Polyethylens emittiert werden und knapp 40 % der totalen THG-Emissionen der Gesamtfassade ausmachen. Eine Fassade mit PE-Pflanztrögen weist gesamthaft 5 % mehr THG-Emissionen auf im Vergleich zum CNS-Szenario.

Eine Fassadenbegrünung mit GFK-Pflanztrögen weist bezüglich der Gesamtumweltbelastung die zweithöchsten Auswirkungen auf, 25 % tiefer als jene des Grundszenarios. Die THG-Emissionen der Entsorgung der GFK-Tröge fallen, aufgrund der kleineren Menge an zu verbrennendem Kunststoff, tiefer aus als jene der Entsorgung der PE-Tröge. Die Produktion der GFK-Tröge hingegen emittiert knapp 30 % mehr CO₂-eq als die Produktion der PE-Tröge, und lediglich 10 % weniger als die Produktion der CNS-Tröge. Gesamthaft verursacht dadurch das Szenario mit GFK-Pflanztrögen von den fünf analysierten Szenarien die grösste Menge an THG-Emissionen.

4.3 Sensitivitätsstudie: Betriebsdauer

Um den Einfluss der Betriebsdauer auf die Ergebnisse zu untersuchen, wurden das Grundszenario mit CNS-Pflanztrögen sowie das Szenario mit PE-Pflanztrögen zusätzlich zu der 15-jährigen Betriebsdauer für eine Betriebsdauer von 60 Jahren gerechnet. Für die Szenarien mit 60 Jahren Betriebsdauer ist die Instandhaltung mitinbegriffen, was ein einmaliger Ersatz aller Fassadenkomponenten beinhaltet, mit Ausnahme der CNS-Komponenten, da für letztere eine Lebensdauer von 60 Jahren angenommen wird.

Abbildung 8 zeigt die Gesamtumweltbelastung der beschriebenen vier Szenarien pro Betriebsjahr. Das Grundszenario mit CNS-Pflanztrögen zeigt die höchste Gesamtumweltbelastung, mit 15 Millionen UBP pro Jahr. Wird die Betriebsdauer von 15 Jahren auf 60 Jahre verlängert, so verringert sich die jährliche Gesamtumweltbelastung um einen Faktor 3. Dieser Unterschied ist grösstenteils den CNS-Pflanztrögen zuzuschreiben. Bei einer Betriebsdauer von 15 Jahren verursacht die Produktion der CNS-Tröge jährlich rund 77 % der Gesamtumweltbelastung. Werden die CNS-Tröge über 60 Jahre genutzt, so verringert sich deren jährliche Gesamtumweltbelastung um 75 %. Die Produktion der CNS-Tröge machen im 60-Jahre-Szenario mit 60 % nach wie vor den Hauptteil der Gesamtumweltbelastung aus. Die Instandhaltung der Fassadenkomponenten zeigt den zweitgrössten Beitrag zur Gesamtumweltbelastung, mit einem Anteil von knapp 15 %.

Bezüglich der Szenarien mit PE-Pflanztrögen zeigt eine Fassadenbegrünung mit PE-Pflanztrögen über eine 15-jährige Betriebsdauer pro Jahr eine deutlich tiefere Gesamtumweltbelastung im Vergleich zu der CNS-Variante. Das 15-Jahre-Szenario mit PE-Trögen fällt 38 % tiefer aus im Vergleich zu der Gesamtumweltbelastung des CNS-Szenarios. Wird die Betriebsdauer der Fassadenbegrünung jedoch auf 60 Jahre verlängert, ergibt sich für das PE-Szenario dieselbe Gesamtumweltbelastung pro Jahr wie für das CNS-Szenario. Die Prozessbeiträge innerhalb der Gesamtfassade sind jedoch zwischen dem PE- und dem CNS-Szenario über 60 Jahre unterschiedlich. Während bei der CNS-Variante die Produktion der Pflanztröge 60 % der Gesamtumweltbelastung verursacht, liegt der Beitrag der Produktion der PE-Pflanztröge lediglich bei 22 %. Allerdings hat hier die Instandhaltung einen wesentlich höheren Anteil, da diese die

erneute Produktion und Entsorgung der PE-Pflanztröge (22 % bzw. 12 % der Gesamtumweltbelastung) beinhaltet und somit für zusätzlichen THG-Emissionen verantwortlich ist.

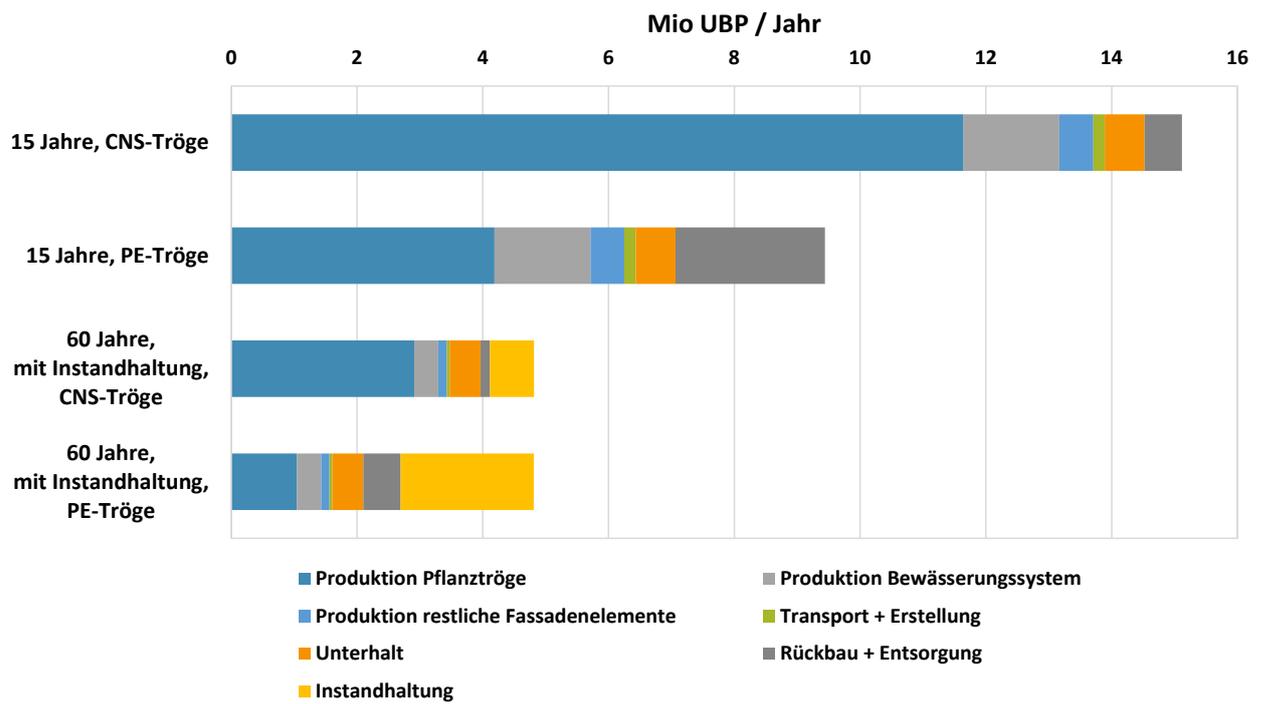


Abbildung 8: Gesamtumweltbelastung in Mio UBP pro Jahr, für eine Fassadenbegrünung mit einer Betriebsdauer von 15 Jahren sowie einer Betriebsdauer von 60 Jahren. Pro Betriebsdauer ist jeweils ein Szenario mit CNS- und PE-Pflanztrögen dargestellt, unterteilt in die verschiedenen Prozesse.

5 Diskussion und Ausblick

Dieses Kapitel dient der Interpretation und der Einordnung der vorgestellten Ergebnisse. Nach einer Diskussion der Datenqualität und Unsicherheiten werden die Ergebnisse ins Verhältnis zu einem Gesamtgebäude sowie zu Ergebnissen vergleichbarer Ökobilanz-Studien gesetzt. Schliesslich werden in Hinblick auf zukünftige Fassadenbegrünungen Empfehlungen zur Reduktion der Umweltauswirkungen hergeleitet und relative Ergebnisse in Anlehnung an das KBOB-Format vorgestellt.

5.1 Datenqualität und Unsicherheiten

Im Allgemeinen basiert die durchgeführte Ökobilanz auf einer Datenbasis mit Vordergrunddaten von hoher Qualität.

