



Untersuchung von CO₂-Emissionen von Erdbauarbeiten, Bau- grubensicherungen und Tiefgründungen bei der Erstellung von Untergeschossen

Schlussbericht

12.06.2023

Fachstelle Umweltgerechtes Bauen
Fachstelle Bauingenieurwesen

Impressum

Auftraggeber

Fachstelle Umweltgerechtes Bauen
Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich
Ansprechpartner:
Niko Heeren (Ökobilanzen)
Armin Grieder (Bauingenieurwesen).

T +41 44 412 11 11

12. Juni 2023

Auftragnehmer*in

s3 GmbH
Zürichstrasse 45
8600 Dübendorf
044 244 46 44
www.s3-engineering.ch
info@s3-engineering.ch

Wälli AG
Stirnrütistrasse 45
6048 Horw
058 100 90 01
www.waelli.ch
kontakt@waelli.ch

Autor*innen

Alexandra Kuhn, Kevin Knecht, Marc Schultheiss

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

Glossar

Baugrubensicherungen, Tiefgründungen und Erdbauarbeiten werden im Kapitel 1.2 erklärt.

CO ₂	Kohlenstoffdioxid: Eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. CO ₂ ist ein Treibhausgas.
GWP	Global Warming Potential (Dt. Treibhauspotential): Indikator der LCA-Methode IPCC 2013
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
kg CO ₂ -eq.	Kilogramm CO ₂ – Äquivalent
LCA	Life Cycle Assessment/Analysis (Dt. Lebenszyklusanalyse): Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus
Sensitivitätsanalyse	Bei der Sensitivitätsanalyse wird durch das Variieren wichtiger Faktoren die Stabilität eines Systems evaluiert und die Unsicherheiten der Berechnungen bestimmt.
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Zusammenfassung

Untergeschosse sind für relevante Teile der Treibhausgasemissionen beim Erstellen von Hochbauten verantwortlich. Um die wichtigsten Treiber dieser Emissionen genauer zu untersuchen, werden in dieser Studie vier Hypothesen aufgestellt und anhand von verschiedenen Fallstudien (Cases) untersucht. Es werden dabei Lebenszyklusanalysen (LCA) für die Erstellung der Untergeschosse von zwei unterschiedlichen Beispielgebäuden durchgeführt, wobei jeweils die Erdbauarbeiten, die Baugrubensicherungen sowie die Tiefgründungen innerhalb der Systemgrenzen sind, nicht aber die Konstruktion des Gebäudes selbst. Die beiden Beispielgebäude werden dafür in elf unterschiedliche Boden- und Platzgegebenheiten platziert und schrittweise, von keinem bis zu zwei Untergeschossen, in den Boden abgesenkt. Dabei wurden meist Verhältnisse angenommen, welche für die Stadt Zürich typisch sind.

Aufgrund der hohen Komplexität des Zusammenspiels zwischen Gebäudegeometrie, Untergrund und Platzverhältnissen auf der Parzelle sind die Resultate teilweise stark von unveränderlichen Gegebenheiten beeinflusst. Die Ergebnisse der betrachteten Cases können deshalb nicht einfach verallgemeinert werden. Dennoch werden an dieser Stelle einige Erkenntnisse und Tendenzen vorgestellt:

- Baugruben sollten wenn immer möglich geböscht werden. Diese Art der Baugrubensicherung führt selbst bei Gebäudetiefen über 10 m zu den niedrigsten Umweltbelastungen.
- Gerade in städtischen Situationen kann aus Platzgründen häufig nicht geböscht werden. Sind deshalb steilere Winkel bei der Baugrubensicherung nötig, weisen Sickerbetonwände, Nagelwände oder gespriesste Spundwände geringere Umweltbelastungen auf als andere Typen von Spundwänden, Bohrpfahlwände oder Rühlwände.
- Pfähle sind grosse Verursacher von CO₂-Emissionen. Kann z.B. durch ein Materialersatz mit einer geringen Mächtigkeit (z.B. unter 1-2 m) auf Pfähle verzichtet werden, kann dies ökologisch sinnvoll sein.
- Falls in kleiner Tiefe guter Baugrund vorhanden ist, lohnt es sich tendenziell, eine Baugrube auf diese Tiefe auszuheben und die Bodenplatte auf diesem Niveau zu setzen (untersucht für eine Tiefe von 3.5 m). In solchen Fällen kann die Realisierung von Untergeschossen fast CO₂-neutral sein, da alle Emissionen für die Tiefgründung sowieso bereits anfallen.
- Schwierige Bodenvoraussetzungen (z.B. grundwasserhaltige Böden) gehen oft mit Pfählen und aufwendigen Baugrubensicherungen einher. Dies führt zu erhöhten ökologischen Auswirkungen, welche unter Umständen mit geringerer Einbautiefe in den Boden (d.h. weglassen oder reduzieren von Untergeschossen) verhindert werden können.

Die Individualität von Bauprojekten und die potentiell hohen ökologischen Einflüsse von Untergeschossen betonen und bestätigen die Notwendigkeit, die Baugrubensicherungen und Tiefgründungen von Hochbauten schon in frühen Projektphasen zu berücksichtigen. Nach dem SIA-Effizienzpfad Energie (Merkblatt 2040 der SIA (2017)), welches noch auf die alte SIA 2032 (2010)-Norm verweist, wird lediglich das Aushubvolumen den grauen Emissionen eines Gebäudes angerechnet. Dabei wird ein potentiell riesiger Anteil an grauen Emissionen komplett vernachlässigt. Auch in Minergie-ECO-Nachweisen werden Baugrubensicherungen und Tiefgründungen aus der Bilanzierung ausgeklammert. Mit der neuen SIA 2032 (2020) Norm werden

Baugrubensicherungen und Tiefgründungen berücksichtigt. Die Erneuerung der SIA 2040 ist also wichtig um diesen relevanten Anteil an grauen Emissionen berücksichtigen zu können und auch den unterirdisch liegenden Teil von Gebäuden ökologisch zu optimieren. Die Aktualisierung des Effizienzpfades wird im Jahr 2023 in Form einer neuen SIA 390 erwartet.

Das im Anschluss an diese Studie kreierte Tool soll helfen, die ökologischen Einflüsse von Untergeschossen bereits in der Wettbewerbsphase bewerten und optimieren zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ziele der Studie und Hypothesen.....	1
1.2	Wichtige Begriffe.....	2
1.2.1	Baugrubensicherungen.....	2
1.2.2	Tiefgründungen.....	4
1.2.3	Weiteres.....	5
2	Methodik.....	7
2.1	Lebenszyklusanalyse.....	7
2.1.1	Treibhausgaspotential.....	7
2.1.2	Ökobilanz Grundlagendaten.....	7
2.2	Tiefenvergleich Baugrubensicherungen.....	7
2.3	Cases zur Untersuchung der Hypothesen.....	9
2.3.1	Cases Hypothese 1.....	11
2.3.2	Cases Hypothese 2.....	12
2.3.3	Cases Hypothese 3.....	14
2.3.4	Cases Hypothese 4.....	15
2.4	Modellierungsannahmen.....	16
2.5	Verwendete Ökobilanzdaten.....	20
2.5.1	Aushub inkl. Transport.....	20
2.5.2	Hinterfüllung inkl. Transport.....	21
2.5.3	Materialersatz inkl. Transport.....	22
2.5.4	Sickerbetonwand.....	22
2.6	Systemgrenzen und Funktionelle Einheit.....	23
2.6.1	Tiefenvergleich Baugrubensicherungen.....	23
2.6.2	Untersuchung der Hypothesen.....	23
2.7	Sachbilanzen.....	23

3 Resultate und Diskussion	24
3.1 Tiefenvergleich Baugrubensicherungen	24
3.2 Untersuchung der Hypothesen	27
3.2.1 Hypothese 1	28
3.2.2 Hypothese 2	30
3.2.3 Hypothese 3	31
3.2.4 Hypothese 4	32
3.3 Vergleichswerte	33
3.3.1 Vergleich mit den Richtwerten der SIA 2040	33
3.3.2 Beton und Aushub	34
4 Fazit	35
4.1 Tiefenvergleich Baugrubensicherungen	35
4.2 Überprüfung der Hypothesen	35
4.3 Allgemein	36
5 Erweiterungsvorschläge KBOB-Empfehlung	38
6 Literaturverzeichnis	39
7 Tabellenverzeichnis	40
8 Abbildungsverzeichnis	40
A. Gebäudebeschrieb	41
B. Sachbilanzen	42
C. Detaillierte Resultate	43

1 Einleitung

Die Erstellung der Untergeschosse von Hochbauten ist für einen relevanten Teil der CO₂-Emissionen verantwortlich, welche die Gebäude über ihren ganzen Lebenszyklus verursachen [1]. Die Stadt Zürich hat sich aber kompaktes Bauen und Verdichtung zum Ziel gesetzt, womit ein potentieller Interessenskonflikt zwischen ebendiesen Zielen und einer Reduktion der CO₂-Bilanz der Gebäude entstehen kann.

1.1 Ziele der Studie und Hypothesen

Die CO₂-Emissionen von Untergeschossen in Hochbauprojekten sollen analysiert werden. Dabei sollen insbesondere folgende zwei Hypothesen untersucht werden, die vom Auftraggeber aufgestellt wurden:

1. Die Erstellung eines einzelnen Untergeschosses ist in der Regel meist «emissionsneutral», da zum Erreichen eines tragfähigen Gründungshorizontes für die ohnehin notwendigen Tiefbauarbeiten von Hochbauten bereits ein Grossteil des Energie- und Materialeinsatzes anfällt.
2. Turnhallen und Schwimmhallen (und Tiefgaragen) im Untergrund führen zu Mehraufwendungen bei den Tiefbauarbeiten. Zudem führen sie in der Regel zu einer aufwändigeren Lastabtragung und somit in den meisten Fällen auch zu höheren Erstellungsemissionen als wenn sie im Obergeschoss angesiedelt würden. Im Weiteren erfordern grosse, tief im Baugrund liegende Hallen in wasserhaltigen Böden entsprechende Auftriebssicherungen (Zugpfähle, Anker, entsprechend dimensionierte Bodenplatten und Aussenwände).

Zusätzlich wurden im Verlaufe der Bearbeitung zwei weitere Hypothesen aufgestellt, um weiteren als interessant identifizierten Fragestellungen nachzugehen:

3. Ein zusätzliches, zweites Untergeschoss lohnt sich auch nicht, wenn durch das zusätzliche Untergeschoss Standpfähle kürzer ausgeführt werden können.
4. Materialersatz anstelle von Pfählen lohnt sich nur bis zu einem Meter Materialersatz.

Die Hypothesen werden anhand von Referenzobjekten untersucht, für welche die grössten Quellen von CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der Erstellung von Untergeschossen identifiziert werden. Die einzelnen Quellen werden zudem bezüglich ihres Anteils an den Gesamtemissionen des Bauwerks sowie bezüglich allfälligem Reduktionspotential untersucht und diskutiert.

Die gewonnen Grundlagen werden in ein Excel-Tool eingepflegt, welches dem Auftraggeber eine möglichst einfache Nutzung der Erkenntnisse in Wettbewerben und Machbarkeitsstudien ermöglichen soll.

1.2 Wichtige Begriffe

In diesem Kapitel werden die betrachteten, unterschiedlichen Baugrubensicherungen und Tiefgründungen kurz beschrieben. Ausführliche Erläuterungen und Ausführungen zu unterschiedlichen Arten zur Erstellung von Baugrubensicherungen können in der von treeze Ltd. erstellten Studie «Ökobilanzen von Tiefbauarbeiten bei Hochbauten» [1] entnommen werden.

1.2.1 Baugrubensicherungen

Als Baugrube wird der Bereich bezeichnet, der unter der Geländeoberfläche liegt und die Erstellung der später unterirdisch liegenden Gebäudeteile ermöglicht. Sie besteht aus Baugrubensohle und Baugrubensicherung. Letztere wird unterschieden in Böschung und Baugrubenverbau. Wenn knappe Platzverhältnisse, der Baugrund oder die Grundwasserverhältnisse keinen geböschten Baugrubenabschluss zulassen, muss die Baugrube mit einem Baugrubenverbau gesichert werden. Dieser verhindert das Nachrutschen des Erdreichs und, je nach Art, das Eindringen von Wasser. Die Böschung und verschiedene, gebräuchliche Verbauarten sind nachfolgend kurz beschrieben:

Böschung: Der geböschte Baugrubenabschluss kommt ohne zusätzlichen Materialaufwand aus. Die Baugrube wird, je nach Material des Bodens, ungefähr in einem 1:1 Winkel ausgehoben, sodass das Material nicht in die Baugrube abrutscht. Alle 4 Meter (Tiefe) wird eine Berme erstellt. Dabei handelt es sich um eine horizontale Zwischenebene von mindestens 1 Meter Breite, um die Stabilität zu erhöhen. Böschungen brauchen im Vergleich zu anderen Baugrubensicherungen viel Platz.

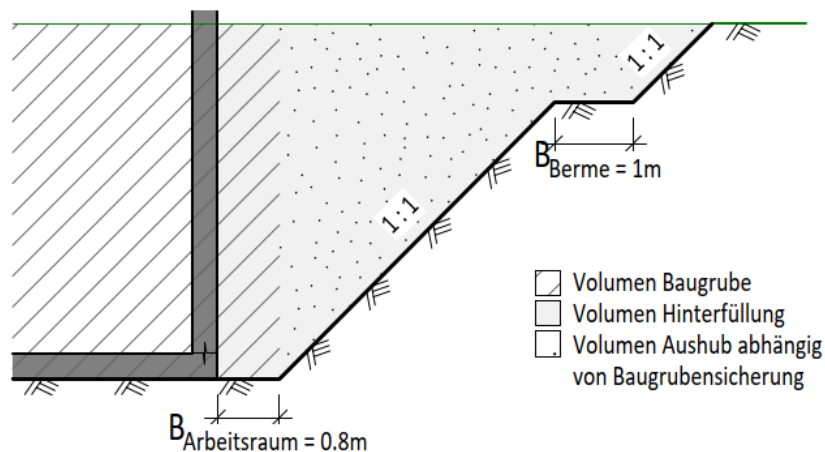


Abbildung 1: Schematische Darstellung: Schnitt Baugrube mit Böschung

Nagelwand: Die Nagelwand wird etappenweise und mit einer steilen Böschung bis zu 10:1 ausgeführt. Die freigelegte Böschung wird mit Spritzbeton gesichert. Die Spritzbetonschale wird mit Bodennägeln rückverankert. Der so entstehende Verbundkörper wirkt dann als Schwergewichtsmauer.

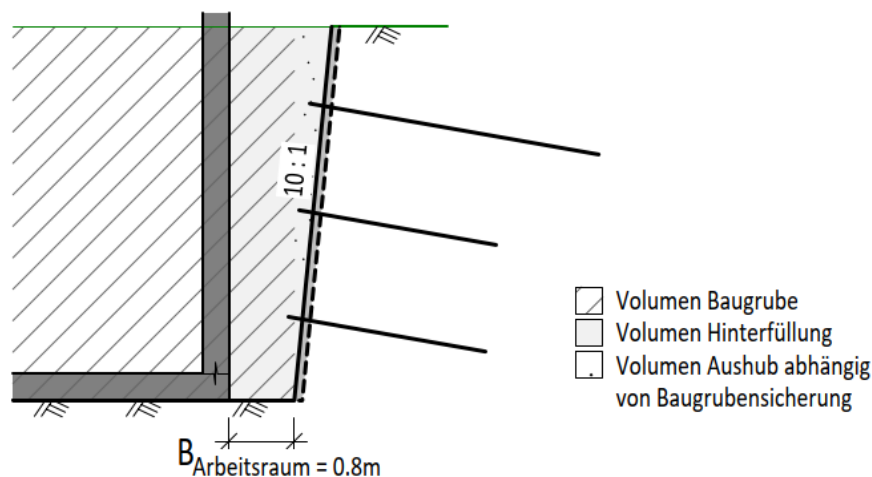


Abbildung 2: Schematische Darstellung: Schnitt Baugrube mit Nagelwand

Sickerbetonwand: Die ausgehobene Böschung mit einer Neigung von ca. 3:1 wird mit einer vorbetonierten Schicht aus Sickerbeton von ca. 0.3 m Dicke ausgekleidet. Der Sickerbeton wirkt als Schwergewichtsstützmauer und erhöht die Standsicherheit des Bodens.

