

Diplomarbeit

Ermittlung von Kennwerten für Treibhausgasemissionen gängiger Bauprozesse

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Identification of greenhouse gas emission parameters for common construction processes

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Josip Josipović, BSc

Matr.Nr.: 01126404

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. **Frank Lulei**
Projektass. Dipl.-Ing. **Maximilian Weigert**
Univ.Ass.in Dipl.-Ing.in Dr.in techn. **Jacqueline Raab**
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/235-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Hinweis zur Geschlechterneutralität

Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in der Diplomarbeit verzichtet. Dies impliziert keinesfalls eine Diskriminierung anderer Geschlechter.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die Klimakrise stellt die Menschheit vor große Herausforderungen. Durch den Anstieg anthropogener Treibhausgasemissionen kommt es derzeit zu einer Erwärmung der Atmosphäre, die nicht nur schwerwiegende ökologische, sondern auch ökonomische und soziale Konsequenzen nach sich zieht. Ein erheblicher Anteil der emittierten Treibhausgase wird durch die Baubranche verursacht. Aus baubetrieblicher Sicht sind vor allem die Emissionen der Errichtungsphase eines Bauwerks von Interesse. Um diese quantifizieren zu können, ist es sinnvoll, einzelne Bauprozesse innerhalb definierter Systemgrenzen zu betrachten. Hierfür werden drei gängige Bauprozesse herangezogen: Baugrubenaushub, Spundwandaarbeiten und Betonarbeiten mit Halbfertigteilen.

Nach einer eingehenden Literaturrecherche werden die gewählten Bauprozesse auf drei Baustellen in Wien und der näheren Umgebung untersucht. Im Rahmen dieser Feldforschung konnten in Zusammenarbeit mit den ausführenden Unternehmen Daten zu Betriebsstoffverbräuchen und Transportwegen gesammelt werden. Aufbauend auf diesen Daten werden die durch den jeweiligen Bauprozess pro Leistungseinheit verursachten Treibhausgasemissionen mithilfe von Emissionsfaktoren für unterschiedliche Energieträger und Fahrzeugtypen aus der bestehenden Literatur berechnet. Die Kategorisierung der Treibhausgasemissionen erfolgt nach den Modulen der Errichtungsphase gemäß ÖNORM EN 15978. Abschließend werden die ermittelten Treibhausgasemissionskennwerte hinsichtlich ihrer Aussagekraft und der wesentlichsten Einflussfaktoren analysiert.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden eine Basis für zukünftige Untersuchungen zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen des Baubetriebs. Längerfristig eröffnen sie die Möglichkeit zur Schaffung einer Datenbank von Treibhausgasemissionskennwerten verschiedener Bauprozesse.

Schlagwörter: Treibhausgasemissionen, Baubetrieb, graue Emissionen, Errichtungsphase, Emissionsfaktor



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

The climate crisis poses significant challenges to humanity. The rise in anthropogenic greenhouse gas emissions is currently leading to atmospheric warming, which entails not only profound ecological but also economic and social consequences. A substantial portion of emitted greenhouse gases is being caused by the construction industry. From a construction operations perspective, the emissions stemming from the construction process are of particular interest. In order to quantify these emissions, it makes sense to examine specific construction processes within defined system boundaries. In this thesis, three common construction processes are selected for investigation: pit excavation, construction of sheet pile walls, and concrete work involving semi-precast elements.

After an in-depth literature review, the chosen processes are examined on three construction sites in Vienna and its surrounding area. In the course of this field research, data on operating resource consumption and transportation routes were collected in collaboration with the executing companies. Based on this data, the calculation of greenhouse gas emissions per unit of output generated by each specific construction process is performed using emission factors for various energy sources and vehicle types from existing literature. A categorization of the determined greenhouse gas emissions is conducted according to the modules of the construction phase as per ÖNORM EN 15978. In the end, the greenhouse gas emission parameters are analyzed in terms of significance and their most influential factors.

The results of this thesis provide a foundation for future studies aimed at quantifying the environmental impacts of construction operations. In the long term, they pave the way for establishing a database of greenhouse gas emission parameters for various construction processes.

Keywords: Greenhouse gas emissions, construction operations, embodied carbon, construction process, emission factor

Abkürzungsverzeichnis

AT	Arbeitstag
BIM	Building Information Modeling (Bauwerksdatenmodellierung)
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
CO₂-eq	Carbon Dioxide Equivalent (Kohlendioxid-Äquivalent)
EEA	European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)
E-Fuel	Electrofuel (synthetischer Kraftstoff)
EH	Emissionshandel
eI_{Na}	Elektronischer Nachhaltigkeitsnachweis
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme (Europäisches Überwachungs- und Bewertungsprogramm)
EPD	Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration)
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
HKLS	Heizung, Klima, Lüftung und Sanitär
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (hydriertes Pflanzenöl)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
KVO	Kraftstoffverordnung
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LETI	London Energy Transformation Initiative
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug < 3,5 t
OLI	Österreichische Luftschadstoff-Inventur
ÖNORM EN	Europäische Norm, die in das österreichische Normenwerk übernommen wurde
SCR	Selective Catalytic Reduction (selektive katalytische Reduktion)
SNF	Schweres Nutzfahrzeug ≥ 3,5 t
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (UN-Klimarahmenkonvention)
WAM	with additional measures (mit zusätzlichen Maßnahmen)
WEM	with existing measures (mit bestehenden Maßnahmen)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation	2
1.2	Forschungsfragen.....	6
1.3	Forschungsmethodik.....	6
1.4	Forschungsabgrenzung.....	8
1.5	Aufbau der Arbeit.....	10
2	Grundlagen	11
2.1	Lebenszyklusanalyse	11
2.2	Systemgrenzen	12
2.2.1	Herstellungsphase.....	12
2.2.2	Errichtungsphase	12
2.2.3	Nutzungsphase	13
2.2.4	Entsorgungsphase.....	14
2.2.5	Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze	14
2.3	Quellen von THG-Emissionen in der Errichtungsphase.....	14
2.3.1	Verbrennungsmotoren.....	15
2.3.2	Schmierstoffe	16
2.3.3	Wasserstoffantriebe.....	17
2.3.4	Elektroantriebe	17
2.4	Emissionsfaktoren	18
3	Baugrubenaushub	22
3.1	Baugrubenaushub – Übersicht.....	22
3.1.1	Wasserhaltung.....	22
3.1.2	Erdbaugeräte.....	23
3.2	Untersuchungsobjekt 1 – Baugrubenaushub.....	26
3.2.1	Transportbedingte Emissionen bei Teilprozess a) (Modul A4).....	28
3.2.2	Emissionen des Aushubs bei Teilprozess a) (Modul A5) – Betrieb mit HVO100.....	28
3.2.3	Emissionen der Errichtungsphase bei Teilprozess a) (Modul A4-A5).....	29
3.2.4	Gesamtemissionen aus den Teilprozessen a) und b) (Modul A4-A5 und Anteile außerhalb der Systemgrenzen)	30
3.2.5	Emissionen der Errichtungsphase bei Teilprozess a) (Modul A4-A5) – Szenario Dieselbetrieb.....	32
3.2.6	Gesamtemissionen aus den Teilprozessen a) und b) (Modul A4-A5 und D) – Szenario Dieselbetrieb.....	34
4	Spundwandaarbeiten	36
4.1	Spundwandaarbeiten – Übersicht	36
4.1.1	Spundbohlen.....	36
4.1.2	Schlösser	38
4.1.3	Einbringverfahren.....	39
4.2	Untersuchungsobjekt 2 – Spundwandaarbeiten	42

4.2.1	Transportbedingte Emissionen bei der Herstellung von Spundwänden (Modul A4)	43
4.2.2	Emissionen beim Einbauprozess von Spundwänden (Modul A5)	46
4.2.3	Gesamtemissionen der Errichtungsphase beim Einbringen von Spundwänden (Modul A4-A5)	47

5	Betonarbeiten mit Halbfertigteilen	49
5.1	Halbfertigteilbauweise – Übersicht	49
5.1.1	Elementdecken	49
5.1.2	Elementwände	50
5.1.3	Turmdrehkran und Betonkübel	52
5.1.4	Fahrmischer und Betonpumpe	53
5.2	Untersuchungsobjekt 3 – Betonarbeiten mit Halbfertigteilen	55
5.2.1	Transportbedingte Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A4)	56
5.2.2	Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Errichtung – Modul A5)	60
5.2.3	Gesamtemissionen der Errichtungsphase bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A4-A5)	66
6	Fazit	68
6.1	Zusammenfassung	68
6.2	Beantwortung der Forschungsfragen	70
6.2.1	Forschungsfrage 1	70
6.2.2	Forschungsfrage 2	74
6.3	Handlungsempfehlungen	76
6.4	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	77

1 Einleitung

Die Klimakrise stellt in den kommenden Jahrzehnten die wahrscheinlich größte Herausforderung für die Menschheit dar. Noch vor wenigen Jahren waren die Folgen der globalen Klimaveränderung für einen Großteil der österreichischen Bevölkerung im Alltag nicht spürbar. Die Dringlichkeit des Problems wurde und wird vielleicht gerade deswegen in Politik und Medien vielfach heruntergespielt oder sogar geleugnet. Doch die Auswirkungen werden auch hierzulande von Jahr zu Jahr sichtbarer: Das Abschmelzen der Gletscher schreitet unaufhörlich voran. Extreme Wetterereignisse treten häufiger auf, wodurch das Risiko für Fluten, Hangrutschungen und Muren steigt. Milde Winter und spätere Fröste führen vermehrt zu Ernteausschlägen. Anhaltende Trockenperioden sorgen vor allem im Osten Österreichs dafür, dass ganze Seen austrocknen und der Grundwasserspiegel vielerorts sinkt. Die zunehmende Zahl an Hitzetagen gefährdet die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen.

Der Klimawandel ist ein Faktor, der das weltweite Artensterben und den Verlust von Biodiversität wesentlich mitverursacht. Die Tatsache, dass der Bestand an wild lebenden Wirbeltieren zwischen 1970 und 2018 weltweit im Durchschnitt um 69 % zurückgegangen ist, lässt erahnen, wie weitreichend die Veränderungen sein können, die unseren Planeten in den kommenden Jahrzehnten erwarten. [1] Die tiefgreifenden Veränderungen in unserer Umwelt erfordern zwangsläufig Anpassungen in unserer Lebensweise. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass einige Regionen der Welt nicht in der Lage sein werden, sich in ausreichendem Maße an diese neuen Bedingungen anzupassen, was eine Vielzahl an weiteren sozialen und wirtschaftlichen Folgen mit sich bringen wird.

Verursacht wird der Klimawandel durch eine zu hohe Konzentration an Treibhausgasen (THG) in der Atmosphäre. Diese sorgt dafür, dass die von der Erdoberfläche reflektierte Wärmestrahlung infolge der Sonnenstrahlen nicht ausreichend durch die Atmosphäre entweichen kann. Stattdessen absorbieren die THG einen Teil der Wärmestrahlung, wodurch es zur Aufheizung der Atmosphäre kommt. Dieser von Natur aus auftretende Effekt wird seit dem Beginn der Industrialisierung immer mehr durch die vom Menschen stammenden THG-Emissionen verstärkt. Inzwischen gilt es als wissenschaftlich erwiesen, dass für die Klimaerwärmung hauptsächlich die anthropogenen THG-Emissionen verantwortlich sind. [2]

Kohlenstoffdioxid (CO_2) kann aufgrund der hohen emittierten Menge als das für den Klimawandel hauptverantwortliche THG angesehen werden. Abb. 1.1 zeigt den Anteil einzelner THG an den Gesamtemissionen. Im Jahr 2020 machte CO_2 in Österreich gemessen am CO_2 -Äquivalent etwa 84 % aller THG-Emissionen aus. Weitere im Hinblick auf ihr Treibhauspotenzial wesentliche THG sind Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O) und die fluorierten Gase. Da zwischen den kumulativen anthropogenen CO_2 -Emissionen und der von ihnen verursachten Klimaerwärmung ein beinahe linearer Zusammenhang besteht, lässt sich ein globales CO_2 - bzw. THG-Restbudget berechnen, welches nicht überschritten werden darf, damit eine übermäßige Erwärmung des Klimas verhindert werden kann. [2]

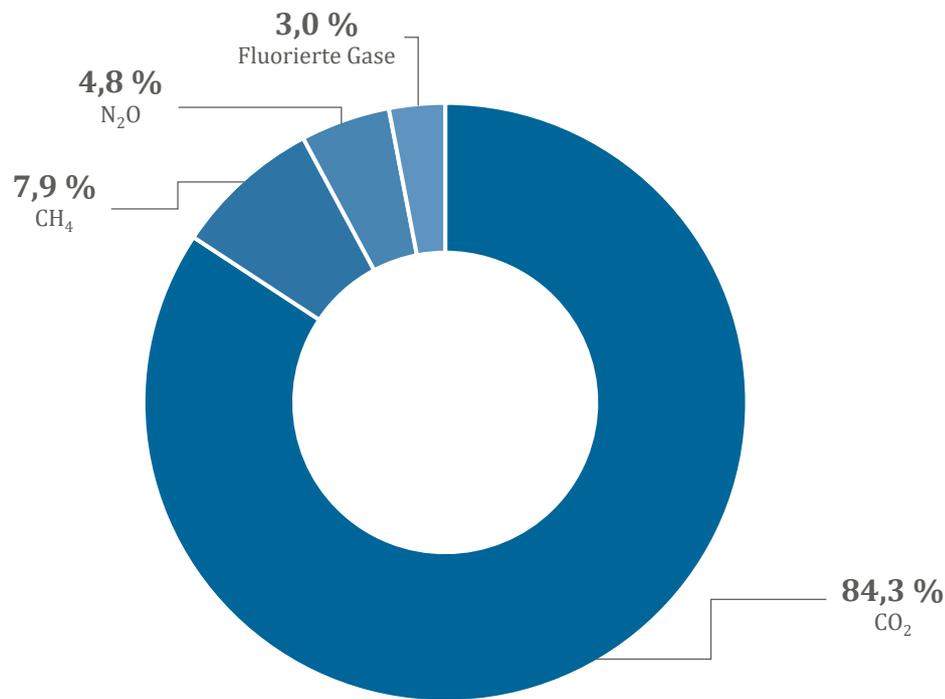


Abb. 1.1: Anteil einzelner Treibhausgase gemessen am CO₂-Äquivalent in Österreich 2020 nach [2, S. 84]

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Um die verheerenden Folgen des Klimawandels einzugrenzen, wurde 1992 in Rio de Janeiro die UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) unterzeichnet. Die beteiligten Staaten setzten sich darin das Ziel, die THG-Konzentration in der Atmosphäre so zu beschränken, dass eine gefährliche Störung des Klimas verhindert wird. Im Kyoto-Protokoll, welches 1997 verabschiedet wurde und 2005 in Kraft trat, wurden erstmals für einige Industrienationen rechtlich bindende Verpflichtungen zur Begrenzung der THG-Emissionen für den Zeitraum 2008 bis 2012 verankert. Im Dezember 2012 einigten sich die beteiligten Länder bei der 18. Vertragsstaatenkonferenz zur UN-Klimakonvention in Doha auf eine zweite Verpflichtungsperiode von 2013 bis 2020. Da das Kyoto-Protokoll aber nur einige Industrieländer zur Emissionsreduktion verpflichtete, kam es 2015 zum Pariser Klimaschutzübereinkommen, in welchem sich 197 Staaten dazu verpflichteten, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von weniger als 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau anzustreben. Die globale Erwärmung soll dabei jedenfalls auf deutlich unter 2 °C begrenzt werden. Um das zu erreichen, präsentieren die Regierungen der Mitgliedsstaaten alle fünf Jahre neue nationale Pläne mit ehrgeizigen Zielen und berichten öffentlich und transparent über ihren Fortschritt bei der Erreichung dieser Ziele. [2]

Die Europäische Union unterstützt die Bestrebungen des Pariser Klimaschutzübereinkommens und hat daher im europäischen „Green Deal“ beschlossen, ab 2050 keine (netto) THG-Emissionen mehr freizusetzen und das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung abzukoppeln. Verbleibende Emissionen sollen durch natürliche und technische „Senken“¹ kompensiert werden. Im

¹ Natürliche Senken können Wälder, Moore oder andere Ökosysteme sein, die CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern. Bei technischen Senken wird dies durch unterschiedliche technologiebasierte Ansätze erreicht.

Zuge des „Green Deals“ soll als Zwischenziel bis 2030 eine Emissionsreduktion um mindestens 55 % gegenüber dem Jahr 1990 erreicht werden. Die österreichische Bundesregierung hat darüber hinaus in ihrem Regierungsübereinkommen für 2020 bis 2024 festgelegt, die nationale „Klimaneutralität“ bereits 2040 zu erreichen. Dies soll im bisher ausständigen Klimaschutzgesetzes gesetzlich verankert werden. [2]

Um die Klimaziele der EU zu erreichen, müssen die Mitgliedsstaaten nationale Energie- und Klimapläne (NEKP) mit geplanten Maßnahmen erstellen. Ein wissenschaftliches Konsortium, bestehend aus Umweltbundesamt, Center of Economic Scenario Analysis and Research, Österreichischer Energieagentur, Instituten der TU Wien und der TU Graz sowie dem WIFO hat für den österreichischen Energie- und Klimaplan eine Wirkungsfolgenabschätzung ausgearbeitet. Darauf aufbauend gibt das Umweltbundesamt Szenarien für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahrzehnten an. Abb. 1.2 zeigt für das Szenario mit bestehenden Maßnahmen aus 2021 (WEM 2021) bis zum Jahr 2050 eine Reduktion von lediglich 17 % gegenüber dem Jahr 1990. Doch auch im Szenario mit zusätzlichen Maßnahmen (WAM 2021), also jenen, die im NEKP beschrieben wurden, zeichnet sich eine Reduktion von lediglich 28 % bis 2050 bzw. 15 % bis 2030 ab. [2]

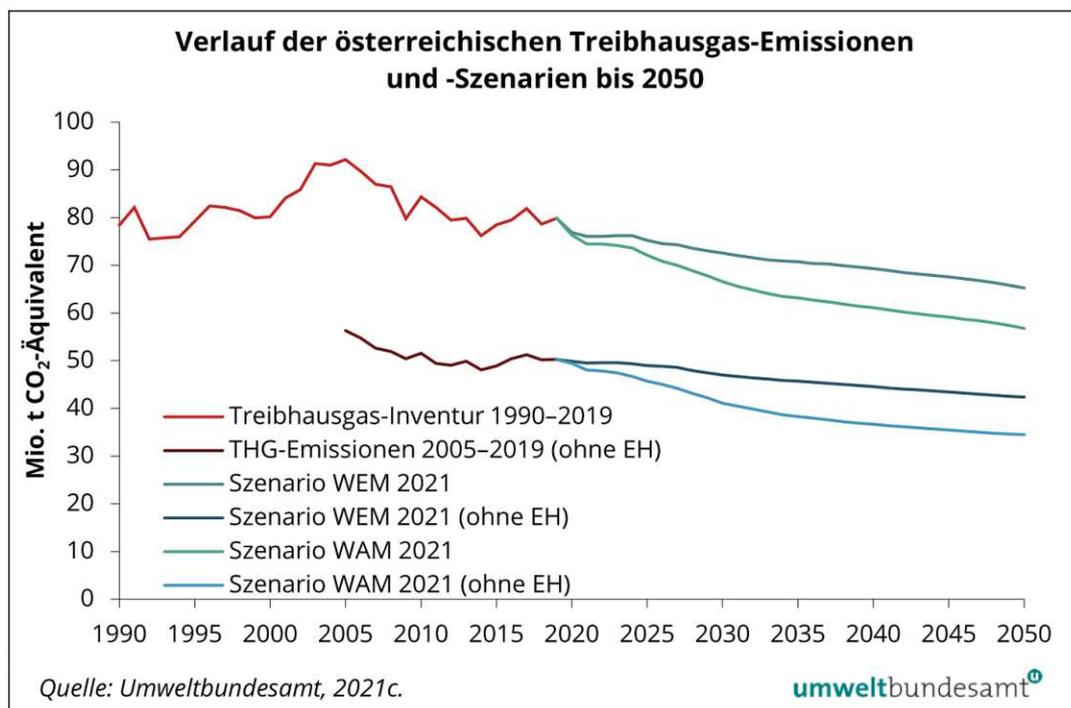


Abb. 1.2: Entwicklung der österreichischen THG-Emissionen und Szenarien mit und ohne Emissionshandel (EH) bis 2050 [2, S. 64]

Die vom Umweltbundesamt erstellten THG-Szenarien für Österreich bieten hinsichtlich der Erreichung der gesetzten Ziele wenig Anlass für Zuversicht. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund aktueller politischer Diskussionen um die Art und Menge der notwendigen weitergehenden Maßnahmen. Klar ist, dass die bisher vereinbarten Ansätze bei weitem nicht ausreichen und die angestrebte Klimaneutralität längerfristig Veränderungen und Optimierungen in allen Sektoren und Branchen erfordern wird. Umso wichtiger erscheint es daher, schnellstmöglich Einsparungspotentiale aufzuzeigen, zu quantifizieren und dafür zu sorgen, dass diese verwirklicht werden können.

Wie groß die Rolle der Baubranche in diesem Zusammenhang ist, wird in Abb. 1.3 deutlich. Die hier dargestellten Zahlen stammen aus einem Bericht der International Energy Agency (IEA) und lassen erkennen, dass etwa 28 % der weltweiten THG-Emissionen durch den Betrieb von Gebäuden verursacht werden, während rund 12 % aus der Bauindustrie bzw. der Herstellung von Baumaterialien stammen. Zudem verursachen Material-, Geräte- und Personentransporte, die mit Bauvorhaben kausal in Verbindung stehen, ebenso THG-Emissionen, die jedoch dem Verkehrssektor zugeordnet werden.

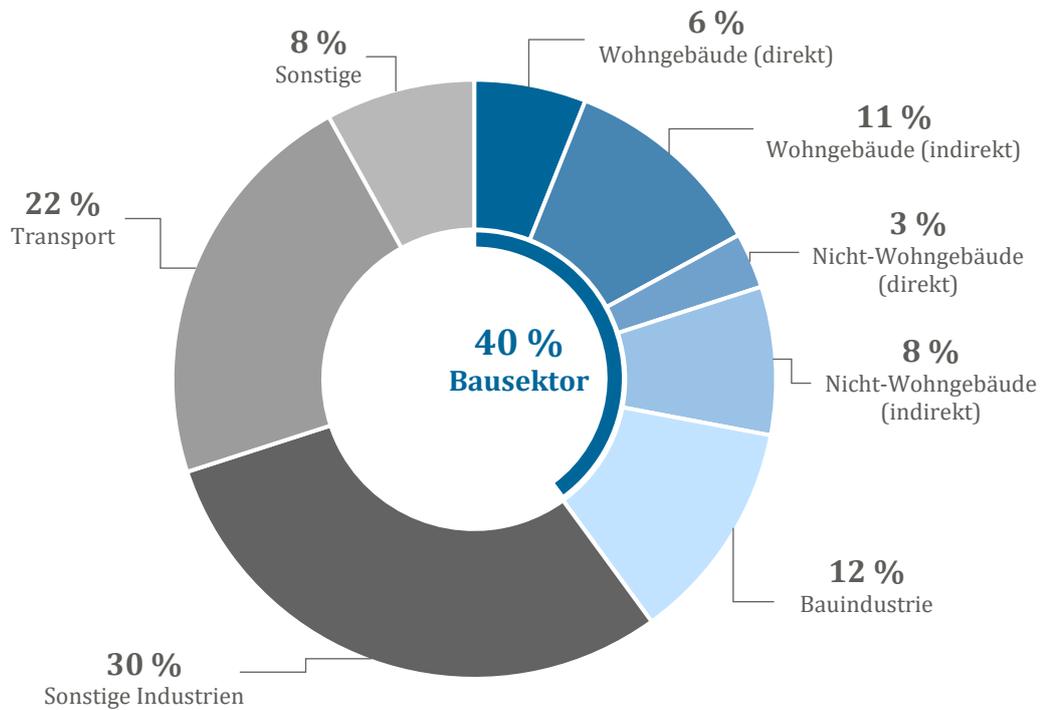


Abb. 1.3: Verteilung der weltweiten THG-Emissionen im Jahr 2021 nach [3]

THG-Emissionen, die ein Gebäude während seines Lebenszyklus verursacht, lassen sich zunächst in zwei Kategorien aufteilen: Der größere Teil entfällt auf direkte und indirekte Emissionen² aus dem Gebäudebetrieb. Diese Emissionen entstehen durch Verbrennungsprozesse, die die Energie für Strom sowie zum Heizen und Kühlen liefern. Die restlichen Emissionen werden auch als graue Emissionen bezeichnet. Sie stammen aus der Herstellungs-, Errichtungs- und Entsorgungsphase sowie jenen Teilen der Nutzungsphase, die nicht direkt mit dem Betrieb in Verbindung stehen (Freisetzung von Stoffen während der Nutzung sowie Reparatur-, Instandhaltungs-, Modernisierungsarbeiten und Austausch von Bauteilen).

Röck untersuchte 2019 den Anteil der grauen Emissionen anhand der Lebenszyklusanalysen (LCA) von 238 Büro- und Wohngebäuden aus unterschiedlichen geografischen und klimatischen Regionen der Welt. Dabei kam er zur Erkenntnis, dass dieser im Durchschnitt bei etwa 20-25 % liegt. Bei energieeffizienter Bauweise steigt der Wert auf 45-50 % und erreicht in Extremfällen sogar 90 %. [4]

² Direkte Emissionen entstehen unmittelbar am Ort der Energieumwandlung, also z. B. durch die Verbrennung von Treibstoff in einem Motor. Indirekte Emissionen hingegen fallen durch vorgelagerte Prozesse an, etwa die Herstellung des Brennstoffes [6].

Durch die fortschreitende Sanierung des Gebäudebestandes und die strengeren Vorgaben bezüglich der Energieeffizienz neuer Gebäude kommt es also zu einer Verschiebung bei den Emissionsanteilen, wodurch graue Emissionen immer mehr in den Vordergrund rücken.

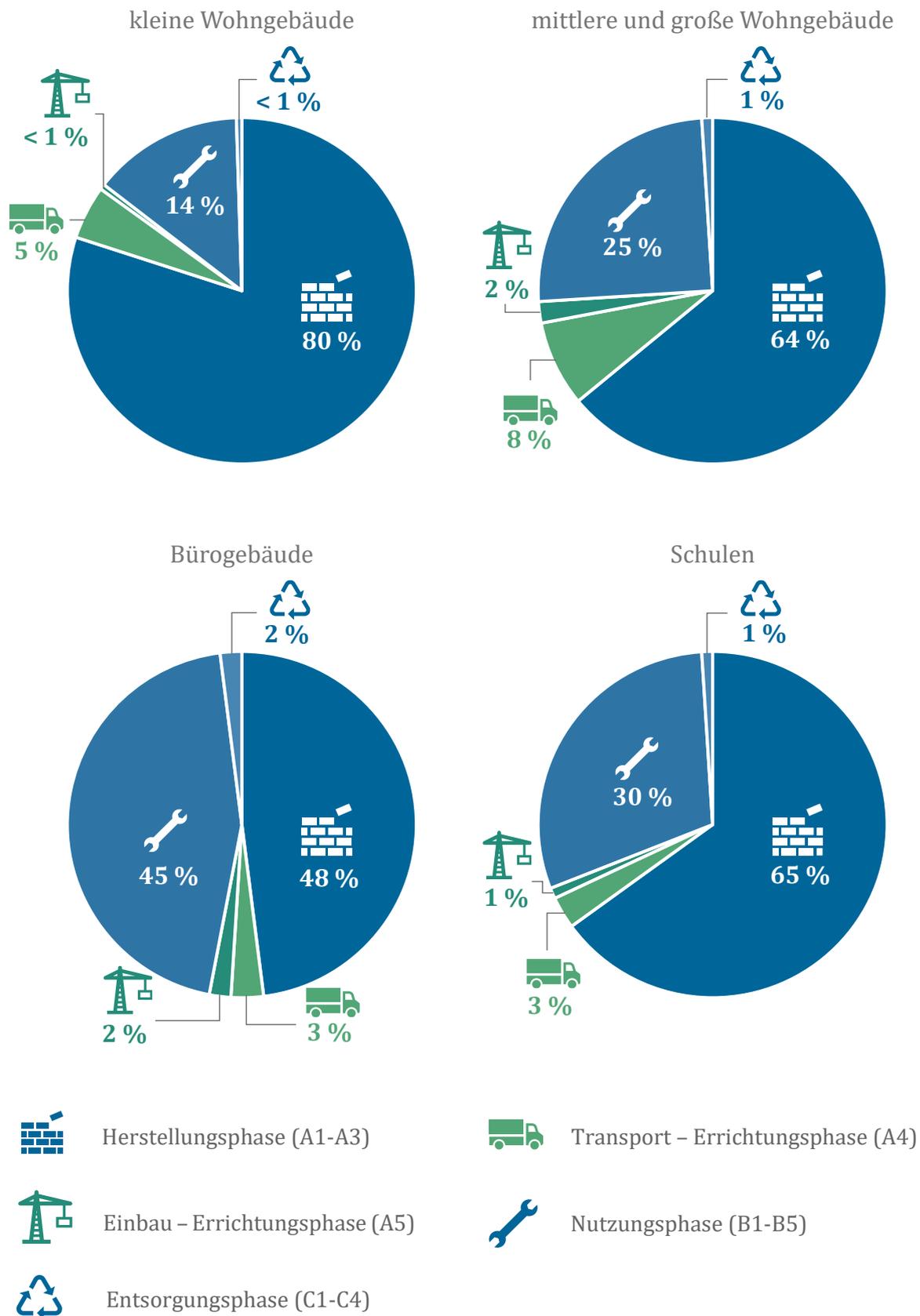


Abb. 1.4: Quellen grauer Emissionen für Gebäude im Vereinigten Königreich nach [5, S. 26 ff]

Abb. 1.4 zeigt eine von der London Energy Transformation Initiative (LETI) erstellte Zusammensetzung der grauen Emissionen verschiedener Gebäudetypen im Vereinigten Königreich. Die Bezeichnungen in Klammern beziehen sich hierbei auf die Module der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen nach ÖNORM EN 15978 (vgl. Kapitel 2.2). Ein Großteil der grauen Emissionen kommt demnach aus der Herstellungs- und Nutzungsphase. Während diese Lebenszyklusphasen meist durch stationäre oder zumindest regelmäßige Teilprozesse gekennzeichnet sind, kann dies über die Errichtungsphase nicht behauptet werden.