Für die Erstellungsphase der Fassadenbegrünung des Triemli-Spitals standen spezifische Material- und Mengenangaben zur Verfügung. Nur in Einzelfällen wurden eigene Annahmen getroffen. Diese betreffen Komponenten, die keinen signifikanten Beitrag an den Umweltbelastungen aufweisen, wie zum Beispiel die elektronischen Komponenten des Bewässerungssystems.

Da die untersuchte Fassadenbegrünung im Jahr 2022 erstellt wurde, sind für die Betriebsphase noch keine tatsächlichen Verbrauchsdaten bekannt. Für Strom-, Wasser-, Dünger- und Ersatzpflanzenbedarf konnte jedoch auf Expertenabschätzungen zurückgegriffen werden, welche spezifisch für die Triemli-Fassadenbegrünung basierend auf Erfahrungswerten seitens Projektleiter und Zulieferer erstellt wurden.

Transportdistanzen sowie der Energieverbrauch für Erstellung und Rückbau wurden durch Projektleiter und Zulieferer abgeschätzt. Diese haben jedoch keinen relevanten Einfluss auf die Endresultate.

Grössere Unsicherheiten sind aufgrund der Verknüpfung der Vordergrunddaten mit ecoinvent-Hintergrunddatensätzen zu erwarten. Hierauf wird im Folgenden näher eingegangen.

Grundsätzlich waren für die einzelnen Fassadenkomponenten keine spezifischen Informationen zu Herkunft der Rohstoffe, Recyclinganteil und Herstellungsart bekannt. Aus diesem Grund wurde bei der Modellierung der Herstellung weitestgehend auf Herstellungs-Datensätze aus der ecoinvent v3.8 Datenbank zurückgegriffen.

Besonders relevant in dieser Hinsicht ist die Modellierung der Herstellung des Chrom-Nickel-Stahls, für welche ein generischer Datensatz verwendet wurde. Dieser legt einen Sekundärstahl-Anteil von schätzungsweise 55 % sowie eine Herstellung über das Elektrostahlverfahren unter Verwendung des globalen Energiemix zugrunde. Die Annahmen innerhalb des Datensatzes zur Stahlerzeugung haben jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz, wie die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zum Recyclinganteil des Stahls verdeutlicht hat (Kapitel 4.2). Zudem hat die Wahl der Datenbank einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis: So ergeben sich aus dem generische Chromstahl-Hintergrunddatensatz der aktualisierten KBOB-Datenbank (KBOB-ID 06.004) ca. 20 % tiefere THG-Emissionen und eine ca. 25 % tiefere Gesamtumweltbelastung als aus dem in dieser Studie verwendeten ecoinvent v3.8 Datensatz.

In einigen Fällen war innerhalb der Modellierung eine Annäherung über andere Materialien nötig. Ein Beispiel hierfür sind die Pflanzensetzlinge, welche teils mit einem Datensatz für Obstbaumsetzlinge, teils mit einem Datensatz für Begonien-Setzlinge angenähert wurden. Ein weiteres Beispiel ist das mineralische Substrat, das über eine Mischung von Kompost, Kies und Ziegelschutt angenähert wurde. Die Auswirkungen dieser Annäherungen auf das Gesamtergebnis sind jedoch im Vergleich zur Stahl-Modellierung gering, da weder Pflanzensetzlinge noch Substrat einen relevanten Beitrag zu den Gesamtergebnissen aufweisen.

Weitere Unsicherheiten bestehen durch die Modellierung der Entsorgung von Fassadenkomponenten. Diese wurde ebenfalls anhand von generischen Datensätzen modelliert, welche typische Entsorgungspraktiken für die einzelnen Materialgruppen in der Schweiz berücksichtigen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich diese Praktiken aufgrund von Nachhaltigkeitsbemühungen ändern werden, bis die Fassadenkomponenten tatsächlich entsorgt

werden. Dies ist vor allem für die Verwendung von Pflanztröge aus PE relevant. In der vorliegenden Studie wird rund ein Drittel der THG-Emissionen, die mit PE in Verbindung stehen, durch die Verbrennung in der KVA verursacht. Eine zukünftige Ausweitung von Recyclingpraktiken würde diesen Anteil signifikant reduzieren. Bei der Verwendung von CNS-Pflanztrögen spielt die Entsorgung dagegen nur eine marginale Rolle, da bereits jetzt 100 % Recycling angenommen wird.

Weitere Unsicherheiten bestehen in Zusammenhang mit den angenommenen Betriebs- und Lebensdauern. Im Grundszenario wurde eine Betriebsdauer von 15 Jahren angesetzt, was der angenommenen restlichen Betriebsdauer des Triemli-Turms entspricht. Allerdings kann die tatsächliche restliche Nutzungsdauer des Gebäudes weit höher liegen. Wie die durchgeführte Sensitivitätsstudie zeigte, hat die Betriebsdauer einen erheblichen Einfluss auf die ermittelten Umweltauswirkungen pro Jahr (Kapitel 4.3). Das Gleiche lässt sich für die angenommenen Lebensdauern der Einzelkomponenten festhalten, welche in der Studie in Anlehnung an die Norm SIA 2032 [23] abgeschätzt wurden, in Realität aber wesentlich kürzer oder länger ausfallen können.

5.2 Anteil der Fassadenbegrünung an den Gesamtumweltbelastungen des Gebäudes

Um die Umweltauswirkungen der Fassadenbegrünung in absoluten Zahlen einordnen zu können, ist eine Gegenüberstellung mit den Umweltauswirkungen des Gesamtgebäudes hilfreich. Es liegen keine spezifischen Ökobilanz-Daten für den Triemli-Turm vor. Daher wird für einen Vergleich auf die Ökobilanz eines Referenzgebäudes im Raum Zürich zurückgegriffen, welche an der ZHAW durchgeführt wurde [25]. Das Referenzgebäude ist in konventioneller Stahlbeton-Bauweise konzipiert und weist abschätzungsweise eine ähnliche Kubatur wie der Triemli-Turm auf. Für den Vergleich wurde angenommen, dass eine Längsseite des Referenzgebäudes mit einer Gesamtfläche von 3510 m² in der gleichen Weise wie der Triemli-Turm begrünt wird und dass das Gebäude über 60 Jahren genutzt wird, wobei sowohl für die Fassadenbegrünung als auch für das Gebäude der gesamte Lebenszyklus (Herstellung, Unterhalt, Betrieb, Rückbau, Entsorgung) berücksichtigt wird. Hierfür wurden die Ergebnisse für die Fassadenbegrünung mit CNS-Pflanztrögen und einer Betriebsdauer von 60 Jahren relativ zur Quadratmeterzahl von 3138 m² auf 3510 m² hochskaliert.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse des Vergleichs in Bezug auf THG-Emissionen, Gesamtumweltbelastung und kumulierten Energieaufwand (total) zusammen. Es zeigt sich, dass die Fassadenbegrünung über den gesamten Lebenszyklus einen eher geringen Anteil von ca. 1 % zu den Umweltbelastungen des Gesamtgebäudes beiträgt. Die Fassadenbegrünung stellt somit im Kontext eines Gesamtgebäudes keinen ökologischen Hotspot dar. Da jedoch die absoluten Umweltauswirkungen eines Gebäudes sehr hoch sind und Gebäude einen erheblichen Anteil an den nationalen THG-Emissionen beitragen, sollte auch für Fassadenbegrünungen Anstrengungen zur Minimierung der Umweltauswirkungen unternommen werden. Empfehlungen hierzu finden sich im folgenden Kapitel 5.3.

Tabelle 4. Umweltauswirkungen einer Fassadenbegrünung unter Verwendung von CNS-Pflanztrögen im Vergleich zur Umweltauswirkung des Referenzgebäudes. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf eine Betriebsdauer von 60 Jahren unter Berücksichtigung von Herstellung, Unterhalt, Betrieb, Rückbau und Entsorgung.

	THG-Emissionen	Gesamt- umweltbelastung	Kumulierter Energieaufwand
Fassadenbegrünung	1.19E+05 kg CO ₂ -eq	3.24E+08 UBP	2.60E+06 MJ oil-eq
Gesamtgebäude	1.18E+07 kg CO ₂ -eq	2.51E+10 UBP	4.81E+08 MJ oil-eq
Anteil Fassadenbegrünung	1.0 %	1.3 %	0.54 %

5.3 Ökologische Hotspots und Empfehlungen zur Reduktion der Umweltbelastungen von Fassadenbegrünungen

Pflanztröge stellen sich klar als ökologischer Hotspot der Fassadenbegrünung des Triemli-Spitals heraus, unabhängig vom angenommenen Pflanztrög-Material und der Betriebsdauer.