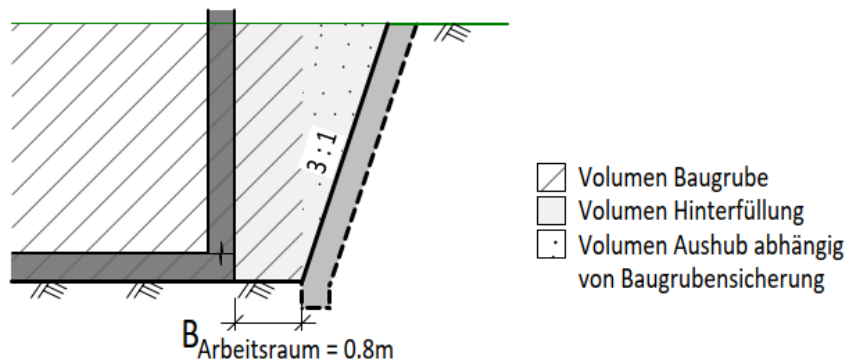


Abbildung 3: Schematische Darstellung: Schnitt Baugrube mit Sickerbetonwand

Spundwand: Spundwände bestehen aus trapezförmigen Stahlblechen, die vertikal in den Boden gerammt oder vibriert werden. Die Spunddielen sind über Nut-Feder-Systeme miteinander verbunden und bilden so einen weitestgehend wasserdichten Baugrubenabschluss. Die Spunddielen können gezogen und wiederverwendet werden, und verbleiben im Normalfall nicht im Boden. Je nach Baugrubentiefe und Anforderungen können Spundwände auskragend, rückverankert oder gespriesst ausgeführt werden.

Rühlwand: Eine Rühlwand besteht aus Stahlträgern, welche im Abstand von 1.5 bis 2 Meter vertikal in den Boden gerammt oder in vorgebohrte Löcher versetzt werden. Die Zwischenräume werden mit zunehmender Aushubtiefe in Etappen mit Beton oder Holz ausgefacht. Je nach Baugrubentiefe und Anforderungen können Rühlwände auskragend, rückverankert oder gespriesst ausgeführt werden.

Schlitzwand: Eine Schlitzwand ist ein vertikaler Baugrubenabschluss aus Ortbeton. Es werden jeweils segmentweise Baggerschlitze ausgehoben, die armiert und ausbetoniert werden. Im Bauzustand wird der Schlitz von einer Stützflüssigkeit stabilisiert. So entsteht ein sehr steifer und wasserdichter, gleichzeitig aber auch sehr aufwändiger Baugrubenabschluss. Je nach Baugrubentiefe und Anforderungen können Schlitzwände auskragend, rückverankert oder gespiesst ausgeführt werden.

Bohrpfahlwand: Eine Bohrpfahlwand ist ein vertikaler Baugrubenabschluss, der aus einzelnen aneinandergereihten Ortbetonbohrpfählen besteht. Die Pfähle können überschritten, tangierend oder aufgelöst gebohrt werden. Es steht eine relativ grosse Bandbreite an Bohrdurchmessern zur Verfügung, sodass flexibel auf Anforderungen der Statik reagiert werden kann. Wasserdichte Ausführungen sind möglich. Je nach Baugrubentiefe und Anforderungen können Bohrpfahlwände auskragend, rückverankert oder gespiesst ausgeführt werden.

Mit zunehmender Baugrubentiefe wachsen die einwirkenden Kräfte auf die Baugrubensicherung überproportional an. Abhängig von den Anforderungen an die Tragsicherheit und die maximal erlaubten Verformungen kann es deshalb statisch notwendig oder wirtschaftlicher sein, den Baugrubenverbau nicht auskragend, sondern rückverankert oder gespiesst auszuführen. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt.

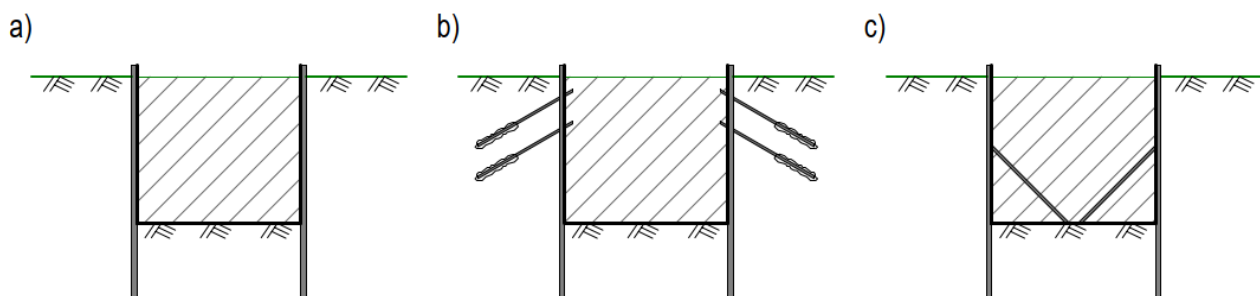


Abbildung 4: Schematische Darstellung Baugrubenverbau; a) auskragend, b) rückverankert, c) gespiesst

Rückverankerte Baugrubenabschlüsse können mit vorgespannten Stahlelementen (Anker, meist Litzen) oder mit nicht vorgespannten Stahlelementen (Nägel, meist gerippte Hohlstäbe) ausgeführt werden. Der Verbund zwischen dem Stahlelement und dem umgebenden Boden erfolgt jeweils über eine Zementinjektion.

Baugrubenabschlüsse können entweder diagonal auf die Baugrubensohle abgespiesst werden oder horizontal auf die gegenüberliegende Seite des Baugrubenverbau. Die Spriessen bestehen in der Regel aus Stahlprofilen.

1.2.2 Tiefgründungen

Tiefgründungen dienen dazu, die Fundationslasten in tieferliegende, tragfähige Bodenschichten zu leiten. Es gibt eine grosse Anzahl an Pfahlarten und Bodenverbesserungsmethoden, die unterschiedliche Vor- und Nachteile haben und z.T. nur in speziellen Baugrundverhältnissen eingesetzt werden können. Pfähle übertragen die Lasten über Mantelreibung und Spitzendruck in den Boden. Abhängig vom Pfahltyp,

Pfahldurchmesser und Bodenaufbau variiert der jeweilige Anteil stark. Wenn die Last hauptsächlich über die Mantelreibung abgetragen wird, spricht man von schwimmenden Pfählen. Wenn die Last hauptsächlich über Spitzendruck in den Boden eingeleitet wird, spricht man von Standpfählen.

Da im Bericht die Anwendung in für die Stadt Zürich typischen Böden untersucht wird, werden nur die untenstehenden Methoden betrachtet.

Ortbetonbohrpfähle: Ortbetonbohrpfähle werden vor Ort im benötigten Durchmesser auf die notwendige Tiefe gebohrt, armiert und mit Beton verfüllt. Es steht eine relativ grosse Auswahl an Durchmessern zur Verfügung und der Pfahl kann in fast allen Bodenarten erstellt werden. Mit Ortbetonbohrpfählen werden mittlere bis grosse Lasten in den Baugrund geleitet. In diesem Bericht wurde von Ortbetonbohrpfählen mit Durchmesser 900 mm ausgegangen.

Mikrobohrpfähle: Bei den Mikrobohrpfählen handelt es sich um Pfähle mit kleinerem Durchmesser. Es können kleine bis mittlere Lasten in den Baugrund abgeleitet werden.

Zugpfähle: Pfähle übertragen normalerweise die schwerkraftbedingten Kräfte des Gebäudes und seiner Nutzung in den Boden und sind dadurch auf „Druck“ belastet, d.h. die wirkende Kraft ist nach unten gerichtet und der Pfahl wird „in den Boden gedrückt“. In gewissen Fällen ist es möglich, dass die Kräfte in die gegenteilige Richtung wirken und der Pfahl „aus dem Boden gezogen“ wird, also auf „Zug“ belastet ist. Man spricht dann von Zugpfählen. Im vorliegenden Bericht ist dies relevant, wenn das Gebäude im Grundwasser zu liegen kommt. Das Gebäude als Hohlkörper erfährt durch das Grundwasser Auftriebskräfte, denen mit Zugpfählen entgegengewirkt werden kann. Grundsätzlich können alle Pfahltypen als Zugpfähle eingesetzt werden.

1.2.3 Weiteres

Hinterfüllung: Als Hinterfüllung wird das Material bezeichnet, das nach dem Erstellen des unterirdischen Baukörpers zum Auffüllen des Volumens zwischen Gebäude und Böschung / Baugrubenverbau eingebracht und verdichtet wird.

Materialersatz: Bei einem Materialersatz wird der am Projektstandort vorhandene, für die Flachfundation ungeeignete Baugrund durch ein geeignetes Material ersetzt. Dazu wird das ungeeignete Material in der Baugrube ausgehoben und mit geeignetem Material (z.B. Kiessand) aufgefüllt und verdichtet (bis zur Unterkante der Bodenplatte des zu erstellenden Gebäudes).

Auftrieb: Das Gebäude als Hohlkörper verdrängt Wasser, wenn die Bodenplatte des Gebäudes unterhalb des Grundwasserspiegels zu liegen kommt. Dadurch entstehen Auftriebskräfte auf die Bodenplatte. Diesen Kräften kann durch das Gewicht des Gebäudes entgegengewirkt werden. Werden die Kräfte zu gross, muss das Gebäude zusätzlich mit Zugpfähle gegen Aufschwimmen gesichert werden.

Bei Gebäuden mit weitem Stützen- / Wandraster (z.B. Turnhallen) besteht ausserdem zusätzlich das Problem, dass die Bodenplatten durch die Auftriebskräfte aufgrund der grossen Spannweiten sehr stark belastet werden. In solchen Fällen kann es notwendig sein, im Vergleich zu Gebäuden mit engerem Stützen- oder Wandraster dickere Bodenplatten auszubilden oder zusätzliche Zugpfähle zu erstellen (die nicht unter Wänden / Stützen platziert werden sollten).

2 Methodik

2.1 Lebenszyklusanalyse

Die ökologische Bewertung der Umweltauswirkungen von Untergeschossen (u.a. Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen) erfolgt durch eine Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz, LCA). Dabei werden die Ressourcenverbräuche und Emissionen über alle Lebensphasen bilanziert. Emissionen in der Bauphase werden dabei ebenso berücksichtigt wie die grauen Emissionen der verbauten Materialien.

2.1.1 Treibhausgaspotential

Das Treibhausgaspotential der verschiedenen Varianten wird mit der Carbon Footprint-Methode (Dt. CO₂-Fussabdruck) bestimmt. Dabei handelt es sich um eine emissionsbasierte, international anerkannte Methode. Sie bewertet das Treibhauspotential sämtlicher zum Klimawandel beitragender Emissionen über einen Zeithorizont von 100 Jahren. Um unterschiedlich starke Treibhausgase miteinander zu vergleichen, werden alle emittierten Stoffe nach ihrem Treibhauspotential gewichtet und so in CO₂-Äquivalente umgewandelt. CO₂-Emissionen werden sowohl in der Politik als auch in der Baubranche intensiv diskutiert und oft als Indikatoren verwendet.

2.1.2 Ökobilanz Grundlagendaten

Die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016 dient als Grundlage für die berechneten ökologischen Auswirkungen. [2] Alle darin aufgeführten Werte betreffend Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen stammen aus einer von treeze Ltd. erstellten Studie [1]. Da für die Bilanzierung nicht alle Prozesse direkt aus der KBOB-Ökobilanzliste verwendet werden konnten, wurden anhand der KBOB-Daten einzelne aggregierte Prozesse erstellt (siehe Kapitel 2.5). Mögliche Lücken in der KBOB-Ökobilanzliste sowie potentiell noch zu ergänzende Materialien bzw. Prozesse werden in Kapitel 5 diskutiert.

2.2 Tiefenvergleich Baugrubensicherungen

Um die unterschiedlichen Baugrubensicherungen, wie im Kapitel 1.2 kurz eingeführt, aus ökologischer Sicht vergleichen zu können, wurden die relevanten Flächen, Aushubvolumen und Hinterfüllungsvolumen von verschiedenen Baugrubensicherungsarten für Baugrubentiefen von 0 bis 8 m berechnet.

Die Werte wurden dabei pro Meter Baugrubenbreite berechnet. Je nach Baugrubensicherungsart wird zusätzlicher Aushub und zusätzliche Hinterfüllung notwendig, die bei einem vertikalen Baugrubenabschluss nicht anfielen (z.B. gebösch 1:1 im Vergleich zu einer Spundwand vertikal). Dies wird in nachfolgender Abbildung 5 veranschaulicht.

Der Aushub bzw. die Hinterfüllung für das Gebäudevolumen und den Arbeitsraum wird als identisch für alle verglichenen Systeme angenommen und liegt ausserhalb der Systemgrenze des Tiefenvergleichs Baugrubensicherungen.

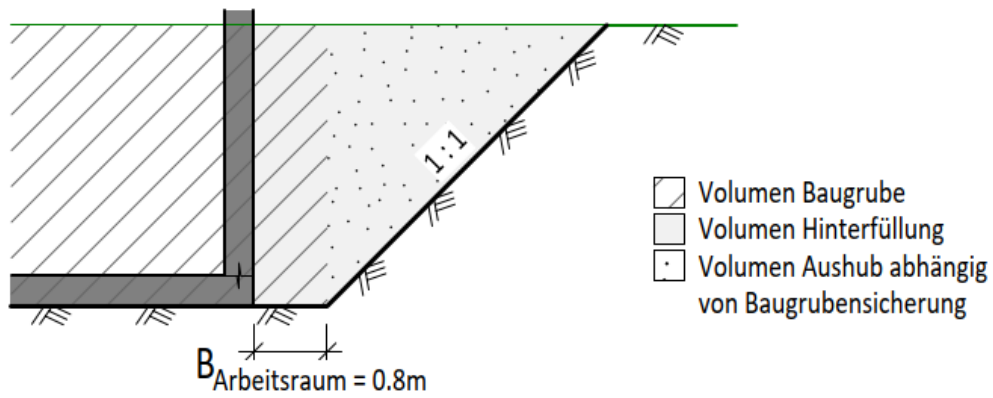


Abbildung 5: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Volumina Baugrube, Hinterfüllung und Aushub für das Beispiel der Böschung

2.3 Cases zur Untersuchung der Hypothesen

Die aufgestellten Hypothesen werden anhand fiktiver Gebäude untersucht. Die fiktiven Gebäude gleichen in Form und Grösse zwei Referenzobjekten der Stadt Zürich. In einem Fall ist dies eine Schulanlage (enges Wandraster im Untergeschoss) und im anderen Fall eine Turnhalle (weites Wandraster im Untergeschoss) in der Stadt Zürich. Rein fiktiv sind jedoch das gewählte Umfeld und der Boden, in welchen die Gebäude gebaut werden.

- Schulanlage: 4'000 m² Baugrubenfläche, 300 m Umfang Baugrube
- Turnhalle: 1'400 m² Baugrubenfläche, 170 m Umfang Baugrube

Weitere Details zu den beiden fiktiven Gebäuden können dem Anhang A entnommen werden.