Gerade im baubetrieblichen Kontext ist jedoch vor allem die Errichtungsphase, bestehend aus den Modulen A4 und A5 (gemäß ÖNORM EN 15978) interessant. Trotz des geringen Anteils an den Gesamtemissionen können die emittierten Mengen an THG hier stark variieren. Stets wechselnde projektbezogene Rahmenbedingungen verlangen unterschiedliche Lösungsansätze, die sich in einer Vielzahl verschiedener Bauprozesse äußern. Diese Vielfalt an Optionen erschwert die standardisierte Datenerfassung und eine damit einhergehende Quantifizierung der THG-Emissionen.

Es erscheint daher sinnvoll, die in der Errichtungsphase verursachten THG-Emissionen auf der Ebene von einzelnen Bauprozessen zu untersuchen. Auch im Hinblick auf die zukünftige Ausweitung der CO₂-Besteuerung in Österreich und der EU besteht von Seiten ausführender Bauunternehmen Interesse an einer unternehmensinternen Evaluierung der verursachten THG-Emissionen.

1.2 Forschungsfragen

Die in Kapitel 1.1 geäußerten Überlegungen lassen einen Forschungsbedarf erkennen, was den Umfang der THG-Emissionen betrifft, die durch einzelne Bauprozesse in der Errichtungsphase verursacht werden.

Basierend darauf ergeben sich die folgenden zwei Forschungsfragen, denen in der vorliegenden Diplomarbeit nachgegangen wird:

1. Wie groß sind die jeweiligen THG-Emissionen (pro Leistungseinheit), die durch die drei Bauprozesse Baugrubenaushub, Spundwandarbeiten und Betonarbeiten mit Halbfertigteilen in der Errichtungsphase verursacht werden?
2. Welche Parameter beeinflussen die THG-Emissionskennwerte für die Bauprozesse Baugrubenaushub, Spundwandarbeiten und Betonarbeiten mit Halbfertigteilen wesentlich?

1.3 Forschungsmethodik

In diesem Kapitel wird die methodische Vorgehensweise der vorliegenden Diplomarbeit, ausgehend von den in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen erläutert. Abb. 1.5 liefert eine Übersicht über die im Folgenden beschriebenen Abläufe.

Um die Forschungsfragen beantworten zu können, sind umfassende theoretische Kenntnisse erforderlich, die sowohl die Berechnung von THG-Emissionen als auch baubetriebliche Details und Abläufe der einzelnen Bauprozesse betreffen. Aus diesem Grund wird zunächst eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Anhand dieser folgen Erläuterungen zum Konzept der

Lebenszyklusanalyse, der Wahl von Systemgrenzen und den Grundlagen der Berechnung von THG-Emissionen.

Zum Zwecke der beispielhaften Ermittlung von THG-Emissionskennwerten in der Errichtungsphase wurden drei gängige Bauprozesse ausgewählt, die im Rahmen dieser Diplomarbeit vor Ort beobachtet und analysiert wurden:

1. Baugrubenaushub;
2. Spundwandarbeiten;
3. Betonarbeiten mit Halbfertigteilen.

Zu jedem der drei Prozesse wird im jeweiligen Kapitel zuerst anhand der Literaturrecherche gesammeltes Grundwissen vermittelt. Im Anschluss daran folgt jeweils die Auswertung der Daten, die im Rahmen der Feldforschung anhand von drei Untersuchungsobjekten erhoben wurden. Die ausgewählten Bauprozesse wurden hierbei auf den jeweiligen Baustellen über mehrere Wochen bzw. Monate beobachtet und analysiert. Das Ziel war einerseits, die einzelnen Prozesse in der Praxis genauer definieren und eingrenzen zu können, da die Abläufe abhängig von den Gegebenheiten der jeweiligen Baustelle von jenen aus der Theorie abweichen können. Andererseits sollten Daten gesammelt werden, die eine Quantifizierung der THG-Emissionen ermöglichen. Dazu konnten ausführende Unternehmen gefunden werden, die bereit waren, passende Baustellen für die Untersuchungen zur Verfügung zu stellen und die notwendigen Daten zu übermitteln. Die Informationsbeschaffung erfolgte im ersten Schritt durch Beobachtungen, Fotos und Notizen vor Ort sowie durch Gespräche mit den beteiligten Bauleitern, Polieren, Arbeitern und sonstigen Projektbeteiligten. Im zweiten Schritt übermittelten die beteiligten Unternehmen meist nach Fertigstellung des jeweiligen Bauprozesses ihre relevanten Unterlagen in schriftlicher und digitaler Form via E-Mail oder über unternehmenseigene Cloud-Speicher. Die weitere Aufarbeitung der Daten sowie weiterführende Berechnungen erfolgten in Microsoft Excel.

Für die Berechnung der THG-Emissionen der Errichtungsphase werden in erster Linie Verbräuche von Strom, Diesel und anderen Kraftstoffen ermittelt und herangezogen. Diese werden mit den Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes für den entsprechenden Energieträger (vgl. Kapitel 2.4) multipliziert, um die aus ihrer Erzeugung und Verbrennung resultierenden Mengen an THG zu erhalten. Emissionen aus Transportfahrten werden vor allem über fahrzeugspezifische Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes berechnet, die sich auf den Auslastungsgrad der Nutzfahrzeuge beziehen, sodass die Treibstoffverbräuche hier nicht gesondert ermittelt werden müssen.

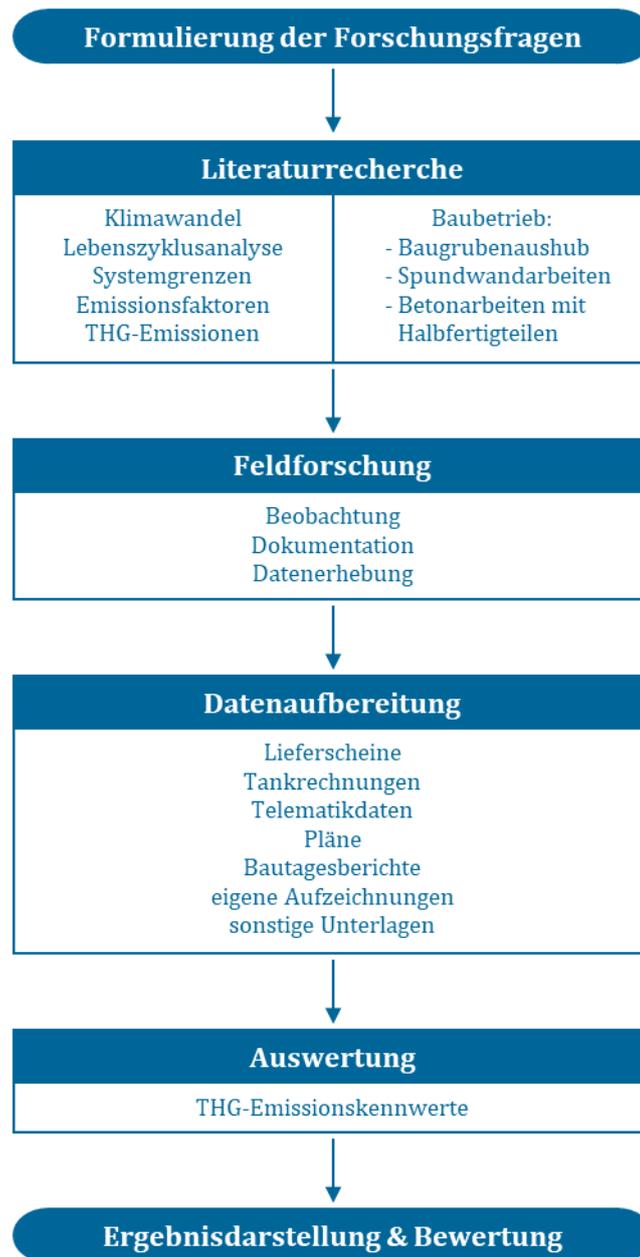


Abb. 1.5: Prozessdiagramm zur Forschungsmethodik

1.4 Forschungsabgrenzung

Wird in dieser Arbeit in weiterer Folge von Emissionen oder CO₂-Emissionen gesprochen, so sind stets THG-Emissionen gemeint. Die synonyme Verwendung der Begriffe ist auf die Maßeinheit „Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalent“ (kg CO₂-eq) zurückzuführen, mit welcher die emittierten Mengen an Treibhausgas angegeben werden.

Das CO₂-Äquivalent beschreibt dabei, wie viel ein Treibhausgas zum Treibhauseffekt beiträgt. Um den Einfluss der verschiedenen Treibhausgase vergleichbar zu machen, werden diese üblicherweise in CO₂-Äquivalente umgerechnet, wodurch Kohlendioxid als Bezugsgröße dient. [6]

Da sich die Untersuchungen in dieser Arbeit auf Bauprozesse der Errichtungsphase beschränken, müssen Systemgrenzen definiert werden, anhand derer eindeutig zugeordnet werden kann, welche Teilprozesse und Tätigkeiten berücksichtigt werden und welche nicht. Aus diesem Grund

wird die Errichtungsphase nach ÖNORM EN 15978 mit den Modulen A4 bis A5 zur Abgrenzung der Prozesse festgelegt. Eine genauere Definition dieser Systemgrenzen im Zusammenhang mit der Lebenszyklusanalyse eines Bauwerks ist in Kapitel 2.2 zu finden.

Die im Rahmen der Feldforschung analysierten Untersuchungsobjekte konnten nicht über den gesamten Zeitraum der jeweiligen Arbeiten vor Ort beobachtet werden. Getroffene Annahmen und Vereinfachungen werden an den jeweiligen Stellen dieser Arbeit als solche benannt und basieren teilweise auf Sachverhalten, die bei den Baustellenbesuchen beobachtet wurden, jedoch nicht zwangsweise dem Regelfall entsprechen.

Die Berechnung der THG-Emissionen erfolgt durch die Ermittlung von Betriebsstoffverbräuchen und im Falle von Modul A4 zum größten Teil über transportierte Massen und zurückgelegte Wegstrecken durch unterschiedliche Fahrzeuge. Als Vereinfachung werden von allen Betriebsstoffen nur der Treibstoff- und Stromverbrauch gewertet, da die Dokumentation der Verbräuche aller weiteren Betriebsstoffe in der Praxis nicht konsistent stattfindet und die Auswirkungen auf das Gesamtergebnis aufgrund der Emissionsfaktoren und geschätzten anfallenden Mengen gering ist (vgl. Kapitel 2.4).

Außerdem fließen nur jene Vorgänge in die Berechnungen ein, die zweifelsfrei und eindeutig dem jeweiligen betrachteten Bauprozess zugeordnet werden können. Wird zum Beispiel ein Turmdrehkran aufgebaut, so wird diese Tätigkeit nicht dem Prozess der Betonarbeiten zugerechnet, da der Kran nicht ausschließlich den Betonarbeiten dient und An- und Abtransport sowie Montage mit dem betreffenden Bauprozess nicht direkt in kausalem Zusammenhang stehen (vgl. Kapitel 5.2).

Durch die vorhandenen Daten (Lieferscheine etc.) ist ersichtlich, dass die meisten Transportfahrten durch Transportunternehmen getätigt wurden. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit fahren die LKWs nach der Anlieferung meist weiter und erledigen weitere Aufträge, um Leerfahrten zu vermeiden. Meist bestand keine Möglichkeit, Informationen über die weiteren Fahrten zu erhalten, weshalb beim Transport der Geräte und Materialien lediglich die Anlieferungen, nicht jedoch mögliche anschließende Leerfahrten berücksichtigt werden. Ebenso gibt es Fälle, etwa beim Transport von Bewehrungsseisen, in denen Stäbe oder Matten für mehrere unterschiedliche Baustellen mit ein und demselben LKW transportiert werden. Somit ist es nicht immer möglich, genau jene Transportkilometer zu ermitteln, die ausschließlich vom betreffenden Bauprozess verursacht werden. Vereinfachend werden für alle drei Bauprozesse all jene Fahrten berücksichtigt und somit dem jeweils untersuchten Bauprozess kausal zugeordnet, die eindeutig und belegbar von oder zu der jeweiligen Baustelle erfolgten. Leerfahrten werden den Prozessen nur angerechnet, sofern dies explizit erwähnt wird.

Reine Personaltransporte zu und von Baustellen verursachen in der Realität THG-Emissionen. In der aktuellen Version der ÖNORM EN 15978 ist die Berücksichtigung dieser bei der Gebäudebewertung jedoch nicht vorgesehen, weshalb auch in der gegenständlichen Arbeit davon abgesehen wird. Das Umlegen von Personaltransporten auf einzelne Bauprozesse wäre in vielen Fällen komplex und zum Zwecke der Berechnung von THG-Emissionskennwerten einzelner Bauprozesse nicht praktikabel.

1.5 Aufbau der Arbeit

Zur Einleitung in diese Diplomarbeit bietet Kapitel 1 einen Überblick rund um die Klimakrise sowie ihre Bedeutung für Österreich und die ganze Welt. Dabei wird kurz auf die Problematik von THG-Emissionen eingegangen und die Rolle der Baubranche in diesem Zusammenhang beleuchtet.

Kapitel 2 befasst sich mit den theoretischen Grundlagen, die zur Bearbeitung der Forschungsfragen notwendig sind. Das Prinzip der Lebenszyklusanalyse und die Systemgrenzen bei der Untersuchung der Bauprozesse werden ebenso erläutert wie die Quellen der Emissionen innerhalb der Prozesse. Die in der Auswertung zum Einsatz kommenden Emissionsfaktoren für die Berechnung der THG-Emissionen werden festgelegt und erklärt.

Im Anschluss daran folgen drei Kapitel, welche sich je einem der untersuchten Bauprozesse widmen. Kapitel 3 behandelt den Baugrubenaushub, Kapitel 4 die Spundwandarbeiten und Kapitel 5 die Betonarbeiten mit Halbfertigteilen. Hierbei wird im jeweils ersten Unterkapitel baubetriebliches Hintergrundwissen zum entsprechenden Bauprozess vermittelt. Danach werden mithilfe der an Untersuchungsobjekten im Rahmen der Feldforschung gesammelten Daten THG-Emissionen errechnet und entsprechende Ergebnisse präsentiert.

In Kapitel 6 werden all diese Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und diskutiert. Anhand der erarbeiteten Erkenntnisse können abschließend die Forschungsfragen beantwortet und Handlungsempfehlungen sowie ein Ausblick für zukünftige Forschungen gegeben werden.

2 Grundlagen

Um THG-Emissionskennwerte für einzelne Bauprozesse ermitteln zu können, müssen zunächst die theoretischen Grundlagen erörtert werden, auf denen alle Berechnungen in dieser Arbeit basieren. In diesem Kapitel werden daher wesentliche Methoden und Werkzeuge vorgestellt, Hintergründe erklärt und Festlegungen getroffen.

2.1 Lebenszyklusanalyse

Im Folgenden werden die Definition des Begriffs Lebenszyklusanalyse sowie die dabei übliche Vorgangsweise nach ÖNORM EN ISO 14040 erläutert:

Life Cycle Assessment (LCA), auf Deutsch Lebenszyklusanalyse oder auch Ökobilanz genannt, ist eine Methode zur Erfassung und Berücksichtigung der Umweltauswirkungen von Produkten oder Dienstleistungen. Sie liefert Entscheidungsträgern relevante Informationen über die Umwelteigenschaften und Verbesserungspotenziale in allen Phasen des Lebenszyklus. Eine LCA-Studie bezieht sich also auf Umweltaspekte und mögliche Umweltwirkungen von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung bis hin zum Recycling bzw. der Entsorgung eines Produktes.

Das Vorgehen bei einer LCA-Studie gliedert sich üblicherweise in vier Schritte:

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen;
2. Sachbilanz;
3. Wirkungsabschätzung;
4. Auswertung.

Der Untersuchungsrahmen beinhaltet die gewählte Systemgrenze und den Detaillierungsgrad. Er hängt vom Ziel bzw. vom Verwendungszweck der Studie ab. Bei einer Sachbilanz werden alle relevanten Daten zur Erfassung von Input und Output des untersuchten Systems gesammelt. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden durch die Wirkungsabschätzung mit zusätzlichen Informationen ergänzt, um ein besseres Verständnis für deren Umweltrelevanz zu erhalten. In der Auswertung werden die Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung im Kontext der Zielsetzung der Studie und des Untersuchungsrahmens diskutiert.

Die aus einer LCA-Studie gewonnenen Erkenntnisse können als Basis für Entscheidungen dienen, müssen aber stets im Kontext der zugrunde liegenden Rahmenbedingungen betrachtet werden. Ergebnisse mehrerer LCA-Studien sind nur miteinander vergleichbar, sofern die getroffenen Annahmen, Festlegungen und Zielsetzungen kompatibel sind. [7]

2.2 Systemgrenzen

Wie im einleitenden Kapitel bereits erklärt wurde, sollen im Rahmen dieser Arbeit THG-Emissionen aus einzelnen Prozessen in der Errichtungsphase von Gebäuden untersucht werden. Die Beschränkung auf einen Abschnitt des Lebenszyklus bedeutet auch, dass die Schnittstellen zu anderen Lebenszyklusphasen genau festgelegt werden müssen.

Hierzu werden die bereits erwähnten Systemgrenzen nach der ÖNORM EN 15978 definiert. Diese liefert eine Methodik zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Je nachdem zu welchem Zweck diese Bewertung durchgeführt wird, können nur Teile des Lebenszyklus oder des Bauwerks selbst betrachtet werden. Die Festlegung von Systemgrenzen ist wichtig, um die zu berücksichtigenden Prozesse genau bestimmen und dokumentieren zu können. [8]

Abb. 2.1 zeigt dazu eine modulare Gliederung der Informationen für die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes, wie sie in ÖNORM EN 15978 definiert ist. Diese Arbeit beschränken sich auf die Untersuchung der Errichtungsphase.

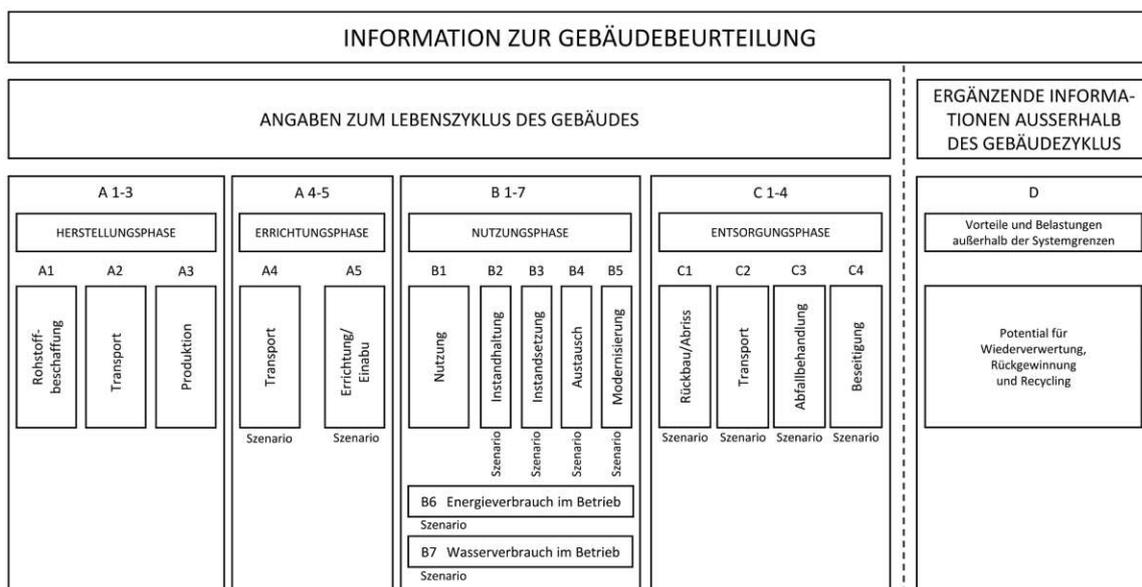


Abb. 2.1: Modulare Informationen für die verschiedenen Phasen der Gebäudebewertung nach [8, S. 23]

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die in Abb. 2.1 dargestellten Lebenszyklusphasen mit ihren untergeordneten Modulen genauer erläutert.

2.2.1 Herstellungsphase

Die Module A1 bis A3 bilden die Herstellungsphase aller Baustoffe, Bauprodukte, Komponenten und Dienstleistungen ab, die bei der Errichtung des Gebäudes zum Einsatz kommen. Dazu zählt neben der Rohstoffgewinnung und dem eigentlichen Herstellungsprozess auch der Transport zum Ort der Herstellung.

2.2.2 Errichtungsphase

Die Errichtungsphase gliedert sich in die Module A4 und A5. Sie umfasst die Prozesse ab Werk bis zur Fertigstellung des Bauwerks, wobei A4 alle Transporte zum und vom Standort umfasst, während A5 die Prozesse und Tätigkeiten vor Ort beinhaltet. Zu A4 zählen neben dem Transport von

Bauprodukten und Baustoffen bis zur Baustelle auch deren Zwischenlagerung und Verteilung sowie Transportfahrten, die von der Baustelle ausgehen. Der Transport von Baugeräten zum und vom Standort wird in A4 ebenfalls berücksichtigt. Außerdem umfasst das Modul alle Auswirkungen, die durch transportbedingte Verluste entstehen.

Der Personentransport zum und vom betrachteten Standort wird nicht in die Bewertung aufgenommen.

Modul A5 enthält:

- Erdarbeiten und Freiflächenplanung;
- die Lagerung von Bauprodukten und Baustoffen;
- Transporte innerhalb des Standorts;
- Behelfsarbeiten (inklusive jener, die für den Bau benötigt werden, aber nicht vor Ort stattfinden);
- die Herstellung/Verarbeitung/Montage von Produkten vor Ort;
- jegliche Art von Heizung, Kühlung, Luftfeuchteregelung usw. während des Baus;
- der Einbau von Produkten inkl. solcher, die nicht in der Umweltproduktdeklaration (EPD) der Produkte berücksichtigt sind, in das Gebäude;
- Wassereinsatz;
- Abfallmanagementprozesse auf der Baustelle erzeugter Abfälle;
- Herstellung, Transport und Entsorgung/Beseitigung von Produkten und Materialien, die während der Errichtungsphase als Abfall anfallen.

2.2.3 Nutzungsphase

Mithilfe der Module B1 bis B8 kann die Nutzungsphase des Bauwerks erfasst werden. B1 enthält dabei jene Auswirkungen, die durch die Nutzung des Gebäudes und seiner Bestandteile verursacht werden. Dazu zählen etwa Stoffe, die aus innen- oder außenliegenden Oberflächen wie Fassaden, Bodenbelägen etc. freigesetzt werden.

Die Prozesse der Instandhaltung des Bauwerks, also der Bausubstanz, aller gebäudeinterner technischer Systeme und sonstiger Komponenten finden sich in Modul B2 wieder. Dazu zählen die Gebäudereinigung ebenso wie etwa jährliche Inspektionen oder die Herstellung und der Transport aller für die Instandhaltung notwendigen Produkte und Stoffe.

Modul B3 enthält alle Instandsetzungs- und Reparaturprozesse während der Nutzung des Gebäudes. Damit sind Produktion und Transport instandgesetzter Bestandteile des Gebäudes (inklusive Materialverluste), der Prozess des Einbaus selbst und schlussendlich auch die Entsorgung der entfernten Teile gemeint. Analog zu den Reparaturprozessen in B3, werden dem Modul B4 die Prozesse für den Austausch von Bauteilkomponenten und dem Modul B5 die Prozesse einer Modernisierung, also eine Änderung an Bausubstanz, Raumeinteilung oder technischen Anlagen zugeordnet.

Die Auswirkungen des Energieeinsatzes für den Gebäudebetrieb finden sich im Modul B6. Diese umfassen den Energieeinsatz von Heizung, Kühlung, Lüftung, Be- und Entfeuchtung, Warmwasseraufbereitung, Beleuchtung, Personentransport und sonstigen technischen Anlagen und Diensten.

Das Modul B7 beinhaltet den Wassereinsatz für den Gebäudebetrieb. Das gesamte verbrauchte Wasser und dessen Behandlung wird über die Zeit der Nutzung betrachtet. Zusätzlich wird beim Modul B7 differenziert zwischen Wasser, das durch gebäudeinterne Systeme genutzt wird (Trinkwasser, Haushaltswarmwasser etc.) und solchem, das durch nicht gebäudeinterne Systeme genutzt wird (Geschirrspüler, Waschmaschine etc.).

2.2.4 Entsorgungsphase

Wenn das Ende der Nutzungsdauer eines Gebäudes erreicht ist und keine zukünftige Nutzung geplant ist, beginnt die Entsorgungsphase, die durch die Module C1 bis C4 beschrieben wird. Modul C1 beschreibt die Prozesse des Rückbaus, also all jene Tätigkeiten, die von der Außerbetriebnahme des Gebäudes bis zum Rückbau, der Zerlegung und dem Abriss stattfinden.

Der Transport der Materialien bis zu dem Punkt, an dem das Ende des Abfallstatus vorliegt, wird in C2 abgebildet. Zwischengeschaltete Lager- oder Verarbeitungsstätten werden hier ebenfalls mitberücksichtigt.

Zu Modul C3 gehört die Abfallbehandlung mit dem Ziel der Wiederverwendung, Rückgewinnung oder dem Recycling. Sämtliche Materialien, Produkte oder Bauelemente, die in der Entsorgungsphase anfallen und das Gebäude verlassen, werden zunächst als Abfall angesehen. Das ändert sich jedoch, wenn sie:

- für bestimmte Zwecke verwendbar sind;
- einen wirtschaftlichen Wert haben (es also einen Markt dafür gibt);
- technische Anforderungen sowie Gesetze und Normen, die für den jeweiligen Zweck gelten, erfüllen;
- durch ihre Verwendung keine negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und Umwelt haben.

Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, so wird der Abfall beseitigt. Die Beseitigung inklusive der dabei entstehenden Emissionen und der Auswirkungen aller notwendigen Abfallbehandlungsprozesse, wird in Modul C4 zusammengefasst.

2.2.5 Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze

Schließlich werden im Modul D umweltbezogene Vorteile und Belastungen eingeordnet, die sich außerhalb der Systemgrenze des Gebäudelebenszyklus befinden. Diese können sich durch Wiederverwendung, Recycling und Energierückgewinnung ergeben. [8]

2.3 Quellen von THG-Emissionen in der Errichtungsphase

Nachdem in Kapitel 2.2.2 definiert wurde, welche Prozesse den Modulen A4 und A5 in der Errichtungsphase zuzuordnen sind, wird nun ein genauerer Blick auf die Emissionsquellen für Treibhausgase innerhalb dieser Prozesse geworfen.