Im Grundszenarium sind CNS-Pflanztröge bei einer angenommenen Betriebsdauer von 15 Jahren für ~75 % der Umweltbelastungen der gesamten Fassadenbegrünung verantwortlich. Dieser Anteil sinkt auf ~60 % bei einer Betriebsdauer von 60 Jahren und weiter auf ~45 %, wenn zusätzlich die Verwendung von reinem Recyclingstahl angenommen wird. Unter Verwendung anderer Pflanztrög-Materialien bewegt sich der errechnete Anteil an den Umweltbelastungen der Fassadenbegrünung ebenfalls zwischen 60 % und 75 %.

Die Beiträge von Produktion und Entsorgung setzen sich dabei je nach Pflanztrög-Material unterschiedlich zusammen. Für CNS-Tröge wurde angenommen, dass diese nach dem Rückbau zu 100 % recycelt werden, was im «cut-off» Ansatz dazu führt, dass die ermittelten Umweltauswirkungen fast ausschliesslich durch die Produktion der Pflanztröge entstehen. Dagegen wurde für PE- und GFK-Pflanztröge eine Entsorgung durch Verbrennung in einer KVA angenommen. Dies führte dazu, dass die Beiträge der PE-Pflanztrögen zu 30 bis 40 % durch Emissionen während der Entsorgung entstehen. Bei GFK-Pflanztrögen bewegen sich der Beitrag der Entsorgung aufgrund des geringeren Kunststoff-Anteils um die 10 %.

Es ergeben sich in Abhängigkeit vom gewählten Pflanztrög-Material unterschiedliche Möglichkeiten, den Beitrag der Pflanztröge an den Umweltauswirkungen der Fassadenbegrünung zu reduzieren. Die Lebensdauer der Pflanztröge stellt dabei einen ausschlaggebenden Faktor dar. In der durchgeführten Sensitivitätsanalyse zur Betriebsdauer wurde angenommen, dass CNS-Pflanztröge eine Lebensdauer von mindestens 60 Jahre aufweisen, während PE-Pflanztröge nach 30 Betriebsjahren komplett ersetzt werden (Kapitel 4.3). Es ist nicht auszuschliessen, dass PE-Pflanztröge mit weitaus höheren Lebensdauern existieren. Könnte auf einen Komplettersatz der PE-Pflanztröge verzichtet werden, würde sich der Beitrag der PE-Pflanztröge an der Instandsetzungsphase wegfallen. Die Gesamtumweltbelastungen im Szenario mit 60 Jahre Betriebsdauer unter Verwendung von PE-Trögen wären somit deutlich tiefer als jene unter Verwendung der CNS-Tröge (vgl. Abbildung 8).

Bei der Produktion der Pflanztröge spielt die Verwendung von recycelten Materialien eine zentrale Rolle, wie beim Vergleich von Standard-CNS und reinem Recyclingstahl gezeigt wurde (Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.2). In gleicher Weise ist auch bei PE-Pflanztrögen eine signifikante Reduktion der Umweltauswirkungen mit steigenden Recyclinganteil zu erwarten.

Grundsätzlich kommt bei allen betrachteten Materialien eine Optimierung der Pflanztrög-Abmessungen wie zum Beispiel eine Reduktion der Wandstärke in Frage. Auch kleinere Pflanztröge sind theoretisch denkbar, um den Materialeinsatz und somit die Umweltbelastungen durch die Herstellung zu reduzieren. Hierbei sind jedoch Aspekte der Pflanzengesundheit zu beachten, da kleinere Tröge zu einer geringeren Pflanzen-Lebensdauer führen können, was wiederum mehr Ersatz-Pflanzungen und einen höheren Unterhalts-Aufwand mit sich bringen kann.

Am Lebensende hat der Entsorgungsweg einen grossen Einfluss auf die Umweltauswirkungen, insbesondere bei der Verwendung von PE-Pflanztrögen. Hier liesse sich durch Recycling anstelle der Verbrennung in einer KVA die Umweltauswirkungen durch die Pflanztröge erheblich reduzieren.

Sofern die Lebensdauer es zulässt, ist in allen Fällen eine direkte Wiederverwendung der Pflanztröge anzustreben. Insbesondere bei CNS-Pflanztrögen ist zu erwarten, dass sie mehrere Lebenszyklen lang eingesetzt werden können, indem sie nach dem Rückbau für eine weitere Fassadenbegrünung an einem anderen Standort verwendet werden. Eine direkte Wiederverwendung führt zu einer weitaus höheren Reduktion von Umweltbelastungen als das Recycling, da das Einschmelzen von Stahlschrott und die Herstellung von Recyclingstahl immer noch mit hohen Ressourcenverbräuchen und Emissionen verbunden sind, wie die Sensitivitätsstudie zum Einsatz von Recyclingstahl zeigt (vgl. Kapitel 4.2).

Eine weitere Optimierungsmassnahme stellt die Minimierung der Anzahl eingesetzter Pflanztröge dar. Im Falle des Triemli-Spitals war aufgrund von Brandschutzbestimmungen keine Stockwerk-übergreifende Begrünung erlaubt, weshalb jede Etage separat mit Trögen bestückt wurde. In Projekten ohne diese Einschränkung wäre es denkbar, nicht alle Etagen mit Pflanztrögen auszustatten und Kletterpflanzen über mehrere Stockwerke ranken zu lassen. Mitunter kann ganz

auf Pflanztröge verzichtet werden, indem Kletterpflanzen bodengebunden eingesetzt, d.h. direkt in den Boden gepflanzt werden. Die Minimierung der Anzahl Pflanztröge hätte den Nebeneffekt, dass sich auch die Umweltauswirkungen der benötigten Bewässerungsanlage reduzieren würde, wobei hier das Einsparpotenzial im Vergleich zu den Pflanztrögen geringer ausfällt. Bei bodengebundenen Pflanzsystemen ist dank des Zugangs zum Grundwasser ausserdem eine Einsparung von Bewässerungswasser zu rechnen.

Neben den Pflanztrögen bestehen noch weitere Ansatzpunkte zur Reduktion der Umweltauswirkungen von Fassadenbegrünungen. So ist es zu empfehlen, ein ökologisches Stromprodukt zum Betreiben der Bewässerungsanlage zu wählen. Des Weiteren könnte für die Bewässerung statt Leitungswasser Regenwasser verwendet werden. Allerdings liegt für diese Massnahmen das mögliche Einsparpotenzial lediglich im unteren einstelligen Prozentbereich der Gesamtumweltbelastungen der Fassadenbegrünung.