Für die Hypothesen 1 bis 3 werden die Gebäude stufenweise in den Boden abgesenkt, wodurch die wichtigsten Einflüsse mit zunehmender Einbindung in den Boden quantifiziert werden können. Bei Hypothese 4 erfolgt auf zwei verschiedenen Baugrubentiefen jeweils ein stufenweise tieferer Materialersatz, um die Effekte von Pfählen und Materialersatz miteinander vergleichen zu können. Durch diese Absenkung in den Untergrund entstehen für jede Hypothese zwischen drei und fünf Cases pro Situation. Zudem wird pro Hypothese zwischen zwei und vier Situationen unterschieden, um eine gewisse Bandbreite an Bodenbegebenheiten abzubilden. Während Baugründe mit unterschiedlichen Eigenschaften untersucht wurden, wurden an den Gebäudegeometrien keine Änderungen vorgenommen. Insbesondere das Verhältnis von der Länge zur Breite eines Gebäudes hat einen Einfluss auf die Fläche der Baugrubensicherungen relativ zu der Baugrubenfläche und dementsprechend auf die Umwelteinwirkungen, was im Rahmen dieser Studie allerdings nicht betrachtet wurde.

Da die Wahl der Baugrubensicherungen und Fundationsarten stark vom Umfeld, dem Baugrund und der Art des Gebäudes abhängen, lassen sich die gewählten Beispiele nicht verallgemeinern, unterstützen den Lesenden jedoch dabei, die Haupttreiber der Emissionen beim Bau von Untergeschossen zu verstehen.

Folgende Annahmen wurden für die Aufstellung der Cases getroffen:

- Der Baugrund wird generell als normal baggerfähig angenommen, also als Baugrund, der ohne spezielle Massnahme (Sprengen o.Ä.) ausgehoben werden kann.
- Wenn nicht anders gekennzeichnet, wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass kein Grundwasser vorhanden ist (bzw. das Grundwasser tiefer als die Baugrubensohle liegt), wodurch auch kein Auftrieb berücksichtigt werden muss. Ausnahmen werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.
- Die Wasserhaltung wird vernachlässigt, da der ökologische Einfluss gering und die Anwendung sehr objektspezifisch ist.
- Es wurden lediglich die Fundationsarten «Flachfundiert», «Flachfundiert mit Materialersatz» und «Ortbetonbohrpfähle» betrachtet, da dies die häufigsten Fundationsarten in der relevanten Region (Stadt Zürich) in dieser Grössenordnung Gebäude sind.
- Es gilt die Annahme, dass vertikale Baugrubenabschlüsse bis zu einem Untergeschoss Tiefe auskragend ausgeführt werden. Bei tieferen Baugruben muss der Baugrubenabschluss entweder gespriesst oder verankert werden.

- Für die Cases, in welchen das Gebäude aus dem Boden gehoben werden (kein Untergeschoss), wird eine Gutschrift für die Isolation mit Steinwolle statt XPS und einer Reduktion des Betons (Dicke der Wand und teilweiser Ersatz von Beton) vorgenommen. Für die Erstellung von zwei Untergeschossen und bei Fällen mit Auftriebssicherungen, wird eine Lastschrift vorgenommen, wenn Wände oder die Bodenplatte dicker ausgeführt werden müssen.
- Gewisse untersuchte Cases würden in der Praxis nicht auf die vorgestellte Weise umgesetzt, dienen aber der anschaulichen Komplettierung einer Reihe.
- Die angegebenen Baugrubentiefen sind wie folgt zu verstehen:
 - 0.5 m: kein Untergeschoss; Haupteingang Gebäude ist bodeneben. Es werden 0.5 m für die Erstellung der Bodenplatte (inkl. Dämmung) benötigt
 - 1.8 m: halbes Untergeschoss
 - 3.5 m: ein Untergeschoss
 - 6.5 m: zwei Untergeschosse
 - 10 m: Turnhalle fast komplett im Boden versenkt
 - 13 m: Turnhalle komplett im Boden versenkt

2.3.1 Cases Hypothese 1

Die Erstellung eines einzelnen Untergeschosses ist in der Regel meist «emissionsneutral», da zum Erreichen eines tragfähigen Gründungshorizontes für die ohnehin notwendigen Tiefbauarbeiten von Hochbauten bereits ein Grossteil des Energie- und Materialeinsatzes anfällt.

Für die Überprüfung der ersten Hypothese wurden die in Tabelle 2 gezeigten Cases aufgestellt. Beim betrachteten Gebäude handelt es sich um einen klassischen Hochbau (Schulhaus) mit einem engen Wandraster im Untergeschoss.

Die nachfolgenden Situationen, in welchen das Gebäude jeweils stufenweise ins Untergeschoss abgesenkt wird, werden betrachtet:

- Cases 1.1 bis 1.4: Baugrubensicherung geböscht, ungeeigneter Boden für Flachfundation, weshalb stattdessen Ortbetonbohrpfähle nötig sind
- Cases 1.5 bis 1.8: Baugrubensicherung geböscht, Boden ab 3.5 m Tiefe geeignet für Flachfundation, bodenebenes Gebäude und Hochparterre benötigen Materialersatz bis auf die entsprechende Tiefe
- Cases 1.9 bis 1.12: Baugrubensicherung vertikal mit Rühlwand, Boden ab 3.5 m Tiefe geeignet für Flachfundation, bodenebenes Gebäude und Hochparterre benötigen Materialersatz bis auf die entsprechende Tiefe
- Cases 1.13 bis 1.16: Grundwasservorkommen oberhalb der Baugrubensohle, Baugrubensicherung vertikal mit Spundwand (wasserdicht), ungeeigneter Boden für Flachfundation, weshalb stattdessen Ortbetonbohrpfähle nötig sind,

Tabelle 1: Cases Hypothese 1, der Referenzfall in 3.5 m Tiefe ist in hellblau hervorgehoben

Nr.	Tiefe Gebäude [m]	Baugrubensicherung	Grundwasser	Fundation	Pfahlänge pro Pfahl [m]	Tiefe Materialersatz [m]
1.1	0.5	Geböscht	nein	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.2	1.8	Geböscht	nein	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.3	3.5	Geböscht	nein	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.4	6.5	Geböscht	nein	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.5	0.5	Geböscht	nein	Flachfundiert mit Materialersatz	-	3.0
1.6	1.8	Geböscht	nein	Flachfundiert mit Materialersatz	-	1.7
1.7	3.5	Geböscht	nein	Flachfundiert	-	-
1.8	6.5	Geböscht	nein	Flachfundiert	-	-

1.9	0.5	Rühlwand auskragend	nein	Flachfundiert mit Materialersatz	-	3.0
1.10	1.8	Rühlwand auskragend	nein	Flachfundiert mit Materialersatz	-	1.7
1.11	3.5	Rühlwand auskragend	nein	Flachfundiert	-	-
1.12	6.5	Rühlwand verankert	nein	Flachfundiert	-	-
1.13	0.5	Gebösch	ja	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.14	1.8	Spundwand auskragend	ja	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.15	3.5	Spundwand auskragend	ja	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-
1.16	6.5	Spundwand verankert	ja	Ortbetonbohrpfähle	20.0	-

2.3.2 Cases Hypothese 2

Turnhallen und Schwimmhallen (und Tiefgaragen) im Untergrund führen zu Mehraufwendungen bei den Tiefbauarbeiten. Zudem führen sie in der Regel zu einer aufwändigeren Lastabtragung und somit in den meisten Fällen auch zu höheren Erstellungsemissionen als wenn sie im Obergeschoss angesiedelt würden. Im Weiteren erfordern grosse, tief im Baugrund liegende Hallen in wasserhaltigen Böden entsprechende Auftriebssicherungen (Zugpfähle, Anker, entsprechend dimensionierte Bodenplatten und Aussenwände).

Um die Fragestellung der zweiten Hypothese zu überprüfen, werden die in Tabelle 2 erstellten Cases bilanziert. Beim betrachteten Gebäude handelt es sich um eine Turnhalle mit einem weiten Wandraster im Untergeschoss, welches ins Untergeschoss abgesenkt wird.

In Böden, bei denen der Grundwasserpegel über der Bodenplatte liegt, führt der Wasserdruck zu Auftrieb unter der Bodenplatte. Diesem muss mit dem Gebäudegewicht und / oder Auftriebspfählen begegnet werden. Turnhallen und Schwimmhallen haben im Vergleich zu sonstigen Hochbauten ein relativ weites Wandraster. Dies bedeutet, dass die Spannweiten der Bodenplatten relativ lang sind, was zu grossen Belastungen der Bodenplatten führen kann. In Hypothese zwei wird untersucht, welchen Einfluss das Grundwasser in einem solchen Fall haben kann.

- Cases 2.1 bis 2.5: Baugrubensicherung vertikal mit Bohrpfahlwand, Boden geeignet für Flachfundation. Die Aussenwände werden mit zunehmender Tiefe dicker.
- Cases 2.6 bis 2.10: Baugrubensicherung vertikal mit Bohrpfahlwand, Boden geeignet für Flachfundation, Pfähle dienen nur zur Sicherung der Sohle gegen Auftrieb, der Grundwasserpegel befindet sich 1 m unterhalb der Oberkante Terrain. Die zunehmende Einbindung im Boden führt aufgrund grösserer Kräfte zu mehr, respektive grösseren Pfählen, welche aber weniger tief gebohrt werden. Ausserdem werden die Aussenwände mit zunehmender Tiefe dicker.

Tabelle 2: Cases Hypothese 2, der Referenzfall in 3.5 m Tiefe ist in hellblau hervorgehoben

Nr.	Tiefe Gebäude [m]	Baugrubensicherung	Grundwasser	Auftrieb	Foundation	Pfahlänge pro Pfahl [m]
2.1	1.8	Bohrpfahlwand auskragend	nein	nein	Flachfundiert	-
2.2	3.5	Bohrpfahlwand auskragend	nein	nein	Flachfundiert	-
2.3	6.5	Bohrpfahlwand gespriesst	nein	nein	Flachfundiert	-
2.4	10.0	Bohrpfahlwand gespriesst	nein	nein	Flachfundiert	-
2.5	13.0	Bohrpfahlwand gespriesst	nein	nein	Flachfundiert	-
2.6	1.8	Bohrpfahlwand auskragend	ja	nein	Flachfundiert	-
2.7	3.5	Bohrpfahlwand auskragend	ja	ja	Mikrobohrpfähle	18.0
2.8	6.5	Bohrpfahlwand gespriesst	ja	ja	Mikrobohrpfähle	18.0
2.9	10.0	Bohrpfahlwand gespriesst	ja	ja	Ortbetonbohrpfähle	15.0
2.10	13.0	Bohrpfahlwand gespriesst	ja	ja	Ortbetonbohrpfähle	15.0

2.3.3 Cases Hypothese 3

Ein zusätzliches, zweites Untergeschoss lohnt sich auch nicht, wenn durch das zusätzliche Untergeschoss Standpfähle kürzer ausgeführt werden können.

Die in Tabelle 3 gezeigten Cases wurden für die Überprüfung der dritten Hypothese aufgesetzt. Dabei wird wieder das Schulhaus aus Hypothese 1 betrachtet (enges Wandraster im Untergeschoss), welches schrittweise in den Boden abgesenkt wird.

Die Fundation erfolgt bis jeweils 20 m unter Oberkante Terrain mit Standpfählen aus Ortbetonbohrpfählen. Je tiefer ins Untergeschoss gebaut wird, desto kürzer werden die Standpfähle.

- Cases 3.1 bis 3.3: Baugrubensicherung geböscht, Boden ungeeignet für Flachfundation, weshalb stattdessen Ortbetonbohrpfähle berücksichtigt werden
- Cases 3.4 bis 3.6: Baugrubensicherung mit Rühlwand, Boden ungeeignet für Flachfundation, weshalb stattdessen Ortbetonbohrpfähle berücksichtigt werden

Tabelle 3: Cases Hypothese 3, der Referenzfall in 3.5 m Tiefe ist in hellblau hervorgehoben

Nr.	Tiefe Gebäude [m]	Art Baugrubensicherung	Fundation	Pfahlänge pro Pfahl [m]
3.1	0.5	Geböscht	Ortbetonbohrpfähle	20.0
3.2	3.5	Geböscht	Ortbetonbohrpfähle	17.0
3.3	6.5	Geböscht	Ortbetonbohrpfähle	14.0
3.4	0.5	Geböscht	Ortbetonbohrpfähle	20.0
3.5	3.5	Rühlwand auskragend	Ortbetonbohrpfähle	17.0
3.6	6.5	Rühlwand gespriesst	Ortbetonbohrpfähle	14.0

2.3.4 Cases Hypothese 4

Materialersatz anstelle von Pfählen lohnt sich nur bis zu einem Meter Materialersatz.

Die in Tabelle 4 abgebildeten Cases wurden für die 4. Hypothese aufgestellt. Wiederum wird das Schulhaus aus Hypothesen 1 und 3 betrachtet (enges Wandraster im Untergeschoss). Anstatt das Gebäude ins Untergeschoss abzusenken, werden in den zwei Baugrubentiefen von 0.5 m und 3.5 m die Fundationsarten Materialersatz und Pfähle verglichen.

- Cases 4.1 bis 4.3: Baugrubensicherung geböscht, Foundation entweder flach mit Materialersatz oder Ort betonbohrpfählen, in 0.5m Baugrubentiefe
- Cases 4.4 bis 4.6: Baugrubensicherung geböscht, Foundation entweder flach mit Materialersatz oder Ort betonbohrpfählen, in 3.5m Baugrubentiefe
- Cases 4.7 bis 4.9: Baugrubensicherung Rühlwand, Foundation entweder flach mit Materialersatz oder Ort betonbohrpfählen, in 3.5m Baugrubentiefe

Tabelle 4: Cases Hypothese 4

Nr.	Tiefe Gebäude [m]	Baugrubensicherung	Foundation	Materialersatz [m]	Pfahllänge pro Pfahl [m]
4.1	0.5	Geböscht	Flachfundiert mit Materialersatz	1.0	-
4.2	0.5	Geböscht	Flachfundiert mit Materialersatz	2.0	-
4.3	0.5	Geböscht	Ort betonbohrpfähle	-	20.0
4.4	3.5	Geböscht	Flachfundiert mit Materialersatz	1.0	-
4.5	3.5	Geböscht	Flachfundiert mit Materialersatz	2.0	-
4.6	3.5	Geböscht	Ort betonbohrpfähle	-	20.0
4.7	3.5	Rühlwand auskragend	Flachfundiert mit Materialersatz	1.0	-
4.8	3.5	Rühlwand auskragend	Flachfundiert mit Materialersatz	2.0	-
4.9	3.5	Rühlwand gespriesst	Ort betonbohrpfähle	-	20.0

2.4 Modellierungsannahmen

Die in Tabelle 5 aufgelisteten Sachbilanzpositionen wurden pro Case berechnet. Schematische Illustrationen der Baugrube mit sämtlichen Bemassungen sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigt.

Für sämtliche Gutschriften und Lastschriften wird davon ausgegangen, dass die Erstellung von einem UG (Tiefe: 3.5 m) der Standard- und Referenzfall ist. Das heisst, dass sämtliche Gutschriften und Lastschriften gegenüber dem Standardfall von einem Untergeschoss vorgenommen werden.

Wenn nicht anders gekennzeichnet, handelt es sich bei den Berechnungen und Annahmen um Erfahrungswerte der Wälli AG.