Treibhausgase fallen in Bauprozessen der Errichtungsphase vor allem beim Verbrauch von Betriebsstoffen durch Transport- und Baugeräte an. Zu den Betriebsstoffen gehören in erster Linie Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren, Strom, aber auch Reduktionsmittel, Schmierstoffe und

weitere Stoffe. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden daher einige dieser gegenwärtig und zukünftig für den Baubetrieb wesentlichen THG-Quellen genauer erklärt.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich die durch den Verbrauch von Betriebsstoffen entstehenden Gesamtemissionen im Allgemeinen aus direkten und indirekten Emissionen zusammensetzen und in dieser Arbeit zur Gänze dem jeweiligen Prozess zugeschrieben werden, durch den der Betriebsstoffverbrauch verursacht wird. Als direkte Emissionen werden solche bezeichnet, die vor Ort, etwa durch die Verbrennung von Treibstoff in der Antriebseinheit eines Gerätes entstehen. Indirekte Emissionen entstehen hingegen durch vorgelagerte Prozesse, etwa die Herstellung des verbrauchten Betriebsstoffes. [6]

2.3.1 Verbrennungsmotoren

Eine Vielzahl an aktuellen Transport- und Baugeräten wird mit Verbrennungsmotoren betrieben. Die Vorteile dieser Technologie liegen darin, dass sie seit Langem bewährt ist, die Verbrennungskraftstoffe eine hohe Energiedichte haben und die Geräte dadurch sehr mobil sein können. Als Alternative zu fossilen Brennstoffen können heutzutage in modernen Verbrennungsmotoren Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen eingesetzt werden. Traditionell kann zwischen Diesel-, Benzin- und Zweitaktmotoren unterschieden werden. Während Benzinmotoren in Baugeräten nur selten eingesetzt werden und Zweitaktmotoren meist nur bei Kleingeräten Anwendung finden, stellen Dieselmotoren die wohl gängigste Antriebsart bei Baugeräten dar. Im Vergleich zu den anderen Verbrennungsantrieben sind sie schwerer, aber auch robuster, da sie bei niedrigen Drehzahlen größere Drehmomente erzeugen. Sie werden meist in größeren Geräten eingesetzt, bei denen eine hohe und kontinuierliche Leistungsabgabe benötigt wird. Ein großer Nachteil von Dieselmotoren ist das verursachte Abgas, welches gereinigt und gefiltert werden muss. [9]

Reduktionsmittel:

Bei der Verbrennung von kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffen enthalten die Abgase Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2), Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) sowie die durch unvollständige Verbrennung auftretenden Produkte Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x) und Partikel. Um die gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte einzuhalten, werden im Falle der Stickoxide viele dieselbetriebene Fahrzeuge und einige Baumaschinen mit Selective Catalytic Reduction (SCR) Systemen ausgestattet. Durch diese werden Stickoxide (NO_x) mithilfe von Ammoniak (NH_3) zu Wasser (H_2O) und Stickstoff (N_2) umgewandelt. Das Ammoniak als Reduktionsmittel wird dazu in Form einer Harnstoff-Wasserlösung (in Europa unter dem Handelsnamen AdBlue® bekannt) in einen eigenen Tank gefüllt und kontinuierlich in den Abgasstrang gespritzt. [10]

Biogene Kraftstoffe:

Bereits heute existieren zahlreiche Arten von erneuerbaren Kraftstoffen, die durch teilweise oder vollständige Substitution fossiler Energieträger einen wichtigen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten. Seit fast zwei Jahrzehnten wird in Österreich Biodiesel zu Diesel und Bioethanol zu Benzin beigemischt. Im baubetrieblichen Kontext spielen aufgrund der hohen verbrauchten Mengen vor allem Alternativen zu Diesel eine wichtige Rolle. Rechnerisch entstehen bei der Verbrennung von biogenen Kraftstoffen keine direkten CO_2 -Emissionen, da im Allgemeinen vereinfachend

angenommen wird, dass die Biomasse, aus der der Kraftstoff hergestellt wurde, genauso viel CO₂ gespeichert hat, wie verbrannt wird. Indirekte Emissionen, etwa durch Anbau, Transporte und Umwandlungsvorgänge müssen trotzdem berücksichtigt werden. Ein mögliches Problem mit dieser Art der Kraftstoffe ist, dass der Anbau der Biomasse oft in Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung steht und sich die Schaffung neuer Anbauflächen negativ auf die CO₂-Bilanz auswirken kann. [11]

Wie in Kapitel 3.2 erläutert wird, kam im Rahmen von Untersuchungsobjekt 1 bei den meisten Geräten hydriertes Pflanzenöl (HVO, englisch hydrotreated vegetable oil) zum Einsatz, weshalb an dieser Stelle genauer auf diesen Kraftstoff eingegangen werden soll.

HVO ist ein Biokraftstoff, der Großteiles auf Pflanzenölen basiert, die durch die Zugabe von Wasserstoff zu hydrierten Pflanzenölen werden. Als Rohstoffe werden Raps, Palmöl, Soja, Altspeiseöl, aber auch tierische Fette und Abwässer aus der Palmölproduktion verwendet. [11]

Die Eigenschaften des hydrierten Pflanzenöls sind jenen von Diesel sehr ähnlich. HVO kann als purer Kraftstoff („HVO100“ = 100% hydrotreated vegetable oil) verwendet oder im Raffinerieprozess bei der Dieselherstellung in beliebigen Mengen beigemischt werden. Es zeichnet sich durch eine gute Motorverträglichkeit aus und kann in den meisten herkömmlichen Dieselmotoren ohne weitere Umbaumaßnahmen eingesetzt werden. Durch den geringen Aromatengehalt emittieren mit HVO100-Kraftstoff betriebene Motoren weniger Treibhausgas und andere Schadstoffe als mit Diesel. [12]

Synthetische Kraftstoffe:

Die im allgemeinen Sprachgebrauch als Electrofuels (E-Fuels) bekannten synthetischen Kraftstoffe basieren alle auf der Gewinnung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom und Wasser mittels Elektrolyse. Aus Wasserstoff und CO₂ werden im nächsten Schritt Methan oder langkettige Kohlenwasserstoffe erzeugt und anschließend zu hochwertigen Kraftstoffen veredelt. Diese können ohne weitere Anpassungsmaßnahmen in bestehenden Verbrennungsmotoren eingesetzt werden und weisen deutlich geringere Luftschadstoffemissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen auf. Um jedoch als klimaneutrale Alternative zu fossilen Kraftstoffen zu funktionieren, müssten die hohen erforderlichen Mengen an Strom erneuerbar erzeugt werden. Doch selbst dann ist die Gesamteffizienz eines mit synthetischem Kraftstoff betriebenen Fahrzeugs geringer als bei rein elektrischen Fahrzeugen. Vorteile würden sich dann ergeben, wenn die großen benötigten CO₂-Mengen aus erneuerbaren biogenen Quellen oder der Atmosphäre bezogen werden könnten. Aufgrund des hohen Energiebedarfs können E-Fuels noch nicht in ausreichendem Maße sinnvoll hergestellt werden. Die Haupteinsatzgebiete werden in Zukunft wohl in jenen Bereichen liegen, in denen Geräte schwer elektrifizierbar sind, also etwa in der Hochseeschifffahrt oder bei Langstreckenflügen. [13]

Im Hinblick auf die mögliche zukünftige Einführung von CO₂-Flottenzielwerten in der EU könnten E-Fuels auch bei der Dekarbonisierung von Baumaschinen eine wichtige Rolle spielen [14].

2.3.2 Schmierstoffe

Schmierstoffe werden als Trennmittel an gegeneinander in Bewegung stehenden Körpern eingesetzt. Sie sollen den Verschleiß von Maschinen und einzelnen Bauteilen mindern, indem sie den

direkten Kontakt zwischen zwei Flächen verhindern. Außerdem können sie der Kühlung und Abdichtung sowie dem Korrosionsschutz und der Verringerung von Laufgeräuschen dienen. [15]

Im Baubetrieb kommen Schmierstoffe vor allem als Motor-, Hydraulik- und Getriebeöle sowie Schmierfette zum Einsatz. Ihr Einsatz und Verbrauch bei verschiedenen Bauprozessen verursacht indirekte THG-Emissionen, die auf die Herstellung und den Vertrieb der Produkte zurückzuführen sind. Schmierstoffe werden heute vor allem aus Mineralöl oder synthetisch durch chemische Prozesse hergestellt und mithilfe von Additiven in ihren Eigenschaften verbessert. [16]

2.3.3 Wasserstoffantriebe

Wasserstoff ist eine wichtige Alternative zu fossilen Kraftstoffen und wird in Zukunft vermehrt in Nutzfahrzeugen und Baumaschinen zum Einsatz kommen [9].

Er besitzt eine sehr hohe massebezogene Energiedichte (1,0 kg enthält so viel Energie wie 2,8 kg Benzin), muss jedoch aufgrund der geringen Dichte entweder unter hohem Druck komprimiert oder bei -253 °C verflüssigt werden, um sinnvoll als Kraftstoff für mobile Anwendungen gespeichert werden zu können. Wasserstoff kommt in der Natur nur in gebundener Form (etwa in Wasser oder Kohlenwasserstoffverbindungen) vor und muss daher für technische Anwendungen zuerst unter hohem Energieeinsatz gewonnen werden. Der Einsatz als Kraftstoff erfolgt entweder in Wasserstoffverbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen. Wasserstoffverbrennungsmotoren funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie herkömmliche Benzinmotoren, emittieren jedoch nur Wasserstoff und Stickoxide. Bei der Brennstoffzellentechnologie oxidiert der Wasserstoff mit Sauerstoff und erzeugt dabei lediglich Strom und Wasserdampf. Der Strom wird dann über einen kleinen Pufferakkumulator für den Antrieb eines Elektromotors verwendet. [17]

Um das Potenzial der Wasserstofftechnologie im Hinblick auf die Verringerung von THG-Emissionen voll auszuschöpfen, muss der hohe Energiebedarf bei der Herstellung durch erneuerbare Energiequellen gedeckt werden [18].

2.3.4 Elektroantriebe

Elektroantriebe werden im Baubetrieb vorwiegend für stationäre Baugeräte wie Krane oder Mischanlagen eingesetzt und über das öffentliche Stromnetz mit Energie versorgt. Neben dieser kabelgebundenen Art der Stromversorgung bieten die Hersteller immer öfter auch Geräte mit Akkuantrieben an. Bei Kleingeräten wie Schraubendrehern ist dies bereits seit vielen Jahren verbreitet. Durch Fortschritte in der Akkutechnologie in den letzten Jahren sind heute fast alle Kleingeräte auch in akkubetriebenen Varianten verfügbar. Im innerstädtischen Bereich können auch LKWs bereits vollelektrisch betrieben werden. Einzelne Hersteller bringen inzwischen auch größere vollelektrische Baugeräte wie etwa Bagger, Radlader oder Dumper auf den Markt. [9]

Die Höhe der THG-Emissionen, die durch die Erzeugung von Strom verursacht werden, hängt von der Zusammensetzung der Energieträger ab. Dabei ist der Anteil an fossilen Energieträgern wesentlich. Abb. 2.2 zeigt die Anteile verschiedener Energieträger an der österreichischen Stromerzeugung für das Jahr 2020. Die mehr als 69 TWh an produziertem Strom stammten zu rund 80 % aus erneuerbaren Quellen, während der Rest auf der Verbrennung fossiler Rohstoffe stammt.

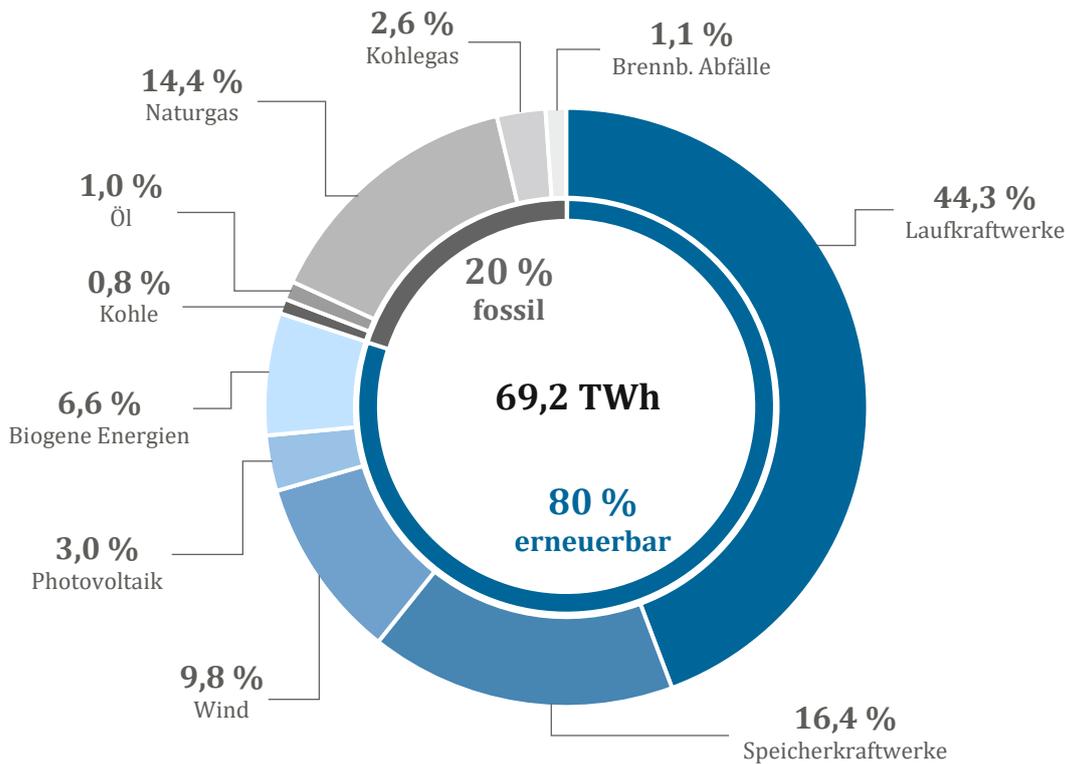


Abb. 2.2: Bruttostromerzeugung in Österreich 2020 nach [19, S. 16]

Doch bei der Zusammensetzung der Energieträger muss beachtet werden, dass nicht der gesamte in Österreich verbrauchte Strom aus dem Inland stammt. Im Jahr 2016 lag das Verhältnis zwischen im Inland erzeugtem Strom und Stromimporten bei 72 % zu 28 %. Bei Berechnungen von THG-Emissionen muss daher stets darauf geachtet werden, welches Bilanzierungsverfahren diesen zugrunde liegt. Das Umweltbundesamt empfiehlt, für Bilanzierung der THG-Emissionen von Strom, die österreichische Stromaufbringung heranzuziehen. Diese umfasst sowohl die inländische Stromerzeugung als auch Stromimporte aus dem Ausland. [20]

2.4 Emissionsfaktoren

Der Einfluss verschiedener THG-Quellen kann mithilfe sogenannter Emissionsfaktoren quantifiziert werden. Diese werden in der Regel durch einen Gesamtwert für die Emissionen angegeben, der sich wiederum aus direkten und indirekten Emissionen zusammensetzt. Als Einheit wird das CO₂-Äquivalent auf den jeweiligen Betriebsstoffverbrauch oder wie im Falle von Tab. 2.2 auf den Auslastungsgrad in Tonnenkilometern (tkm) bezogen.

Der mit Abstand größte Teil der THG-Emissionen ist bei den drei Untersuchungsobjekten auf den Verbrauch von Diesel zurückzuführen. In Österreich müssen nach der Kraftstoffverordnung (KVO), bezogen auf den Energiegehalt insgesamt 5,75 % der fossilen Kraftstoffe durch biogene Kraftstoffe substituiert werden [11]. Die Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes in Tab. 2.1 berücksichtigen beim Energieträger Diesel einen energetischen Anteil an Biokraftstoff von 5,5 % (Stand 2020) [6]. Für den verbrauchten Strom kommt der Emissionsfaktor für die österreichische Stromaufbringung zur Anwendung.

Tab. 2.1: Emissionsfaktoren für Diesel und Strom nach [6]

Energieträger	Emissionsfaktor CO ₂ -Äquivalent		
	direkte Emission	indirekte Emission	gesamt
Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil)	2,493 kg/l	0,642 kg/l	3,134 kg/l
Stromaufbringung Österreich	-	-	0,202 kg/kWh

Die Daten für die direkten Emissionen werden dabei vom Umweltbundesamt im Rahmen der Österreichischen Luftschadstoff-Inventur (OLI) nach den standardisierten Richtlinien des International Governmental Panel on Climate Change (IPCC) sowie dem European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP)/European Environment Agency (EEA) Handbuch erhoben. Die Informationen zu indirekten Emissionen stammen aus dem Globalen Emissions-Modell integrierter Systeme für Österreich (GEMIS-Österreich). Dieses computergestützte Modell wurde vom deutschen Öko-Institut entwickelt und durch das Umweltbundesamt an Österreich angepasst. Es ermöglicht die Berechnung produktbezogener Umweltauswirkungen und hilft bei der Erstellung von Energie- und Emissionsbilanzen. [6]

Da für Nutzfahrzeuge oftmals keine genauen Angaben über den Dieserverbrauch in Litern verfügbar sind und die Verbräuche je nach Beladung variieren können, werden in diesen Fällen Emissionsfaktoren herangezogen, die sich auf den Auslastungsgrad der jeweiligen Fahrzeuge beziehen. Tab. 2.2 zeigt diese Emissionsfaktoren, die vom Umweltbundesamtes für verschiedene Arten von LKWs angegeben werden. Unterschieden werden dabei leichte Nutzfahrzeuge (LNF), schwere Nutzfahrzeuge (SNF) unterschiedlicher Gewichtskategorien sowie Sattelzüge.

Die THG-Emissionen einer jeden Transportfahrt können damit nach folgendem Schema berechnet werden:

$$\text{Tonnenkilometer} = \text{transportierte Masse} * \text{Strecke}$$

$$\text{Treibhausgasemission} = \text{Tonnenkilometer} * \text{Emissionsfaktor}$$

Tab. 2.2: Emissionsfaktoren dieselbetriebener Fahrzeuge bezogen auf Tonnenkilometer nach [21]

Energieträger	Emissionsfaktor CO ₂ -Äquivalent		
	direkte Emission	indirekte Emission	gesamt
LKW LNF (< 3,5 t)	644,1 g/tkm	288,4 g/tkm	932,5 g/tkm
LKW SNF (< 18 t)	293,5 g/tkm	86,6 g/tkm	380,0 g/tkm
LKW SNF (> 18 t)	111,8 g/tkm	37,5 g/tkm	149,3 g/tkm
Sattelzüge (40 t)	51,7 g/tkm	16,9 g/tkm	68,7 g/tkm

Der Reduktionsmittelverbrauch wird in der Literatur als Prozentsatz des Kraftstoffverbrauchs angegeben und variiert somit in Abhängigkeit von der Intensität, mit der ein Motor betrieben wird. Ein weiterer Einflussfaktor ist die eingesetzte Technologie der Abgasnachbehandlung. Bei Baumaschinen mit Dieselpartikelfilter und SCR-System kann der Verbrauch mit 2-4 % des Kraftstoffverbrauchs angenommen werden, während Geräte, die lediglich über ein SCR-System verfügen einen Verbrauch von etwa 4-8 % aufweisen. [16]

Bei Nutzfahrzeugen liegt der Verbrauch im Bereich von etwa 4-6 % des Dieserverbrauchs [22]. Die indirekten Emissionen durch den Verbrauch von AdBlue® können mit etwa 0,6 kg CO₂-eq je Liter angenommen werden und stammen vor allem aus der Ammoniakproduktion [23].

Im Rahmen der Feldforschung stellte sich heraus, dass in der Praxis zwar viele dieselbetriebene Nutzfahrzeuge und auch einige Baumaschinen mit SCR-Systemen ausgestattet sind, die tatsächlichen Reduktionsmittelverbräuche jedoch meist unzureichend dokumentiert werden. Vereinfachend wird in dieser Arbeit der Einfluss des Reduktionsmittelverbrauchs auf die THG-Emissionen aufgrund der verhältnismäßig geringen Mengen vernachlässigt.

Ähnlich verhält es sich mit dem Einfluss der Schmierstoffe. Hier kann für verschiedene Baumaschinen je nach Bauart ein mittlerer Schmierstoffverbrauch zwischen 0,0009 l/kWh und 0,0017 l/kWh angenommen werden [16]. Als Emissionsfaktor könnten 1,213 kg CO₂-eq je kg angesetzt werden [24]. Auch hier standen keine zuverlässigen Verbrauchsangaben zur Verfügung, weshalb die aus Schmierstoffen resultierenden THG-Emissionen ebenfalls vernachlässigt werden.

Bei der Erforschung des Baugrubenaushubs an Untersuchungsobjekt 1 in Kapitel 3.2 kam zu einem großen Teil HVO100-Kraftstoff statt Diesel zum Einsatz. Der Kraftstoffverbrauch von Dieselmotoren, die mit reinem HVO betrieben werden, weicht nach Literaturangaben nur geringfügig vom standardmäßigen Dieserverbrauch ab [12]. Die Angaben zu Emissionsfaktoren für HVO100 variieren je nach Zusammensetzung der Primärrohstoffe. Um einen praktikablen Emissionsfaktor zu erhalten, werden Daten aus der Datenbank „Elektronischer Nachhaltigkeitsnachweis“ (eINA) herangezogen. Diese wird vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) finanziert und vom Umweltbundesamt betrieben.

Demnach kann für HVO100 mit einem Emissionsfaktor von 20,42 g CO₂-eq/MJ gerechnet werden [11]. Die Multiplikation dieses Wertes mit dem volumenspezifischen Energiegehalt von hydriertem Pflanzenöl von 34 MJ/l laut Anhang IX der KVO ergibt den Emissionsfaktor für HVO100 zu rund 0,694 kg/l.

3 Baugrubenaushub

Der erste Bauprozess, der hinsichtlich seiner THG-Emissionen untersucht wird, ist der Baugrubenaushub. Um die hierfür spezifischen Arbeitsabläufe sowie die zum Einsatz kommenden Geräte besser zu verstehen, werden in Kapitel 3.1 zuerst die notwendigen theoretischen Hintergründe erläutert. Kapitel 3.2 behandelt anschließend das Untersuchungsobjekt, aus dem Daten gesammelt und Ergebnisse abgeleitet werden konnten.

3.1 Baugrubenaushub – Übersicht

Die Herstellung von Baugruben wird in der Regel im Vorfeld genau geplant. Bevor mit den eigentlichen Aushubmaßnahmen begonnen werden kann, muss ein Baustelleneinrichtungsplan vorliegen, welcher den Baustellenverkehr, Versorgungsanschlüsse, Baucontainer bzw. Gebäude, Lagerplätze, freizuhaltende Bereiche und zu schützende Pflanzen, Stromleitungen und Ähnliches definiert. Das Baugelände muss für Bautransporte erschlossen sein, eher mit der Entfernung des Aufwuchses begonnen wird. Der Aushub selbst beginnt mit dem Abtragen des Mutterbodens. Dieser wird üblicherweise mit Baggern abgeschoben und zur späteren Verwendung für die Gestaltung von Grünflächen beiseitegelegt. Die Zwischenlagerung erfolgt in länglichen, locker aufgeschütteten Haufen, die nach Bedarf feuchtzuhalten sind. [25]

Ist der Mutterboden abgetragen, so kann der weitere Aushub vorangetrieben werden. Um spätere Setzungen zu vermeiden, soll die Baugrubensohle im Bereich der geplanten Gründungsflächen vor dem Auflockern geschützt werden, indem eine Schicht von etwa 10 bis 15 cm belassen werden, die erst unmittelbar vor den Gründungsarbeiten entfernt wird. Die Wände von Baugruben sind zu sichern, um die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Baugrube, aber auch möglicher umliegender Bauwerke und Einbauten zu gewährleisten. Am einfachsten erfolgt das durch eine Abböschung der Baugrube, sofern es die Platzverhältnisse auf dem Baufeld zulassen. Der notwendige Böschungswinkel ist von den Bodeneigenschaften, der Baugrubentiefe, möglichen Erschütterungen und Belastungen sowie von der Zeit und dem damit verbundenen Ausmaß an Witterungseinflüssen abhängig. Ist eine Abböschung nicht möglich, muss die Baugrube verbaut werden. [25]

Hierfür gibt es heute eine Vielzahl an System und Methoden, deren Vor- und Nachteile situationsbedingt abzuwägen sind, um die geeignetste Lösung zu finden. An dieser Stelle sei nur auf Spundwände als eine der häufigsten Verbauarten hingewiesen, deren Herstellung in Kapitel 4 als eigener Bauprozess hinsichtlich der verursachten THG-Emissionen untersucht wird.

3.1.1 Wasserhaltung

In Baugruben einsickerndes Wasser muss gegebenenfalls abgeleitet oder herausgepumpt werden. Hierzu können in der Baugrubensohle sogenannte Pumpsümpfe, also Schächte bis etwa einen Meter unter die tiefste Fundamentsohle gegraben werden. Das anfallende Wasser kann dann über Dränleitungen oder Gräben zu diesen geleitet und anschließend abgepumpt werden. Liegt der Grundwasserspiegel deutlich über der Baugrubensohle, so ist zur Trockenlegung der Baugrube

meist eine Grundwasserabsenkung notwendig. Diese funktioniert, indem Sauglanzen oder Brunnen rund um die Baugrube platziert und bis unter die Baugrubensohle geführt werden. Die Grundwasserhaltung muss so lange in Betrieb bleiben, bis alle betroffenen Bauwerksteile abgedichtet und nicht mehr durch Auftrieb gefährdet sind. [25]

3.1.2 Erdbaugeräte

Erdarbeiten bestehen im Allgemeinen aus den Teilvorgängen Lösen, Laden, Fördern, Einbauen und Verdichten, bei denen jeweils unterschiedliche Geräte und Verfahren zum Einsatz kommen können. Im Folgenden werden nur jene Gerätearten vorgestellt, die bei Untersuchungsobjekt 1 tatsächlich Verwendung fanden.

Hydraulikbagger:

Eine der am öftesten eingesetzten Erdbaumaschinen ist der Hydraulikbagger. Dieser setzt sich aus Unter- und Oberwagen zusammen. Der Unterwagen trägt dabei das Fahrwerk, welches mit Rädern (Mobilbagger) oder Ketten (Raupebagger) ausgestattet sein kann. Der Oberwagen ist drehbar auf dem Unterwagen gelagert und enthält die Antriebseinheit (meist Dieselmotor, seltener Elektroantrieb), den Ausleger, die Hydraulikanlage, Ballast sowie die Steuerkabine. [26]

Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen Hydraulikbagger mit unterschiedlichen Ausführungsarten des Unterwagens und deren Bestandteile.