5.4 Vergleich mit Literaturwerten

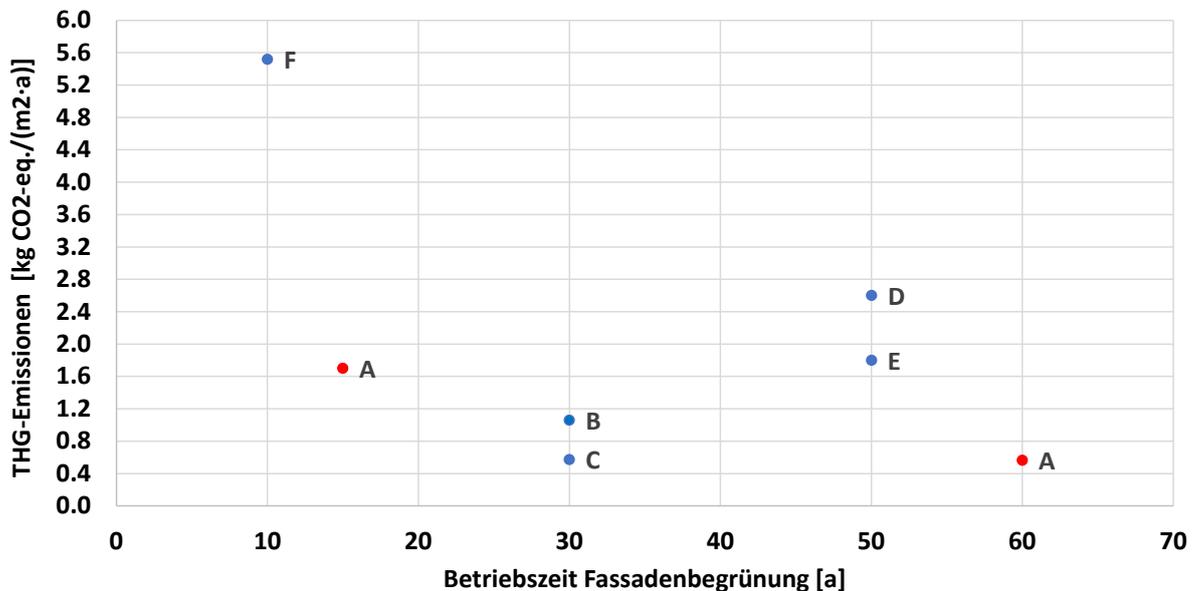
Die Ergebnisse der Fassadenbegrünung des Triemli-Spitals werden in Abbildung 9 anhand von THG-Emissionen mit Literaturwerten verglichen, wobei alle Ergebnisse pro Quadratmeter begrünte Fassade und pro Betriebsjahr abgebildet sind. Für den Vergleich werden drei europäische Studien herangezogen, welche THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus verschiedener begrünter Fassaden untersuchen. Die Studie von Blanco et al. [26] vergleicht verschiedene Beschattungsmöglichkeiten für Gebäudewände in Italien, wobei sich die Werte in Abbildung 9 auf eine Begrünung mit Kletterpflanzen in PE-Pflanztrögen beziehen (Datenpunkte B und C). Ottelé et al. [27] untersuchen für einen Standort in den Niederlanden verschiedene Fassadenbegrünungsvarianten im Vergleich zu einer blanken Gebäudewand. Hier beziehen sich die Werte in Abbildung 9 auf eine Bepflanzung mit Farn in übereinander installierten PE-Pflanzkisten (Datenpunkt D) bzw. auf eine bodengebundene Begrünung mit Efeu an Rankseilen (Datenpunkt E). Das gezeigte Ergebnis von Salah & Romanova (Datenpunkt F) bezieht sich auf ein sogenanntes «living wall system» aus Grossbritannien, in welchem Topfpflanzen in einer Art Wandtäfelung aus Textil-, PVC-, Polyamid- und Stahl-Schichten kultiviert werden [28].

Generell zeigt sich, dass die Ergebnisse des Triemli-Spitals sich im unteren Bereich der publizierten THG-Emissionen für Fassadenbegrünungen einreihen. Allerdings ist beim Vergleich quantitativer Ergebnisse zu beachten, dass die verglichenen Studien teils auf sehr unterschiedlichen Berechnungsansätzen und Methoden basieren.

Ein relevanter Unterschied ist, dass zwei Studien [26,27] die Gebäudewand innerhalb der Ökobilanz berücksichtigen, was zu höheren THG-Emissionen pro Quadratmeter führt. Anhand der veröffentlichten Ergebnisse von Blanco et al. [26] kann abgeschätzt werden, dass die THG-Emissionen ohne Berücksichtigung der Gebäudewand sich um ca. 45 % reduzieren (Datenpunkt C).

Ein weiterer Unterschied liegt in der Festlegung der Bezugsfläche. Während alle Literaturwerte in Abbildung 9 sich auf relativ kleine, durchgehend begrünte Wandsegmente ohne Fenster und Türen beziehen, wird für die Fassadenbegrünung des Triemli-Spitals die gesamte Fassadenfläche als Bezugsfläche herangezogen. Letzteres führt zu tendenziell kleineren Emissionswerten pro Quadratmeter.

Eine Übereinstimmung zu den Literaturwerten besteht im Beitrag der Pflanztröge zur Klimabilanz der Fassadenbegrünungen. In allen betrachteten Studien bilden Pflanztröge bzw. die Bepflanzungsvorrichtungen einen eindeutigen Hotspot, wenn die Gebäudewand nicht berücksichtigt wird. Dies bestätigt die abgeleiteten Empfehlungen aus dem vorherigen Kapitel 5.3, die Pflanztröge möglichst lange zu nutzen sowie, wenn möglich, bodengebundenen Begrünungen zu bevorzugen.



- A: Fassadenbegrünung Triemli-Spital, CNS-Pflanztröge
- B: Kletterpflanzen, Stahl-Rankhilfe, PE-Tröge, mit Gebäudewand [26]
- C: Kletterpflanzen, Stahl-Rankhilfe, PE-Tröge, ohne Gebäudewand [26]
- D: Farn, PE-Trögen, mit Gebäudewand [27]
- E: Efeu, bodengebunden, mit Gebäudewand [27]
- F: Topfpflanzen, "lebende Wand"-System, ohne Gebäudewand [28]

Abbildung 9: Vergleich relativer Treibhausgasemissionen der Fassadenbegrünung des Triemli-Spitals (rot) mit Literaturwerten (blau); alle Ergebnisse beziehen sich auf ein Betriebsjahr und einen Quadratmeter begrünte Fassade.

5.5 Weitere zu berücksichtigende Aspekte

Die im Kapitel 5.3 aufgeführten Optimierungsmassnahmen beziehen sich auf die Umweltindikatoren THG-Emissionen, kumulierter Energiebedarf und Gesamtumweltbelastung. Neben diesen drei Indikatoren existieren jedoch zahlreiche weitere Aspekte, welche bei der Konzipierung einer Fassadenbegrünung eine Rolle spielen können.

Fassadenbegrünungen haben im Allgemeinen das Ziel, die Biodiversität zu fördern, das Stadtbild bzw. die Raumatmosphäre aufzuwerten und im Sommer zur Kühlung des urbanen Raumes und auch der Innenräume beizutragen. Diese positiven Effekte sind im Allgemeinen quantitativ schwer zu erfassen, sollten jedoch den ermittelten Umweltbelastungen zumindest qualitativ gegenübergestellt werden.

In bestimmten Fällen können Fassadenbegrünungen dazu führen, dass in warmen Monaten durch Beschattung des Gebäudes Kühlenergie und in kalten Monaten durch den Isolierungseffekt Heizenergie eingespart werden kann [10]. Die resultierende Energieeinsparung kann dabei bis zu 20 % betragen [12]. Im Rahmen einer Ökobilanz können solche Einsparungen als vermiedene Emissionen und Ressourcenverbräuche angerechnet werden (englisch: «avoided burden»). Auch im Falle des Triemli-Turms ist mit einem Kühleffekt im Sommer zu rechnen. Da das Gebäude jedoch nicht aktiv durch eine Klimaanlage gekühlt wird, wurde in der durchgeführten Ökobilanz keine Energie-Einsparung angerechnet. Ausserdem wurde kein Isoliereffekt im Winter berücksichtigt, da bei der Fassadenbegrünung des Triemli-Turms bewusst eine laubabwerfende Bepflanzung gewählt wurde, um ausreichend Tageslicht in den Räumen während der Wintermonate zu gewährleisten.

Neben positiven Effekten kann der Einsatz einer Fassadenbegrünung auch zu negativen Nebeneffekten führen. So mussten für die Realisierung der Fassadenbegrünung am Triemli-Turm aufgrund von Brandschutzbestimmungen die Sprinkler der automatischen Feuerlöschanlage näher als ursprünglich geplant an den Fenstern installiert werden, was den Einsatz von geringfügig längeren Löschwasserleitungen zur Folge hatte. Im Vergleich zu den Umweltauswirkungen, welche

durch gesamte Fassadenbegrünung entstehen, wird der Einsatz dieser zusätzlichen Leitungen allerdings als gering eingeschätzt und wurde in diesem Fall nicht berücksichtigt.

In Hinblick auf die Auswahl der Pflanztrög-Materialien ist zu betonen, dass diese nie ausschliesslich aufgrund von ökologischen Gesichtspunkten erfolgen wird. Weitere Aspekte, die bei der Auswahl eine Rolle spielen, sind zum Beispiel die bereits erwähnten Brandschutzvorgaben, die Kosten und die maximale Traglast von Balkonen und Brüstungen. All diese Aspekte können zu Einschränkungen in der Materialauswahl führen und müssen gegeneinander abgewogen werden.

5.6 Verwendung der Ergebnisse für zukünftige Projekte

Um die Ergebnisse der durchgeführten Ökobilanz für zukünftige Projekte nutzen zu können, sind in den Tabellen 5 und 6 relative Ergebnisse der Fassadenbegrünung zusammengestellt.