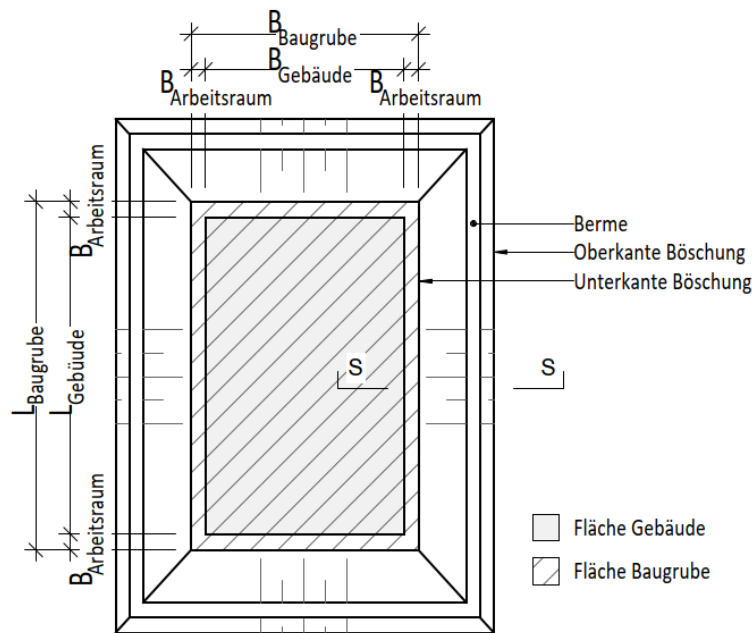


Abbildung 6: Schematische Darstellung Grundriss Baugrube (gebösch)

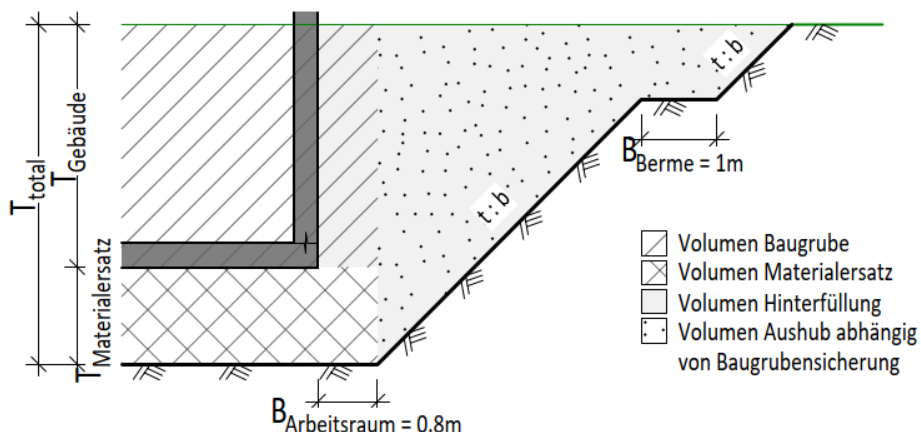


Abbildung 7: Schematische Darstellung Schnitt Baugrube (gebösch)

Tabelle 5: Berechnete Komponenten; L = Länge, B = Breite, A = Fläche, T= Tiefe, U= Umfang, V = Volumen

Bezeichnung	Einheit	Detailbeschreibung
Baugrubensicherung	[m ²]	<p>Die Fläche der Baugrubensicherung wurde abhängig von der Tiefe des Gebäudes (plus Tiefe allfälliger Materialersatz) und dem Umfang der Baugrube berechnet.</p> $A_{\text{Baugrubensicherung}} = T_{\text{Total}} \cdot U_{\text{Baugrube}}$ <p>mit</p> $U_{\text{Baugrube}} = 2 \cdot L_{\text{Baugrube}} + 2 \cdot B_{\text{Baugrube}}$
Aushub	[m ³]	<p>Das totale Aushubvolumen berechnet sich durch den Aushub der Baugrube (Gebäude und Arbeitsraum), dem Aushub abhängig von der Baugrubensicherung (Böschung mit 45° Winkel, falls vorhanden), und dem Aushub für den Materialersatz (falls vorhanden).</p> $V_{\text{Aushub}} = V_{\text{Baugrube}} + V_{\text{Extraaushub Böschung}} + V_{\text{Extraaushub Materialersatz}}$ <p>mit</p> $A_{\text{Baugrube}} = L_{\text{Baugrube}} \cdot B_{\text{Baugrube}}$ $V_{\text{Baugrube}} = A_{\text{Baugrube}} \cdot T_{\text{Gebäude}}$ $V_{\text{Extraaushub Böschung} < 4\text{m}} = \frac{\left(T_{\text{total}}^2 \cdot \frac{\text{Verhältnis Breite}}{\text{Verhältnis Tiefe}}\right)}{2} \cdot U_{\text{Baugrube}}$ $V_{\text{Extraaushub Böschung} > 4\text{m}} = \left(\frac{\left(T_{\text{total}}^2 \cdot \frac{\text{Verhältnis Breite}}{\text{Verhältnis Tiefe}}\right)}{2} + \frac{T_{\text{total}}}{2} \cdot B_{\text{Berme}}\right) \cdot U_{\text{Baugrube}}$ $V_{\text{Extraaushub Materialersatz}} = A_{\text{Baugrube}} \cdot T_{\text{Materialersatz}}$
Hinterfüllung	[m ³]	<p>Das Hinterfüllungsvolumen entspricht dem Arbeitsraum von 0.8 m neben der Aussenkante Gebäude und dem, von der Baugrubensicherung abhängiges, zusätzliches Volumen, was aufgefüllt werden muss.</p> $V_{\text{Hinterfüllung}} = V_{\text{Extraaushub Böschung}} + U_{\text{Baugrube}} \cdot T_{\text{Gebäude}} \cdot B_{\text{Arbeitsraum}}$
Materialersatz	[m ³]	<p>Das Materialersatzvolumen entspricht dem Volumen unterhalb der Baugrube bis zur erforderlichen Tiefe.</p> $V_{\text{Materialersatz}} = A_{\text{Baugrube}} \cdot T_{\text{Materialersatz}}$
Pfähle	[m]	<p>Die totale Pfahllänge wird anhand eines Verhältnisses von Pfahl pro Baugrubenfläche berechnet. Dieses Verhältnis stammt aus den Referenzprojekten.</p> <ul style="list-style-type: none"> Enges Wandraster im UG: 33 m² Baugrubenfläche /Pfahl <p>Die zusätzlich benötigten Pfähle in tiefen Untergeschossen wurden basierend auf dem Verhältnis der Pfähle pro m² Baugrube der Referenzprojekte und zusätzlich notwendiger Stabilisation aufgrund des Wasserdruckes abgeschätzt.</p> <ul style="list-style-type: none"> Weite Wandraster im UG: abhängig von der Tiefe und Wasserdruck zwischen 33

		<p>und 13 m² / Pfahl</p> $L_{Pfähle} = \text{Verhältnis} \left(\frac{\text{Pfähle}}{A_{Baugrube}} \right) \cdot L_{pro\ Pfahl} \cdot A_{Baugrube}$ <p>Für die Cases 2.8 und 2.9 werden zusätzliche Mikrobohrpfähle in der Bodenplattenfläche als Zugpfähle für die anfallenden Auftriebskräfte verwendet. Pfahllänge 18 m, 33 m²/Pfahl resp. 13 m²/Pfahl.</p> <p>Für die Cases 2.10 und 2.11 werden zusätzliche Ort betonbohrpfähle 900 mm in der Bodenplattenfläche als Zugpfähle für die anfallenden Auftriebskräfte verwendet. Pfahllänge 15 m, 20 m²/Pfahl resp. 13 m²/Pfahl.</p>
Gutschriften	[kg]	<p>Folgende Gutschriften wurden für alle Cases ohne Untergeschoss angenommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Betondicke Aussenwände kann um 5 cm reduziert werden und 50% der Betonwände werden durch Backsteinwände ersetzt. Es sind dabei die Aussenwände des neuen EGs gemeint, dass im Vergleich zum Referenzfall aus dem Boden „gehoben“ wurde. • Der Stahl in den Aussenwänden reduziert sich parallel zur Einsparung des Betons mit 100 kg/m³ Stahlanteil • Ersatz Dämmung XPS (10 cm) durch Dämmung Steinwolle (15 cm)¹ im Erdgeschoss (das aus dem Boden gehobene Untergeschoss)
Lastschriften	[kg]	<p>Folgende Lastschriften wurden berechnet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hypothese 1: für die Auftriebssicherung im Case 1.16 wird von einer dickeren Bodenplatte ausgegangen (+ 10 cm) • Hypothese 2: <ul style="list-style-type: none"> ○ Für die Cases 2.7 bis 2.11 wird die Dicke der Bodenplatte schrittweise von 25 cm auf 90 cm erhöht, um den Auftriebskräften zu begegnen. Der Grundwasserhöchststand wird 1 m unter der Geländeoberkante angenommen. ○ Die Aussenwandstärke wird mit zunehmender Tiefe schrittweise von 25 cm auf 50 cm erhöht, um dem steigenden Erd- und Wasserdruck zu begegnen (da keine Zwischengeschossdecken die Kräfte aufnehmen können). ○ Der Stahl in den Aussenwänden und Bodenplatten erhöht sich parallel zum Mehrverbrauch des Betons mit 100 kg/m³ Stahlanteil <p>Folgende Lastschriften wurden zusätzlich für alle Cases mit mehr als einem Untergeschoss angenommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Betondicke der Aussenwände, welche im Vergleich zum Referenzfall in den

¹ Da XPS einen besseren U-Wert hat als Steinwolle, wird davon ausgegangen, dass 10 cm XPS rein dämmtechnisch gleichwertig ist mit 15 cm Steinwolle, basierend aus Angaben von [9]

		<p>Boden abgesenkt werden, muss um 5cm erhöht werden und der Backsteinanteil der Wände wird durch Beton ersetzt (Annahme 50%). Auch hier wird erhöht sich der Stahlgehalt parallel zum Mehrverbrauch des Betons.</p> <ul style="list-style-type: none">• Ersatz Dämmung Steinwolle (15 cm) durch Dämmung XPS (10 cm)¹ im Untergeschoss (die im Boden versenkten Geschosse, welche sich zuvor ob Terrain befanden)
--	--	--

2.5 Verwendete Ökobilanzdaten

Wenn nicht anders beschrieben, wurden die Daten gemäss der KBOB-Empfehlung verwendet [2]. Nachfolgend sind zusätzlich relevante, aggregierte Prozesse aufgelistet, die in der gezeigten Form nicht in der KBOB-Empfehlung oder der Studie von treeze [1] aufgeführt sind. Zugrundeliegende Komponenten aus dem KBOB-Katalog sind anhand ihrer ID-Nummer gekennzeichnet. Die für die Bilanzierung verwendeten Werte sind jeweils als Total gekennzeichnet.

2.5.1 Aushub inkl. Transport

Im Aushub, welcher in der KBOB-Empfehlung aufgeführt ist, muss der Transport noch dazugerechnet werden. Unter den Annahmen, dass in der Stadt Zürich grundsätzlich nie Aushub auf der bebauten Parzelle zwischengelagert werden kann und die nächstgelegene Deponie durchschnittlich 12.6 km vom Projektstandort entfernt ist ², wurde der folgende Prozess zusammengestellt. Es wird jeweils der gesamte Aushub auf die Deponie geliefert.

Es wird von einer Aushubdichte von 1.6 t/m³ ausgegangen.

Tabelle 6: Modellierung Aushub inkl. Transport.

KBOB ID Nummer	Bezeichnung	Bezugseinheit	THG- Emissionen pro Bezugseinheit [kg CO ₂ -eq./ Bezugseinheit]	Menge	THG- Emissionen pro m ³ Aushub [kg CO ₂ -eq./m ³]
06.001	Aushub maschinell, Durchschnitt	m ³	0.412	1	0.412
62.010	Lastwagen 32-40t	tkm	0.110	20.16 tkm/m ³	2.218
Total	Aushub inkl. Transport	m³			2.630

In der in der KBOB-Liste enthaltenen Komponente Transport Lastwagen 32-40t sind Leerfahrten bereits eingerechnet, es wird von einer durchschnittlichen Füllmenge von 11 t ausgegangen [3]. In der Modellierung ist lediglich der Transport zur Deponie beinhaltet. Die Rücklieferung des Aushubes, welcher für die Hinterfüllung benötigt wird, wird im Prozess der Hinterfüllung berücksichtigt.

² Dieser Wert wurde anhand der drei nächstgelegenen Deponien und Kiesgruben vom HB Zürich aus berechnet (Autofahrt). Die Standorte der Deponien stammen aus [10].

2.5.2 Hinterfüllung inkl. Transport

Die Hinterfüllung inkl. Transport wird gleich modelliert wie der Aushub inkl. Transport (gleiche Transportdistanz und Dichte Material). Hier wird allerdings davon ausgegangen, dass das gesamte Hinterfüllungsvolumen aus der Deponie angeliefert werden muss, da es auf urbanen Bauparzellen meist keinen Platz für die Zwischenlagerung des Aushubes hat. Der Aushub kann also nicht direkt als Hinterfüllung verwendet werden.

Tabelle 7: Modellierung Hinterfüllung inkl. Transport.

KBOB ID Nummer	Bezeichnung	Bezugs-einheit	THG- Emissionen pro Bezugseinheit [kg CO ₂ -eq./ Bezugseinheit]	Menge	THG- Emissionen pro m ³ Hinterfüllung [kg CO ₂ -eq./m ³]
06.001	Aushub maschinell, Durchschnitt	m ³	0.412	1	0.412
62.010	Lastwagen 32-40t	tkm	0.110	20.16 tkm/m ³	2.218
Total	Hinterfüllung inkl. Transport	m³			2.630

Jegliche Hinterfüllung wird als Aushubmaterial betrachtet. Die Komponente «Aushub maschinell, Durchschnitt» wird ebenfalls berücksichtigt, für die Arbeiten mit dem Hydraulikbagger auf der Deponie und auf der Bauparzelle. In der aggregierten Komponente «Hinterfüllung inkl. Transport» enthalten ist wiederum die Komponente Transport, jedoch wird hier die Strecke von der Deponie zur Baustelle betrachtet.

2.5.3 Materialersatz inkl. Transport

Der Materialersatz wird ähnlich wie die Hinterfüllung modelliert. Im Unterschied zur Hinterfüllung werden durch den Transport aufgrund der höheren Dichte von Kies leicht mehr Treibhausgasemissionen pro m³ verursacht. Um die Arbeiten in der Kiesgrube (Abtragen Kies, ohne Waschen, ohne Sortieren) und die Verdichtung vor Ort zu berücksichtigen, fließt die Komponente «Aushub maschinell, Durchschnitt» doppelt in den summierten Prozess ein. Es wird davon ausgegangen, dass die Kiesgrube durchschnittlich auch 12.6 km weit vom Projektstandort entfernt ist und Kies eine Dichte von 2.0 t/m³ hat.

Tabelle 8: Modellierung Materialersatz inkl. Transport.

KBOB ID Nummer	Bezeichnung	Bezugs-einheit	THG- Emissionen pro Bezugseinheit [kg CO ₂ -eq./ Bezugseinheit]	Menge	THG- Emissionen pro m ³ Materialersatz [kg CO ₂ -eq./m ³]
06.001	Aushub maschinell, Durchschnitt	m ³	0.412	2	0.824
62.010	Lastwagen 32-40t	tkm	0.110	25.2 tkm/m ³	2.772
Total	Materialersatz inkl. Transport	m³			3.596

2.5.4 Sickerbetonwand

Die Sickerbetonwand wird auf Basis der Komponente Magerbeton modelliert, es wurde allerdings von einer geringeren Dichte von 1'850 kg/m³ und einer Dicke der Sickerbetonwand von 30 cm ausgegangen.

Tabelle 9: Modellierung Materialersatz inkl. Transport.

KBOB ID Nummer	Bezeichnung	Bezugs-einheit	THG- Emissionen pro Bezugseinheit [kg CO ₂ -eq./ Bezugseinheit]	Menge	THG- Emissionen pro m ² Sickerbetonwand [kg CO ₂ -eq./m ²]
01.001	Magerbeton (ohne Bewehrung)	kg	0.059	555 kg/m ²	32.745
Total	Sickerbetonwand	m²			32.745

2.6 Systemgrenzen und Funktionelle Einheit

Die funktionellen Einheiten werden als totale Emissionen über die ganze Lebenszeit des Gebäudes pro Längen- bzw. Flächenmass gewählt. Dies entspricht den Emissionen einer einmaligen Erstellung und Entsorgung, da alle betrachteten Komponenten und Prozesse eine Lebenszeit von 60 Jahren nach SIA 2032 aufweisen (entspricht Lebenszeit des gesamten Gebäudes) [4]. Einzig die Gut- bzw. Lastschriften für die Wärmedämmung der Aussenfassade (Steinwolle) wird mit einem Faktor von 2 gewichtet, da diese als einzige eine Lebenszeit von 30 Jahren hat.