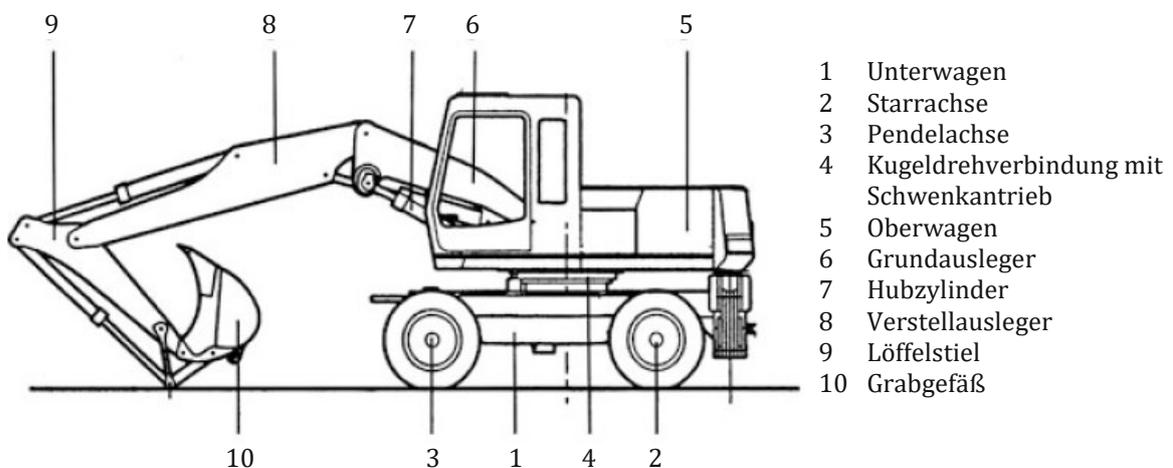


Abb. 3.1: Aufbau eines Mobilbaggers [27, S. 98]

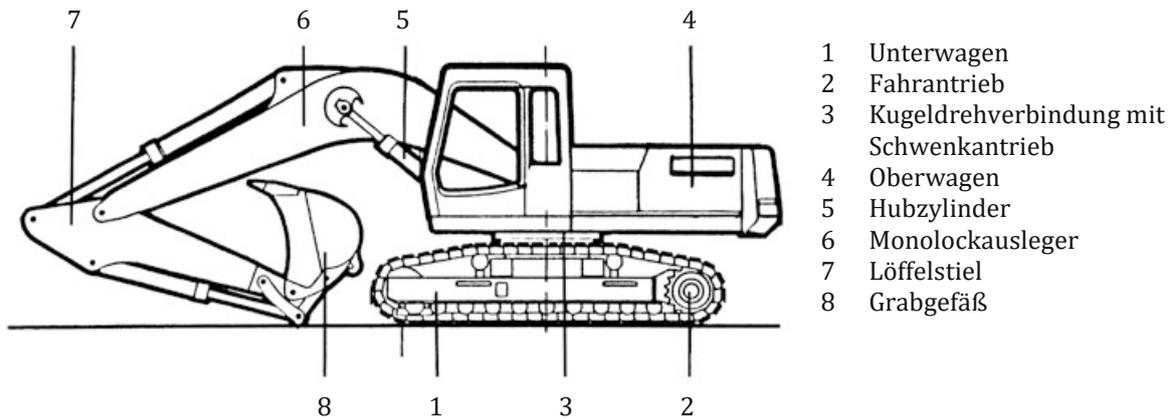


Abb. 3.2: Aufbau eines Raupenbaggers [27, S. 99]

Je nach Größe und Einsatzbereich des Baggers kann die Auslegerform variieren. Als Grabgefäße kommen eine Vielzahl an Löffel- und Greifertypen in Frage. Moderne Bagger besitzen meist mehrere Grabgefäße, die mit einer Schnellwechseinrichtung von der Fahrerkabine aus getauscht werden können. Zwei häufige Arten von Grabgefäßen sind der Tieflöffel und die Klappschaufel. Tieflöffel eignen sich besonders zum Baggern aus der Tiefe, während Klappschaufeln beim Baggern vor Wänden zum Einsatz kommen. Letztere bestehen aus zwei Teilen, die während des Füllvorgangs geschlossen sind und sich beim Entleeren nach unten hin öffnen. Um beim Laden einen wirtschaftlichen Ablauf gewährleisten zu können, ist es wichtig, die Anzahl und Größe der Geräte, ausgehend von der Baggerleistung so aufeinander abzustimmen, dass der Ladebetrieb möglichst kontinuierlich vonstattengeht. Die Baggerleistung hängt im Wesentlichen vom Auflockerungsfaktor des Aushubmaterials, dem Füllungsgrad des Grabgefäßes, der Ladezeit und der LKW-Wechselzeit ab. [27]

Hydraulikbagger können über das Lösen und Laden hinaus für zahlreiche weitere Arbeiten eingesetzt werden. Sie können beispielsweise durch das Anschlagen von Lasten am Tieflöffel temporär oder mithilfe eines eigenen Lasthakens längerfristig als Hebezeuge genutzt werden. Zahlreiche verfügbare Anbau- und Zusatzgeräte ermöglichen Hydraulikbaggern das Verdichten, Schneiden, Fräsen, Vibrieren und weitere Vorgänge. [27]

Muldenkipper:

Nach dem Lösen und Laden des Aushubmaterials wird dieses in der Regel gefördert, also an einen anderen Ort bewegt. Die Art der hierbei zum Einsatz kommenden Fahrzeuge ist von Transportleistung, Länge der Fahrstrecke und dem Gelände abhängig. Am häufigsten werden jedoch mit Dieselmotoren betriebene Muldenkipper verwendet. Unterschieden werden drei Typen: Muldenkipper mit starrem Rahmen, mit Knicklenkung (Dumper) sowie Schwerlast-Muldenkipper. Letztere werden vor allem im Tagebau oder bei sehr großen Erdbaulosen eingesetzt. In Abb. 3.3 ist ein Muldenkipper mit starrem Rahmen zu sehen. Diese sind auf Baustellen am öftesten anzutreffen und bestehen aus einem LKW-Fahrgestell mit einer nach hinten kippbaren Stahlmulde. Sie besitzen eine Zulassung für den Straßenverkehr und sind somit nicht nur auf die Baustelle beschränkt. Bei Muldenkippern mit Knicklenkung sind Vorder- und Hinterwagen durch ein Dreh- und Kippgelenk miteinander verbunden, wodurch diese Fahrzeuge auch im unwegsamen Gelände

eingesetzt werden können. Ihr Einsatz beschränkt sich jedoch auf die Baustelle bzw. das Betriebsgelände. [27]



Abb. 3.3: 3-Achs-LKW-Muldenkipper [28]

Planierraupen:

Planierraupen sind meist dieselbetriebene Geräte, die zum Abtragen, Planieren, Abschieben und Hinterfüllen von Bodenmaterial verwendet werden. Sie bestehen aus einem Raupengrundgerät und auf der Vorder- bzw. Rückseite montierter, hydraulisch steuerbarer Arbeitsausrüstung. Je nach Anwendungsgebiet können vorne unterschiedliche Arten von Planierschildern und Schubrahmen befestigt sein, während an der Rückseite häufig Heckaufreißer zur Auflockerung von Böden zu finden sind. [27]

Eine genauere Übersicht über den Aufbau einer Planierraupe ist in Abb. 3.4 zu sehen.

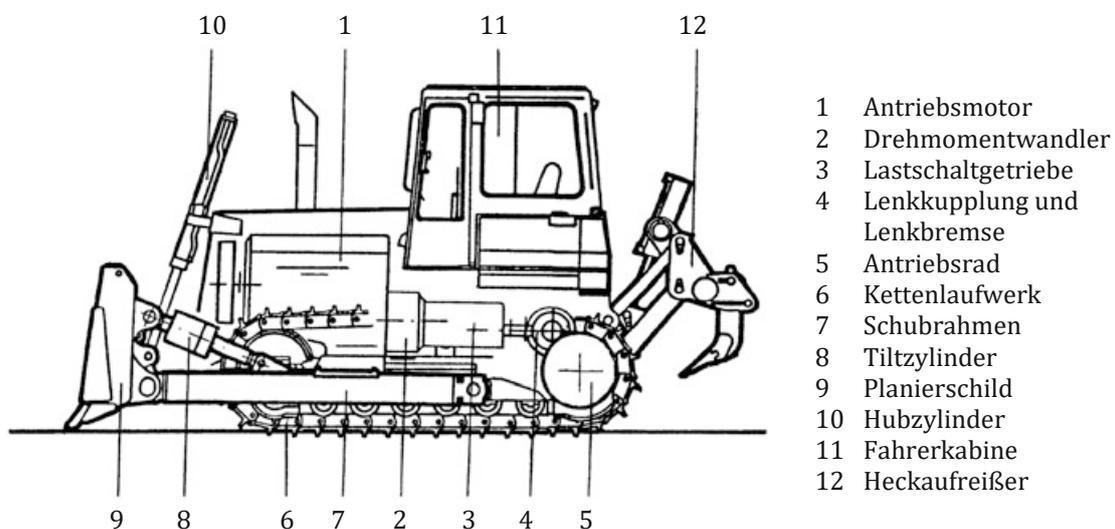


Abb. 3.4: Aufbau einer Planierraupe [27, S. 153]

Walzen:

Bei der Verdichtung von Böden wird die Lagerungsdichte des Untergrundes mithilfe von Verdichtungsgeräten erhöht. Die heutzutage gängige dynamische Verdichtung kann dabei je nach Anwendungsgebiet und Größe der zu verdichtenden Fläche mit Vibrationsstampfern, Vibrationsplatten oder unterschiedlichen Arten von Walzen durchgeführt werden. Bei größeren Verdichtungsarbeiten kommen oft Walzenzüge wie in Abb. 3.5 dargestellt, zum Einsatz. Diese werden üblicherweise von Dieselmotoren betrieben und bestehen aus einem Vorderwagen mit Vibrationsbandage und einem Hinterwagen mit Antriebseinheit und Fahrerkabine. Die Verdichtung erfolgt bei Vibrationswalzen über ein rotierendes Unwuchtsystem in der Bandage, welches Schwingungen und Schläge auf den Boden überträgt. Diese verursachen Umlagerungen im Korngerüst, durch die die Porenräume im Boden verringert werden. So können spätere Verformungen und Setzungen im Boden vorweggenommen werden. [27]

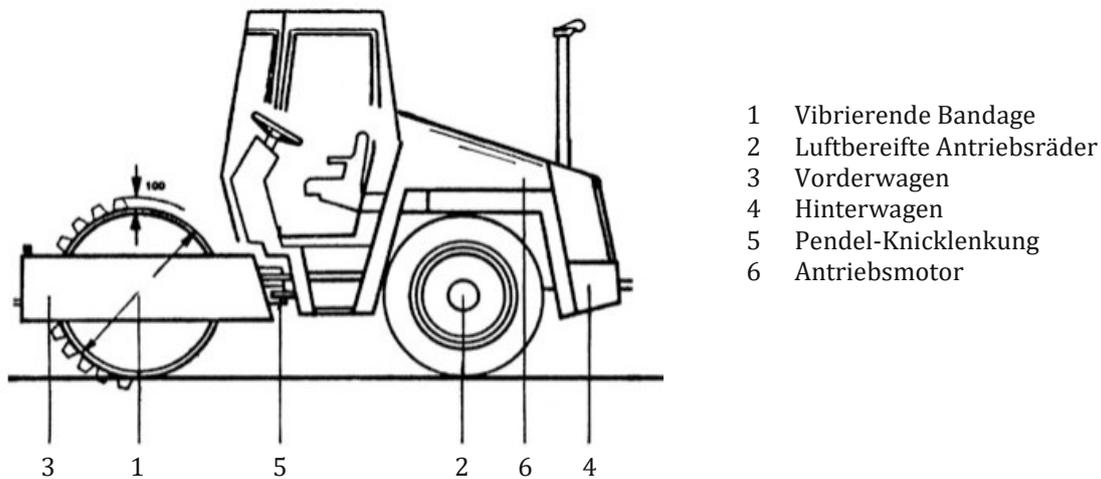


Abb. 3.5: Aufbau eines Walzenzugs [27, S. 208]

3.2 Untersuchungsobjekt 1 – Baugrubenaushub

Das Untersuchungsobjekt, anhand dessen der Prozess des Baugrubenaushubes im Hinblick auf seine THG-Emissionen untersucht werden soll, ist eine etwa 75 km nördlich von Wien gelegene Baugrube mit einer Fläche von ca. 8.000 m² und einem Volumen von rund 27.700 m³. Laut Planung soll auf dem Baufeld ein Gebäude für Weinproduktion und -präsentation errichtet werden. Aufgrund der großzügigen Platzverhältnisse und der Standfestigkeit des Bodens wurde als Baugrubenumschließung kein Verbau, sondern lediglich eine Böschung gewählt. Maßnahmen zur Wasserhaltung wurden mangels Notwendigkeit nicht ausgeführt. Da es sich bei dem vorhandenen Untergrund um einen fruchtbaren Lössboden handelt, konnte ein Großteil des Aushubmaterials an einem nahegelegenen Ort zur Herstellung eines neuen Weingartens genutzt werden, statt auf eine weiter entfernte Deponie transportiert zu werden, wie es üblicherweise der Fall wäre. Der Rest wurde als Hinterfüllmaterial direkt auf dem Baufeld zwischengelagert.

Eine weitere Besonderheit des Untersuchungsobjekts bestand darin, dass die Eigengeräte des für die Erdarbeiten beauftragten Unternehmens fast vollständig mit HVO100 als Kraftstoff betrieben wurden. Lediglich ein Teil der Muldenkipper (Fremdgeräte) sowie einige der LKWs beim An- und Abtransport der Erdbaugeräte wurden mit Diesel betrieben.

Abb. 3.6 liefert eine Übersicht über alle Teilvorgänge des Baugrubenaushubs und ihre Zuordnung zu den Modulen der Errichtungsphase nach ÖNORM EN 15978.

Der eigentliche Aushub der Baugrube, also das Lösen und Aufladen des Bodenmaterials, erfolgte durch einen Hydraulikbagger. Zu diesem Teilprozess a) sind Daten in guter Qualität vorhanden, weshalb er gesondert betrachtet wird. Der THG-Emissionskennwert, der in diesem Kapitel ermittelt wird, bezieht sich lediglich auf diesen Teilprozess und umfasst neben dem Einsatz des Baggers auf der Baustelle (Modul A5) auch seinen An- und Abtransport zu bzw. von dieser (Modul A4).

Die restlichen Teilvorgänge sind in Abb. 3.6 grau hinterlegt und werden fortan als Teilprozess b) bezeichnet. Mit ihnen kann kein „sauberer“ THG-Emissionskennwert ermittelt werden. Das bedeutet, dass sich die aus diesen Teilvorgängen resultierenden Emissionen nicht ausschließlich auf die Errichtungsphase beschränken und nicht eindeutig den Modulen der ÖNORM EN 15978 zugeordnet werden können. Grund dafür ist die Datenlage zum Treibstoffverbrauch der hierbei eingesetzten Geräte. Trotzdem werden die durch das Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie die Herstellung der Fundamentvertiefungen insgesamt entstandenen Emissionen in Unterkapitel 3.2.4 berechnet und zu den Emissionen aus den Teilvorgängen Lösen und Aufladen addiert, um einen besseren Überblick über die Gesamtemissionen des Untersuchungsobjektes zu ermöglichen.

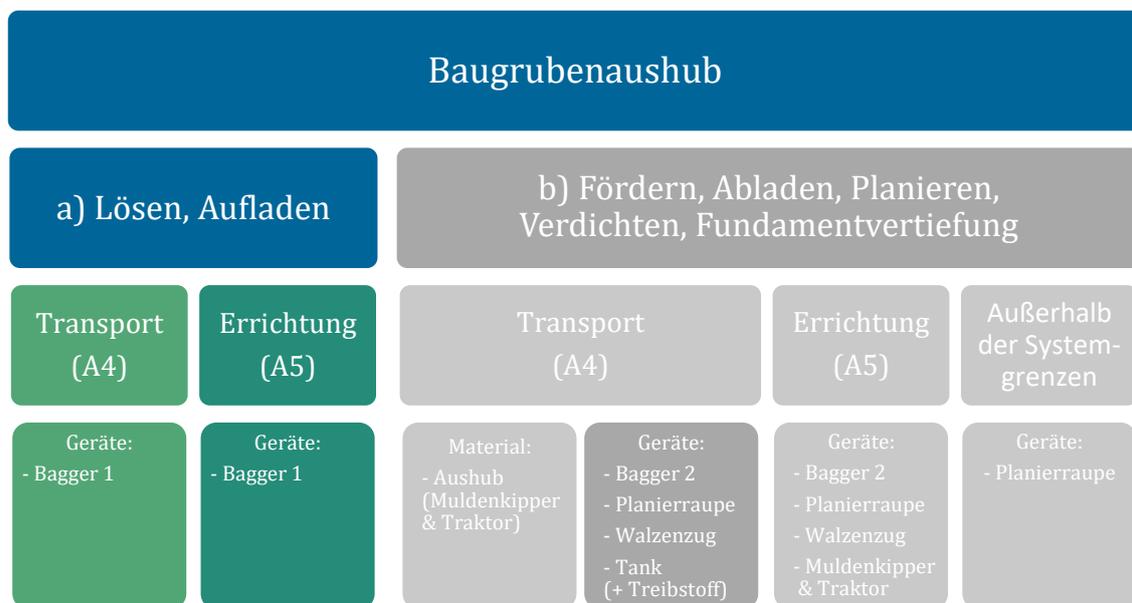


Abb. 3.6: Übersicht – Baugrubenaushub

Da der Betrieb von Baugeräten mit HVO100 zum gegenwärtigen Zeitpunkt keineswegs den Regelfall darstellt und der in Unterkapitel 3.2.3 berechnete THG-Emissionskennwert für den reinen Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger folglich wenig repräsentativ ist, wird in Unterkapitel 3.2.5 ein fiktives Szenario desselben Prozesses mit ausschließlichem Deseleinsatz berechnet. Im Anschluss daran werden in Unterkapitel 3.2.6 (analog zu Unterkapitel 3.2.4) die Emissionen durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie die Herstellung der Fundamentvertiefungen unter Annahme eines reinen Dieselbetriebs hinzugezogen, um einen Überblick über die Gesamtemissionen der untersuchten Baugrube zu gewähren.

3.2.1 Transportbedingte Emissionen bei Teilprozess a) (Modul A4)

Das für den Aushub eingesetzte Gerät war ein Raupenbagger mit Tiefflöfel und einer Höchstleistung von 202 kW. Seine Anlieferung und der Abtransport nach Beendigung der Arbeiten fanden mittels dieselbetriebener LKWs der Kategorie SNF (> 18 t) statt. Aus der Transportstrecke, dem Gewicht des Geräts und dem zugehörigen Emissionsfaktor ergeben sich die THG-Emissionen für den Transport wie in Tab. 3.1 dargestellt. Für die Ermittlung der Transportstrecke standen keine Lieferscheine zur Verfügung, weshalb die Entfernung beim Unternehmen nachgefragt und anhand dieser Informationen abgeschätzt wurde. Mögliche mit diesem Transport in Verbindung stehende Leerfahrten werden nicht berücksichtigt, da sie nicht eindeutig dem untersuchten Bauprozess zuzuordnen sind.

Tab. 3.1: THG-Emissionen durch den Gerätetransport für den Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger – Emissionsfaktor nach [21]

Fahrzeug	Emissionsfaktor gesamt	Tonnenkilometer	THG-Emissionen
LKW SNF (> 18t)	149,3 g/tkm	3.685 tkm	550 kg CO ₂ -eq
			550 kg CO₂-eq

3.2.2 Emissionen des Aushubs bei Teilprozess a) (Modul A5) – Betrieb mit HVO100

Die Emissionen des Moduls A5 stammen aus dem Einsatz des Hydraulikbaggers beim Lösen und Aufladen des Aushubmaterials. Der Kraftstoffverbrauch des Gerätes wurde hierbei durch ein Telematiksystem aufgezeichnet und die Aufzeichnungen durch das ausführende Unternehmen zur Verfügung gestellt. Die Herstellung der Baugrube dauerte demnach insgesamt etwa zwei Monate. Der Bagger war in diesem Zeitraum rund 252 h im Einsatz, von denen er etwa 188 h tatsächlich in Betrieb war und ca. 64 h im Leerlauf verbrachte. Der HVO100-Verbrauch betrug in Summe 8.187 l.

Wie in Tab. 3.2 ersichtlich wird, ergeben sich die THG-Emissionen von Modul A5 durch Multiplikation des HVO100-Verbrauchs mit dem entsprechenden Emissionsfaktor.

Tab. 3.2: THG-Emissionen durch den Geräteeinsatz beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger (Modul A5) – Emissionsfaktor nach [11]

Energieträger	Emissionsfaktor gesamt	Verbrauch	THG-Emission
HVO100	0,694 kg/l	8.187 l	5.682 kg CO ₂ -eq
			5.682 kg CO₂-eq

3.2.3 Emissionen der Errichtungsphase bei Teilprozess a) (Modul A4-A5)

Die in den zwei vorangegangenen Unterkapiteln berechneten THG-Emissionen ergeben in Summe rund 6,2 t CO₂-eq. Der jeweilige Anteil von Modul A4 und A5 an den Gesamtemissionen der Errichtungsphase beim Aushub mittels Hydraulikbagger wird in Abb. 3.7 aufgeschlüsselt.

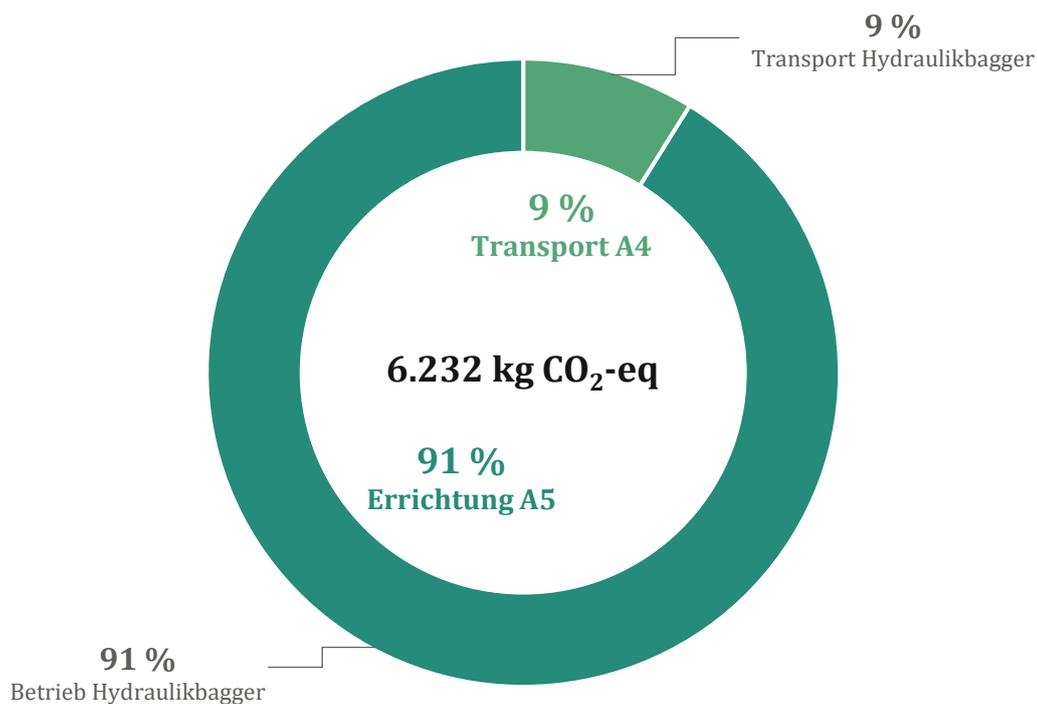


Abb. 3.7: Verteilung der THG-Emissionen beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger

Der überwiegende Teil der Emissionen entsteht durch den Einsatz des Hydraulikbaggers und entfällt somit auf das Modul A5, während der Transport nur etwa 9 % ausmacht. Bezogen auf das Aushubvolumen des ungelösten Bodens von rund 27.700 m³ ergibt sich ein THG-Emissionskennwert von 0,225 kg CO₂-eq/m³.

3.2.4 Gesamtemissionen aus den Teilprozessen a) und b) (Modul A4-A5 und Anteile außerhalb der Systemgrenzen)

Das Fördern und Abladen des Aushubmaterials wurde mit mehreren Muldenkippern und einem Traktor durchgeführt. Gemäß der Definition der Systemgrenzen in ÖNORM EN 15978 (vgl. Unterkapitel 2.2.2) sind Transporte innerhalb des Standorts, also jene von der Baugrube zum Zwischenlager dem Modul A5 zuzurechnen. Der Transport des Materials von der Baugrube zum Ort der Verwertung fällt unter Modul A4. Da für die mittels Telematiksystem gemessenen Kraftstoffverbräuche von Diesel und HVO100 jedoch nur Gesamtwerte vorliegen und die Verbräuche nicht den jeweiligen Wegstrecken zugeordnet werden können, ist eine Aufteilung der Emissionen auf die Module nach ÖNORM EN 15978 hier nicht möglich.

Weitere eingesetzte Geräte waren ein zweiter Hydraulikbagger, der nur zeitweise zur Herstellung von Fundamentvertiefungen verwendet wurde, sowie eine Planierraupe und ein Walzenzug. Der Einsatz dieser Erdbaugeräte vor Ort wird Modul A5 zugeschrieben, während ihr An- und Abtransport zu bzw. von der Baustelle zum Modul A4 gezählt wird. Beim Geräteeinsatz ist wiederum nur ein Gesamtwert für den HVO100-Verbrauch vorhanden, weshalb eine Aufteilung der Emissionen auf die jeweiligen Teilvorgänge bzw. Geräte nicht möglich ist. Die Planierraupe wurde außerdem nicht nur zur Herstellung des Feinplanums in der Baugrube, sondern auch zur Schaffung des neuen Weingartens genutzt. Die durch den Einbau des Aushubmaterials am Verwertungsort entstandenen Emissionen befinden sich außerhalb der Systemgrenzen.

Anlieferung und Abtransport von Bagger 2, Planierraupe und Walzenzug werden in Tab. 3.3 analog zu Unterkapitel 3.2.1 über die geschätzten Transportstrecken, das jeweilige Gerätegewicht und den Emissionsfaktor für dieselbetriebene LKWs der Kategorie SNF (> 18 t) berücksichtigt. Für die Anlieferung der insgesamt rund 12 t HVO100-Kraftstoff sowie den An- und Abtransport eines etwa 2,7 t schweren stationären HVO100-Tanks mit rund 10.000 l Fassungsvermögen wird der Emissionsfaktor für LKW der Kategorie SNF (< 18 t) zugrunde gelegt. Die Entfernungen werden analog zu Unterkapitel 3.2.1 abgeschätzt. Bei den Werten aus Tab. 3.3 finden mögliche Leerfahrten keine Berücksichtigung.

Tab. 3.3: THG-Emissionen durch den Transport von Bagger 2, Planierraupe, Walzenzug, Treibstofftank und Treibstoff – Emissionsfaktor nach [21]

Fahrzeug	Emissionsfaktor gesamt	Tonnenkilometer	THG-Emissionen
LKW SNF (< 18t)	380,0 g/tkm	3.097 tkm	1.177 kg CO ₂ -eq
LKW SNF (> 18t)	149,3 g/tkm	6.893 tkm	1.029 kg CO ₂ -eq
			2.206 kg CO₂-eq

Die Kraftstoffverbräuche aus den Teilvorgängen Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie durch die Herstellung von Fundamentvertiefungen sind in Tab. 3.4 dargestellt.

Der HVO100-Verbrauch der „restlichen Baugeräte“ ergibt sich hierbei aus dem Gesamtvolumen des zur Verfügung gestellten HVO100 (laut Angaben des ausführenden Unternehmens) abzüglich der durch das Telematiksystem erfassten Verbräuche der Nutzfahrzeuge.

Tab. 3.4: Kraftstoffverbrauch durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie Herstellung von Fundamentvertiefungen

Quelle	Modul	Kraftstoff	Verbrauch
Muldenkipper	A4	Diesel	2.451 l
			2.451 l
Muldenkipper + Traktor	A4	HVO100	4.089 l
restliche Erdbaugeräte	A5	HVO100	2.709 l
			6.798 l

Tab. 3.5 zeigt die aus diesen volumetrischen Verbrauchsangaben mithilfe der in Kapitel 2.4 angeführten Emissionsfaktoren für Diesel mit einem Biokraftstoffanteil von 5,5 % (energetisch) und HVO100 abgeleiteten THG-Emissionen. Sie umfassen auch die Leerfahrten der Muldenkipper vom Verwertungsort bzw. vom Zwischenlager zurück zur Baugrube, da diese in der Messung des Kraftstoffverbrauchs erfasst wurden und kausal in direktem Zusammenhang mit dem untersuchten Prozess stehen.

Tab. 3.5: THG-Emissionen durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie Herstellung von Fundamentvertiefungen – Emissionsfaktoren nach [6] und [11]

Energieträger	Emissionsfaktor gesamt	Verbrauch	THG-Emission
Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil)	3,134 kg/l	2.451 l	7.681 kg CO ₂ -eq
HVO100	0,694 kg/l	6.798 l	4.718 kg CO ₂ -eq
			12.399 kg CO₂-eq

In Abb. 3.8 wird ersichtlich, dass sich durch die Herstellung der Baugrube bei Untersuchungsobjekt 1 in Summe rund 20,8 t CO₂-eq ergeben, wovon etwa ein Drittel auf die reinen Aushubarbeiten entfällt. Die restlichen ca. 14,6 t CO₂-eq stammen aus den weiteren Teilvorgängen, die für die Herstellung der Baugrube notwendig sind, können jedoch nicht genauer nach den Modulen der ÖNORM EN 15978 eingeteilt werden.