Dabei sind die relativen Ergebnisse für THG-Emissionen, kumulierter Energieaufwand und Gesamtumweltbelastung zum einen pro Quadratmeter Fassadenfläche (Tabelle 5) und zum anderen pro Laufmeter Pflanztrög (Tabelle 6) angegeben. Das Tabellenformat wurde dabei in Anlehnung an die aktualisierte KBOB-Liste (2009/1:2022) [15] der Ökobilanzdaten im Baubereich gewählt.

Die Ergebnisse der Ökobilanz wurden jeweils in drei Datensätze aufgeteilt, um die Bestimmung der Umweltauswirkungen einer Fassadenbegrünung für unterschiedliche Betriebszeiträume zu ermöglichen. Die drei Datensätze beinhalten:

1. «Fassadenelemente mit 30 Jahren Lebensdauer»: Dieser Datensatz fasst die Herstellung, den Transport und die Entsorgung von allen Komponenten zusammen, für welche eine Lebensdauer von 30 Jahre angenommen wurde. Dies umfasst unter anderem die Steuerleitungen, PE-Bewässerungsleitungen und EPS-Drainageplatten (siehe Tabelle 3).
2. «Fassadenelemente mit 60 Jahren Lebensdauer»: Dieser Datensatz fasst die Herstellung, den Transport und die Entsorgung von allen Komponenten zusammen, für welche eine Lebensdauer von 60 Jahre angenommen wurde. Dies umfasst alle CNS-Komponenten der Fassadenbegrünung.
3. «Unterhalt pro Jahr»: Dieser Datensatz umfasst den Düngereinsatz, die Ersatzbepflanzungen sowie Wasser- und Strombedarf für den Unterhalt der Fassadenbegrünung.

Die Angaben zum im Produkt enthaltenen biogenen Kohlenstoff wurden für Pflanzen und Holz-Stützstäbe anhand des Kohlenstoff-Gehalts von Nadelholz (KBOB Datensatz 07.009) abschätzt.

Um die Umweltauswirkungen einer Fassadenbegrünung mit einer Betriebsdauer von 60 Jahren abzuschätzen, muss zweimal der Datensatz «Fassadenelemente mit 30 Jahren Lebensdauer», einmal der Datensatz «Fassadenelemente mit 60 Jahren Lebensdauer» und 60-mal der Datensatz «Unterhalt pro Jahr» aufaddiert werden und mit der Quadratmeterzahl der Fassade bzw. mit der verwendeten Laufmeter-Zahl der Pflanztröge multipliziert werden. Welche der beiden Tabellen dabei anzuwenden ist (Werte pro Quadratmeter oder Werte pro Laufmeter), muss projektspezifische evaluiert werden.

Tabelle 5: Ökobilanzdaten der Fassadenbegrünung des Triemli-Turms mit CNS-Pflanztrögen, dargestellt als relative Werte pro Quadratmeter Fassadenfläche.

Ergebnisse pro m ² Fassadenfläche	Rohdichte/ Flächen- masse kg/m ²	Bezug	UBP*21			Primärenergie									Treibhausgas- emissionen			Biogener Kohlenstoff
			UBP			gesamt			erneuerbar			nicht erneuerbar (Graue Energie)			Total	Herstellung	Entsorgung	im Produkt enthalten
			Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung				
			UBP	UBP	UBP	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq				
Elemente Fassadenbegrünung, 30 Jahre Lebenszeit	35.0	m ²	13'450	10'756	2'694	27.5	25.2	2.24	2.95	2.87	0.074	24.8	22.6	2.16	5.98	3.86	2.13	<0.930
Elemente Fassadenbegrünung, 60 Jahre Lebenszeit	3.60	m ²	55'789	55'640	149	76.6	75.9	0.676	13.6	13.3	0.296	63.0	62.6	0.380	18.6	18.5	0.037	0
Unterhalt Fassadenbegrünung*		m ² ·a	157			0.487			0.914			0.314			0.053			<0.007

* Wasser, Strom, Dünger, Ersatzpflanzen

Tabelle 6: Ökobilanzdaten der Fassadenbegrünung des Triemli-Turms mit CNS-Pflanztrögen, dargestellt als relative Werte pro Laufmeter Pflanzrog.

Ergebnisse pro Laufmeter (lm) Pflanzrog	Rohdichte/ Flächen- masse kg/lm	Bezug	UBP*21			Primärenergie									Treibhausgas- emissionen			Biogener Kohlenstoff
			UBP			gesamt			erneuerbar			nicht erneuerbar (Graue Energie)			Total	Herstellung	Entsorgung	im Produkt enthalten
			Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung				
			UBP	UBP	UBP	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq				
Elemente Fassadenbegrünung, 30 Jahre Lebenszeit	171	lm	65'764	52'589	13'174	134	123	10.9	14.4	14.0	0.362	121	111	10.6	29.3	18.9	10.4	<4.50
Elemente Fassadenbegrünung, 60 Jahre Lebenszeit	17.6	lm	272'778	272'048	730	375	371	3.30	66.6	65.2	1.45	308	306	1.86	90.8	90.6	0.183	0
Unterhalt Fassadenbegrünung*		lm·a	766			2.38			4.47			1.53			0.260			<0.032

* Wasser, Strom, Dünger, Ersatzpflanzen

6 Fazit

Fassadenbegrünungen bilden einen wichtigen Baustein in der nachhaltigen Stadt- und Gebäudeplanung und haben zahlreiche positive Auswirkungen wie die Förderung der Artenvielfalt, die Minderung des urbanen Hitzeinseleffektes, die Verbesserung des Stadtbildes und die Kühlung von Gebäuden. Gleichzeitig verursacht die Erstellung, der Betrieb und die Entsorgung einer Fassadenbegrünung selber negative Umweltauswirkungen, welche den positiven Effekten gegenübergestellt werden müssen.

Die durchgeführte Ökobilanz hat ergeben, dass die Umweltauswirkungen der Fassadenbegrünung des Triemli-Turms durch die Herstellung der eingesetzten Pflanztröge aus Chrom-Nickel-Stahl dominiert werden. Alternative Szenarien mit unterschiedlichen Betriebsdauern und Pflanztrög-Materialien zeigen, dass der Beitrag der Pflanztröge an der gesamten Umweltbelastung der Fassadenbegrünung zwar variiert, diese jedoch stets den grössten Beitrag zu den Umweltauswirkungen aufweisen.

Über eine Betriebszeit von 60 Jahren macht die Fassadenbegrünung schätzungsweise 1 % der Umweltbelastungen eines Gebäudes in der Grössenordnung des Triemli-Turms aus. Somit stellt die Fassadenbegrünung in Bezug auf das Gesamtgebäude keinen entscheidenden Faktor dar.

Nichtsdestotrotz ergeben sich zahlreiche Ansatzpunkte, um die Umweltauswirkungen der Fassadenbegrünung zu reduzieren: Da Pflanztröge mit Abstand am meisten zu den Umweltauswirkungen beitragen, sollten deren Anzahl möglichst minimiert werden. Dies kann zum einen durch langlebige Pflanztröge erzielt werden, welche über die gesamte Betriebsdauer der Fassade eingesetzt und nach dieser eventuell sogar direkt für weitere Begrünungen wiederverwendet werden können. Zum anderen kann, wenn möglich, eine stockwerkübergreifende Begrünung umgesetzt werden, was ebenfalls die Anzahl der eingesetzten Pflanztröge reduziert. Im Hinblick auf das Pflanztrög-Material ist neben Langlebigkeit ausserdem ein möglichst hoher Recyclinganteil bei der Herstellung und die Rezyklierbarkeit am Lebensende zu beachten.

Im Optimierungsprozess zukünftiger Fassadenbegrünungen ist es wichtig, neben den ökologischen Gesichtspunkten auch weitere Aspekte wie Kosten, Gewicht und Pflanzengesundheit einzubeziehen. Die in der dieser Studie identifizierten Optimierungsmöglichkeiten zeigen auf, wie Umweltauswirkungen bereits in der Planung erheblich reduziert werden können.