2.6.1 Tiefenvergleich Baugrubensicherungen

In der Systemgrenze enthalten sind lediglich die Aufwände für die Erdbauarbeiten und die Baugrubensicherung. Der Aushub bzw. die Hinterfüllung für das Gebäudevolumen und den Arbeitsraum wird als identisch für alle Arten der Baugrubensicherung angenommen und liegt ausserhalb der Systemgrenze des Tiefenvergleichs.

Die Resultate des Tiefenvergleichs werden als totale Emissionen pro Meter Breite Baugrubensicherung angegeben, da die Baugrubensicherungen unabhängig von einem spezifischen Gebäude betrachtet werden.

2.6.2 Untersuchung der Hypothesen

Innerhalb des Bilanzierungsperimeters befinden sich die Erdbauarbeiten (Aushub, Materialersatz, Hinterfüllung), die Baugrubensicherungen sowie die Tiefgründungen (Pfähle).

Die Erstellung der eigentlichen Gebäude ist ausserhalb der Systemgrenzen. Verändert sich in einem der betrachteten Cases aufgrund der Anhebung aus dem Boden oder der Versenkung in den Boden die Konstruktion des Gebäudes, werden diese Veränderungen gegenüber einem Referenzfall als Gutschriften und Lastschriften berücksichtigt (z.B. dickere oder dünnere Wände bzw. Bodenplatten oder angepasste Materialisierungen). Der Referenzfall ist für jede Hypothese ausgewiesen.

Als funktionelle Einheit für die betrachteten Cases wird die graue Emission der Erdbauarbeiten, Baugrubensicherung und Tiefgründung pro m² Gebäudestempel definiert.

$$\frac{\text{Treibhausgasemissionen}}{m_{\text{Gebäudestempel}}^2}$$

Für das fiktive Schulgebäude beträgt der Gebäudestempel 3'760 m², für das fiktive Turnhallen-Gebäude 1'270 m².

2.7 Sachbilanzen

Sämtliche Sachbilanzdaten sind in Anhang B beigelegt.

3 Resultate und Diskussion

Die nachfolgend gezeigten Resultate spiegeln lediglich die Situation der spezifisch betrachteten Fälle (Gebäudeparameter) in der Stadt Zürich wider (Boden- und Grundwassereigenschaften) und sind nicht allgemein gültig.

3.1 Tiefenvergleich Baugrubensicherungen

Abbildung 8 zeigt die totalen Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Baugrubensicherungen, abhängig von der Baugrubentiefe (bzw. Gebäudetiefe). In einer Tiefe von 3.5 m wechseln die vertikalen Baugrubensicherung von der ausgekragten Version in die verankerte oder gespriesste. Dies entspricht der maximalen bzw. minimalen Einsatztiefe dieser Technologie in der Praxis.

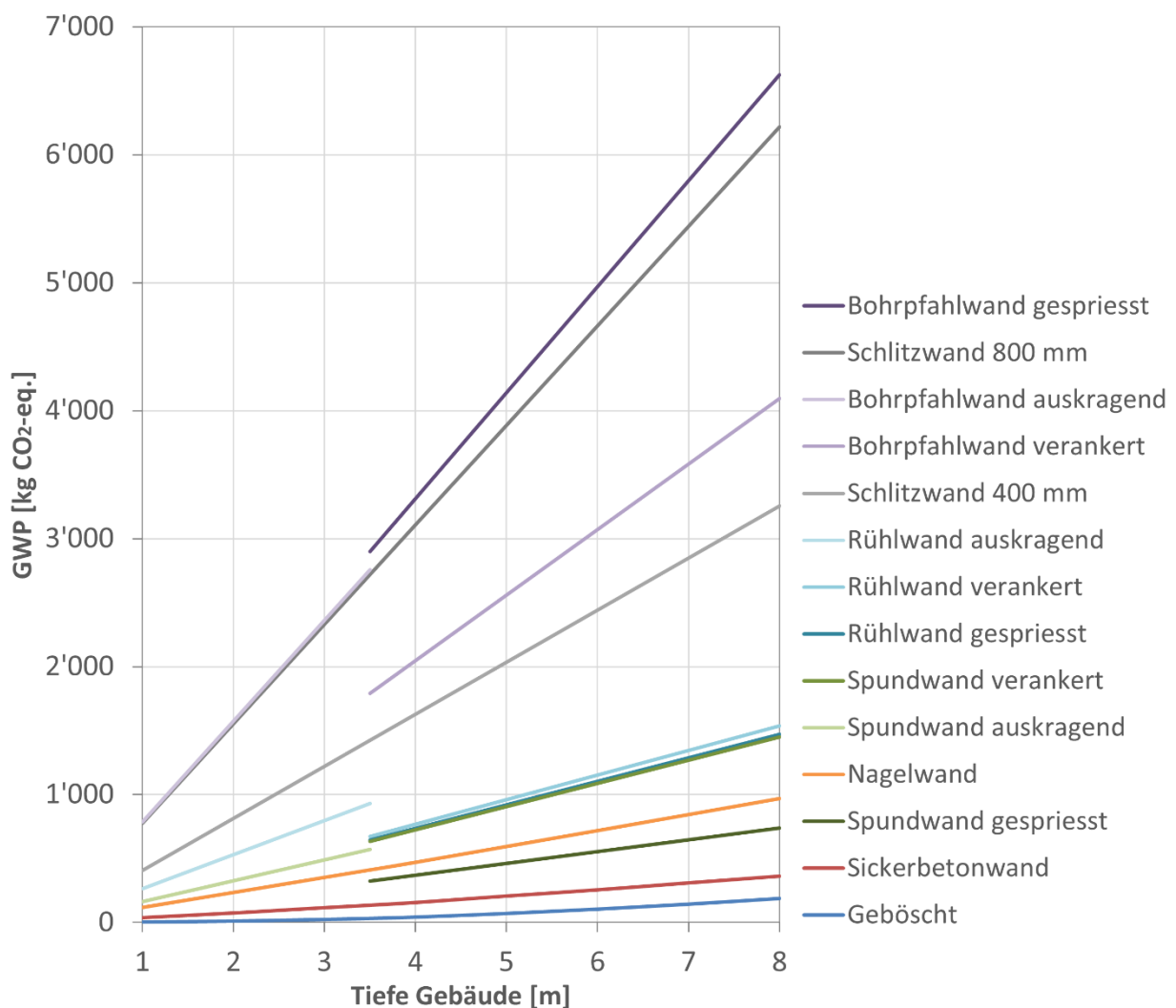


Abbildung 8: Vergleich Baugrubensicherung abhängig von der Tiefe der Baugrube (1 bis 8 m)

Im direkten Vergleich der unterschiedlichen Baugrubensicherungen schneidet die Böschung klar am besten ab. Die grössten ökologischen Einwirkungen entstehen bei der gespriessten Bohrpfahlwand.

Grundsätzlich deckt sich die Reihenfolge der Umwelteinwirkungen unterschiedlicher Baugrubensicherungen mit dem Aufwand während der Installation und den aufgewendeten Materialmengen. Insbesondere die Bohrpfahlwand und Schlitzwand benötigen grosse Mengen an Beton und schwere Maschinen. Die in der Ausführung einfacher zu handhabenden und weniger materialintensiven Baugrubensicherungen Rühlwand, Spundwand und Nagelwand schneiden aus ökologischer Sicht klar besser ab. Die Spundwand würde voraussichtlich sogar noch besser abschneiden als dargestellt. Grund dafür ist die in der KBOB-Empfehlung (bzw. der zugrundeliegenden Studie von treeze Ltd.) angenommene, 3-malige Wiederverwendbarkeit der Spundwandelemente, welche nach Absprache mit einem Unternehmenden durchschnittlich eher bei 10- bis 15-mal liegt. Die in der treeze Studie berechneten Werte vernachlässigen zudem die überproportionale Erhöhung von Ankern und Spriessungen pro Quadratmeter Baugrubensicherung mit zunehmend tieferer Baugrube. Daher erscheinen die gezeigten Werte für die gespriessten und verankerten Baugrubensicherungen wie auch die Nagelwand als zu optimistisch.

Die Böschung verzeichnet deutlich tiefere Umwelteinwirkungen im Vergleich, da nur Baugrund ausgehoben wird und keine zusätzlichen Materialien für die Erstellung anfallen. In den gezeigten ökologischen Einwirkungen macht zudem der Transport des Aushubes zur nächstgelegenen Deponie den grössten Anteil an Emissionen für die Böschung aus. Könnte das ausgehobene Material also vor Ort zwischengelagert werden (z.B. in ländlicheren Regionen), sind die Umweltauswirkungen der Böschung noch tiefer.

Der Einfluss von abweichenden Aushub-Transportdistanzen auf die Böschung und die Sickerbetonwand wird in Abbildung 9 gezeigt. Wiederum werden die totalen ökologischen Einwirkungen in ein bis acht Meter Baugrubentiefe visualisiert. Die Transportdistanzen werden von 6 bis 96 km variiert. Um den Vergleich zu Abbildung 8 wiederherzustellen wird zudem die Nagelwand, mit Aushub-Transportdistanz von 12.6 km aufgezeigt.

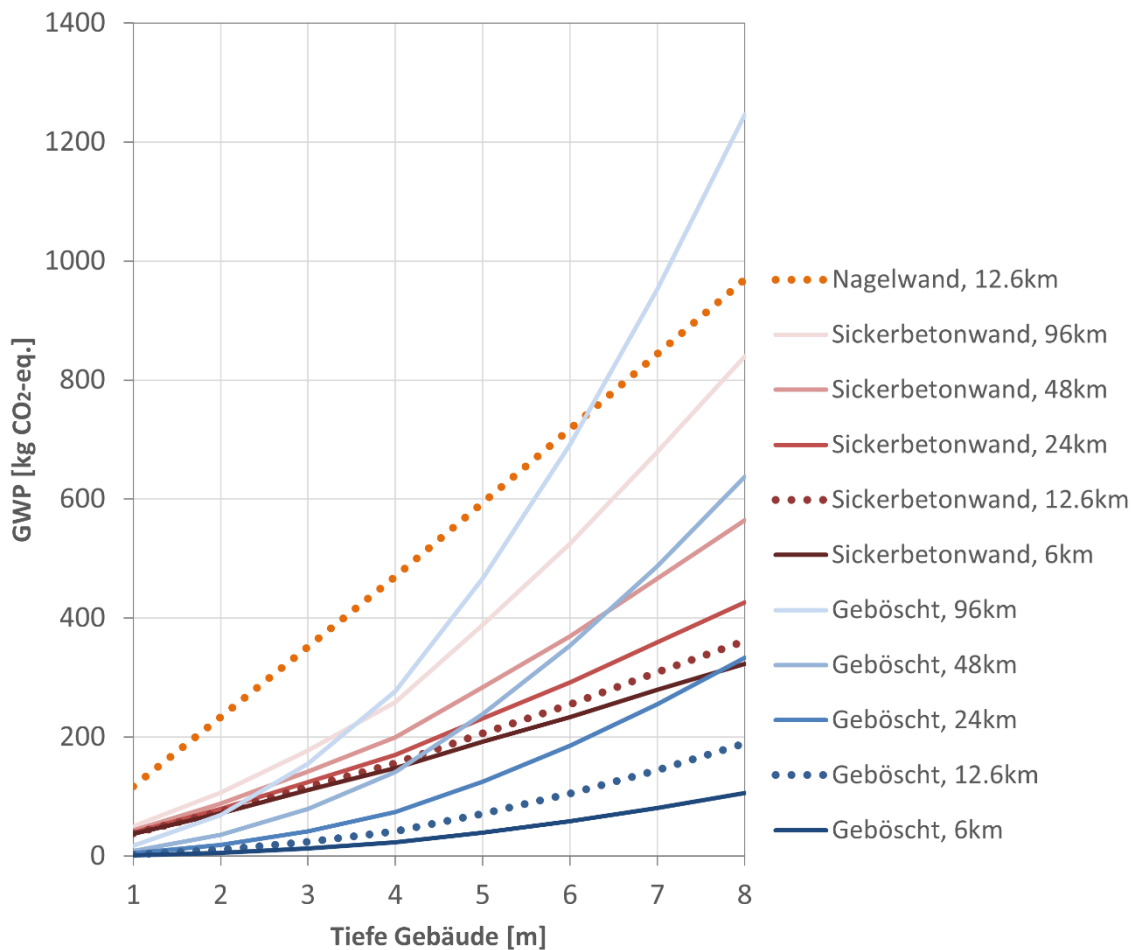


Abbildung 9: Sensitivität der Transportdistanz; Vergleich der Böschung und Sickerbetonwand

Die Böschung ist stärker abhängig von der Transportdistanz, da mit einem Böschungswinkel von 1:1 mehr Aushub generiert wird als mit dem Baugrubensicherungswinkel der Sickerbetonwand von 3:1. Der kubische Zusammenhang des Aushubes mit den ökologischen Einwirkungen kann sowohl bei der Böschung als auch bei der Sickerbetonwand deutlich erkannt werden. Jedoch schneidet erst bei weiten Transportdistanzen von 48 km die Böschung aus ökologischer Sicht schlechter ab als die Sickerbetonwand, jedoch erst ab 6.5 m Tiefe. Bei einer Transportdistanz von 96 km ist die Sickerbetonwand bereits bei einer Tiefe von 3.5 m der Böschung vorzuziehen.

Unter realen Bedingungen ist, speziell im städtischen und dicht bebauten Kontext, der Platz fürs Böschchen nicht vorhanden. Je tiefer geböschert wird, desto grösser ist der zusätzlich benötigte Platz für eine geböscherte Baugrube im Vergleich zu einer vertikal gesicherten Baugrube, was anhand eines Beispiels kurz verdeutlicht wird: Bei einer Baugrubentiefe von 3.5 m muss von der zu erstellenden Wand des Gebäudes im Untergeschoss 4.3 m für die Böschung und nur 0.8 m für die Erstellung einer Rühlwand oder einer anderen vertikalen Baugrubensicherung eingeplant werden. Unter Umständen würde eine solche Böschung bereits ausserhalb der Bauparzelle zu liegen kommen. Noch deutlicher wird der Unterschied, wenn bis in eine Tiefe von 8 m geböschert werden müsste; es würden in diesem Fall gar 9.8 m Abstand zum erstellenden Gebäude notwendig.

3.2 Untersuchung der Hypothesen

Die nachfolgenden Resultate zeigen die totalen ökologischen Auswirkungen der betrachteten Cases. Wie bereits erwähnt, hat jedes konkrete Bauprojekt eine eigene Struktur sowie objektspezifische Boden- und Grundwasserverhältnisse. Die gezeigten Resultate dürfen deshalb nicht als allgemein gültig betrachtet werden, da die Wahl der Baugrubensicherungen, Foundationen und Tiefgründungen stark von diesen Gegebenheiten abhängig ist.

Trotzdem erlauben die gezeigten Resultate einen Einblick in die zu erwartenden Emissionen für das Erstellen von Untergeschossen und können helfen, wesentliche Treiber zu identifizieren.

Sämtliche numerischen Werte der gezeigten Resultate können dem Anhang C entnommen werden.