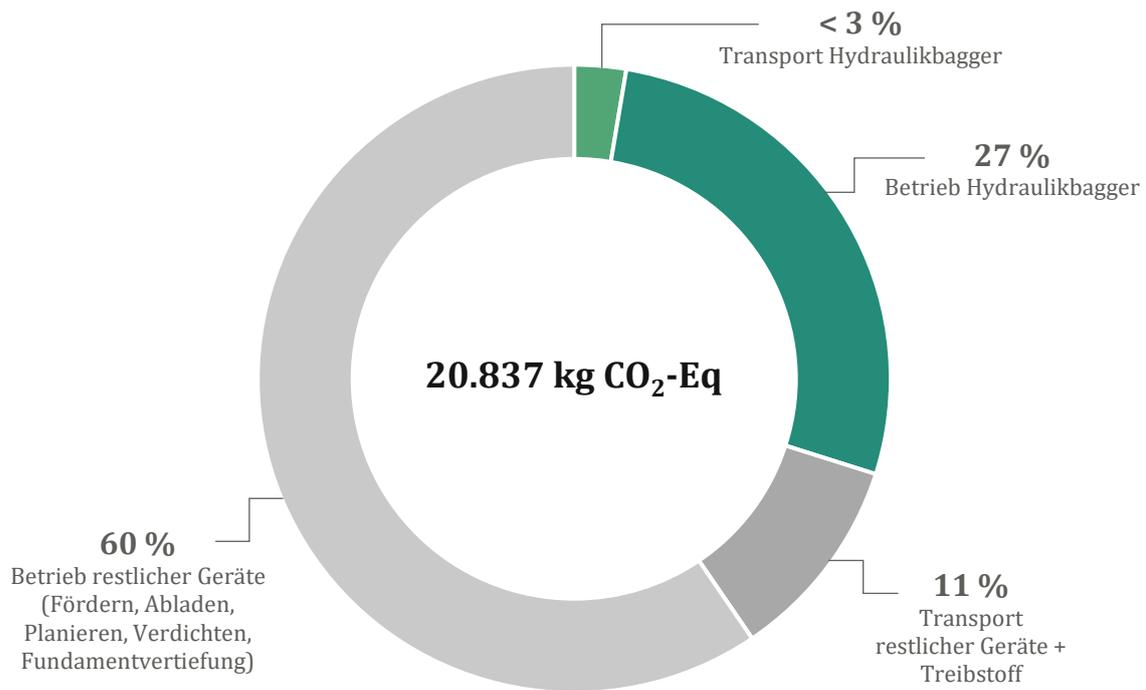


Abb. 3.8: Verteilung der THG-Emissionen beim Baugrubenaushub

Bei Division der gesamten THG-Emissionen der Baugrubenherstellung durch das Aushubvolumen des ungelösten Bodens ergibt sich ein THG-Emissionskennwert von $0,752 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$. Dieser ist jedoch nicht als reiner Emissionskennwert eines Prozesses der Errichtungsphase anzusehen, da er neben den Teilvorgängen der Errichtungsphase (A4-A5) auch den Einsatz der Planierdraupe auf einem anderen Standort enthält.

3.2.5 Emissionen der Errichtungsphase bei Teilprozess a) (Modul A4-A5) – Szenario Dieseltreibstoff

Der in Unterkapitel 3.2.3 berechnete THG-Emissionskennwert basiert auf dem Einsatz von HVO100 als Treibstoff für den Hydraulikbagger. Dies stellt zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Diplomarbeit einen Ausnahmefall dar, da die mit Abstand meisten Baugeräte mit Verbrennungsmotor aktuell durch Diesel angetrieben werden. Der THG-Emissionskennwert ist folglich keinesfalls repräsentativ für den Prozess des Aushubs mittels Hydraulikbagger in Österreich. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein fiktives Szenario herangezogen, bei dem Bagger 1 von Untersuchungsobjekt 1 mit Diesel statt HVO100 betrieben wird, während alle anderen Parameter gleich bleiben.

Die transportbedingten THG-Emissionen bleiben mit $550 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, entsprechend Tab. 3.1 gleich, da die Anlieferung und der Abtransport des Baggers durch dieseltreibene LKWs erfolgten. Der Dieserverbrauch durch den Betrieb des Baggers sowie die zugehörigen, sich durch Multiplikation mit dem Emissionsfaktor für Diesel ergebenden THG-Emissionen sind in Tab. 3.6 ersichtlich.

Tab. 3.6: THG-Emissionen durch den Geräteeinsatz beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger (Modul A5) im Szenario Dieselbetrieb – Emissionsfaktoren nach [6]

Energie- träger	Emissionsfaktor			Verbrauch	THG-Emission
	direkte Emission	indirekte Emission	gesamt		
Diesel (inkl. 5,5 % Bio- kraftstoffanteil)	2,493 kg/l	0,642 kg/l	3,134 kg/l	8.187 l	25.659 kg CO ₂ -eq
					25.659 kg CO₂-eq

Laut Anhang IX der KVO ist der gewichtsspezifische Energiegehalt von HVO100 mit 44 MJ/kg höher als der von Diesel (42 MJ/kg). Durch die geringere Dichte ergibt sich jedoch ein geringfügig niedrigerer volumenspezifischer Energiegehalt von 34 MJ/l im Vergleich zu Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil) mit rund 35 MJ/l [6].

Die Annahme des gleichbleibenden Treibstoffverbrauchs in Litern erscheint unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus der Literatur, etwa durch *Maus* trotzdem plausibel [12]. Auch das ausführende Unternehmen gab an, der Kraftstoffverbrauch bleibe bei vollständiger Substitution von Diesel durch HVO100 in der Praxis annähernd gleich.

Abb. 3.9 zeigt die Summe der THG-Emissionen und deren Verteilung beim Aushub einer Baugrube mittels Hydraulikbagger im Szenario mit ausschließlichem Dieseleinsatz.

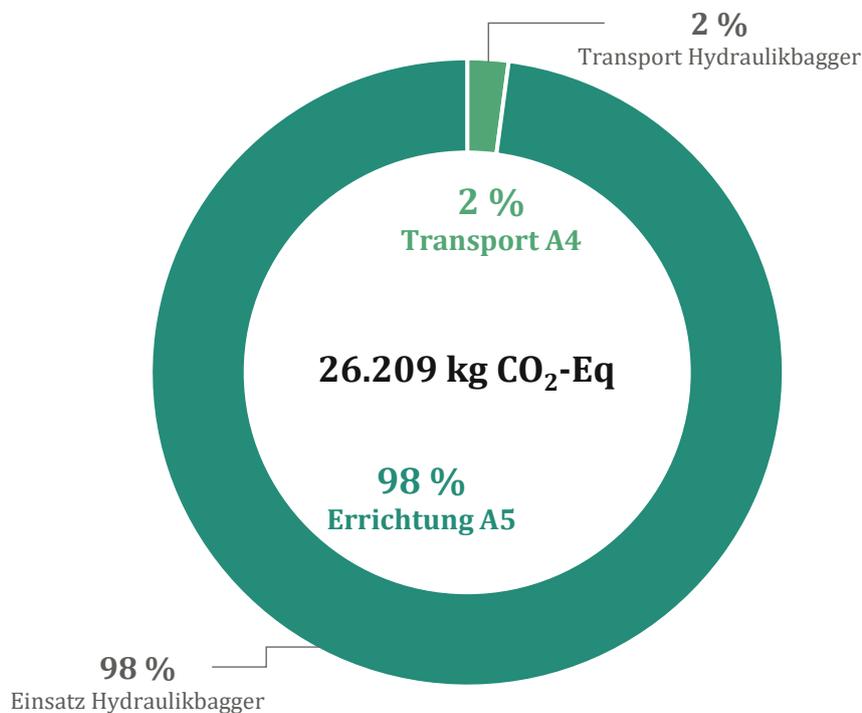


Abb. 3.9: Verteilung der THG-Emissionen beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger im Szenario Dieselbetrieb

Die Emissionen aus dem Betrieb des Baggers wären beim Einsatz von Diesel etwa viereinhalb Mal so groß wie bei HVO100.

Um einen aussagekräftigeren Kennwert als jenen aus Unterkapitel 3.2.3 zu erhalten, wird die Summe der THG-Emissionen aus Abb. 3.9 auf das Aushubvolumen des ungelösten Bodens von etwa 27.700 m³ bezogen. Dadurch ergibt sich ein THG-Emissionskennwert von 0,946 kg CO₂-eq/m³.

3.2.6 Gesamtemissionen aus den Teilprozessen a) und b) (Modul A4-A5 und D) – Szenario Dieselbetrieb

Analog zu Unterkapitel 3.2.4 werden die Gesamtemissionen aller Teilvorgänge nun auch für das Szenario mit reinem Dieselbetrieb berechnet.

Die THG-Emissionen, die durch die Anlieferung und den Abtransport von Bagger 2, Planierraupe, Walzenzug und Treibstofftank entstehen, werden hierbei als gleichbleibend angenommen. Ein geringfügiger Unterschied wird in Tab. 3.7 durch die höhere Dichte des Diesels (ca. 0,84 kg/l) gegenüber HVO100 (ca. 0,78 kg/l) bei Annahme des gleichbleibenden Volumens sichtbar. Das Gewicht des angelieferten Treibstoffs erhöht sich von rund 12 t auf etwa 12,6 t. Leerfahrten werden bei diesen Transportwegen wieder nicht betrachtet.

Tab. 3.7: THG-Emissionen durch den Transport von Bagger 2, Planierraupe, Walzenzug, Treibstofftank und Treibstoff im Szenario Dieselbetrieb – Emissionsfaktor nach [21]

Fahrzeug	Emissionsfaktor gesamt	Tonnenkilometer	THG-Emissionen
LKW SNF (< 18t)	380,0 g/tkm	3.204 tkm	1.218 kg CO ₂ -eq
LKW SNF (> 18t)	149,3 g/tkm	6.893 tkm	1.029 kg CO ₂ -eq
			2.247 kg CO₂-eq

Die Treibstoffverbräuche für HVO100 aus Tab. 3.4, welche den Transport des Aushubmaterials durch die Muldenkipper und den Traktor sowie den Betrieb von Bagger 2, Planierraupe und Walzenzug abbilden, werden für den Kraftstoff Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil) übernommen. Somit ergibt sich ein zusätzlicher Dieserverbrauch von 6.798 l. Dieser wird zu den 2.451 l Diesel der Fremd-LKWs, welche ohnehin mit Diesel betrieben wurden, addiert. In Tab. 3.8 wird der Verbrauch mit dem entsprechenden Emissionsfaktor multipliziert, um die daraus resultierenden THG-Emissionen zu erhalten.

Tab. 3.8: THG-Emissionen durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie Herstellung von Fundamentvertiefungen im Szenario Dieselbetrieb – Emissionsfaktor nach [6]

Energieträger	Emissionsfaktor gesamt	Verbrauch	THG-Emission
Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil)	3,134 kg/l	9.249 l	28.986 kg CO ₂ -eq
			28.986 kg CO₂-eq

Abb. 3.10 zeigt die Gesamtsumme der berechneten THG-Emissionen für das Szenario mit reinem Dieselbetrieb und den Anteil der eigentlichen Aushubarbeiten (Teilvorgänge Lösen und Aufladen) daran. Letztere machen etwas weniger als die Hälfte der insgesamt rund 57,4 t CO₂-eq aus. Bezogen auf das Aushubvolumen des ungelösten Bodens ergibt sich ein THG-Emissionskennwert von 2,074 kg CO₂-eq/m³.

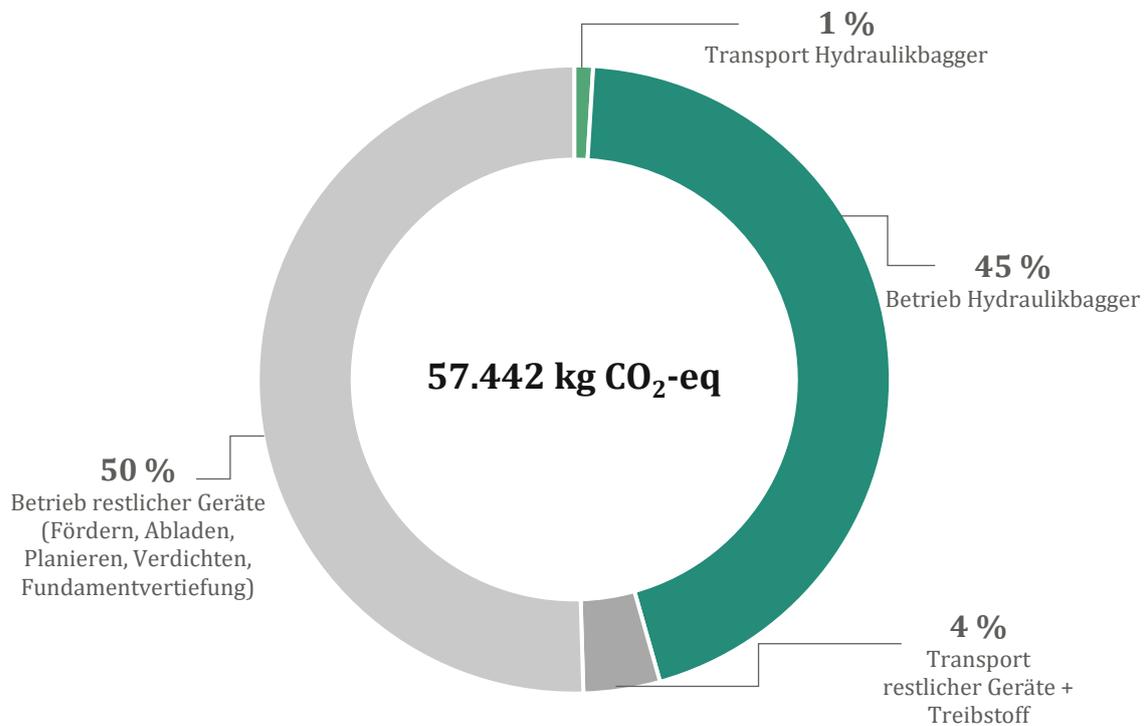


Abb. 3.10: Verteilung der THG-Emissionen beim Baugrubenaushub im Szenario Dieselbetrieb

Die THG-Emissionen für Untersuchungsobjekt 1 wären in dem hier betrachteten Szenario mehr als zweieinhalb Mal so groß wie in Unterkapitel 3.2.4.

4 Spundwandarbeiten

Die Untersuchung des Herstellungsprozesses von Spundwänden zur Umschließung einer Baugrube, konnte anhand eines großen Hochbauprojektes in Wien durchgeführt werden. Bevor genauer auf das Untersuchungsobjekt eingegangen wird, liefert Kapitel 4.1 zunächst eine Übersicht über die Einsatzbereiche und Funktionsweisen sowie gängige Einbauverfahren für Spundwände. Im Anschluss daran wird in Kapitel 4.2 näher auf die untersuchte Baustelle, die Auswertung der Daten und die daraus folgenden Ergebnisse eingegangen.

4.1 Spundwandarbeiten – Übersicht

Als Spundwand wird ein Bauwerk bezeichnet, das aus einzelnen Elementen besteht, die in den Boden eingetrieben und durch Schlösser miteinander verbunden werden. Spundwände können als Stützbauwerke bei Geländesprüngen, zur Baugrubensicherung, aber auch im Wasserbau, etwa als Ufersicherung oder Dichtwände eingesetzt werden. [29] Sie werden vorwiegend auf Biegung beansprucht und können entweder mit einer ausreichenden Einbindetiefe freistehend oder durch eine Abstufung in Form von Abstützungen bzw. Ankern ausgeführt werden [30].

4.1.1 Spundbohlen

Die Elemente einer Spundwand werden Spundbohlen genannt und bestehen heutzutage überwiegend aus Stahl. Typischerweise werden kalt- oder warmgewalzte Profile eingesetzt, wobei zwischen einer Vielzahl von unterschiedlichen Querschnittsformen und Schlossausbildungen unterschieden werden kann, wie in Abb. 4.1 zu sehen ist. Am häufigsten kommen wellenförmige Spundwände aus U-, Z-, oder Omega-Profilen zum Einsatz. Die Widerstandsmomente, die mit solchen herkömmlichen Wellenwänden erreicht werden können, sind durch die am Markt verfügbaren Profilgrößen beschränkt. Schlossverbindungen können schubfest oder nicht schubfest ausgeführt werden. Eine schubfeste Schlossverbindung kann beispielsweise durch ein sinnvolles Aneinanderfügen von Profilen oder das werksseitige Verschweißen der Schlösser erreicht werden. Die sogenannten Verbundwände, die dadurch entstehen, zeichnen sich durch eine im Vergleich zu Wellenwänden höhere Biegesteifigkeit sowie ein relativ niedriges Gewicht aus. Beim Einbringen von Verbundwänden können allerdings zusätzliche Aussteifungen notwendig sein. [29]

Eine weitere Variante bilden die kombinierten Wände. Wie bereits am Namen zu erkennen ist, werden hierbei meist schwere, I-förmige Trägerprofile oder Rohre mit leichteren Zwischenbohlen kombiniert. Durch diese Kombination lassen sich noch größere Biegesteifigkeiten als bei Verbundwänden erreichen. Die technischen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte haben dazu geführt, dass Spundwände aus Stahl in ihren Anwendungsmöglichkeiten noch vielseitiger und wirtschaftlicher geworden sind. Zwar gibt es auch Spundwände aus Holz, Kunststoff sowie Stahl- und Spannbeton, jedoch kommen diese im Vergleich zu Stahlspundwänden nur in seltenen Sonderfällen zum Einsatz und sollen daher an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. [29]

Der Einsatz des Werkstoffs Stahl bietet in diesem Zusammenhang zahlreiche Vorteile: Er ermöglicht die Herstellung dünner Querschnitte, die sich auch aufgrund der hohen Festigkeit des Stahls gut in den Boden einbringen lassen. Außerdem können die Stahlbohlen zu einem späteren Zeitpunkt ohne größere Setzungen gezogen und wiederverwendet werden. Ein weiterer Vorteil ist das „gutmütige“ Verhalten im Versagensfall. Gemeint ist damit die hohe Verformungsfähigkeit der Stahlspundwand, durch die mögliche Schäden verringert werden können. [31]

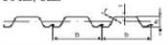
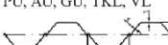
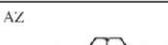
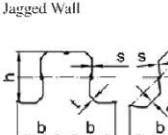
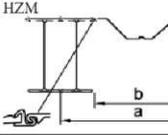
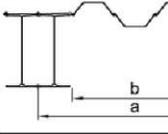
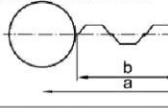
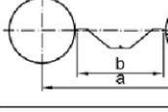
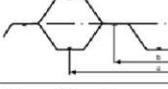
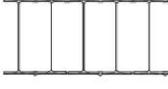
Bezeichnung	Wandform, Profile	Technische Daten						Zeit	W_{it} [cm ³ /m]	
		Widerstandsmoment W [cm ³ /m]	Gewicht G [kg/m ²]	Trägheitsmoment I [cm ⁴ /m]	Abmessungen					
					b [mm]	h [mm]	t [mm]	s [mm]		
Kaltgeformte Spundbohlen nach DIN EN 10249	PAL, KL 	$112 \leq W \leq 605$	$29 \leq G \leq 100$	500 bis 4.600	660, 700, 711	89–152	s = t 3–9		1	≤ Klasse 3
	PAU, Omega 	$404 \leq W \leq 1063$	$42 \leq G \leq 100$	5.100 bis 16.000	804, 813, 922	251–297	s = t 4–8		2	
	PAZ 	$600 \leq W \leq 1628$	$52 \leq G \leq 96$	8.000 bis 34.000	725, 807, 744	269–409	s = t 5–8		3	
Wellenförmige Spundwände	PU, AU, GU, TKL, VL 	$625 \leq W \leq 3340$	$70 \leq G \leq 251$	4.000 bis 75.400	400, 500, 600, 700, 750	150–450	7,5–20	6,4–12	4	1.400 bis 3.700
	AZ 	$1205 \leq W \leq 5015$	$94 \leq G \leq 253$	18.880 bis 121.000	630, 670, 675, 700, 770, 800	314–450	8,5–24	8,5–17	5	1.400 bis 5.800
Verbundwände	Jagged Wall 	$4275 \leq W \leq 8560$	$159 \leq G \leq 270$	112.000 bis 495.000	708–1135	750–1174			6	3.300 bis 11.000
Warmgewalzte Spundbohlen nach DIN EN 10248	HZM 	2000 (Einzeltraggpfahl) bis 22.000 (Doppeltraggpfahl)	$180 \leq G \leq 527$	44.000 bis 1.200.000	1.200 – 1.540	370–1.100	a [mm] Einzelpfähle 1.600 bis 2.060	a [mm] Doppelpfähle 2.000 bis 2.525	7	Systemabhängig
	HZM 	2000 (Einzeltraggpfahl) bis 21.000 (Doppeltraggpfahl)	$180 \leq G \leq 500$	44.000 bis 1.140.000	1.200 – 2.250	370–1.100	a [mm] Einzelpfähle 1.600 bis 2.060	a [mm] Doppelpfähle 2.000 bis 3.235	8	
	Rohrwand mit U-Bohle 	6000 bis 19.000	abhängig von Rohrdurchmesser und Wanddicke	abhängig von Rohrdurchmesser und Füllbohlenbreite	1.200 – 2.250	h = Rohrdurchmesser	a [mm] abhängig von Rohrdurchmesser und Füllbohlen		9	
	Rohrwand mit Z-Bohle 	6000 bis 19.000	abhängig von Rohrdurchmesser und Wanddicke	abhängig von Rohrdurchmesser und Füllbohlenbreite	1.150 – 1.540	h = Rohrdurchmesser	a [mm] abhängig von Rohrdurchmesser und Füllbohlen		10	
	CAZ 	2000 bis 6320	$147 \leq G \leq 265$	64.000 bis 300.000	1.150 – 1.600	600–1.000	a [mm] 2.420 bis 3.200		11	
Trägerpfahlwand		5950 bis 44.120	$352 \leq G \leq 932$	124.000 bis 2.451.000	400–938	370–1.100			12	abhängig von Steg- und Flanschbreite

Abb. 4.1: Übersicht Spundwandprofile [29, S. 330]

4.1.2 Schlösser

Ein wesentlicher Faktor für die Qualität von Spundwänden sind die Schlösser. In Abb. 4.2 sind einige gängige Schlossformen dargestellt. Die Differenz zwischen Hakenbreite und Schlossöffnung wird als Verhakungsmaß bezeichnet. Dieses darf nicht zu gering ausfallen, da die Spundbohlen sonst aus den Schlössern laufen und sie aufbiegen könnten. Andererseits muss auch ein ausreichendes Schlossspiel sichergestellt sein, da sich die Spundbohlen anderenfalls nur schwer einbringen lassen und die Gefahr besteht, dass sie sich aufgrund der entstehenden Reibung stark erwärmen und plastisch verformen. [29]

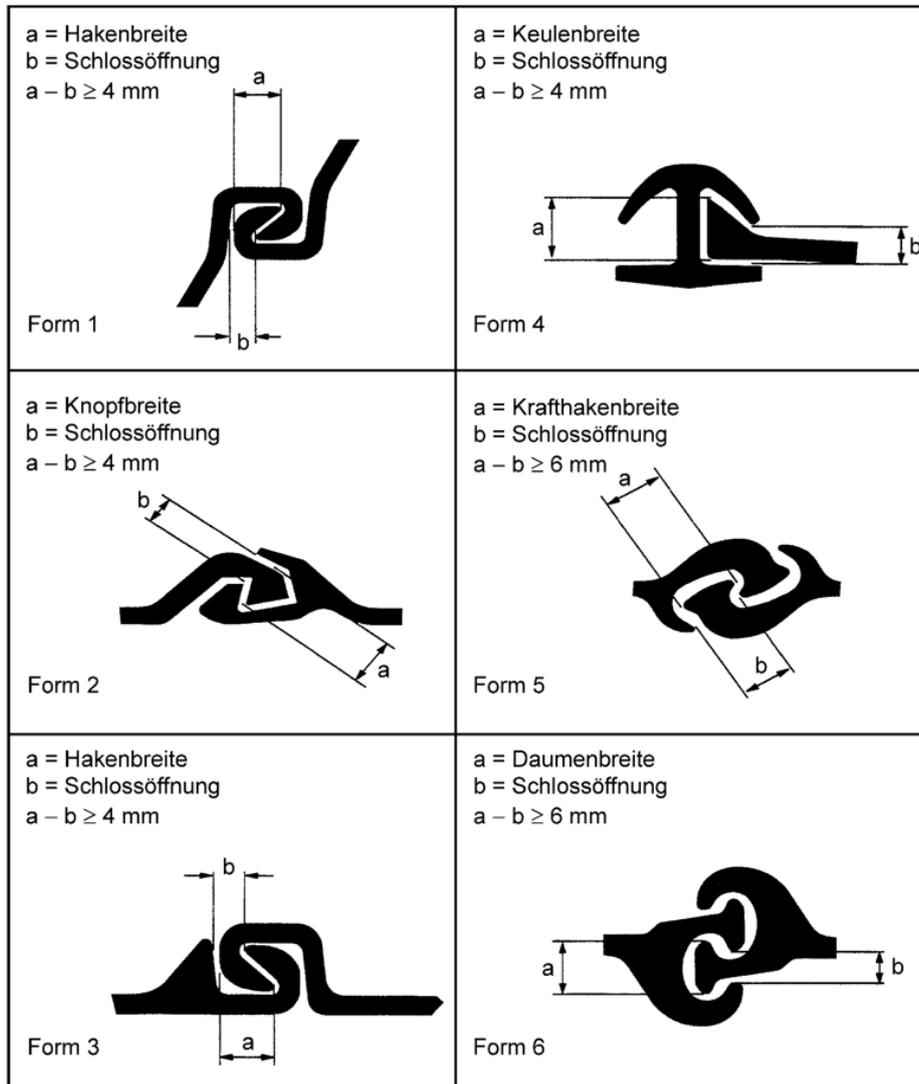


Abb. 4.2: Beispiele für bewährte Schlossformen von Stahlspundbohlen [32, S. 314]

Dieses Schlossspiel ist auch der Grund, weshalb Stahlspundbohlen nicht zur Gänze wasserdicht sind. Mögliche werksseitig verbundene Mittelschlösser (W-Schlösser) sind meist dichter als die durch das Einbringen verbundenen Fädelschlösser (B-Schlösser). Doch auch bei diesen kommt es häufig mit der Zeit zu einer Selbstdichtung. Die Ursachen dafür sind einerseits eine korrosionsbedingte Verkrustung und andererseits eine Ablagerung von Feinteilen des Bodens in den Zwischenräumen der Schlösser. [29]

In Fällen, in denen es nicht zur Selbstdichtung der Schlösser kommt, etwa in Böden mit geringem Feinkornanteil, oder wenn direkt nach Einbau der Spundbohlen hohe Anforderungen an die Dichtheit gestellt werden, können zusätzliche Dichtungsmaßnahmen erforderlich sein. Einfache Verfahren zu diesem Zwecke wären das nachträgliche Verstemmen der Fugen mit quellfähigen Holzkeilen, das nachträgliche Einbringen von Gummi- bzw. Kunststoffschnüren und das Verschweißen von Fugen im Werk oder auf der Baustelle. Alternativ gibt es aber auch Systeme, bei denen die Dichtungswirkung durch das Verfüllen der Schlösser vor dem Einbringen erzielt wird. Dies erfolgt in der Regel durch den Verguss mit bituminösen Materialien oder das Aufbringen profilierter Lippendichtungen. [31]

4.1.3 Einbringverfahren

Das Einbringen der Spundbohlen in den Boden kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Die gängigsten sind das Rammen, Vibrieren und Einpressen. Die Wahl des Verfahrens wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: Neben der Wirtschaftlichkeit spielen die Bodenbeschaffenheit, eine mögliche Nachbarbebauung, die Länge, Neigung und Art der Spundbohlen sowie Anforderungen hinsichtlich der Geräusch- und Erschütterungsentwicklung eine wesentliche Rolle. [31]

Rammen:

Beim Rammen können langsame Rammsysteme, wie schwere Rammbären oder aber schneller schlagende Systeme wie Rammhämmer herangezogen werden. Der Einsatz von Rammbären, etwa beim Freifallrammen oder beim Explosionsrammen zeichnet sich durch eine hohe Schlagenergie bei niedriger Schlagzahl aus, was den Vorteil hat, dass ein möglicher Porenwasserüberdruck an der Spundbohlenspitze zwischen den einzelnen Schlägen abgebaut werden kann [3]. Um den Bohlenkopf zu schützen und eine bessere Einleitung der Schläge zu gewährleisten, können sogenannte Rammhauben zum Einsatz kommen. Diese bestehen aus Stahlguss, besitzen an der Unterseite Führungsschlitze und an der Oberseite eine mit Hartholz gefütterte Vertiefung zur Aufnahme der Schläge. [31]

Die schnelleren Systeme mit Schlaghämmern sorgen dafür, dass die Spundbohle während des Rammvorgangs durchgehend in Bewegung bleibt, wodurch der Einbringvorgang erleichtert wird. Das Schlagrammen kann langsamer (bis 60 Schläge/min) oder schneller (bis 300 Schläge/min) erfolgen, zeichnet sich jedoch in jedem Fall durch eine höhere Schlagzahl aus, als es bei den Rammbären der Fall ist (3-6 Schläge/min). [33]

Vibrieren:

Das Einvibrieren von Spundbohlen hat sich vor allem in den letzten Jahren stark verbreitet und insbesondere bei nicht bindigen Böden als schnelle und wirtschaftliche Einbringmethode etabliert. Die Vorteile im Vergleich zu schlagenden Verfahren liegen in der geringeren Lärm- und Erschütterungsentwicklung sowie der Schonung der Spundbohlen. Ein Vibrationsbär wird dabei über Klemmzangen mit der Spundbohle verbunden und erzeugt durch eine Unwucht Schwingungen. Diese versetzen den anstehenden Boden beim Einbringen in einen Schwebезustand, welcher zu einer Verminderung der Mantelreibung führt. Nach dem gleichen Prinzip können die Spundbohlen mithilfe von Vibrationsbären zu einem späteren Zeitpunkt auch wieder gezogen werden. [31]

Einpressen:

Die Methode des Einpressens bietet sich vor allem bei bindigen Böden an. Die Spundbohlen können hierbei geräusch- und erschütterungsarm eingebracht werden, weshalb das Verfahren gerade auf Baustellen im innerstädtischen Bereich gut einsetzbar ist. Die zur Anwendung kommenden Pressen können mehrere Spundbohlen auf einmal in Position bringen. Zuerst erfolgt das Einbringen nur durch das Eigengewicht der Presse und der Bohlen selbst. Nach und nach kann aber, wie in Abb. 4.3 ersichtlich, die Mantelreibung der bereits eingebrachten Spundbohlen als Widerlager genutzt werden. [31]

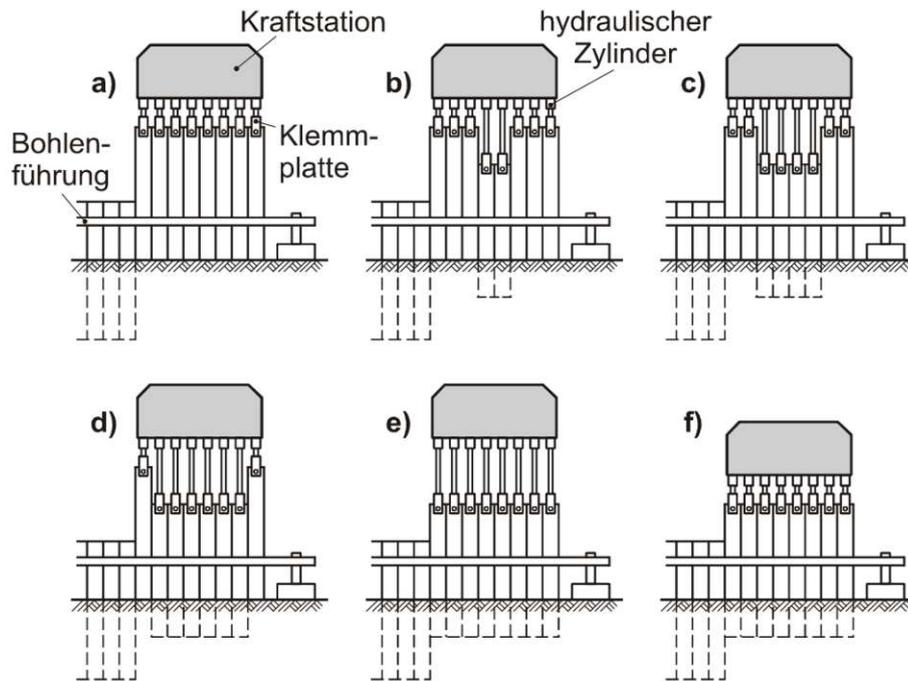


Abb. 4.3: Arbeitsweise einer Spundwandpresse [31, S. 398]

Zusatzmaßnahmen:

Vor oder während dem Einbringvorgang können Zusatzmaßnahmen vorgesehen werden. Dazu zählen:

- Wasserspülungen;
- Druckluftspülungen;
- Lockerungsbohrungen;
- Vorspaltsprengungen;
- Schlossschmierung.