7 Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

- [1] UNCTAD, Total and urban population – UNCTAD Handbook of Statistics 2021, (2021). <https://hbs.unctad.org/total-and-urban-population/> (abgerufen am 4. Juli 2022).
- [2] SRF, Bevölkerungsrekord - Noch nie gab es so viele Stadt-Zürcherinnen und -Zürcher, Schweiz. Radio Fernseh. SRF. (2022). <https://www.srf.ch/news/schweiz/bevoelkerungsrekord-noch-nie-gab-es-so-viele-stadt-zuercherinnen-und-zuercher> (abgerufen am 22. Juli 2022).
- [3] G.M.J.A. Salah, A. Romanova, Life cycle assessment of felt system living green wall: Cradle to grave case study, *Environ. Chall.* 3 (2021) 100046. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100046>.
- [4] D. Montes-González, R. Vilchez-Gómez, J. Barrigón-Morillas, P. Atanasio-Moraga, G. Rey Gozalo, J. Trujillo Carmona, Noise and Air Pollution Related to Health in Urban Environments, *Proceedings.* 2 (2018) 1311. <https://doi.org/10.3390/proceedings2201311>.
- [5] P. Li, Z.-H. Wang, Environmental co-benefits of urban greening for mitigating heat and carbon emissions, *J. Environ. Manage.* 293 (2021) 112963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112963>.
- [6] M. Bosch, M. Locatelli, P. Hamel, R.P. Remme, R. Jaligot, J. Chenal, S. Joost, Evaluating urban greening scenarios for urban heat mitigation: a spatially explicit approach | Royal Society Open Science, *R. Soc. Open Sci.* (2021). <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsos.202174> (abgerufen am 4. Juli 2022).
- [7] M. Manso, I. Teotónio, C.M. Silva, C.O. Cruz, Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 135 (2021) 110111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>.
- [8] World Green Building Council, The benefits of green buildings, World Green Build. Council. (2022). <https://www.worldgbc.org/benefits-green-buildings> (abgerufen am 4. Juli 2022).
- [9] ASLA, Green Infrastructure: Green Roofs and Walls | asla.org, *Am. Soc. Landsc. Archit.* (2022). <https://www.asla.org/contentdetail.aspx?id=43536> (abgerufen am 5. Juli 2022).
- [10] J. Eberle, Fassadenbegrünung - Vorteile, Wissenswertes und praktische Beispiele, Mare Communication and Care AG, 2017.
- [11] G. Vox, I. Blanco, E. Schettini, Green façades to control wall surface temperature in buildings, *Build. Environ.* 129 (2018) 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>.
- [12] J. Li, B. Zheng, W. Shen, Y. Xiang, X. Chen, Z. Qi, Cooling and Energy-Saving Performance of Different Green Wall Design: A Simulation Study of a Block, *Energies.* 12 (2019) 2912. <https://doi.org/10.3390/en12152912>.
- [13] ecoinvent Centre, ecoinvent data v3.6, ecoinvent Centre, the Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zürich, 2019. www.ecoinvent.org.
- [14] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, B. Weidema, The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, *Int. J. Life Cycle Assess.* 21 (2016) 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>.
- [15] KBOB, Liste Ökobilanzdaten im Baubereich 2009-1-2022_d (UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022), Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB), Bern, 2022. https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themenleistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html (abgerufen am 13. Juli 2022).
- [16] PRé Consultants, SimaPro 9, (2019).
- [17] ecoinvent Centre, ecoinvent data v3.8, ecoinvent Centre, the Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zürich, 2021. www.ecoinvent.org.
- [18] R. Frischknecht, S. Büsser Knöpfel, K. Flury, M. Stucki, M. Ahmadi, Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland, Federal Office for the Environment, Berne, 2013. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=en>.
- [19] Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

- [20] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, S. Hellweg, R. Hischier, S. Humbert, M. Margni, T. Nemecek, M. Spielmann, Implementation of life cycle impact assessment methods, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, 2004. www.ecoinvent.org.
- [21] ISO, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO 14040:2006, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2006.
- [22] raderschall partner ag, Stadtspital Triemli Zürich, Begrünung Fassade Süd, Gegenüberstellung Varianten Pflanzgefässe, (2021). Dokument erhalten per Email von Therese Fankhauser am 23. März 2022.
- [23] SIA, SIA 2032:2020: Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Switzerland, 2020.
- [24] L. Eymann, M. Stucki, Ökobilanzierung einer Bestattung, IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil, 2016.
- [25] H. Kröhnert, R. Itten, M. Stucki, Comparing flexible and conventional monolithic building design: Life cycle environmental impact and potential for material circulation, *Build. Environ.* (2022) 109409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109409>.
- [26] I. Blanco, G. Vox, E. Schettini, G. Russo, Assessment of the environmental loads of green façades in buildings: a comparison with un-vegetated exterior walls, *J. Environ. Manage.* 294 (2021) 112927. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112927>.
- [27] M. Ottel , K. Perini, A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri, Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems, *Energy Build.* 43 (2011) 3419–3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>.
- [28] G.M.J.A. Salah, A. Romanova, Life cycle assessment of felt system living green wall: Cradle to grave case study, *Environ. Chall.* 3 (2021) 100046. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100046>.
- [29] T. Nemecek, J. Schnetzer, Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems, Agroscope, Reckenholz-Tänikon, 2011.

7.2 Sachbilanz

Dieser Anhang enthält eine umfassende Auflistung der Sachbilanzdaten sowie der verwendeten ecoinvent v3.8-Hintergrunddatensätze, welche zur Modellierung der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital verwendet wurden.

7.2.1 Grundszenario

Tabelle 7 fasst die Sachbilanz-Modellierung der Herstellung der Fassadenbegrünung im Grundszenario zusammen, wobei die Herstellungsphase in die Prozesse der Produktion der Pflanztröge, des Bewässerungssystems, der Rankhilfe, der Pflanzen sowie des Substrats unterteilt ist. Das Substrat wurde innerhalb der Modellierung als eine Kombination von Kompost, Abfall-Ziegel und Kiesel angenähert. Der Datensatz «Waste brick {CH}| treatment of, sorting plant | OHNE ABRISS» wurde dabei vom ecoinvent v3.8 Datensatz «Waste brick {CH}| treatment of, sorting plant» abgeleitet und berücksichtigt Arbeiten in der Recyclinganlage und nicht im Rahmen des Abrisses.

Tabelle 7: Sachbilanz und Modellierung der Herstellung der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital (Grundszenario).

Name, ecoinvent v3.8 Datensatz	Menge	Einheit	Kommentar
Produktion Pflanztröge	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	11038	kg	Pflanztröge aus CNS; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m; durchschnittl. 17.2 kg pro laufender Meter
Polystyrene foam slab, 10% recycled {GLO} market for, U	884.0	kg	Drainageplatten aus Polystyrol; 431.21 m2 gesamt für alle Pflanztröge; 2.05kg/m2
Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for, U	8.991	kg	Distanzplättchen aus LURAN S; 900 St.; Annahme: 1110kg/m3 und Abmasse 1cm*3cm*3cm
Produktion Bewässerungssystem	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	200	kg	CNS-Steigleitung, Bewässerungswasser; Annahme: 160 m à 1.25kg/m
Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for, U	590.6	kg	Transportrohre aus PE; Länge gesamt 865 m; 0.68kg/m; Faktor 1/0.996 berücksichtigt 0.4% Verlust bei Verarbeitung (gemäss DS Extrusion, plastic pipes {RER} extrusion, plastic pipes)
Extrusion, plastic pipes {RER} extrusion, plastic pipes, U	588.2	kg	Transportrohre aus PE; Verarbeitung PE
Cable, unspecified {GLO} market for, U	240.3	kg	Steuerleitungen: 800m à 0.054kg/m; 500m à 0.087kg/m; 280m à 0.312kg/m; 180m à 0.368kg/m
Polypropylene, granulate {RER} production, U	12.85	kg	Hüllrohr Steuerleitung aus PP; Länge 160m; Gewicht 0.08kg/m; Faktor 1/0.996 berücksichtigt 0.4% Verlust bei Verarbeitung (gemäss DS Extrusion, plastic pipes {RER} extrusion, plastic pipes)
Extrusion, plastic pipes {RER} extrusion, plastic pipes, U	12.8	kg	Hüllrohr Steuerleitung aus PP; Verarbeitung PP
Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO} market for, U	411.2	kg	Kontrollschächte aus PVC; 262 Stück à 1.56kg; Faktor 1/0.994 berücksichtigt 0.6% Verlust bei Verarbeitung (gemäss DS Injection moulding {RER} processing)
Injection moulding {RER} processing, U	408.7	kg	Kontrollschächte; 262 Stück à 1.56kg, Verarbeitung PVC
Brass {CH} production, U	8.84	kg	Elektro-Magnetventil aus Messung 1/2", 17 Stück à 0.52kg
Casting, brass {CH} processing, U	8.84	kg	Elektro-Magnetventil aus Messung 1/2", 17 Stück, Verarbeitung Messing
Electronic component, active, unspecified {GLO} market for, U	0.34	kg	Elektro-Magnetventil, 17 Stück; Annahme: jeweils 20g Elektronik-Komponente

Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for, U	3.50	kg	Düngermischgerät, Kunststoff, 1 Stück; 3.5kg; Faktor 1/0.994 berücksichtigt 0.6% Verlust bei Verarbeitung (gemäss DS Injection moulding {RER} processing)
Injection moulding {RER} processing, U	3.50	kg	Düngermischgerät, Verarbeitung Kunststoff
Electronic component, active, unspecified {GLO} market for, U	0.02	kg	Düngermischgerät; Annahme: 20g Elektronik-Komponente
Brass {CH} production, U	1	kg	Durchflussmessgerät, Messing; 1 Stück; 1kg
Casting, brass {CH} processing, U	1	kg	Durchflussmessgerät, Verarbeitung Messing
Electronic component, active, unspecified {GLO} market for, U	0.02	kg	Durchflussmessgerät, Annahme: 20g Elektronik-Komponente
Produktion Rankhilfe	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	32.82	kg	INOX Seile, 887.04 m, 0.037kg/m
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	13.82	kg	Aussengewinde, 1152 Stück à 0.012 kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	13.82	kg	Klemmringe, 1152 Stück à 0.012 kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	7.488	kg	Bolzenanker, 576 Stück à 0.013 kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	3.456	kg	Sechskantmuttern M6, 1728 Stück à 0.002 kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for, U	1.152	kg	Unterlegscheiben, 1152 Stück à 0.001 kg
Produktion Pflanzen	1	p	
Resources			
Energy, gross calorific value, in biomass	2802.9	MJ	KEA Biomasse für Begonienetzlinge (Obstbaumsetzling beinhaltet bereits KEA Biomasse); Annahme 0.05 kg Pflanzenmaterial pro Setzling, 80% Trockenmasse (TM), Brennwert (oberer Heizwert): 19 MJ/kgTM
Input from technosphere: Materials/fuels			
Fruit tree seedling, for planting {CH} fruit tree seedling production, for planting, U	616	p	Gehölze, Gesamtzahl 616; Annahme: gleichwertige Aufzucht zum Obstbaum-Setzling: 824 d Anzucht, Platzbedarf 0.39m ² pro Setzling
Fruit tree seedling, for planting {CH} fruit tree seedling production, for planting, U	328	p	Kletterpflanzen, Gesamtzahl 656; Annahme: 50% längere Aufzuchtzeit (Obstbaumsetzling) und 50% kurze Aufzuchtzeit (Begonie)
Begonia semperflorens, von Gärtnerei Imhof	328	p	Kletterpflanzen, Gesamtzahl 656; Annahme: 50% längere Aufzuchtzeit (Obstbaumsetzling) und 50% kurze Aufzuchtzeit (Begonie)
Begonia semperflorens, von Gärtnerei Imhof	3360	p	Pflanzen für Unterpflanzung, Gesamtzahl 3360
Sawnwood, lath, softwood, raw, dried (u=20%) {CH} market for sawnwood, lath, softwood, raw, dried (u=20%), U	0.512	m ³	Stützstäbe für höhere Pflanzen; Gesamtstückzahl 320; 5cm*5cm*64cm
Produktion Substrat	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Compost {GLO} market for, U	42500	kg	insgesamt 125m ³ Substrat; Dichte 850kg/m ³ ; Annahme zur Modellierung: 40Gew.-% Kompost (Kompost-Datensatz beinhaltet nur Transport);
Waste brick {CH} treatment of, sorting plant OHNE ABRISS	42500	kg	insgesamt 125m ³ Substrat; Dichte 850kg/m ³ ; Annahme zur Modellierung: Annahme: 40Gew.-% Recycling-Ziegel
Gravel, crushed {CH} market for gravel, crushed, U	21250	kg	insgesamt 125m ³ Substrat; Dichte 850kg/m ³ ; Gravel als Annäherung für Lava, Annahme: 20Gew.-%

Die Modellierung von Transport und Erstellung der Fassadenbegrünung ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Für den Transport wurden Distanzen von 50 km für die Pflanztröge, sowie 90 km für alle restlichen Komponenten angenommen. Die Sachbilanz der Erstellung basiert auf Abschätzungen zur Leistungsaufnahmen und zur Einsatzdauer von Fassadenlift und Baukran, welche zur Erstellung der Fassadenbegrünung zum Einsatz kamen.

Tabelle 8: Sachbilanz und Modellierung von Transport und Erstellung der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital (Grundszenario).

Name, ecoinvent v3.8 Datensatz	Menge	Einheit	Kommentar
Transport Fassadenelemente	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for, U	596.1	tkm	Transport Pflanztröge (inkl. Drainageplatten); Gesamtgewicht (11039+884) kg; Transportdistanz 50 km
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for, U	6.534	tkm	Transport Rankhilfe; Gesamtgewicht 72.6kg; Transportdistanz 90 km
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for, U	9562	tkm	Transport Substrat; 125m ³ ; 850 kg/m ³ ; Transportdistanz 90 km
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for, U	139.5	tkm	Transport Pflanzen; Gesamtzahl Setzlinge: 4632; Annahme: 200g/Setzling der Unterbepflanzung (2260 Stk.), 400g/Kletterpflanzen-Setzling (656 Stk.), 1kg/Gehölz-Setzling (616 Stk.); Transportdistanz 90 km
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} transport, freight, lorry, all sizes, EURO4 to generic market for, U	117	tkm	Transport Bewässerungssystem; Gesamtgewicht ~1300kg; Transportdistanz 90km
Erstellung Fassadenbegrünung	1	p	
Input from technosphere: Electricity/heat			
Electricity, low voltage {CH} market for, U	600	kWh	Energiebedarf Fassadenlift; Leistungsaufnahme 5kW (eigene Annahme); geschätzte Einsatzdauer 120 h
Electricity, low voltage {CH} market for, U	440	kWh	Energiebedarf Baukran, fest installiert auf Triemli-Turm; Leistungsaufnahme 5.5 - 37kW; geschätzte Einsatzdauer 80 h

Tabelle 9 fasst die Sachbilanzmodellierung der Unterhaltsphase der Fassadenbegrünung zusammen. Dabei beruhen Angaben zum Wasser- und Strombedarf, Ersatzbepflanzungen, Düngereinsatz sowie jährlichen Rückschnitt auf Expertenabschätzungen. In Hinblick auf den kumulierten Energiebedarf wurde die stofflich vorliegende biogene Energie als Brennwert des jährlich nachwachsenden Pflanzenmaterials abgeschätzt. Emissionen von Düngemitteln wurden nach den Bewertungsmethoden der Agroscope Reckenholz-Tänikon Forschungsanstalt ART berechnet [29]. Berücksichtigt wurden dabei Emissionen von Ammoniak, Stickoxiden und Distickstoffmonoxid in die Luft.

Tabelle 9: Sachbilanz und Modellierung von Unterhalt über ein Jahr der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital (Grundszenario).

Name, ecoinvent v3.8 Datensatz	Menge	Einheit	Kommentar
Unterhalt Fassadenbegrünung	1	Jahr	
Resources			
Energy, gross calorific value, in biomass	8360	MJ	KEA von zusätzliche gewachsenem Pflanzenmaterial; Annahme: 500kg Grünabfall pro Jahr (zur Entsorgung) und 50kg Pflanzenwuchs pro Jahr, welche nicht entsorgt werden. Trockenmasse 80%; HVV 19MJ/kgTM
Input from technosphere: Electricity/heat			
Tap water {CH} market for, U	791862	kg	Bewässerung der Pflanztröge; 5 l/d pro m2 Vegetationstragschicht; Gesamtvegetationstragschicht 433.6 m2
Electricity, low voltage {CH} market for, U	219.2	kWh	Strombedarf der Geräte des Bewässerungssystems; Annahme Leistungsaufnahme Steuergerät: 25W; dauerhaft unter Strom (8766h pro Jahr); Alle anderen Geräte werden nicht berücksichtigt, da sie stromlos geschlossen und nur punktuell in Betrieb sind.
Produktion Pflanzen, Fassadenbegrünung Triemli-Spital, Zürich	0.03	p	Annahme: Ersatz von 3% der Pflanzen pro Jahr; Datensatz siehe Tabelle 7
NPK (15-15-15) fertiliser {RER} market for NPK (15-15-15) fertiliser, U	30	kg	Annäherung für 50 l Flüssigdünger pro Jahr. Skalierung über N-Gehalt: 50l des eingesetzten Flüssigdüngers beinhalten 4.5kg N (90g/l); der Datensatz "NPK (15-15-15) fertiliser {RER} market for NPK (15-15-15) fertiliser" beinhaltet 0.15 kg_N pro kg Dünger
Emissions to air			
Ammonia (high pop.)	0.52	kg	Emissionen durch den Einsatz von Flüssigdünger
Nitrogen oxides, CH (high pop.)	0.01631	kg	Emissionen durch den Einsatz von Flüssigdünger
Dinitrogen monoxide (high pop.)	0.07766	kg	Emissionen durch den Einsatz von Flüssigdünger
Waste to treatment			
Biowaste {CH} market for, U	500	kg	Grünabfall durch Rückschnitt und Entfernung alter Pflanzen