3.2.1 Hypothese 1

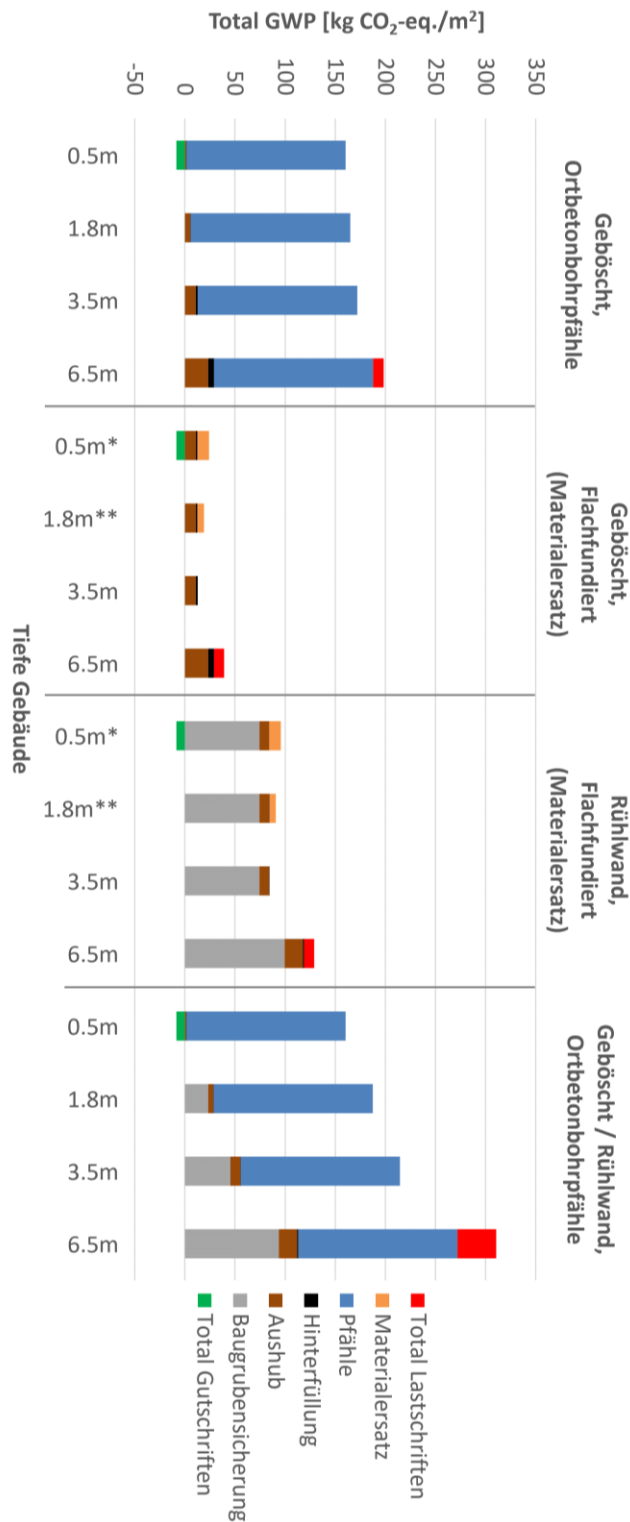


Abbildung 10: Resultate Hypothese 1, von unten nach oben: Cases 1.1 bis 1.16

* Materialersatz 3.0 m

** Materialersatz 1.7 m

Die Erstellung eines einzelnen Untergeschosses ist in der Regel meist «emissionsneutral», da zum Erreichen eines tragfähigen Gründungshorizontes für die ohnehin notwendigen Tiefbauarbeiten von Hochbauten bereits ein Grossteil des Energie- und Materialeinsatzes anfällt.

- Cases 1.1 bis 1.4: Unter den angenommenen Gegebenheiten wird deutlich, dass die Erstellung der Ort betonbohrpfähle den grössten Anteil an Gesamtemissionen ausmacht, unabhängig von der Baugrubentiefe. Für die Stabilisation des betrachteten Schulhauses muss mit dem vorliegenden Baugrund mit Pfählen gearbeitet werden, und eine Böschung ist bis in eine Tiefe von 6.5 m möglich. In diesem spezifischen Fall schneidet das Erstellen eines bodenebenen Gebäudes (0.5 m) minimal besser ab, als wenn ein Untergeschoss erstellt wird. Allerdings sind auch in einer Tiefe von 6.5 m (zwei Untergeschosse) die Emissionen nicht bedeutend grösser als bei der Erstellung eines Untergeschosses, da die Böschung nur wenig Emissionen verursacht.
- Cases 1.5 bis 1.8: Die Absenkung des Gebäudes auf das Niveau von einem Untergeschoss (3.5 m) schneidet aus ökologischer Sicht am besten ab. In diesem Cluster von Cases trifft man in einer Tiefe von 3.5 m auf stabilen Untergrund. Für die Cases 1.5 und 1.6 muss daher ungeeignetes Material bis auf diese Tiefe ersetzt werden, was die Ökobilanz dieser Cases belastet. Sobald der stabile Untergrund jedoch erreicht ist, führt eine weitere Versenkung des Gebäudes im Boden zu höheren Umweltbelastungen.
- Cases 1.9 bis 1.12: Auch in diesem Cluster trifft man in einer Tiefe von 3.5 m auf stabilen Untergrund, allerdings sind die Platzverhältnisse beschränkt, sodass nicht mehr geböschet werden kann. Die Erstellung von einem Untergeschoss (3.5m) ist aus ökologischer Sicht knapp am besten, wenn der Boden so oder so auf 3.5 m abgetragen und gesichert werden muss (Baugrubensicherung muss beim Materialersatz bis Unterkante Materialersatz erfolgen). Die zusätzlichen Aufwendungen für ein zweites Untergeschoss lohnen sich aber ökologisch betrachtet nicht mehr.
- Cases 1.13 bis 1.16: Wenn die Gegebenheiten keine Böschung zulassen und zusätzlich die Tiefgründung mit Pfählen sichergestellt werden muss, ist, ähnlich wie bei den Cases 1.1 bis 1.4, die Erstellung von Pfählen die relevanteste Quelle für Treibhausgasemissionen. Mit dem zusätzlichen Einfluss der Baugrubensicherungen schneidet schlussendlich aber das bodenebene Erstellen des Gebäudes ökologisch am besten ab.

Die Lastschriften und Gutschriften beeinflussen die Resultate nur unwesentlich.

3.2.2 Hypothese 2

Turnhallen und Schwimmhallen (und Tiefgaragen) im Untergrund führen zu Mehraufwendungen bei den Tiefbauarbeiten. Zudem führen sie in der Regel zu einer aufwändigeren Lastabtragung und somit in den meisten Fällen auch zu höheren Erstellungsemissionen als wenn sie im Obergeschoss angesiedelt würden. Im Weiteren erfordern grosse, tief im Baugrund liegende Hallen in wasserhaltigen Böden entsprechende Auftriebssicherungen (Zugpfähle, Anker, entsprechend dimensionierte Bodenplatten und Aussenwände).

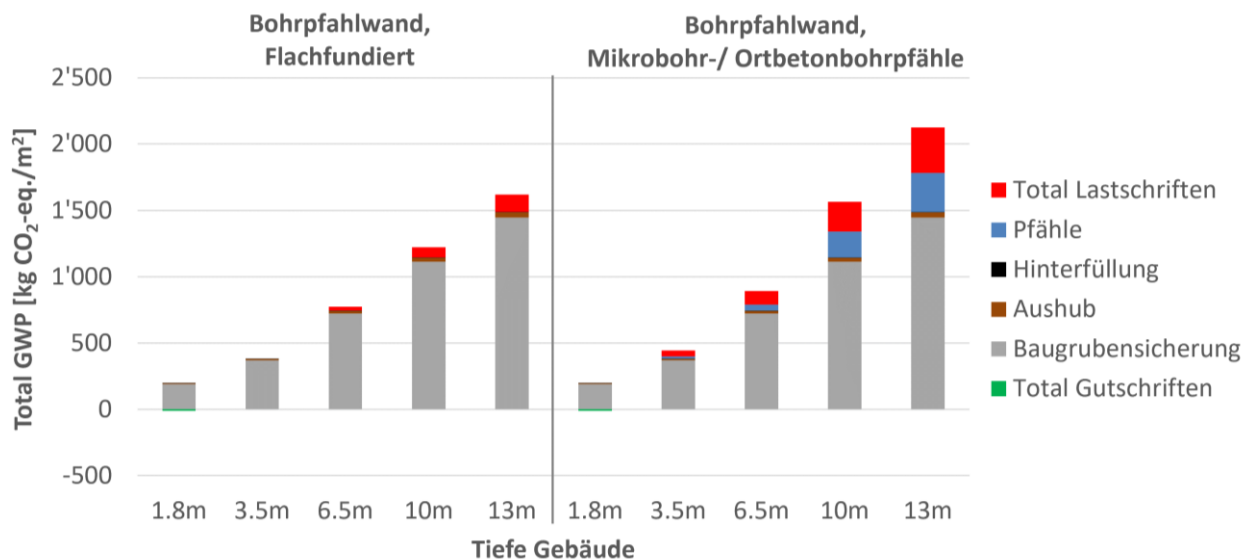


Abbildung 11: Resultate Hypothese 2, von links nach rechts: Cases 2.2 bis 2.11

- Cases 2.1 bis 2.5: Je tiefer die Turnhalle in den Boden abgesenkt wird, desto grösser werden die Umweltauswirkungen. Dies ist durch die vertikale Baugrubensicherung per Bohrpfahlwand zu begründen, welche, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, hohe Treibhausgasemissionen nach sich zieht.
- Cases 2.6 bis 2.10: Bei diesem Cluster handelt es sich bezüglich der Gegebenheiten um einen Worst-Case. Der Untergrund ist schwierig, da Grundwasser vorhanden ist. Weil das Gebäude ein weites Wandraster hat, ist es vergleichsweise leicht und muss gegen Auftrieb durch das Grundwassers geschützt werden. Unter diesen Umständen führt eine im Erdreich versenkte Turnhalle zu noch mehr Umweltemissionen als in den Fällen 2.1 bis 2.5. Die Lastschriften, welche durch die dickere Bodenplatte verursacht werden, kreieren zusammen mit den Ortbetonbohrpfählen in Cases 2.9 und 2.10 relevante, aber nicht ausschlaggebende Umwelteinwirkungen.

3.2.3 Hypothese 3

Ein zusätzliches, zweites Untergeschoss lohnt sich auch nicht, wenn durch das zusätzliche Untergeschoss Standpfähle kürzer ausgeführt werden können.

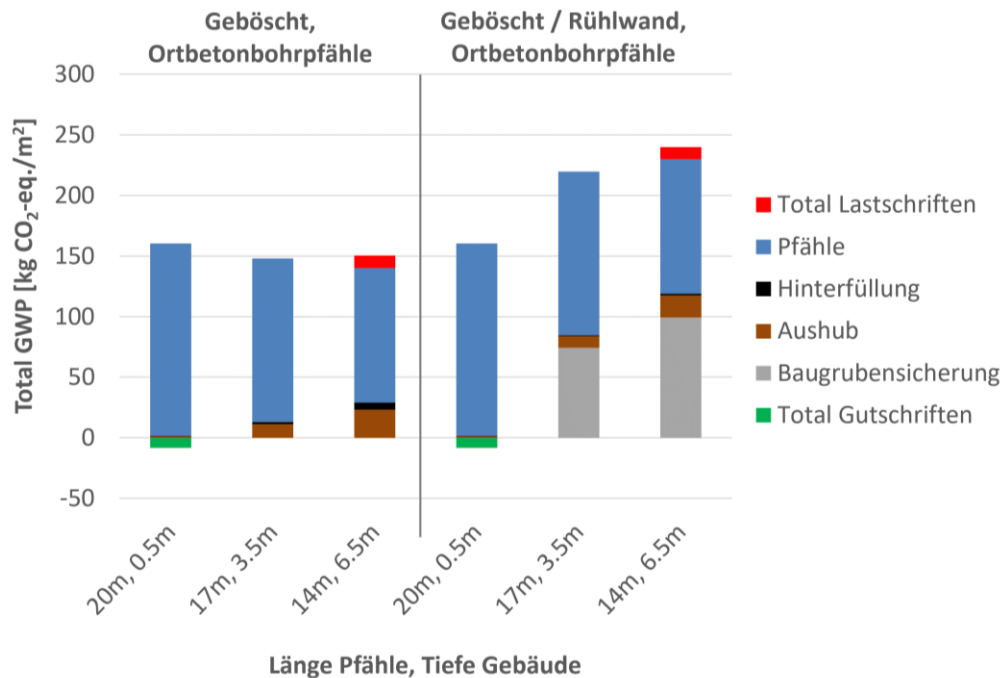


Abbildung 12: Resultate Hypothese 3, von links nach rechts: Cases 3.1 bis 3.6

- Cases 3.1 bis 3.3: Die Einsparung der Ortbetonbohrpfahllängen entspricht bei diesem spezifischen Fall ungefähr den Lastschriften und den zusätzlichen Emissionen für den Aushub. In diesem Fall ist es ökologisch neutral, ob das Schulhaus mit zwei, einem oder keinem Untergeschoss erstellt wird.
- Cases 3.4 bis 3.6: Ein leicht anderes Resultat ergibt sich, wenn die Baugrubensicherung nicht mehr per Böschung realisiert werden kann. In diesem Fall macht es aus ökologischer Sicht mehr Sinn, das Schulhaus bodeneben zu erstellen, um so auf vertikale Baugrubensicherungen verzichten zu können, auch wenn so die Länge der Pfähle nicht reduziert werden kann.

3.2.4 Hypothese 4

Materialersatz anstelle von Pfählen lohnt sich nur bis zu einem Meter Materialersatz.

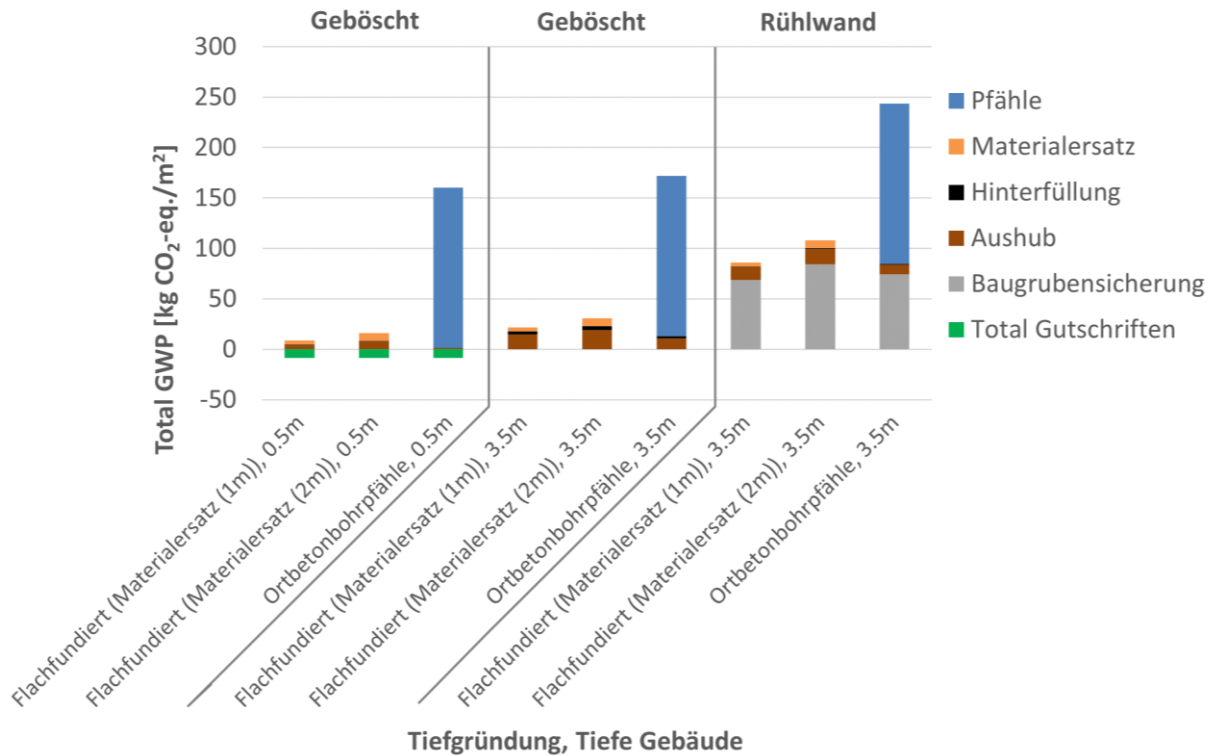


Abbildung 13: Resultate Hypothese 4, von links nach rechts: Cases 4.1 bis 4.9

Cases 4.1 bis 4.9: Unabhängig von der gewählten Baugrubentiefe und Baugrubensicherung weisen für diesen Cluster von Cases die Fälle mit Materialersatz deutlich geringere Umweltauswirkungen auf als jene mit Ortbohrbohrpfählen von 20 m Länge.