Diese können bei allen der drei oben genannten Einbringverfahren zum Einsatz kommen, um das Herstellen von Spundwänden zu erleichtern oder überhaupt möglich zu machen. [33]

Gerätekomponenten:

Bei der Herstellung von Stahlspundwänden werden in der Regel mit Diesel betriebene Seil- oder Hydraulikbagger als Trägergeräte verwendet. Diese sind meist mit einem Mäkler ausgestattet, an dem wiederum ein Ramm- oder Vibrationsbär bzw. ein Pressgerät montiert ist. [33]

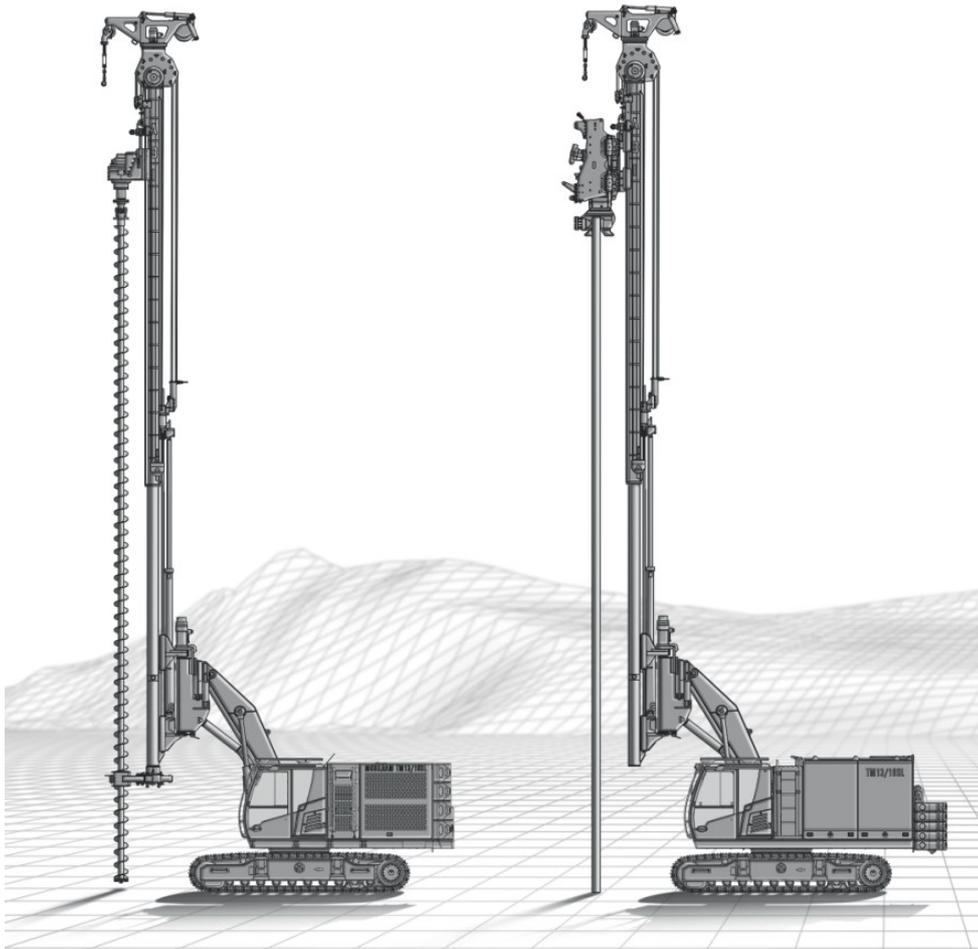


Abb. 4.4: Mobiles Rammsystem bestehend aus Trägergerät mit Teleskopmäkler und Bohrantrieb zum Vorbohren (links) bzw. Vibrator (rechts) [34, S. 7]

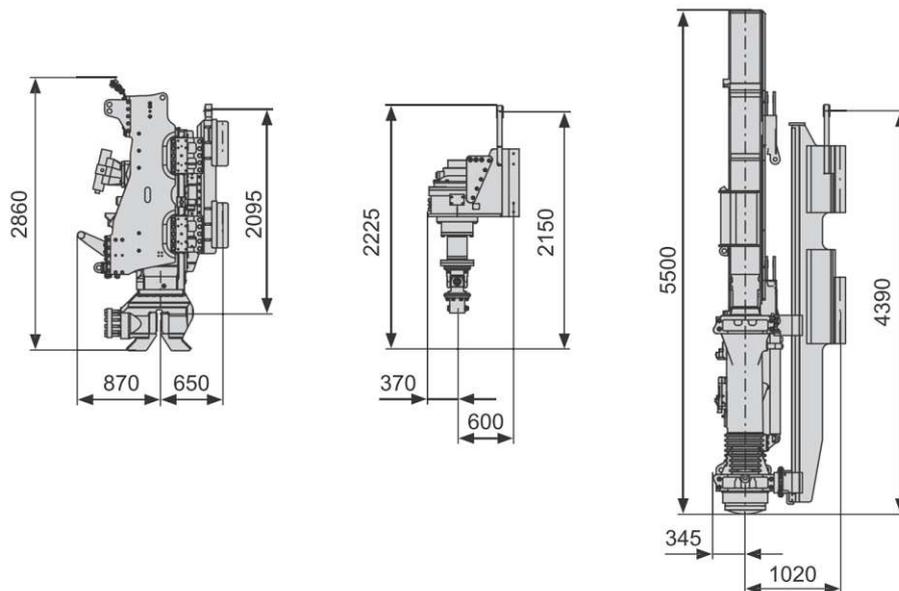


Abb. 4.5: Beispiele für Arbeitsgeräte: Vibrator (links), Bohrantrieb (mittig) und Dieselrammbär (rechts) [34, S. 7]

Moderne Systeme, wie jene aus Abb. 4.4 verfügen über eine Schnellwechsellanlage, die es möglich macht, in kurzer Zeit das Arbeitsgerät (siehe Abb. 4.5) zu wechseln.

Bei den Pressgeräten gibt es neben der mäklergeführten Variante auch freireitende und selbstschreitende Geräte. Freireitende Pressen werden mithilfe eines Krans umgesetzt und benötigen ein Führungsgerüst, während selbstschreitende Pressen ohne Trägergerät auskommen und sich selbstständig entlang der bereits eingebauten Spundbohlen umsetzen [15]. Abb. 4.6 zeigt zwei unterschiedliche Typen von Pressgeräten.

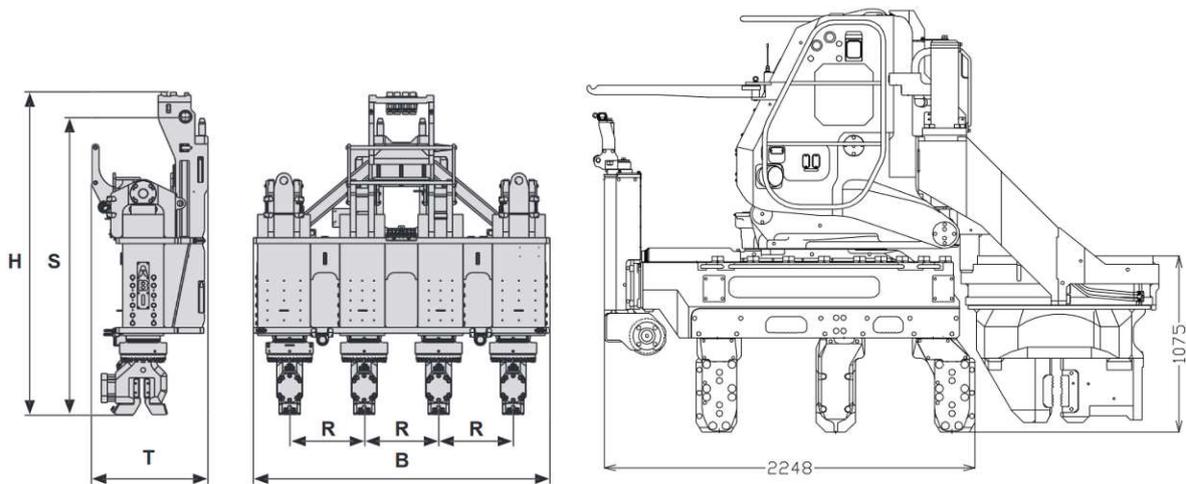


Abb. 4.6: Varianten von Pressgeräten: mäklergeführt (links) [35, S. 3] und selbstschreitend (rechts) [36, S. 2]

Ziehen:

Temporäre Spundbohlen, etwa zum Zwecke der Baugrubensicherung, können aus dem Untergrund gezogen und wiederverwendet werden. Es werden dafür die gleichen Geräte wie zum Einbringen verwendet, in manchen Fällen jedoch umgebaut. Da es beim Ziehen aufgrund von Umlagerungen zu Setzungen im Boden kommen kann, ist es möglich Bodeninjektionen vorzusehen. Dabei wird während des Ziehens mithilfe von Injektionslanzen eine Zementsuspension in den Untergrund injiziert. [33]

4.2 Untersuchungsobjekt 2 – Spundwandaarbeiten

Für die Untersuchung des Bauprozesses Spundwandaarbeiten konnte in Absprache mit den ausführenden Unternehmen eine Baustelle im Norden Wiens herangezogen werden. Das dort geplante Hochhausprojekt sah eine von Spundwänden umschlossene Baugrube von ca. 4.300 m² Größe vor. Dabei kamen warmgewalzte Stahlspundbohlen in Form von PU28 und PU32 Profilen mit einer Länge von 12,0 bis 13,0 m zum Einsatz. Die Spundwände wurden freistehend als Wellenwände, ohne zusätzliche Aussteifungen durch Anker oder Ähnliches ausgeführt und mit dem Vibrationsverfahren bis in den Grundwasserstauer abgesenkt. In der fertigen Baugrube betrug die Aushubhöhe zwischen 5,0 und 6,4 m. Das Ziehen der Spundwände erfolgte etwa ein halbes Jahr später.

Abb. 4.7 zeigt eine Übersicht über den Bauprozess der Spundwandarbeiten. Dieser wurde in zwei Teilprozesse unterschieden: Das eigentliche Herstellen der Spundwände durch das Einbringen der Spundbohlen wird als Teilprozess a) bezeichnet, während das Entfernen der Spundwände durch Ziehen der Spundbohlen Teilprozess b) genannt wird. Bei den Teilprozessen wiederum können jeweils die Module A4 und A5 der Errichtungsphase laut ÖNORM EN 15978 getrennt voneinander betrachtet werden. Modul A4 umfasst die mit dem Teilprozess in Zusammenhang stehenden Transporte von und zur Baustelle, während A5 die Vorgänge auf der Baustelle zur „Errichtung“ berücksichtigt. Im Falle von Teilprozess b) ist der Begriff „Errichtung“ nicht im eigentlichen Sinne des Wortes zu verstehen, sondern steht für alle Tätigkeiten, die auf der Baustelle zur Erledigung des Teilprozesses vollbracht werden. Aufgrund einer unzureichenden Datenlage konnte Teilprozess b) nicht vollständig untersucht werden und ist daher nicht Teil der Auswertungen in den nachfolgenden Kapiteln.

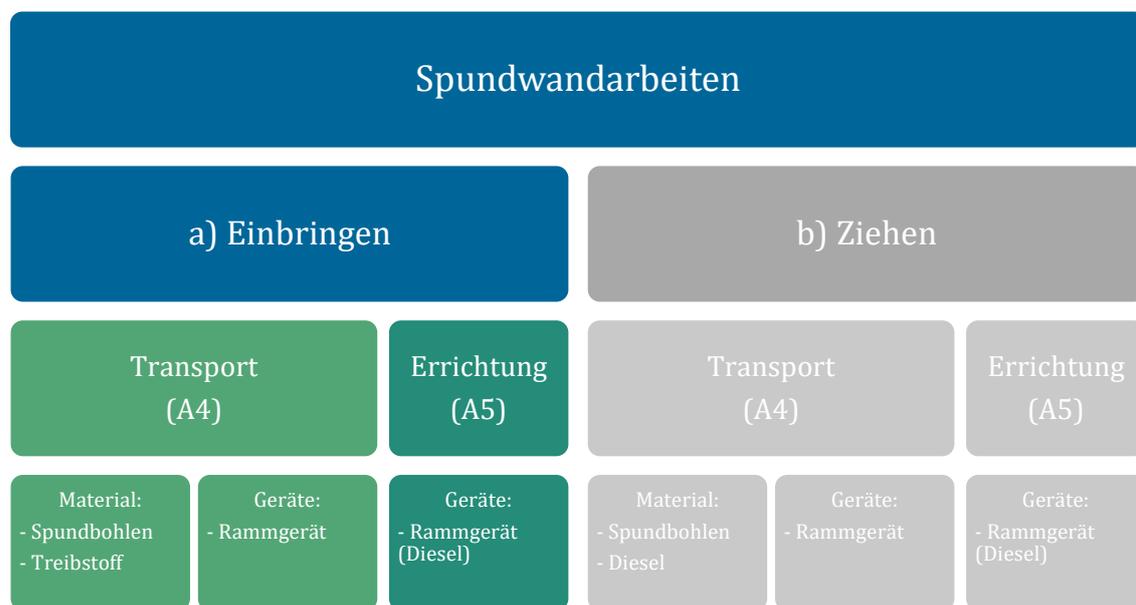


Abb. 4.7: Übersicht – Spundwandarbeiten

Im Vorfeld der Untersuchungen vor Ort war bereits ein Voraushub erledigt worden. Dieser soll aber, wie auch der den Spundwandarbeiten nachfolgende Baugrubenaushub im gegenwärtigen Kapitel nicht weiter betrachtet oder berücksichtigt werden. Der Baugrubenaushub wurde in Kapitel 3 als eigener Bauprozess untersucht.

4.2.1 Transportbedingte Emissionen bei der Herstellung von Spundwänden (Modul A4)

Bei den Spundwandarbeiten selbst kam ein mobiles Rammsystem mit 470 kW Höchstleistung zum Einsatz. Bestehend aus Trägergerät und Teleskopmäkler war es mit einem Bohrantrieb zum Vorbohren sowie mit einem Vibrator ausgestattet (siehe Abb. 4.4). Es wurde gemeinsam mit dem Bohrgestänge per LKW von einer nahegelegenen Baustelle antransportiert. Die Spundbohlen wurden sukzessive mit zehn LKWs aus Niederösterreich und 17 LKWs aus Salzburg antransportiert.

Für die Transportfahrten wurden seitens des ausführenden Unternehmens keine Lieferscheine zur Verfügung gestellt. Informationen über die Fahrten wurden jedoch firmenintern

4 Spundwandarbeiten

dokumentiert und via E-Mail weitergegeben. Basierend auf diesen Daten konnten anschließend mittels Google Maps die Transportkilometer bestimmt werden, wobei für jede Strecke die schnellste Route angenommen wurde. Eine Zusammenstellung der Transportkilometer findet sich in Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Ermittlung der Transportkilometer für Spundwandarbeiten

Kategorie	Art	Transportkilometer		
		zu Baustelle	von Baustelle	gesamt
Geräte	mobiles Rammsystem mit Bohrantrieb und Vibrator	5,90 km	205,00 km	210,90 km
Material	Spundbohlen PU28 & PU32	6.114,00 km	-	6.114,00 km
Treibstoff	Diesel für Gerätebetrieb	15,00 km	-	15,00 km
				6.339,90 km

Auf der Baustelle waren bei dem Bauprozess neben dem Bauleiter des ausführenden Subunternehmens nur zwei weitere Personen beteiligt. Die produktiven Tätigkeiten wurden von einem Geräteführer und einem Arbeiter durchgeführt. Der Personaltransport wird jedoch laut der aktuellen Fassung der ÖNORM EN 15978 nicht berücksichtigt.

Um einen THG-Emissionskennwert für das Modul A4 zu erhalten, wird im nächsten Schritt mithilfe der Planunterlagen die Fläche der Spundwände gemäß Tab. 4.2 errechnet.

Tab. 4.2: Flächenermittlung Spundwände

Profil	Länge Spundbohlen	Länge Abschnitt	Fläche
PU28	12,00 m	50,73 m	608,76 m ²
PU28	13,00 m	121,02 m	1.573,26 m ²
PU32	12,00 m	40,18 m	482,16 m ²
PU32	13,00 m	60,20 m	782,60 m ²
			3.446,78 m²

Über das Handlungsgewicht der eingesetzten Profile lässt sich anschließend das Gesamtgewicht der angelieferten Spundbohlen, wie in Tab. 4.3 dargestellt, mit ausreichender Genauigkeit bestimmen. Es sei hierzu angemerkt, dass zusätzlich sechs Stück Eckprofile verbaut wurden, die sich aufgrund der geringen Menge und schmalen Bauweise jedoch nicht in relevantem Maße auf die Berechnung auswirken.

Tab. 4.3: Massenermittlung Spundwände

Profil	Fläche	Handelsgewicht	Gewicht
PU28	2.182,02 m ²	169,60 kg/m ²	370,07 t
PU32	1.264,76 m ²	190,20 kg/m ²	240,56 t
			610,63 t

Im Durchschnitt ergibt sich beim Antransport der Spundbohlen ein Gewicht von rund 22,6 t Beladung je LKW. Für die insgesamt 27 Transportfahrten an Spundbohlen zur Baustelle werden die vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellten Emissionsfaktoren bezogen auf Tonnenkilometer für LKWs der Kategorie SNF (> 18 t) [21] herangezogen. Der An- und spätere Abtransport des Arbeitsgeräts wird analog dazu mit dem Emissionsfaktor für Sattelzüge (40 t) berücksichtigt. Bei der Berechnung findet jeweils die Summe aus direkten und indirekten Emissionen Anwendung. Mögliche mit diesen Transporten in Zusammenhang stehende Leerfahrten werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Die Gründe hierfür wurden in Kapitel 1.4 bereits genannt.

Das Einbringen der Spundwände dauerte insgesamt 21 Arbeitstage (AT). In dieser Zeit wurde das Arbeitsgerät dreimal (voll) betankt. Hierbei kam ein mobiler Diesel-Zustelldienst zum Einsatz. Nach Angaben des Fahrers erfolgten die Belieferungsfahrten jeweils innerhalb Wiens durch Tankfahrzeuge mit einem maximalen Tankvolumen von 2.000 l. Es gibt jedoch keine genauen Aufzeichnungen zu den einzelnen Fahrten, die es ermöglichen würden, einen kausalen Zusammenhang zwischen der untersuchten Baustelle und einer bestimmten Fahrstrecke aufzuzeigen. In der Regel werden pro vollem Tank mehrere Standorte angefahren. Daher wird in den weiteren Berechnungen für jede der drei Fahrten ein pauschaler Wert von 5 km mit einem LKW der Kategorie leichte Nutzfahrzeuge (LNF) (< 3,5 t) und einem laut den Angaben des Umweltbundesamts für diese Fahrzeugkategorie durchschnittlichen Auslastungsgrad von 0,33 t angenommen. Die Summe der transportbedingten THG-Emissionen ist in Tab. 4.4 ersichtlich.

Tab. 4.4: Transportbedingte THG-Emissionen bei der Herstellung von Spundwänden (Modul A4) – Emissionsfaktoren nach [21]

Fahrzeug	Emissionsfaktor gesamt	Tonnenkilometer	THG-Emissionen
Sattelzüge (40t)	68,7 g/tkm	9.491 tkm	652 kg CO ₂ -eq
LKW SNF (> 18 t)	149,3 g/tkm	138.273 tkm	20.644 kg CO ₂ -eq
LKW LNF (< 3,5 t)	932,5 g/tkm	5 tkm	5 kg CO ₂ -eq
			21.301 kg CO₂-eq

4.2.2 Emissionen beim Einbauprozess von Spundwänden (Modul A5)

Da das Trägergerät keine genaue Messeinrichtung, sondern lediglich eine simple Tankanzeige besitzt, wurde der Dieserverbrauch über die Tankrechnungen ermittelt. Im technischen Datenblatt des Geräts wird der maximale Tankinhalt mit 810 l angegeben. Für die Zeiträume zwischen den drei Befüllungen kann ein durchschnittlicher Tagesverbrauch berechnet werden. Mit diesem ist es möglich, den Füllstand des Treibstofftanks zu Beginn und am Ende der Arbeiten zu interpolieren. Um diese Werte zu validieren, wurde der ungefähre Füllstand sowohl vor Beginn als auch nach Beendigung der Arbeiten beim Geräteführer erfragt. Tab. 4.5 liefert eine Übersicht über den Dieserverbrauch des Rammgerätes während der Arbeiten zur Herstellung der Spundwände. Die gingen abschnittsweise vonstatten und umfassten zunächst Lockerungsbohrungen in regelmäßigen Abständen von rund 80 cm bis 100 cm. Anschließend folgte das Versetzen und Einvibrieren der Spundbohlen.

Tab. 4.5: Dieserverbrauch des mobilen Rammsystems bei der Herstellung von Spundwänden

Zeitpunkt	Tankinhalt	Δ Tankinhalt	Verbrauch pro Tag
Beginn der Arbeiten	680 l		
		-547 l	109 l/d
1. Befüllung	133 l		
		+677 l	
	810 l		
		-469 l	117 l/d
2. Befüllung	341 l		
		+469 l	
	810 l		
		-609 l	102 l/d
3. Befüllung	201 l		
		+609 l	
	810 l		
		-766 l	109 l/d
Ende der Arbeiten	44 l		

Der gesamte Dieserverbrauch des mobilen Rammsystems beträgt also 2.391 l. Durch Multiplikation mit dem Emissionsfaktor (gesamt) des Umweltbundesamtes für den Energieträger Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil) [6] können die THG-Emissionen von Modul A5 für das Einbringen der Spundwände berechnet und in Tab. 4.6 dargestellt werden.

Tab. 4.6: THG-Emissionen beim Einbauprozess von Spundwänden (Modul A5) – Emissionsfaktoren nach [6]

Energie-träger	Emissionsfaktor			Verbrauch	THG-Emission
	direkte Emission	indirekte Emission	gesamt		
Diesel (inkl. 5,5 % Bio- kraftstoffanteil)	2,493 kg/l	0,642 kg/l	3,134 kg/l	2.391 l	7.492 kg CO ₂ -eq
					7.492 kg CO₂-eq

4.2.3 Gesamtemissionen der Errichtungsphase beim Einbringen von Spundwänden (Modul A4-A5)

In Tab. 4.7 und Abb. 4.8 werden die in den zwei vorangegangenen Unterkapiteln berücksichtigten THG-Quellen und ihr jeweiliger Anteil an den Gesamtemissionen beim Einbringen von Spundwänden aufgeschlüsselt. Insgesamt wurden rund 28,8 t CO₂-eq emittiert.

Tab. 4.7: Verteilung der THG-Emissionen beim Einbringen von Spundwänden

Quelle	Modul	THG-Emissionen
Spundbohlen	A4	20.644 kg CO ₂ -eq
Treibstoff	A4	5 kg CO ₂ -eq
Rammgerät	A4	652 kg CO ₂ -eq
Rammgerät	A5	7.492 kg CO ₂ -eq
		28.793 kg CO₂-eq

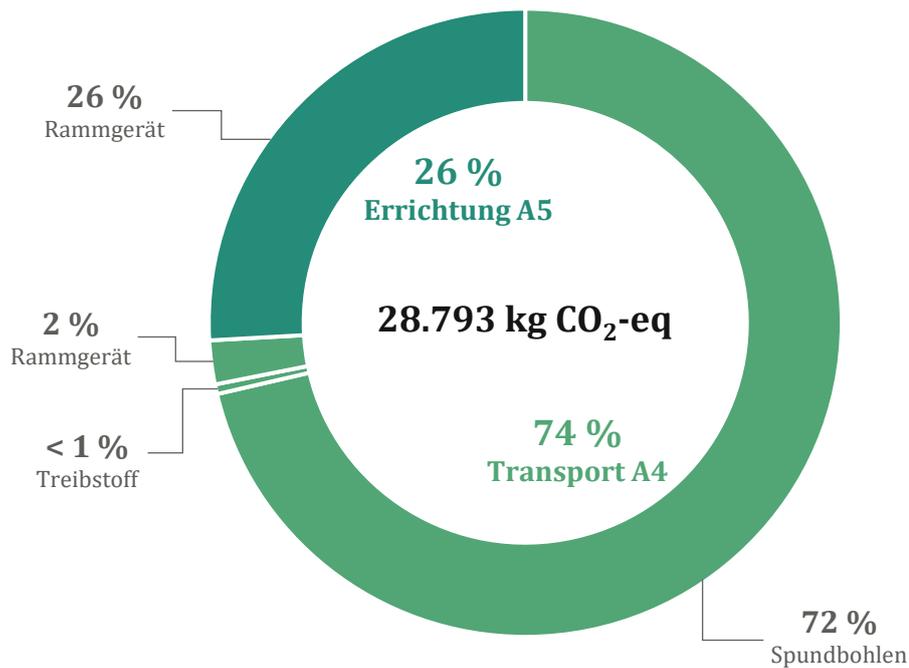


Abb. 4.8: Verteilung der THG-Emissionen beim Einbringen von Spundwänden

Im untersuchten Fall werden etwa drei Viertel der THG-Emissionen beim Bauprozess des Einbringens von Spundwänden durch den Transport von und zu der Baustelle verursacht. Der überwiegende Teil davon stammt aufgrund der hohen Masse und der großen Entfernung des Werks, aus dem Antransport der Spundbohlen. Der Geräte- und Treibstofftransport machen gemeinsam nur etwa 3 % der Gesamtemissionen aus. Die restlichen 26 % der Emissionen sind auf den Betrieb nur eines Gerätes, nämlich des mobilen Vibrationsrammsystems zurückzuführen.