Tabelle 10 beinhaltet die Sachbilanz-Modellierung des Rückbaus und der Entsorgung der Fassadenbegrünung. Der Energiebedarf während des Rückbaus wurde dabei analog zur Erstellung festgelegt. Für die Entsorgung wurden die Materialmengen der einzelnen Komponenten aus der Herstellungsphase verwendet. Der Datensatz «Entsorgung Stahl, Recycling, Schweiz» wurde aus dem Datensatz ecoinvent v3.8 Datensatz «Scrap steel {CH}| market for scrap steel» abgeleitet und beinhaltet lediglich den Transport zur Recyclinganlage.

Tabelle 10: Sachbilanz und Modellierung des Rückbaus und der Entsorgung der Fassadenbegrünung am Triemli-Spital (Grundzenario).

Name, ecoinvent v3.8 Datensatz	Menge	Einheit	Kommentar
Rückbau Fassadenbegrünung	1	p	
Input from technosphere: Electricity/heat			
Electricity, low voltage {CH} market for, U	600	kWh	Energiebedarf Fassadenlift; Leistungsaufnahme 5kW (eigene Annahme); Einsatzdauer 120 h
Electricity, low voltage {CH} market for, U	440	kWh	Energiebedarf Baukran, fest installiert auf Triemli-Turm; Leistungsaufnahme 5.5 - 37kW; Einsatzdauer 80 h
Entsorgung Elemente der Fassadenbegrünung	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Entsorgung Stahl, Recycling, Schweiz	11038	kg	Pflanztröge aus CNS; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m ; durchschnittl. 17.2kg pro laufender Meter
Entsorgung Stahl, Recycling, Schweiz	200	kg	Steigrohr Bewässerungssystem; CNS; 160m à 1.25kg/m
Entsorgung Stahl, Recycling, Schweiz	72.6	kg	Rankhilfe, Edelstahl
Input from technosphere: Waste to treatment			
Waste electric wiring {CH} market for waste electric wiring, U	240.3	kg	Steuerleitung Bewässerungssystem; Gesamtgewicht 240.3 kg
Waste polypropylene {CH} market for waste polypropylene, U	12.8	kg	Hüllrohr Steuerleitung; PP; 160m à 0.08kg/m
Waste polyethylene {CH} market for waste polyethylene, U	588.2	kg	Transportrohre aus HDPE; Länge gesamt 865 m; 0.68kg/m
Waste polyvinylchloride {CH} market for waste polyvinylchloride, U	408.7	kg	Kontrollschächte; 262 Stück à 1.56kg
Waste polystyrene {CH} market for waste polystyrene, U	884.0	kg	Drainageplatten; Styropor; 431.21 m2 (gesamt für alle Pflanztröge); 2.05kg/m2
Biowaste {CH} market for, U	2150	kg	Grünabfall; Annahme ca. 5 kg Grünschnitt pro m2; Gesamtvegetationsfläche ca. 430m2
Inert waste, for final disposal {CH} market for inert waste, for final disposal, U	106250	kg	Substrat; 125m3; 850kg/m3
Waste plastic, mixture {CH} market for waste plastic, mixture, U	9	kg	Distanzplättchen zur Ausnivellierung Pflanztröge

7.2.2 Sensitivitätsanalyse zu Pflanztrög-Materialien

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zu Pflanztrög-Materialien wurden als alternative Materialien glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), PE, Faserzement und reiner Recycling-CNS berücksichtigt. Tabelle 11 fasst die Modellierung der Herstellung dieser alternativen Pflanztröge zusammen. Die Herstellung aller anderen Komponenten bleibt unverändert im Vergleich zum Grundszenario (siehe Tabelle 7). Der Datensatz «steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}, 100% Recycling | market for» für reinen Recyclingstahl wurden aus dem Datensatz «steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}| market for» des Grundszenarios abgeleitet, indem primäres Ferronickel und primäres Ferrochromium durch Stahlschrott ersetzt wurden. Im Fall der Pflanztröge aus Faserzement wurde aufgrund des erheblich höheren Gewichts die Modellierung des Transports entsprechend angepasst (vgl. Tabelle 8). Für alle anderen alternativen Pflanztrög-Materialien wurden der Transport unverändert zum Grundszenario modelliert.

Tabelle 11: Sachbilanz und Modellierung der Produktion von Pflanztrögen aus verschiedenen Materialien (Szenarien innerhalb der Sensitivitätsanalyse zu Pflanztrög-Materialien).

Name, ecoinvent v3.8 Datensatz	Menge	Einheit	Kommentar
Produktion Pflanztröge aus GFK	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for, U	13478	kg	Pflanztröge aus GFK; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m; durchschnittl. 21kg pro laufender Meter
Produktion Pflanztröge aus PE	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for, U	10976	kg	Pflanztröge aus PE; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m ; durchschnittl. 17kg pro laufender Meter (gemäss Bewertungsmatrix zu Pflanztrög-Materialien von Raderschallag); Faktor 1/0.994 berücksichtigt 0.6% Verlust bei Bearbeitung gemäss DS Injection moulding {RER} processing, U
Injection moulding {RER} processing, U	10910	kg	Pflanztröge: PE-Verarbeitung
Produktion Pflanztröge aus Faserzement	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Fibre cement roof slate {GLO} market for, U	51343	kg	Pflanztröge aus Faserzement; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m ; durchschnittl. 80 kg pro laufender Meter
Produktion Pflanztröge aus reinem Recyclingstahl	1	p	
Input from technosphere: Materials/fuels			
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}, 100% Recycling market for, U	11038	kg	Pflanztröge aus reinem Recyclingstahl; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m ; durchschnittl. 17.2 kg pro laufender Meter

Tabelle 12 fasst die Modellierung der Entsorgung von Pflanztrögen aus GFK, PE und Faserzement zusammen. Der Modellierung der Entsorgung von reinem Recyclingstahl ist dagegen identisch zu jener des generischen CNS (siehe Tabelle 10) und ist daher nicht in der Tabelle aufgenommen.

Tabelle 12: Sachbilanz und Modellierung der Entsorgung von Pflanztrögen aus verschiedenen Materialien (Szenarien innerhalb der Sensitivitätsanalyse zu Pflanzrog-Materialien).

Name, ecoinvent v3.8 Datensatz	Menge	Einheit	Kommentar
Entsorgung Pflanztröge aus GFK	1	p	
Input from technosphere: Waste to treatment			
Waste plastic, mixture {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction, U	5391	kg	Pflanztröge aus GFK; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m; durchschnittl. 21kg pro laufender Meter; 40% Kunststoff
Waste glass {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction, U	8086	kg	Pflanztröge aus GFK; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m; durchschnittl. 21kg pro laufender Meter; 60% Glas
Entsorgung Pflanztröge aus PE	1	p	
Input from technosphere: Waste to treatment			
Waste plastic, mixture {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction, U	10910	kg	Pflanztröge aus PE; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m; durchschnittl. 17kg pro laufender Meter
Entsorgung Pflanztröge aus Faserzement	1	p	
Input from technosphere: Waste to treatment			
Inert waste, for final disposal {CH} market for inert waste, for final disposal, U	51343	kg	Pflanztröge aus Faserzement; 17 St. à 1.69m; 10 St. à 2.05m; 105 St. à 2.27m; 77 St. à 4.62m ; durchschnittl. 80kg pro laufender Meter

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
Lindenhofstrasse 21
Postfach, 8021 Zürich
T+ 41 44 412 11 11
stadt-zuerich.ch/hochbau