Die ökologischen Auswirkungen der Baugrubensicherung nehmen von Case 4.7 bis 4.8 zu und dann von Case 4.8 bis 4.9 wieder ab. Grund dafür ist, dass für die Cases 4.7 und 4.8 aufgrund der höheren Tiefe (wegen dem Materialersatz; insgesamt 4.5 m und 5.5 m totale Tiefe) die verankerte Rühlwand verwendet wird. Die im Case 4.9 verwendete auskragende Rühlwand muss nur bis in eine Tiefe von 3.5 m erstellt werden.

3.3 Vergleichswerte

3.3.1 Vergleich mit den Richtwerten der SIA 2040

In der nachfolgenden Tabelle wird der Richtwert für die Erstellung Schulanlage aus dem Merkblatt der SIA 2040 (Gebäude im Bilanzierungsperimeter nach SIA 2032 (2010) [5]) mit den in dieser Studie berechneten Werten verglichen. Im Vergleich enthalten sind einerseits die berechneten Werte für die Erstellung des Aushubs, und andererseits für die Summe aus Erstellung Aushub, Baugrubensicherung, Tiefgründung, Materialersatz und Hinterfüllung (ohne Gut- und Lastschriften). Gemäss SIA 2032 (2010) ist lediglich der Aushub (ohne Baugrubensicherung, Tiefgründung, Materialersatz oder Hinterfüllung) im Bilanzierungsperimeter enthalten. Trotzdem werden auch die für die Baugrubensicherung, Tiefgründung, Materialersatz und Hinterfüllung entstandenen Emissionen mit dem Richtwert verglichen, um ein Gefühl für die Grössenordnung dieser Komponenten zu erlangen. Der Richtwert wird mit den minimalen und maximalen Werten für die entsprechenden Kategorien aus dieser Studie verglichen.

Der Vergleich mit der Turnhalle ist mit Vorsicht zu geniessen, da für Turnhallen keine spezifischen Richtwerte in der SIA 2040 vorliegen. Zudem handelt es sich bei den gezeigten Cases um den Worst-Case, weshalb eine Turnhalle im «durchschnittlichen» Untergrund voraussichtlich etwas weniger schlecht abschneidet.

In der neuen SIA 2032 (2020) ist neben dem Aushub auch der Baugrubenabschluss und Pfählung in der Bilanzierung zu berücksichtigen, neue Richtwerte, bzw. ein Nachfolger der SIA 2040, liegen allerdings noch nicht vor [4]. In der Berechnung der grauen Energie für die Minergie-ECO, Minergie-P-ECO und Minergie-A-ECO Bauten wird wohl die neuste SIA 2032 berücksichtigt, allerdings die Baugrubenabschlüsse und Pfählungen vernachlässigt.

Tabelle 10: Vergleich mit Richtwerten SIA 2040 (2017) [6]

	Richtwert Erstellung [kg CO ₂ -eq./m ² EBF]	Erstellung Aushub (Min – Max) [kg CO ₂ -eq./m ² EBF]	Erstellung Aushub, Baugrubensicherung, Tiefgründung, Materialersatz und Hinterfüllung (Min – Max) [kg CO ₂ -eq./m ² EBF]
Schulanlage (8'500 m² EBF, 3'760 m² Gebäudestempel)	9.00 (100%)	0.01 – 0.17 (0.1% – 2%)	0.06 – 2.01 (1% – 22%)
Turnhalle (2'320 m² EBF, 1'270 m² Gebäudestempel)	(9.00 (100%)) ³	0.05 – 0.34 (1% – 4%)	1.78 – 16.23 (20% – 180%)

³ Da es für die Turnhalle keine spezifischen Richtwerte für die Erstellung gibt, wird hier als Vergleichswert der Richtwert für die Schulanlage verwendet.

Die berechneten Werte für die Schulanlage liegen alle im Rahmen der SIA 2040 gegebenen Richtwerte für das gesamte Gebäude. Bei der Turnhalle liegen die Werte für den Aushub im einstelligen prozentualen Anteil des gesamten Gebäudes und damit im Rahmen des Richtwerts für die Erstellung einer Schulanlage. Ein in der SIA 2040 Dokumentation aufgeführtes Beispielprojekt (Neubau Schulhaus Eichmatt inkl. Turnhalle) liegt mit einem Aushubanteil von 1.4% der Erstellung in einem sehr ähnlichen Bereich wie die in dieser Studie betrachtete Schulanlage und Turnhalle [7].

Werden neben dem Aushub zudem die weiteren Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen berücksichtigt, belaufen sich deren Emissionen bei der Schulanlage bis zu 22% und bei der Turnhalle sogar bis zu 180%, die Emissionen für diesen Teil allein sind also fast doppelt so hoch wie der Richtwert für die Erstellung des Gebäudes (maximale Fälle).

Bei diesen Vergleichen ist es wichtig zu beachten, dass sowohl bei der Schulanlage als auch der Turnhalle das Verhältnis von Energiebezugsfläche zu Gebäudestempel (sprich, das Verhältnis zur Untergeschossfläche) relativ klein ist. Das heisst, dass verhältnismässig viel Untergeschossfläche auf wenig Energiebezugsfläche kommt, verhältnismässig also viel Baugrubenfläche pro Energiebezugsfläche erstellt wird. Würden die Gebäude mit mehr Stockwerken gebaut werden, würden die Emissionen aus Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen auf mehr EBF verteilt und hätten einen geringeren Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Diese Resultate zeigen auf, wie gross das Gewicht und die Relevanz der grauen Emissionen von Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen sein kann. Eine baldige Aktualisierung der Richtwerte (Update SIA Merkblatt 2040) ist daher wichtig, da mit dem aktuell gültigen Merkblatt ein potentiell relevanter Teil der grauen Emissionen bei Neubauten komplett vernachlässigt wird. Die Aktualisierung des Effizienzpfades wird im Jahr 2023 in Form einer neuen SIA-Norm (390) erwartet [8].

3.3.2 Beton und Aushub

Nachfolgend werden vier Referenzwerte (Basis: KBOB-Empfehlung und daraus abgeleitete Prozesse) vorgestellt, sodass die Resultate noch weiter in den Kontext gestellt werden können:

- Herstellung und Entsorgung von 1 m³ Hochbaubeton (ohne Bewehrung): 230 kg CO₂-eq.
- Herstellung und Entsorgung von 1 m³ Hochbaubeton (bewehrt, 100kg Stahl pro m³): 330 kg CO₂-eq.
- Aushub von 1 m³, inklusive Transport zur Deponie: 2.6 kg CO₂-eq

Interessant ist hier ein Vergleich des Verhältnisses der Kosten und dem CO₂ Gehalt von einem Kubikmeter Beton zu einem Kubikmeter Aushub. Aus Sicht der Kosten ist Beton 4.4 mal teurer als Aushub, aus Sicht der Ökologie liegt dieser Faktor bei knapp 90. Der Unterschied zwischen diesen Faktoren ist gewaltig und zeigt erneut auf, wie wichtig es ist, bei Entscheidungsprozessen in Bauprojekten nicht nur die Kosten, sondern auch die Ökobilanz der verbauten Materialien zu berücksichtigen.

4 Fazit

4.1 Tiefenvergleich Baugrubensicherungen

Obwohl die Böschung im Vergleich mit anderen Baugrubensicherungen ökologisch deutlich am besten abschneidet, ist diese Art von Baugrubensicherung häufig nicht realisierbar. Gerade in städtischen Situationen wird eine Böschung oft nicht möglich sein, da kein Platz vorhanden ist. In diesen Fällen muss auf eine vertikale Baugrubensicherung ausgewichen werden. Zudem sind Bauprojekte, bei welchen mehrere unterschiedliche Baugrubensicherungen angewendet werden, keine Seltenheit. Die meisten Bauprojekte sind gerade in städtischen Kontexten wesentlich komplexer. Die Verfügbarkeit der benötigten Baugeräte beim Unternehmen und deren Terminplan spielen ebenfalls eine Rolle bei der Wahl von Baugrubensicherungen. Dennoch zeichnen sich aus ökologischer Sicht gewisse Technologien ab, die gegenüber anderen bevorzugt werden sollten, falls es die Umstände erlauben.

4.2 Überprüfung der Hypothesen

1. *Die Erstellung eines einzelnen Untergeschosses ist in der Regel meist «emissionsneutral», da zum Erreichen eines tragfähigen Gründungshorizontes für die ohnehin notwendigen Tiefbauarbeiten von Hochbauten bereits ein Grossteil des Energie- und Materialeinsatzes anfällt.*

Die Resultate für das Beispielgebäude bestätigen diese These nur teilweise:

- Wenn der tragfähige Untergrund ab einer Tiefe von rund einem UG ansteht, kein Grundwasser vorhanden ist und die Baugrube geböscht ausgeführt werden kann, ist das Erstellen von einem Untergeschoss aus ökologischer Sicht der Erstellung von keinem oder zwei Untergeschossen vorzuziehen.
- Steht der fundationsgeeignete Boden sehr tief an und muss die Tiefgründung mit Pfählen sichergestellt werden, ist die Erstellung von einem oder keinem Untergeschoss aus ökologischer Sicht fast gleichwertig (bei geböschtem Baugrubenabschluss). Sobald ein vertikaler Baugrubenabschluss notwendig wird, schneiden Varianten ohne UG besser ab.

Hier ist speziell noch einmal hervorzuheben, dass die Resultate nur für den untersuchten Fall gelten. Wenn z.B. ein weniger hohes Gebäude realisiert würde, das auf Pfähle mit kleinerem Durchmesser gestellt werden könnte, sähe die Bilanz anders aus. Die Tiefe des tragfähigen Untergrundes ist zudem entscheidend. Falls der tragfähige Untergrund bereits in geringer Tiefe erreicht wird (z.B. 0.5-1 m) und kein Materialersatz oder Pfähle nötig sind, ist der Verzicht auf ein Untergeschoss ökologisch sinnvoll.

2. *Turnhallen und Schwimmhallen (und Tiefgaragen) im Untergrund führen zu Mehraufwendungen bei den Tiefbauarbeiten. Zudem führen sie in der Regel zu einer aufwändigeren Lastabtragung und somit in den meisten Fällen auch zu höheren Erstellungsemissionen als wenn sie im Obergeschoss angesiedelt würden. Im Weiteren erfordern grosse, tief im Baugrund liegende Hallen in wasserhaltigen Böden entsprechende Auftriebssicherungen (Zugpfähle, Anker, entsprechend dimensionierte Bodenplatten und Aussenwände).*

Diese Hypothese wird in den untersuchten Fällen bestätigt. Durch das weite Wand-/Stützenraster werden bei Vorhandensein von Grundwasser zusätzliche bauliche Massnahmen zur Auftriebssicherung notwendig. Diese tragen zu rund einem Viertel der Lastschrift im Vergleich zur Variante ohne Grundwasser bei.

Im betrachteten Fall ist mit der Bohrpfahlwand ein sehr aufwändiger Baugrubenabschluss notwendig (u.a. aufgrund des städtischen Kontextes). Das Verhältnis der Fläche der Baugrubensicherung zur Baugrubenfläche ist zudem relativ gross, da die Baugrube nur für die Turnhalle mit Umkleideräumen und nicht noch für zusätzliche Gebäudeteile ausgehoben wurde. Würden diese beiden Faktoren von den Annahmen abweichen (weniger aufwändiger Baugrubenabschluss und kleineres Verhältnis Fläche Baugrubensicherung zu Baugrubenfläche), würde der Aufwand aufgrund der Auftriebssicherung anteilmässig sogar noch grösser. Turnhallen im Untergrund sollten in jedem Fall genau geprüft werden, da sie potentiell zu grossen Umwelteinwirkungen führen. Ausnahmen könnten gelten, wenn bereits eine Baugrube zur Verfügung steht (z.B. bei einem Ersatzneubau) oder wenn die Baugrube geböscht werden kann.

- 3. Ein zusätzliches, zweites Untergeschoss lohnt sich auch nicht, wenn durch das zusätzliche Untergeschoss Standpfähle kürzer ausgeführt werden können.*

Auch diese These konnte nur teilweise bestätigt werden. Kann geböscht werden, lohnt sich aus ökologischer Sicht das Einsparen von Bohrm Metern nur knapp. Werden allerdings aufwändige Baugrubensicherungen nötig, lohnt sich die Erstellung von Untergeschossen trotz eingesparter Bohrmeter nicht. Kann also nicht geböscht werden, liegt in diesem Fall das Optimum eher bei einem Gebäude ohne Untergeschoss.

- 4. Materialersatz anstelle von Pfählen lohnt sich nur bis zu einem Meter Materialersatz.*

Diese Hypothese wird anhand aller betrachteten Cases verneint. Unabhängig von den vorgefundenen Begebenheiten schneidet für das fiktive Gebäude der Materialersatz von bis zu zwei Metern besser ab als die Pfählung mit Ort betonbohrpfählen von 20 m Länge. Falls die Möglichkeit besteht, Pfähle durch Materialersatz zu substituieren, sollte diese aus ökologischer Sicht genau geprüft werden.

4.3 Allgemein

Da die Tiefgründungen und Baugrubensicherungen einen grossen Einfluss auf die Gesamtemissionen eines zu erstellenden Gebäudes haben können, ist es wichtig, deren Effekte bereits in frühen Planungsphasen zu berücksichtigen.

Aus ökologischer Sicht kann die Aussage verallgemeinert werden, dass – wenn möglich – vertikale Baugrubensicherungen vermieden werden sollten. Pfähle sind zudem grosse Treiber von Umweltemissionen, deren Substitution (z.B. durch Materialersatz) sich aus ökologischer Sicht lohnen kann. In beiden Fällen kann dies jedoch schwierig bis unmöglich sein.

Wenn das Gebäude und der Standort feststehen, diktieren oft das Umfeld, die Architektur und der Baugrund

die notwendige Fundationsmethode sowie die Art der Baugrubensicherung. Einsparpotenziale können folglich nicht aktiviert werden, respektive müssten schon sehr früh, nämlich beim Projektstart, erkannt und genutzt werden. Neben dem Willen, dieser Thematik den entsprechenden Raum einzuräumen, setzt dies auch spezielles Wissen der Planer und Auftraggeber um die Grössenordnung der ökologischen Auswirkung ihrer Entscheidungen voraus. Dieses Wissen ist nicht trivial und steht nicht breit zur Verfügung. Die Grundlagen für die Berechnung sind durch die KBOB-Empfehlung der Ökobilanzdaten im Baubereich aber bereits geschaffen. Das im Rahmen dieses Auftrags erarbeitete Tool kann zudem helfen, Projekte bereits in der Wettbewerbsphase auf die ökologischen Auswirkungen der Erstellung von Untergeschossen zu untersuchen und die Projekte entsprechend zu optimieren.