Bezogen auf die Gesamtfläche der Spundwände von rund 3.447 m² ergibt sich ein THG-Emissionskennwert von ca. 8,35 kg CO₂-eq/m².

5 Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

Der dritte Bauprozess, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird, sind Betonarbeiten mit Halbfertigteilen. Diese wurden bei der Errichtung von zwei Dachgeschoßstockwerken eines Wohngebäudes im Westen Wiens untersucht. Das Gebäude wurde in kombinierter Bauweise hergestellt: Die Kellergeschoße sowie Teile des Erdgeschoßes wurden in Ortbetonbauweise errichtet, während der Rest des Gebäudes unter Zuhilfenahme von Stahlbeton-Halbfertigteilen gefertigt wurde. Kapitel 5.1 liefert zunächst eine Übersicht über die wichtigsten Elemente der Halbfertigteilbauweise. Danach wird in Kapitel 5.2 näher auf die untersuchte Baustelle, die Auswertung der Daten und die daraus folgenden Ergebnisse eingegangen.

5.1 Halbfertigteilbauweise – Übersicht

Die Halbfertigteilbauweise verbindet Vorteile der Ortbetonbauweise mit jenen der Fertigteilbauweise und kommt auf Österreichs Baustellen bereits seit Jahren häufig zum Einsatz. Durch die Vorfertigung im Werk kann ein Großteil der aufwendigen Schalungsarbeiten auf der Baustelle entfallen. Die Lieferung erfolgt meist just-in-time und die einzelnen Elemente werden mit einem Kran direkt vom LKW gehoben und in Position gebracht. Im Gegensatz zur klassischen Fertigteilbauweise werden Halbfertigteile nur zum Teil im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle mit Ortbeton ergänzt. Bei den häufig eingesetzten Elementdecken und -wänden sorgen Gitterträger für die notwendige Steifigkeit während des Transportes und der Montage. [37]

5.1.1 Elementdecken

Elementdecken bestehen aus meist 50 bis 70 mm dicken, werkseitig hergestellten Plattenelementen, in die Gitterträger mit ihren Untergurten einbetoniert sind. Abb. 5.1 zeigt einen solchen Gitterträger im Detail. Die Obergurte und Gitterträgerdiagonalen ragen aus der Platte heraus. Während die Untergurte als Teil der Biegezugbewehrung fungieren, nehmen die Obergurte im Montagezustand Druckkräfte auf. Die Diagonalen wirken als Querkraftbewehrung und stellen die Verbundwirkung zwischen der Fertigteilplatte und dem nachträglich eingebrachten Ortbeton her. [37]



Abb. 5.1: Nahaufnahme Gitterträger [38, S. 1]

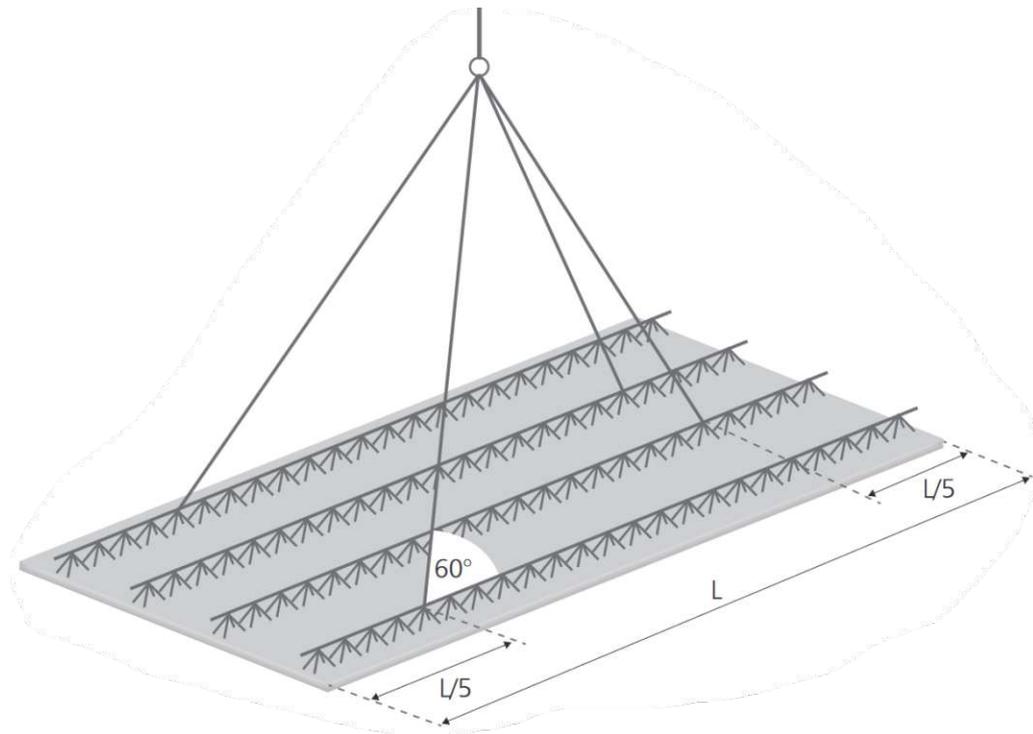


Abb. 5.2: Hebevorgang einer Elementdecke mittels Kran [39, S. 4]

Nach Anlieferung werden die einzelnen Deckenplatten wie in Abb. 5.2 dargestellt mit einem Kran vom LKW gehoben und direkt verlegt. Hierzu werden vorab Baustützen mit Jochträgern als Montageunterstützung eingebaut. Ein wesentlicher Vorteil von Elementdecken besteht darin, dass sie als verlorene Schalung dienen, was den Schalungsaufwand im Vergleich zu Ortbetondecken wesentlich reduziert. Die daraus folgende Zeitersparnis und die resultierende Verringerung der Lohnkosten haben zur großen Verbreitung des Einsatzes von Halfertigteilen geführt. Ist die Decke verlegt, folgt der Einbau der Bewehrung sowie der Installationsleitungen. Anschließend wird der Beton aufgebracht und verdichtet. Nachdem der Aufbeton ausgehärtet ist, kann die Elementdecke je nach Ausführung der Bewehrung wie eine monolithische, ein- oder zweiachsig gespannte Massivdecke wirken. [40]

5.1.2 Elementwände

Elementwände werden, ähnlich wie Elementdecken unter Zuhilfenahme von Gitterträgern im Werk vorgefertigt. Dabei wird das Element nach der Herstellung der ersten Betonschale gewendet und kopfüber mit dem freistehenden Gurt des Gitterträgers in den Frischbeton eingetaucht. Das Ergebnis ist ein zweischaliges Halfertigteil, in dem auch Leerrohre für Leitungen bzw. Türzargen oder sogar Fenster vormontiert sein können. Die äußere Schale wird bei Außenelementen in der Regel länger ausgeführt, um die Ausbildung von Eck-Elementen oder Deckenauflagern mit Randabschalung zu ermöglichen. Für die Montage auf der Baustelle werden die einzelnen Wandelemente an werkseitig eingebauten Anschlagpunkten an einen Kran gehängt und vom LKW gehoben. Anschließend werden sie auf die vorab mit Holzstaffeln bzw. Unterlagsplatten vorbereitete Bodenplatte aufgesetzt, indem die herausragenden Steckisen in das jeweilige Wandelement eingefädelt werden. Die Ausrichtung und Sicherung erfolgt mit zug- und druckfesten Richtstützen, welche mit Gelenkplatten an beiden Enden ausgestattet sind. Die Wandelemente verfügen hierfür meist über werkseitig vorgegebene Befestigungspunkte, während in der Bodenplatte Löcher

gebohrt werden müssen. Vor dem Betonieren werden die vertikalen Elementfugen und Öffnungen abgeschalt oder mit Bauschaum verschlossen. Im Bereich der Elementfugen müssen außerdem Bewehrungskörbe als konstruktive Stoßfugenbewehrung von oben eingesetzt werden. [41]

An den Außenecken können zusätzlich Montagewinkel zur Sicherung angebracht werden. Um einen zu hohen Schalungsdruck zu vermeiden, muss beim Betonieren unbedingt die maximale Steiggeschwindigkeit laut dem Versetzplan des Herstellers (in der Regel 0,5-1,0 m/h) eingehalten werden. Das Einfüllen läuft gleichmäßig und lageweise ab, wobei Fallrohre oder Betonierschläuche genutzt werden, um ein Entmischen des Betons zu verhindern. Das Verdichten erfolgt durch Innenrüttler mit geeignetem Durchmesser. [42]

Auch schräge Dachflächen können mithilfe von Halbfertigteilen ausgeführt werden. Dabei wird genauso vorgegangen wie bei Elementwände.

Abb. 5.3 zeigt fertig montierte Wand- und Dachschrägelemente, die durch Richtstützen gesichert sind. Tür- und Fensteröffnungen sowie Stoßfugen wurden dabei abgeschalt bzw. mit Bauschaum verschlossen. Links im Bild sind werkseitig eingebaute Elektrodosen und Leerrohre zu sehen. Die Baustützen und Jochträger in der Mitte des Bildes wurden für die Elementdecke aufgestellt.



Abb. 5.3: Montierte Elementwände und Montageunterstützung für eine Elementdecke

5.1.3 Turmdrehkran und Betonkübel

Das für die Halbfertigteilbauweise wichtigste Gerät ist der Kran. Dieser wird zum Heben und Versetzen der Halbfertigteile sowie von Bewehrungen, Schalungselementen und sonstigen Lasten verwendet. Auch der Betoniervorgang kann mittels Kran und Betonkübel erfolgen.

An dieser Stelle soll erwähnt sein, dass es viele verschiedene Arten von Kranen gibt, in weiterer Folge jedoch nur Turmdrehkrane genauer erläutert werden, da diese im Hochbau eine besonders wichtige Rolle spielen. Sie bestehen aus einem Turm mit Unterbau und einem Ausleger, wobei die Auslegerform variieren kann. Turmdrehkrane werden in Untendreher und Obendreher unterteilt, je nachdem, ob sich der gesamte Turm samt Ausleger unten dreht oder der Turm fest auf einem Fundament montiert ist und die Drehung oben am Ausleger und Gegenausleger erfolgt. Untendreher werden auch Selbstmontagekrane genannt und besitzen oft einen ausfahrbaren Turm. Sie sind besonders für kleinere Lasten und Auslegerlängen geeignet und zeichnen sich durch die einfache Montage aus. Abb. 5.4 zeigt gängige Auslegerformen, wobei der Laufkatzenausleger die häufigste Variante darstellt. Als Laufkatze wird jenes Bauteil bezeichnet, welches Lasten horizontal entlang des Auslegers verfahren kann. Besonders erwähnenswert sind außerdem Biegebalkenausleger, da diese aufgrund der fehlenden Turmspitze eine niedrigere Bauhöhe des Krans ermöglichen, was besonders beim Einsatz mehrerer Krane mit sich überschneidenden Schwenkbereichen von Vorteil ist. [9]

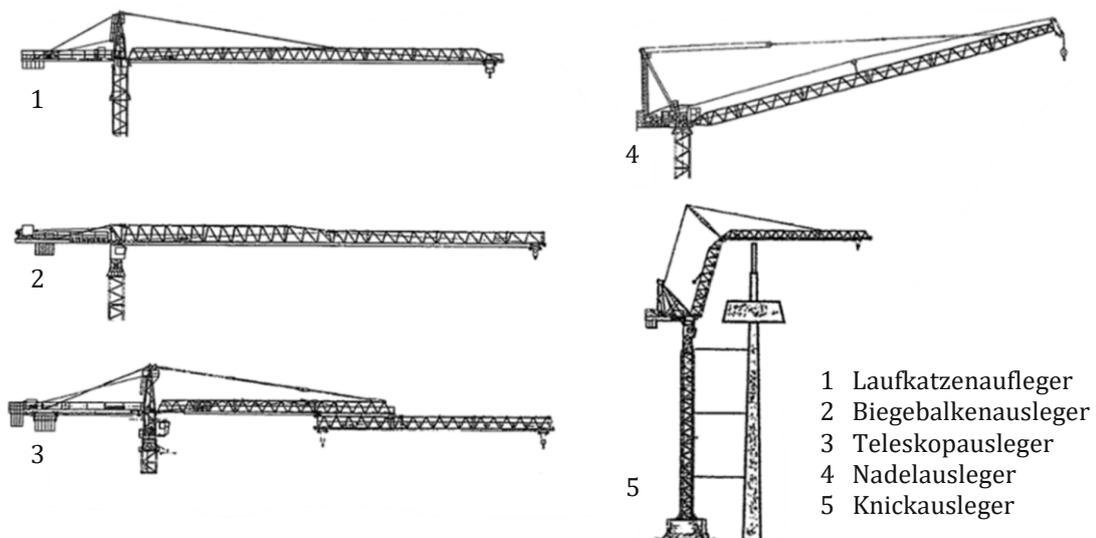


Abb. 5.4: Auslegerformen obendrehender Turmdrehkrane nach [43, S. 33]

Je nach Bauart sind in einem Turmdrehkran mehrere mit Strom betriebene Motoren für das Hubwerk, Drehwerk, Laufkatzenfahrwerk und ein mögliches Kranfahrwerk verbaut.

Beim Betoniervorgang mittels Kran wird üblicherweise ein Betonkübel an einem Betonmischer befüllt und anschließend vom Kran zum Ort der Einbringung gehoben. Betonkübel können unterschiedliche Größen und Formen aufweisen. Die Entleerung erfolgt über eine händisch oder per Funk dosierbare Klappe, an die ein Schlauch angeschlossen sein kann. Funkferngesteuerte Kübel, wie jener aus Abb. 5.5 funktionieren mithilfe eines Öffnungsmechanismus, der durch einen Hydraulikzylinder, ein Hydraulikaggregat und einen Akkumulator ausgestattet ist. [44]



Abb. 5.5: Betonkübel mit Funkfernsteuerung und Schlauch [44]

5.1.4 Fahrmischer und Betonpumpe

Der Transport von Frischbeton aus einem Betonwerk zur Baustelle erfolgt heutzutage überwiegend mit Fahrmischern. Diese bestehen aus einem Fahrgestell und einem Mischeraufbau mit einer Trommel und einer darin befindlichen Mischspirale. In Abb. 5.6 ist der genaue Aufbau eines Fahrmischers mit seinen einzelnen Bestandteilen dargestellt. Die Drehzahl und Drehrichtung der Spirale können verstellt werden, um ein schnelleres Befüllen bzw. Entleeren zu ermöglichen. Vor dem Entleeren wird der Beton auf der Baustelle noch einmal durchmischt, wobei gegebenenfalls mitgelieferte Betonzusätze über eine eingebaute Dosiereinheit beigemischt werden. Nach dem Entleeren erfolgt eine Reinigung der Trommel durch das in einem Tank mitgeführte Wasser. [27]

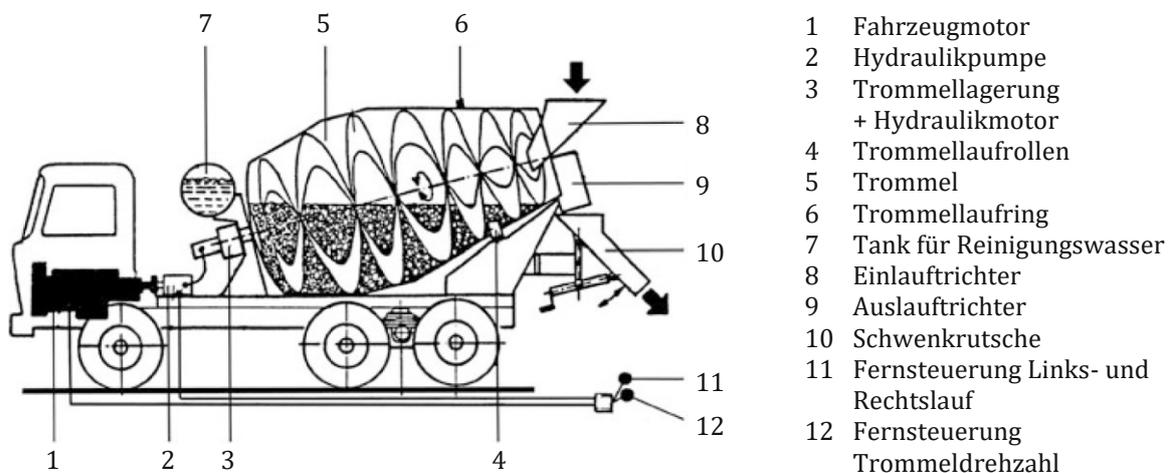


Abb. 5.6: Aufbau eines Fahrmischers [27, S. 20]

Das Einbringen von Beton mit Autobetonpumpen ist neben dem Betonieren mit Kran und Betonkübel eines der häufigsten Einbringverfahren. Es sei darauf verwiesen, dass es noch weitere Methoden gibt, diese jedoch hier nicht weiter erläutert werden. Abb. 5.7 zeigt ein verbreitetes Modell einer Autobetonpumpe. Diese bestehen ähnlich wie Fahrmischer aus einem LKW-Fahrgestell, auf dem eine Betonpumpe sowie ein dreh- und auffaltbarer Verteilermast mit Förderrohr befestigt sind.



Abb. 5.7: Autobetonpumpe [45]

Der Frischbeton wird stetig über die Schwenkrutsche eines Fahrmischers in den Aufgabetrichter gefüllt, welcher sich am hinteren Ende des Fahrzeugs befindet. Von dort wird er mithilfe der Pumpe über die Rohrleitungen des Verteilermastes zur Einbaustelle gefördert. Dort kann die genaue Verteilung des Betons über den Endschlauch durch einen Arbeiter erfolgen.

Der Betoneinbau ist im Allgemeinen mit Kran und Betonkübel wirtschaftlicher als mit Autobetonpumpe, solange der Kran nicht für andere Arbeiten benötigt wird. Erst bei großen Betonmengen, etwa für die Herstellung von Bodenplatten oder Decken, bringt der Einsatz von Autobetonpumpen eine deutliche Zeitersparnis. Bevor diese eingesetzt werden können, muss jedoch zunächst die notwendige Verteilermastlänge ermittelt und die Verfügbarkeit einer ausreichenden Stellfläche auf dem Baufeld sichergestellt werden. Autobetonpumpen verfügen über eine ausfahrbare Abstützvorrichtung, die mit Lastverteilungsplatten ergänzt wird. Die Einhaltung von Sicherheitsabständen zu Baugruben und Freileitungen ist vorab zu prüfen. Ebenso gilt es, die in Abhängigkeit von der Verteilermasthöhe vom Hersteller maximal erlaubte Windstärke für den Einsatz zu beachten. Insgesamt kann für den Auf- und Abbau einer Autobetonpumpe eine Dauer von etwa zehn bis 30 Minuten und für die anschließende Reinigung 15 bis 30 Minuten angenommen werden. [9]

5.2 Untersuchungsobjekt 3 – Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

Der dritte untersuchte Prozess ist die Errichtung eines Rohbaus in Halbfertigteilbauweise. Als Untersuchungsobjekt diente hierzu eine Baustelle im Westen Wiens, auf der die Herstellung von zwei Dachgeschoßstockwerken untersucht werden konnte. Das geplante Wohngebäude befand sich an einer Straßenkreuzung und verfügte über einen L-förmigen Grundriss. Die Bruttogeschoßfläche der Regelgeschoße belief sich auf etwa 1.000 m². Das Gebäude umfasste eine Tiefgarage, die sich über zwei unterirdische Geschoße erstreckte, sowie sieben oberirdische Geschoße, wovon die zwei obersten das Untersuchungsobjekt darstellen. Die Dachflächen der beiden Dachgeschoße wurden als Sargdeckel ausgeführt, wobei das erste Dachgeschoß eine Dachneigung von 60° und das zweite Dachgeschoß eine Dachneigung von 45° aufwies. Über dem zweiten Dachgeschoß entstand ein Flachdach mit Attika. Sowohl straßen- als auch hofseitig fanden sich je neun Gaupen, deren Wände und Dachflächen allesamt mithilfe von Betonhalbfertigteilen hergestellt wurden. Innen- und Außenwände sowie geneigte Dachflächen wurden in Form von Elementwänden gefertigt, während die Decken als Elementdecken ausgeführt wurden. Die einzigen Ausnahmen hinsichtlich der Bauweise bildeten die Fertigteiltreppen und die Innenschalen der zweischaligen Aufzugsschachtwände in den zwei Stiegenhäusern, welche ebenfalls als Fertigteile ausgeführt wurden, sowie vereinzelte kleine Wandelemente in Ortbetonbauweise.

Der Beobachtungszeitraum erstreckte sich vom 27.07.2022 bis zum 02.09.2022 und umfasste 27 Arbeitstage. Er begann mit der Errichtung der Wände im ersten Dachgeschoß. Es sei angemerkt, dass die Herstellung der Decke und aller anderen Bauteile darunter ebenso wenig Gegenstand der Betrachtung ist wie die Herstellung der Attika oder des Gefällebetons auf der Decke über dem zweiten Dachgeschoß. Attika und Gefällebeton wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt betoniert.

Abb. 5.8 liefert eine Übersicht über die Zuordnung einzelner Vorgänge zu den Modulen A4 und A5 der Errichtungsphase laut ÖNORM EN 15978. Der Antransport von Halbfertigteilen, Schalung, Bewehrung und Frischbeton wird hierbei dem Modul A4 zugeordnet. Eine Sonderstellung nehmen hier die Fahrmaschinen ein, da ihre Emissionen einerseits in den reinen Fahrbetrieb des Fahrgestells und andererseits in den Betrieb der Mischtrommel aufgeteilt werden. Die Emissionen durch den Treibstoffverbrauch der Trommel werden dabei dem Modul A5 zugewiesen. Analog dazu können bei den Autobetonpumpen die Anfahrstrecken in Modul A4 und der Betrieb vor Ort in Modul A5 erfasst werden. Der Betrieb des Turmdrehkrans und einiger Kleingeräte fällt ebenso in Modul A5, während die dazugehörigen An- und Abtransporte in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Der Grund dafür ist, dass der Kran über die gesamte Dauer der Baustelle auch für zahlreiche andere Prozesse und Gewerke eingesetzt wird und die daraus entstehenden Emissionen daher nicht eindeutig dem hier betrachteten Prozess zuzuordnen sind. Ähnliches gilt für die Kleingeräte, welche teilweise auch für andere Prozesse eingesetzt werden und deren Transport gemeinsam mit anderen Geräten, Materialien oder dem Personal erfolgte, somit also an dieser Stelle nicht gewertet wird.



Abb. 5.8: Übersicht – Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

5.2.1 Transportbedingte Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A4)

Der Antransport der Halbfertigteile für den betrachteten Gebäudeabschnitt erfolgte durch 33 LKW-Fahrten mit einem Ladegewicht von durchschnittlich etwa 21 t aus einem Werk, das etwa 105 km von der Baustelle entfernt liegt. Die Ermittlung der Transportkilometer für das Schalungsmaterial erfordert aufgrund der eingeschränkten Datenlage einige Annahmen. In Summe wurden über den Verlauf der gesamten Rohbauarbeiten von Baubeginn bis zur Fertigstellung der letzten Geschoße elf Transportfahrten mit Schalungsmaterial zur Baustelle und zehn Rücklieferungen von der Baustelle unternommen. Dadurch ergeben sich insgesamt rund 656 km, die jedoch nicht eindeutig einzelnen Gebäudeabschnitten zugeordnet werden können, da ein großer Teil des Schalungsmaterials über alle Stockwerke hinweg mehrfach verwendet wurde. Vereinfachend wird daher angenommen, dass die Ladung von jeder der 21 LKW-Fahrten zu einem Anteil von 2/9 (es werden zwei von neun Geschoßen betrachtet) dem untersuchten Gebäudeteil zuzuordnen ist. Die Multiplikation der Gesamtkilometer mit dem Faktor ergibt ca. 146 km, welche dem Untersuchungsobjekt zugeschrieben werden. Von den 21 Fahrten wurden vier mit LKWs der Kategorie leichte Nutzfahrzeuge (LNF) (< 3,5 t), 15 mit LKWs der Kategorie SNF (< 18 t) und zwei mit LKWs der Kategorie SNF (> 18 t) getätigt. Die Tonnenkilometer, die sich insgesamt für jede Fahrzeugkategorie ergeben, werden zur weiteren Berechnung jeweils anteilmäßig mit dem Faktor 2/9 berücksichtigt. Bei der Bewehrung kann das angelieferte Material auf Basis von Plänen und Anmerkungen in den Lieferscheinen sehr genau dem betreffenden Gebäudeteil zugeordnet werden. Der Transport beinhaltete insgesamt etwa 18 t Eisen und erfolgte in Form von zwei LKW-Ladungen der Kategorie SNF (< 18 t). Dabei wurden insgesamt etwa 342 km Strecke zurückgelegt.

Bei der Errichtung der zwei Dachgeschoße wurden pro Stockwerk je zwei Deckenabschnitte mittels Autobetonpumpen betoniert. Die An- und Abfahrtswege der Pumpen können anhand der Lieferscheindaten nicht zweifelsfrei beurteilt werden. Laut der mündlichen Auskunft eines Fahrers, wird pro Arbeitstag meist mehr als eine Baustelle angefahren, wobei sich das Einsatzgebiet auf Wien und die nähere Umgebung beschränkt. Als Annahme wird zur Berechnung für den

Anfahrtsweg der vier Fahrten der Mittelwert der Entfernungen aller fünf Betonwerke herangezogen, von denen Frischbeton zur Baustelle geliefert wurde. Für die 103 km, die sich so ergeben, wird der Emissionsfaktor für LKWs der Kategorie SNF (> 18 t) angesetzt, da das Gesamtgewicht der Betonpumpe unter 32 t beträgt [45].

Die Informationen über alle Transportfahrten stammen aus Lieferscheinen, die durch das ausführende Unternehmen in Form von PDF-Dateien zur Verfügung gestellt wurden. Die daraus relevanten Daten wurden in Microsoft Excel übertragen und weiterverarbeitet. Durch die vorhandenen Lieferscheine ist ersichtlich, dass die meisten Transportfahrten durch Transportunternehmen getätigt werden. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit fahren die LKWs in der Regel nach einer Anlieferung weiter und erledigen andere Aufträge, um Leerfahrten zu vermeiden. Zu diesen Strecken oder möglichen Leerfahrten konnten im Rahmen dieser Arbeit keine Informationen gesammelt werden. Im Falle der Bewehrung wurden außerdem vereinzelt Eisen für mehrere unterschiedliche Baustellen mit ein und demselben LKW transportiert. Eine exakte Ermittlung jener Transportkilometer, die vom hier untersuchten Bauprozess verursacht wurden, war somit nicht möglich. Vereinfachend wurden daher in Tab. 5.1 all jene Fahrten berücksichtigt, die eindeutig und belegbar dieser Baustelle kausal zugeordnet werden können, nicht jedoch die möglichen Leerfahrten.