Die Tiefe des Gebäudes im Erdreich ist dabei ein möglicherweise wichtiger Hebel. Standardmässig mindestens ein Untergeschoss zu erstellen, ist im Rahmen des Ziels Netto Null 2035 nicht unbedingt zielführend. Je nach geologischen Gegebenheiten am Projektstandort und je nach Geometrie und Grösse eines Gebäudes kann der Verzicht auf ein Untergeschoss ökologisch lohnenswerter sein als die Erstellung von einem oder mehreren Untergeschossen. Insbesondere Bauten auf wasserhaltigen und schwierigen Baugründen und in engen Platzverhältnissen können von weniger (tiefen) Untergeschossen profitieren, da tendenziell nicht geböscht werden kann, sowieso Pfähle nötig sind und bei zunehmender Tiefe immer aufwändigere Baugrubensicherungen nötig werden. Der Hebel «Gebäudetiefe» kann aber in gewissen Situationen wegen gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht genutzt werden. So können beispielsweise Höhenbegrenzungen in der Bauordnung einer Gemeinde verhindern, dass die maximalen Ausnutzungsziffern beim Verzicht auf ein Untergeschoss noch erreicht werden können. Hier könnte beispielsweise ein Höhenzuschlag für Gebäude ohne oder einem halbem Untergeschoss Abhilfe schaffen. Die Tiefe des tragfähigen Bodens kann zudem von hoher Relevanz sein. Befindet sich dieser in kleiner Tiefe (bis 3.5 m Gebäudetiefe), kann es sinnvoll sein, das Untergeschoss bis auf diese Tiefe zu erstellen, anstatt ganz auf ein Untergeschoss zu verzichten oder zwei Untergeschosse zu erstellen. Bei einem Ersatzneubau besteht ausserdem die Option, die Bodenplatte auf derselben Tiefe zu setzen wie das zu ersetzende Gebäude, wenn dieses bereits auf tragfähigem Untergrund errichtet wurde.

Die untersuchten Fälle bestätigen im ökologischen Sinne viele Erkenntnisse, die bereits aus wirtschaftlichen Überlegungen bekannt sind. So wird im Normalfall versucht, ein Bauwerk kostenmässig so günstig wie möglich zu errichten. Dies beinhaltet unter anderem Baugruben wo immer möglich zu böschen und auf Pfähle zu verzichten. Unternehmer werden zudem versuchen, ihre Transportdistanzen möglichst klein zu halten. Die Umweltbilanz der Baugrube scheint jedoch jeweils beim Einsatz von Beton überproportional zu den dafür aufzuwendenden Kosten zu steigen. Ein Ansatz zur Reduktion der Emissionen scheint zu sein, so wenig Zement wie möglich zu verwenden. So wäre es z.B. besser, den Baugrubenabschluss zu spriessen, als mit Ankern zu arbeiten (unter der Annahme, dass die Spriessung wiederverwendet werden kann). Interessant ist auch die Beobachtung, dass sowohl beim Aushub wie auch beim Hinterfüllen und dem Materialersatz die Transportdistanz des Materials bei weitem der wichtigste Treiber für die ökologischen Auswirkungen ist und nicht der Aushub selbst.

Die Individualität eines jeden Projektes macht pauschale Aussagen zu ökologisch sinnvollem Bauen im Untergrund sehr schwierig, weshalb eine nahe Zusammenarbeit mit Spezialisten für Geologie,

Tiefgründungen, Baugrubensicherungen und Nachhaltigkeit notwendig ist.

5 Erweiterungsvorschläge KBOB-Empfehlung

In diesem Kapitel werden anhand der während der Erstellung der vorliegenden Studie gewonnenen Erkenntnisse einzelne Einträge in der KBOB-Empfehlung diskutiert oder Erweiterungen der KBOB-Ökobilanzliste vorgeschlagen:

- Aufnahme der Sickerbetonwand als zusätzliche Baugrubensicherung
- Datengrundlage für die Bilanzierung der Spundwand verfeinern: In Absprache mit einem Unternehmen scheint eine Wiederverwendbarkeit von 10 bis 15x realistischer. In der Studie von treeze wird von 3-maliger Wiederverwendung ausgegangen.
- Mehr Datengrundlagen sollten für die Bilanzierung der Bohrpfahlwand verwendet werden; Die Bohrpfahlwand könnte in verschiedene Subtypen aufgeteilt werden, z.B. überschritten, tangierend und aufgelöst.
- Die horizontale Spriessung der vertikalen Baugrubensicherungen ist noch nicht in der KBOB-Empfehlung enthalten.
- Die Verwendung der Daten aus der treeze-Studie führt dazu, dass mit zunehmender Wandfläche der Anteil der Spriess- und Anker linear zunimmt. Korrekterweise müsste der Spriess- und Ankeranteil überproportional mit grösserer Tiefe zunehmen. Mit einer Aufschlüsselung nach unterschiedlichen Tiefen pro Typ Baugrubensicherung könnte dies gelöst werden.
- Differenzierung des Aushubes: Aufteilung in Aushub lockerer Boden, Aushub fester/schwieriger Boden
- Der Materialersatz ist nicht in der Empfehlung enthalten. Die Materialisierung dieser Komponente fehlt zum jetzigen Zeitpunkt, da es sich weder um Rundkies noch um Aushub handelt. Nicht nur das Abtragen des Kieses in der Kiesgrube, sondern auch das Verdichten des Materials vor Ort sollte in der Bilanzierung berücksichtigt werden.
- Die Hinterfüllung ist nicht in der Empfehlung enthalten. Im Normalfall handelt es sich dabei allerdings um Aushubmaterial. Je nach dem kann der benötigte Aushub auf der Bauparzelle zwischengelagert werden, oder muss von der Deponie abgeholt werden (z.B. bei engen Platzverhältnissen wie in der Stadt Zürich).

6 Literaturverzeichnis

- [1] treeze Ltd., „Ökobilanzen von Tiefbauarbeiten bei Hochbauten,“ Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen, Zürich, 2014.
- [2] Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB); ecobau; Interessengemeinschaft privater professioneller Bauherren (IPB), „Empfehlung Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016,“ KBOB c/o Bundesamt für Bauten und Logistik (BBL), Bern, 2016.
- [3] P. Stolz, A. Messmer und R. Frischknecht, „Life Cycle Inventories of Road and Non-Road Transport Services,“ treeze Ltd., Uster, 2016.
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „SIA 2032:2020 - Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden,“ Zürich, 2020.
- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „Merkblatt 2032 - Graue Energie von Gebäuden,“ Zürich, 2010.
- [6] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „SIA 2040:2017 - SIA-Effizienzpfad Energie,“ Zürich, 2017.
- [7] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „Dokumentation D 0236 SIA-Effizienzpfad Energie - Ergänzungen und Fallbeispiele zum Merkblatt SIA 2040,“ Zürich, 2011.
- [8] preisig:pfäffli, „SIA-Effizienzpfad Energie,“ [Online]. Available: <https://preisigpfaeffli.ch/sia-effizienzpfad>. [Zugriff am 01 September 2022].
- [9] M. Ragonesi, M. Paulus, I. Plüss, G. Notter, M. Ettlin, D. Burkhardt, R. Miloni, S. Lenel, O. Bachmann, E. Schüller, U. Wolfisberg und B. Zurfluh, Bautechnik der Gebäudehülle, Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2016.
- [10] Amt für Raumentwicklung, „Kanton Zürich Richtplan,“ Zürich, 2021.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Cases Hypothese 1, der Referenzfall in 3.5 m Tiefe ist in hellblau hervorgehoben	11
Tabelle 2: Cases Hypothese 2, der Referenzfall in 3.5 m Tiefe ist in hellblau hervorgehoben	13
Tabelle 3: Cases Hypothese 3, der Referenzfall in 3.5 m Tiefe ist in hellblau hervorgehoben	14
Tabelle 4: Cases Hypothese 4	15
Tabelle 5: Berechnete Komponenten; L = Länge, B = Breite, A = Fläche, T= Tiefe, U= Umfang, V = Volumen	17
Tabelle 6: Modellierung Aushub inkl. Transport.....	20
Tabelle 7: Modellierung Hinterfüllung inkl. Transport.....	21
Tabelle 8: Modellierung Materialersatz inkl. Transport.....	22
Tabelle 9: Modellierung Materialersatz inkl. Transport.....	22
Tabelle 10: Vergleich mit Richtwerten SIA 2040 (2017) [6]	33
Tabelle 11: Berücksichtigte Gebäudeparameter	41

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung: Schnitt Baugrube mit Böschung.....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung: Schnitt Baugrube mit Nagelwand	3
Abbildung 3: Schematische Darstellung: Schnitt Baugrube mit Sickerbetonwand	3
Abbildung 4: Schematische Darstellung Baugrubenverbau; a) auskragend, b) rückverankert, c) gespriesst ...	4
Abbildung 5: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Volumina Baugrube, Hinterfüllung und Aushub für das Beispiel der Böschung	8
Abbildung 6: Schematische Darstellung Grundriss Baugrube (gebösch)	16
Abbildung 7: Schematische Darstellung Schnitt Baugrube (gebösch).....	16
Abbildung 8: Vergleich Baugrubensicherung abhängig von der Tiefe der Baugrube (1 bis 8 m)	24
Abbildung 9: Sensitivität der Transportdistanz; Vergleich der Böschung und Sickerbetonwand	26
Abbildung 10: Resultate Hypothese 1, von unten nach oben: Cases 1.1 bis 1.16 * Materialersatz 3.0 m ** Materialersatz 1.7 m.....	28
Abbildung 11: Resultate Hypothese 2, von links nach rechts: Cases 2.2 bis 2.11	30
Abbildung 12: Resultate Hypothese 3, von links nach rechts: Cases 3.1 bis 3.6	31
Abbildung 13: Resultate Hypothese 4, von links nach rechts: Cases 4.1 bis 4.9	32
Abbildung 14: Sachbilanzen aller Cases.....	42
Abbildung 15: Resultate in GWP/m ² Gebäudestempel	43

A. Gebäudebescrieb

Die beiden betrachteten Gebäude gleichen in der Grundform zwei geplanten Referenzbojekten der Stadt Zürich. Nachfolgend sind die relevanten Parameter, welche für die Aufstellung der Cases verwendet wurden, aufgelistet.

Die Grundlagen wurden aus zur Verfügung gestellten Plangrundlagen grob ausgemessen.

Tabelle 11: Berücksichtigte Gebäudeparameter

Gebäude	Umfang Gebäude [m]	Umfang Baugrube [m]	Fläche Gebäudestempel [m ²]	Fläche Baugrube [m ²]	Energiebezugsfläche [m ²]
Schulanlage	290	300	3'760	4'000	8'500
Turnhalle	160	170	1'270	1'400	2'320

B. Sachbilanzen

ID	Baugrubensicherung		Aushub [m ³]	Hinterfüllung [m ³]	Prähle [m]	Materialersatz [m ³]	Bonus		Malus		Bonus		Malus		Bonus		Malus	
	[m ²]	[m ³]					Beton Wand [kg]	Stahl Wand [kg]	Isolation XPS [kg]	Backstein [kg]	Malus Isolation Steinwolle [kg]	Beton Wand [kg]	Stahl Wand [kg]	Isolation XPS [kg]	Backstein [kg]	Isolation Steinwolle [kg]	Beton Bodenplatte [kg]	Stahl Bodenplatte [kg]
1.1	150	2'038	157	2'500	0	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	540	7'686	913	2'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	1'050	15'838	2'669	2'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4	1'950	33'088	8'631	2'500	0	0	0	0	0	0	354'200	15'400	2'860	79'200	12'672	0	0	0
1.5	1'050	15'838	1'957	0	12'000	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6	1'050	15'838	2'265	0	6'800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.7	1'050	15'838	2'669	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.8	1'950	33'088	8'631	0	0	0	0	0	0	0	354'200	15'400	2'860	79'200	12'672	0	0	0
1.9	1'050	14'000	119	0	12'000	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
1.10	1'050	14'000	427	0	6'800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.11	1'050	14'000	831	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.12	1'950	26'000	1'543	0	0	0	0	0	0	0	354'200	15'400	2'860	79'200	12'672	0	0	0
1.13	150	2'038	157	2'500	0	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
1.14	540	7'200	427	2'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.15	1'050	14'000	831	2'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.16	1'950	26'000	1'543	2'500	0	0	0	0	0	0	354'200	15'400	2'860	79'200	12'672	828'000	36'000	0
2.1	306	2'520	240	0	0	96'600	4'200	910	25'200	4'032	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2	595	4'900	467	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.3	1'105	9'100	867	0	0	0	0	0	0	0	310'500	13'500	1'593	44'100	7'104	0	0	0
2.4	1'700	14'000	1'334	0	0	0	0	0	0	0	795'800	34'600	3'445	95'400	15'360	0	0	0
2.5	2'210	18'200	1'735	0	0	0	0	0	0	0	1'340'900	58'300	5'038	139'500	22'368	0	0	0
2.6	306	2'520	240	0	0	96'600	4'200	910	25'200	4'032	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	595	4'900	467	756	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	434'700	18'900	0
2.8	1'105	9'100	867	1'890	0	0	0	0	0	0	310'500	13'500	1'593	44'100	7'104	724'500	31'500	0
2.9	1'700	14'000	1'334	1'050	0	0	0	0	0	0	917'700	39'900	3'445	95'400	15'360	1'304'100	56'700	0
2.10	2'210	18'200	1'735	1'575	0	0	0	0	0	0	1'520'300	66'100	5'038	139'500	22'368	1'883'700	81'900	0
3.1	150	2'038	157	2'500	0	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
3.2	1'050	15'838	2'669	2'125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.3	1'950	33'088	8'631	1'750	0	0	0	0	0	0	354'200	15'400	2'860	79'200	12'672	0	0	0
3.4	150	2'038	157	2'500	0	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	1'050	14'000	831	2'125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.6	1'950	26'000	1'543	1'750	0	0	0	0	0	0	354'200	15'400	2'860	79'200	12'672	0	0	0
4.1	450	6'338	457	0	4'000	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
4.2	750	10'938	1'057	0	8'000	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
4.3	150	2'038	157	2'500	0	303'600	13'200	2'860	79'200	12'672	0	0	0	0	0	0	0	0
4.4	1'350	21'188	4'019	0	4'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	1'650	26'988	5'819	0	8'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.6	1'050	15'838	2'669	2'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.7	1'350	18'000	831	0	4'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.8	1'650	22'000	831	0	8'000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.9	1'050	14'000	831	2'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 14: Sachbilanzen aller Cases

C. Detaillierte Resultate

ID	Baugrubensicherung	Aushub	Hinterfüllung	Prähle	Materialersatz	Bonus Beton Wand		Bonus Stahl Wand		Bonus Isolation XPS		Malus Backstein		Malus Isolation Steinwolle		Malus Beton Wand		Malus Stahl Wand		Malus Isolation XPS		Bonus Backstein		Bonus Isolation Steinwolle		Malus Beton Bodenplatte		Malus Stahl Bodenplatte	
						[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]	[kg CO ₂ -eq./m ² Gebäude-Gebäude-stempel]
1.1	0	1	0	159	0	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.2	0	5	1	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.3	0	11	2	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.4	0	23	6	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.5	0	11	1	0	11	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.6	0	11	2	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.7	0	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.8	0	23	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.9	74	10	0	0	11	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.10	74	10	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.11	74	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.12	100	18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.13	0	1	0	159	0	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.14	23	5	0	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.15	45	10	1	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.16	94	18	1	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.1	190	5	0	0	0	-8	-2	-10	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.2	370	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.3	722	19	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.4	1'111	29	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.5	1'445	38	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.6	190	5	0	0	0	-8	-2	-10	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.7	370	10	1	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.8	722	19	2	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.9	1'111	29	3	198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.10	1'445	38	4	297	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.1	0	1	0	159	0	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.2	0	11	2	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.3	0	23	6	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.4	0	1	0	159	0	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.5	74	10	1	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.6	100	18	1	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.1	0	4	0	0	4	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.2	0	8	1	0	8	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.3	0	1	0	159	0	-8	-2	-11	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.4	0	15	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.5	0	19	4	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.6	0	11	2	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.7	69	13	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.8	84	15	1	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.9	74	10	1	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Abbildung 15: Resultate in GWP/m² Gebädestempel