Tab. 5.1: Ermittlung der Transportkilometer für Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

Kategorie	Art	Transportkilometer		
		zu Baustelle	von Baustelle	gesamt
Geräte	Autobetonpumpen	103 km	-	103 km
Material	Halbfertigteile	3.465 km	-	3.465 km
Material	Schalung	70 km	76 km	146 km
Material	Bewehrung	342 km	-	342 km
Material	Beton (Fahrnischer)	997 km	997 km	1.994 km
				6.050 km

Anders verhält es sich lediglich mit dem Transport des Frischbetons. Hier wird davon ausgegangen, dass die Fahrnischer nach jeder Anlieferung direkt zurück zum Betonwerk fahren. Die Belieferung der Baustelle mit Beton erfolgte von fünf verschiedenen Betonwerken mit Entfernungen zwischen 18 km und 31 km zur Baustelle. Für die weiteren Berechnungen wird angenommen, dass jeder Fahrnischer nach der Anlieferung zu jenem Betonwerk zurückfährt, von welchem er gekommen ist, wodurch sich eine Gesamtstrecke von 1.994 km ergibt. Dieser Wert wird im Falle der Fahrnischer jedoch nicht mit den auf Fahrzeugtypen bezogenen Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes multipliziert, da die Leerfahrten sowie der Einfluss der Trommel auf den Verbrauch berücksichtigt werden sollen. Zum Zwecke dieser Diplomarbeit wurde dem Autor

stattdessen eine interne Monatsstatistik über den Fuhrpark eines Betonwerks zur Verfügung gestellt. Diese enthält Informationen über getankte Dieselmengen und zurückgelegte Strecken unterschiedlicher Fahrzeuge. Die 16 darin angeführten Fahrmischer tankten über den Monat August hinweg im Schnitt 1.468 l Diesel und legten durchschnittlich je 2.467 km zurück. Daraus ergibt sich ein mittlerer Verbrauch von 0,597 l/km. Zum Vergleich weisen die zwei gelisteten Fahrzeuge vom Typ Muldenkipper einen durchschnittlich fast halb so großen Verbrauch von 0,329 l/km auf. Aufgrund der ähnlichen Spezifikationen der Fahrgestelle sowie der Gewichtsklassen erscheint es plausibel, die Annahme zu treffen, dass der Treibstoffverbrauch je Kilometer sich bei beiden Fahrzeugtypen nur durch den Betrieb der Trommel unterscheidet. Daher wird im nächsten Schritt die Differenz der beiden Verbrauchswerte herangezogen, um jenen Dieserverbrauch abzubilden, der auf den reinen Mischtrommelbetrieb zurückzuführen ist. Dieses Ergebnis wird in Kapitel 5.2.2 verwendet, indem es in Tab. 5.10 dem Modul A5 zugeordnet wird.

$$0,597 - 0,329 = 0,269 \text{ l/km}$$

$$0,269 * 1.944 = 536 \text{ l}$$

Entsprechend der oben getroffenen Annahme wird der Dieserverbrauch des reinen Fahrbetriebs der Fahrmischer mit dem Verbrauch der Muldenkipper gleichgesetzt, um die für den Transport verbrauchte Treibstoffmenge zu erhalten.

$$0,329 * 1.944 = 656 \text{ l}$$

Mithilfe des Emissionsfaktors für den Energieträger Diesel errechnen sich die THG-Emissionen zufolge der Frischbetontransporte wie in Tab. 5.3 dargestellt. Tab. 5.2 zeigt die Berechnung der restlichen transportbedingten Emissionen mit den fahrzeugbezogenen Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes, während Tab. 5.4 einen Überblick über die Gesamtemissionen für das Modul A4 liefert.

Tab. 5.2: Transportbedingte THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A4) exklusive Transportbeton/Fahrmischer – Emissionsfaktoren nach [21]

Fahrzeug	Emissionsfaktor gesamt	Tonnenkilometer	THG-Emissionen
LKW SNF (> 18 t)	149,3 g/tkm	74.949 tkm	11.190 kg CO ₂ -eq
LKW SNF (< 18 t)	380,0 g/tkm	4.019 tkm	1.527 kg CO ₂ -eq
LKW LNF (< 3,5 t)	932,5 g/tkm	4 tkm	4 kg CO ₂ -eq
			12.721 kg CO₂-eq

Tab. 5.3: Transportbedingte THG-Emissionen durch Transportbeton/Fahrmischer (Modul A4) – Emissionsfaktoren nach [6]

Energie- träger	Emissionsfaktor			Verbrauch	THG-Emission
	direkte Emission	indirekte Emission	gesamt		
Diesel (inkl. 5,5 % Bio- kraftstoffanteil)	2,493 kg/l	0,642 kg/l	3,134 kg/l	656 l	2.055 kg CO ₂ -eq
					2.055 kg CO₂-eq

Tab. 5.4: Transportbedingte THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A4)

Quelle	Energieträger	THG-Emission
Transport Autobetonpumpe	Diesel	415 kg CO ₂ -eq
Transport Frischbeton (Fahrmischer)	Diesel	2.055 kg CO ₂ -eq
Transport restlicher Materialien	Diesel	12.306 kg CO ₂ -eq
		14.776 kg CO₂-eq

5.2.2 Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Errichtung – Modul A5)

Die ausgewerteten Lieferscheine geben Auskunft über die eingebauten Betonmengen sowie das von den Autobetonpumpen geförderte Betonvolumen. Demnach wurden mit 43 Fahrmischern etwa 319 m³ Beton angeliefert. Es handelt sich dabei bereits um das verdichtete Volumen des Betons. Davon wurden 205 m³ mit Autobetonpumpen eingebracht.

Tab. 5.5 zeigt die Ermittlung der benötigten Betonmengen aus einem durch das ausführende Unternehmen bereitgestellten Building Information Modelling (BIM) Modell und kann als Plausibilitätsprüfung für die aus den Lieferscheinen ermittelten Daten dienen.

Tab. 5.5: Massenermittlung Frischbeton

Gebäudeteil	Elementdecken	Elementwände	Ortbetonwände	Dachflächen
1. Dachgeschoß	126,35 m ³	42,87 m ³	3,32 m ³	18,34 m ³
2. Dachgeschoß	59,65 m ³	27,88 m ³	1,13 m ³	30,08 m ³
	185,99 m³	70,75 m³	4,45 m³	48,42 m³

In Summe ergeben sich daraus ca. 310 m³, was einer knapp 3 % geringeren Menge entspricht, als laut den Lieferscheinen tatsächlich verbraucht wurde. Der Unterschied lässt sich durch Ungenauigkeiten im Modell und Verluste beim Einbau erklären.

Das Betonieren der Wände und Dachflächen erfolgte lageweise mittels Turmdrehkran und Betonkübel. Dabei kam Großteiles selbstverdichtender Beton zum Einsatz, der über einem Kübel mit 1,0 m³ Fassungsvermögen eingebracht wurde. Zur besseren Bedienbarkeit war dieser mit einer Funkfernsteuerung sowie einem Schlauch ausgestattet. Zur Vermeidung von Verlusten und Verunreinigungen wurden die Elemente nicht vollständig bis zum oberen Rand befüllt. Erst nachdem alle Deckenelemente eines Gebäudeabschnitts in Position gebracht, bewehrt und alle Leerrohre für zukünftige Leitungen verlegt waren, kamen Autobetonpumpen zum Einsatz. Mit diesen wurden zunächst die Spalte zwischen den Deckenelementen und somit auch die restlichen, darunter liegenden Hohlräume der Wand- und Dachflächenelemente verfüllt. Hierfür wurde pro Abschnitt zuerst eine Betonmenge von ein bis zwei Fahrmischern mit einem kleineren Größtkorn von 8 mm verbaut. Für die restlichen Dachflächen wurde im Anschluss Beton mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Danach wurde der frische Beton manuell verteilt und mit Innenrüttlern verdichtet. Die anfänglich unvollständige Befüllung der Elemente mit dem Betonkübel erklärt den Unterschied zwischen dem gepumpten Betonvolumen laut der Lieferscheindaten und dem in Tab. 5.5 angeführten, theoretisch benötigten Betonvolumen für die Elementdecken.

Die direkt auf der Baustelle durch den untersuchten Bauprozess verursachten Emissionen (Modul A5) stammen einerseits aus dem Betrieb der Mischtrommeln aller Fahrmischer sowie den Einsätzen der Autobetonpumpen vor Ort und andererseits aus dem Stromverbrauch des Krans sowie von Kleingeräten. Über den Baustromzähler konnten mit der Zustimmung des ausführenden Unternehmens durch die Auskunft der Wiener Netze GmbH monatliche Messwerte für den Stromverbrauch der gesamten Baustelle ab Baubeginn nachvollzogen werden. Diese werden in Tab. 5.6 tabellarisch und in Abb. 5.9 in Form eines Liniendiagramms dargestellt.

Tab. 5.6: monatlicher Gesamtstromverbrauch von Beginn der Baustelle bis zwei Tage vor Fertigstellung des untersuchten Gebäudeabschnitts

Datum der Messung	Stromverbrauch
30.11.2021	3.192,8 kWh
31.12.2021	3.080,0 kWh
31.01.2022	4.021,6 kWh
28.02.2022	5.455,2 kWh
31.03.2022	4.269,6 kWh
30.04.2022	2.298,4 kWh
31.05.2022	2.178,4 kWh
30.06.2022	2.256,8 kWh
31.07.2022	2.397,6 kWh
31.08.2022	

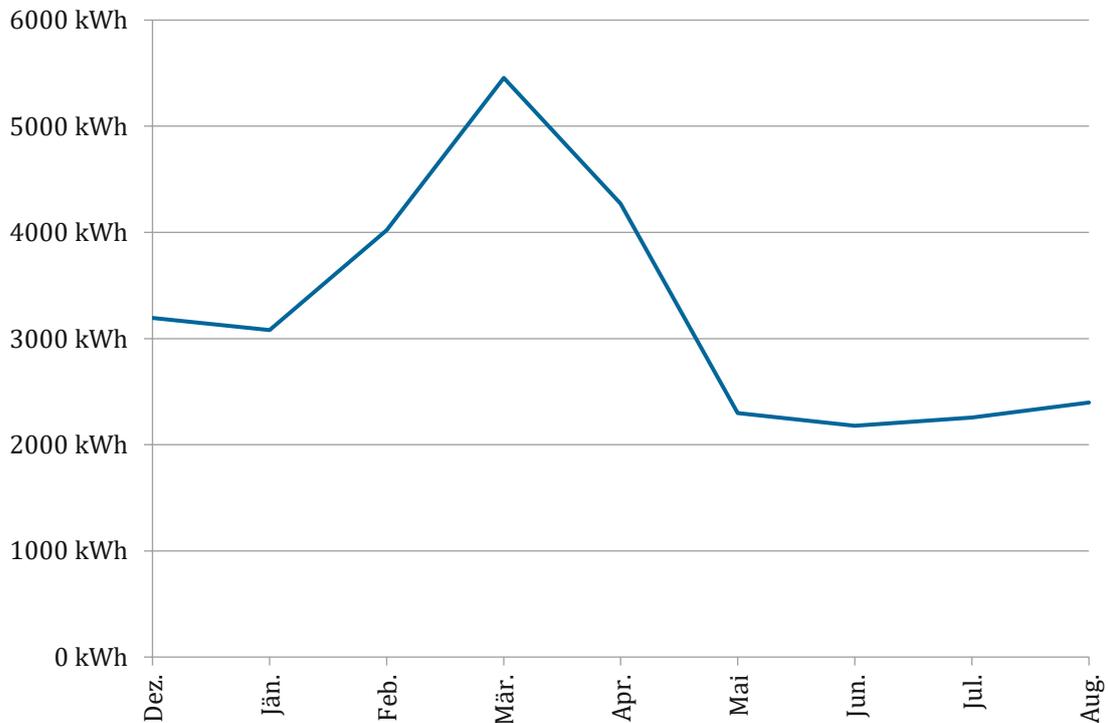


Abb. 5.9: Liniendiagramm – Gesamtstromverbrauch der Baustelle

Der anfängliche Stromverbrauch der Baustelle lag in den Monaten Dezember und Jänner jeweils über 3.000 kWh. Zu dieser Zeit fanden vor allem Bohrpfahl- und Aushubarbeiten statt. Für die Übergangszeit ist ein deutlich höherer Verbrauch mit einer Spitze von fast 5.500 kWh im März 2022 zu erkennen. Die Gründe dafür sind vor allem im Beginn der Stahlbetonarbeiten zu vermuten. Der erhöhte Personaleinsatz auf der Baustelle und die damit verbundene stärkere Nutzung der Baucontainer spielen hierbei ebenso eine Rolle wie die Montage und der Einsatz des Krans, beginnend mit Februar. Die Containerburg setzte sich aus je einem Sanitär-, Toiletten-, Aufenthalts- sowie drei Mannschaftscontainern zusammen, wobei Heizen und Kühlen hier wahrscheinlich den größten Anteil am Verbrauch hatten. Insgesamt verfügten drei der Container über eine elektrische Heizung und eine Klimaanlage, der Rest lediglich über eine Heizung. Das Baubüro befand sich im Erdgeschoß eines etwa 150 m entfernten Gebäudes, war nicht an denselben Stromzähler angeschlossen und wird an dieser Stelle auch nicht weiter berücksichtigt. Ein weitaus niedrigerer Stromverbrauch ist beginnend mit rund 2.300 kWh im Mai sichtbar. Zeitlich fällt dies mit dem Aufkommen von deutlich milderem Wetter zusammen, wodurch von einem niedrigeren Heiz- und Kühlbedarf ausgegangen werden kann. Außerdem begannen Anfang Mai die Arbeiten in den oberirdischen Geschoßen, wo ein deutlich geringerer Einsatz von Ortbeton zugunsten der Halbfertigteilbauweise erkennbar ist. Für den Monat August 2022 mit seinen 22 Arbeitstagen ergibt sich daraus ein Gesamtstromverbrauch von etwa 2.400 kWh. Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil davon für den Betrieb des Krans verbraucht wurde. Der restliche Strom ist einerseits den Kleingeräten und andererseits der Baustelleneinrichtung, insbesondere den Baucontainern zuzuordnen. Im untersuchten Zeitraum konnte außerdem beobachtet werden, dass die zuvor hergestellten unterirdischen Räumlichkeiten zur Einlagerung von Geräten und die Tiefgarage zum Abstellen von Fahrzeugen genutzt wurden. Zur Ausleuchtung dieser Gebäudeteile wurden Leuchtstoffröhren installiert. Als Grund für den flachen Anstieg des Stromverbrauchs im Juli und August können die zunehmende Hitze und der erhöhte Einsatz der Klimaanlagen sowie die Mitte Juli bzw. Anfang August begonnenen Arbeiten an Heizung, Klima, Lüftung, Sanitär (HKLS) und Trockenbau.

Als Kran kam ein obendrehender Turmdrehkran mit einem 40 m langen Biegebalkenausleger und einer Hakenhöhe von 42 m zum Einsatz. Um seinen Stromverbrauch zu berechnen, werden Werte aus der Literatur herangezogen, da eine Messung nicht möglich war. Das Zwischenschalten eines eigenen Stromzählers für den Kran kam seitens des ausführenden Unternehmens nicht infrage und Telematikdaten standen nicht zur Verfügung.

Durch die Beobachtung des Bauablaufs vor Ort konnte festgestellt werden, dass der Einsatz des Krans so abgestimmt war, dass dieser während der Betonpumpeneinsätze stets auf einem anderen Gebäudeabschnitt mit Montage- und Versetzarbeiten beschäftigt war. Trotzdem konnten auch Stillstandszeiten von mehreren Stunden beobachtet werden und sogar ein Tag, an dem der Kran kaum im Einsatz war. Die Betonarbeiten mit Halbfertigteilen waren im betrachteten Zeitraum der einzige Bauprozess, dem der Kran diente. Neben der Montage der Halbfertigteile und dem Betonieren mit Krankübel zählt dazu auch das Versetzen des Schalungsmaterials, der Bewehrungseisen und fallweise kleinerer Geräte innerhalb der Baustelle.

Laut *Krause* und *Ulke* variiert der Stromverbrauch von obendrehenden Turmdrehkränen stark, kann jedoch in Abhängigkeit von der Auslastung mit 0,10 kWh bis 0,25 kWh je kW installierter Leistung und Stunde bemessen werden. Diese Werte sind dadurch zu erklären, dass Krane sogar unter voller Auslastung nur zu 50 % der Zeit arbeiten und währenddessen nicht alle Motoren gleichzeitig und unter Vollast laufen. [46]

Deshalb wird zunächst die Leistung der einzelnen Motoren anhand des technischen Datenblatts für den Kran zusammengezählt: Der Antrieb des Hubwerks weist eine Leistung von 45 kW auf, während das Dreh- und Katzfahrwerk jeweils über 7,5 kW verfügen [47]. Ein Kranfahrwerk war beim vorhandenen Gerät nicht verbaut, weshalb sich die installierte Leistung zu insgesamt 60 kW ergibt.

$$0,15 * (45 + 7,5 + 7,5) * 8 h = 72 kWh/AT$$

$$72 * 27 AT = 1.944 kWh$$

Mit einer Annahme von 0,15 kWh je kW installierter Leistung und einer täglichen Arbeitszeit von 8,0 h wird für die nachfolgenden Berechnungen ein Stromverbrauch des Turmdrehkrans von 72 kWh pro Arbeitstag angesetzt. Über den Betrachtungszeitraum von 27 Arbeitstagen bedeutet das einen Stromverbrauch von knapp 1.944 kWh.

Zu den eingesetzten Kleingeräten gehörten unter anderem ein Innenrüttler, eine Tischkreissäge sowie einige akkubetriebene Bohrhämmer, Bohrmaschinen, Handkreissägen, Stichsägen und Winkelschleifer. Die bei der Errichtung der zwei Dachgeschoße verwendeten Geräte wurden vor Ort dokumentiert und im Nachhinein mit einer Baugeräteliste abgeglichen.

Nach *Schach* und *Otto* kann der Stromverbrauch induktiver Verbraucher auf der Baustelle durch das Multiplizieren der Summe ihrer abgegebenen Leistungen mit der geschätzten Benutzungsdauer und anschließende Division durch den Wirkungsgrad abgeschätzt werden. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von zugeführter und abgegebener Leistung innerhalb des Verbrauchers und kann beim Zusammenfassen mehrerer Verbraucher mit einem Wert von 0,75 bis 0,85 angenommen werden. [9]

Tab. 5.7 zeigt eine Auflistung jener Kleingeräte, die für den untersuchten Bauprozess über den Betrachtungszeitraum von 27 Arbeitstagen zum Einsatz kamen. Die Angaben zur Leistung wurden entweder direkt vor Ort von den Geräten abgelesen oder über Datenblätter verifiziert. Teilweise mussten dabei Datenblätter vergleichbarer Geräte herangezogen werden, da die genauen Modellbezeichnungen nicht immer festgestellt werden konnten. Akkubetriebene Geräte werden durch den Stromverbrauch ihrer Ladegeräte berücksichtigt, wobei manche Ladegeräte zum Laden der Akkus mehrerer Geräte eingesetzt wurden. Die Benutzungsdauer der jeweiligen Kleingeräte wurde anhand der Beobachtungen vor Ort geschätzt.

Tab. 5.7: Leistung und Benutzungsdauer der Kleingeräte im Betrachtungszeitraum

Gerät	Leistung	Benutzungsdauer
Tischkreissäge	3,00 kW	2,00 h
Innenrüttler	0,75 kW	10,00 h
Bohrhammer	1,01 kW	1,00 h
Winkelschleifer	2,00 kW	1,00 h
Handkreissäge	2,00 kW	1,00 h
Ladegerät 1	0,35 kW	5,00 h
Ladegerät 2	0,10 kW	5,00 h
Ladegerät 3	0,10 kW	5,00 h
Ladegerät 4	0,10 kW	5,00 h
	9,41 kW	35,00 h

Bei Annahme eines Wirkungsgrads von 0,8 ergibt sich über den betrachteten Zeitraum von 27 Arbeitstagen ein Stromverbrauch der Kleingeräte von etwa 412 kWh.

$$\frac{9,41 * 35 \text{ h}}{0,8} = 411,69 \text{ kWh}$$

In Tab. 5.8 ist der gesamte, den Betonarbeiten mit Halbfertigteilen zuzuordnende Stromverbrauch auf der Baustelle zu sehen.

Tab. 5.8: Stromverbrauch bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A5)

Gerät	Stromverbrauch
Turmdrehkran	411,69 kWh
Kleingeräte	1.944,00 kWh
	2.355,69 kWh

Zur Plausibilitätsprüfung dieser Werte wird der tatsächliche Gesamtstromverbrauch der Baustelle für den Monat August laut Tab. 5.6 herangezogen. Bei Division durch die 22 Arbeitstage dieses Monats ergibt das einen Durchschnittsverbrauch von fast 109 kWh/AT. Der tatsächliche Zeitraum der Errichtung der beiden Dachgeschoße umfasst neben dem gesamten August auch die letzten drei Tage im Juli sowie die ersten zwei Tage im September. Durch das Hochrechnen des durchschnittlichen Tagesverbrauchs auf diese 27 Arbeitstage ergeben sich über 2.900 kWh.

$$\frac{2.397,60}{22 \text{ AT}} = 108,98 \text{ kWh/AT}$$

$$108,98 * 27 \text{ AT} = 2.942,51 \text{ kWh}$$

Der ermittelte Stromverbrauch für Modul A5 entspricht also etwa 80 % des Gesamtstromverbrauchs in diesem Zeitraum.

Die Emissionen aus den Fahrstrecken der Fahrmischer und Autobetonpumpen wurden in Kapitel 5.2.1 bereits abgehandelt. Gleiches gilt für den Treibstoffverbrauch der Fahrmischer aufgrund des Mischtrommelbetriebs. Dieser wurde auf Seite 58 als Differenz der Durchschnittsverbräuche der Fahrmischer und Muldenkipper berechnet und ergab 536 l. Was noch zu berücksichtigen bleibt, sind jene Emissionen, die durch den Betrieb der Pumpen auf der Baustelle selbst anfallen. Da hierfür, wie auch beim Kran keine Telematikdaten verfügbar waren, muss der Verbrauch auf andere Art abgeschätzt werden. Die durch das Betonwerk bereitgestellte Monatsstatistik für August 2022 in Tab. 5.9 umfasst die Streckenkilometer und getankten Dieselmengen für fünf Autobetonpumpen. Bei einem der Geräte ist außerdem die geförderte Betonmenge bekannt.

Tab. 5.9: Treibstoffverbrauch von Autobetonpumpen (Auszug aus Monatsstatistik August)

Gerät	zurückgelegte Strecke	Liter getankt	Verbrauch	Fördermenge
Autobetonpumpe 1	1.110 km	1.098 l	0,99 l/km	-
Autobetonpumpe 2	654 km	1.254 l	1,92 l/km	2.063 m ³
Autobetonpumpe 3	1.305 km	1.295 l	0,99 l/km	-
Autobetonpumpe 4	613 km	2.235 l	3,65 l/km	-
Autobetonpumpe 5	905 km	1.639 l	1,81 l/km	-

Es gilt jedoch zu beachten, dass die hier gelisteten Werte für den Treibstoffverbrauch sowohl aus dem Fahr- als auch aus dem Pumpbetrieb der Geräte stammen. Außerdem ist zu erkennen, dass der Verbrauch von Gerät zu Gerät stark variiert. Da es sich bei allen Fahrgestellen um die gleichen Modelle oder zumindest solche mit ähnlichen Spezifikationen handelt, wird davon ausgegangen werden, dass diese Unterschiede im Treibstoffverbrauch nicht auf den Fahr-, sondern großteils auf den Pumpbetrieb zurückzuführen sind. Bei Letzterem können sich Rahmenbedingungen wie Förderlänge, Förderhöhe oder Rohrdurchmesser, die den erforderlichen Förderdruck und somit auch den Treibstoffverbrauch maßgeblich beeinflussen, je nach Einbausituation stark unterscheiden.

Aufgrund der kleinen Stichprobe von nur fünf Fahrzeugen und des beschränkten Betrachtungszeitraums kann der Statistik zum Zwecke der weiteren Berechnungen nicht genügend Aussagekraft beigemessen werden. Stattdessen wird auf interne Erfahrungswerte des Betonwerks zurückgegriffen. Demnach kann für den Dieserverbrauch im Pumpbetrieb ein Durchschnittswert von rund 1,0 l/m³ angenommen werden. Nach Auswertung der Lieferscheine ergibt sich daraus ein Gesamtdieserverbrauch der Autobetonpumpen von etwa 205 l.

Tab. 5.10 fasst die dem Modul A5 zugeordneten Diesel- und Stromverbräuche zusammen und zeigt die daraus resultierenden THG-Emissionen auf.

Tab. 5.10: THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Errichtung – Modul A5)

Energie-träger	Emissionsfaktor			Verbrauch	THG-Emission
	direkte Emission	indirekte Emission	gesamt		
Diesel (inkl. 5,5 % Bio- kraftstoffanteil)	2,493 kg/l	0,642 kg/l	3,134 kg/l	741 l	2.321 kg CO ₂ -eq
Stromaufbringung Österreich	-	-	0,202 kg/kWh	2.356 kWh	476 kg CO ₂ -eq
					2.797 kg CO₂-eq

5.2.3 Gesamtemissionen der Errichtungsphase bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A4-A5)

Tab. 5.11 und Abb. 5.10 zeigen alle in den zwei vorangegangenen Unterkapiteln berücksichtigten THG-Quellen und ihren Anteil an den Gesamtemissionen bei der Errichtung der zwei untersuchten Dachgeschoße eines Wohnhauses. Insgesamt wurden rund 8,6 t CO₂-eq emittiert.

Tab. 5.11: Verteilung der THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

Quelle	Modul	THG-Emissionen
Halbfertigteile	A4	10.729 kg CO ₂ -eq
Schalung	A4	406 kg CO ₂ -eq
Bewehrung	A4	1.170 kg CO ₂ -eq
Fahrmischer	A4	2.055 kg CO ₂ -eq
Autobetonpumpen	A4	415 kg CO ₂ -eq
Fahrmischer	A5	1.679 kg CO ₂ -eq
Autobetonpumpen	A5	642 kg CO ₂ -eq
Kran	A5	393 kg CO ₂ -eq
Kleingeräte	A5	83 kg CO ₂ -eq
		17.573 kg CO₂-eq

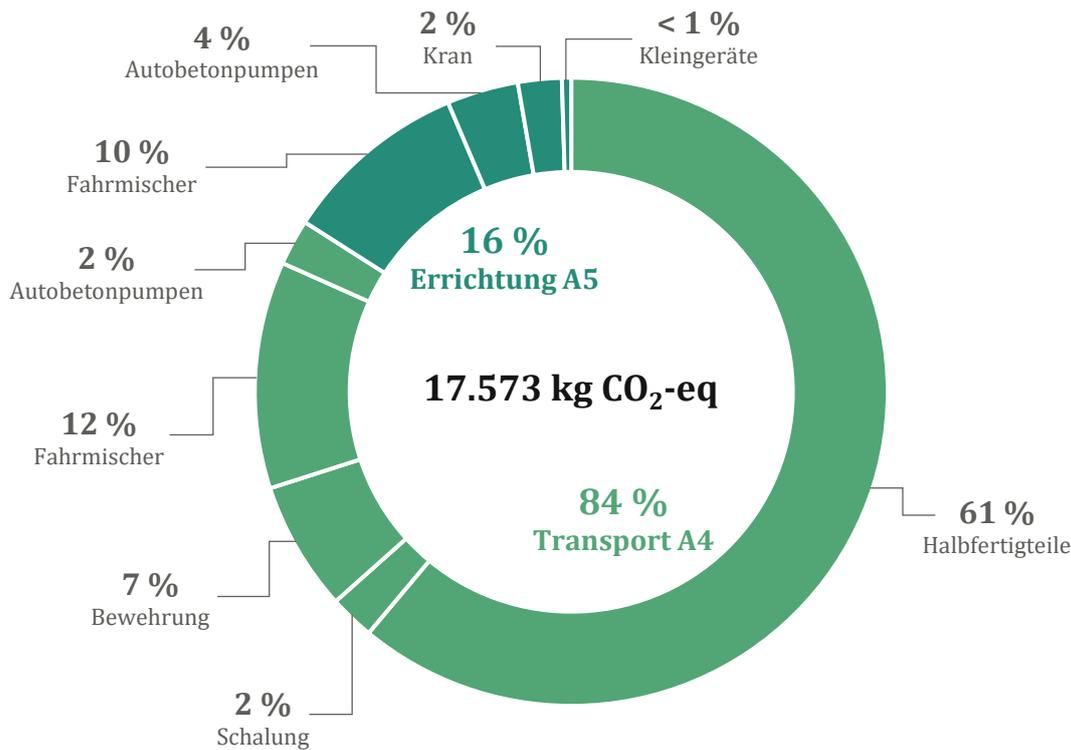


Abb. 5.10: Verteilung der THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

Rund 84 % der am Untersuchungsobjekt festgestellten und von den Betonarbeiten mit Halbfertigteilen in der Errichtungsphase verursachten THG-Emissionen, stammen aus Transporten von und zur Baustelle (Modul A4), während nur etwa 16 % direkt durch die Errichtung und den Einbau vor Ort (Modul A5) verursacht wird. Den mit Abstand größten Anteil an Modul A4 nehmen aufgrund der hohen Gesamtstrecke und des Gewichts die Transporte der Halbfertigteile ein. Gefolgt werden diese vom Frischbetontransport durch die Fahrmischer. Das in Kapitel 5.2.1 erläuterte Miteinbeziehen aller Leerfahrten in die Berechnung wirkt sich hierbei deutlich auf das Ergebnis aus. Auch in Modul A5 spielen die Fahrmischer eine wesentliche Rolle. Durch die 43 Betonlieferungen mit einer aus Lieferscheindaten abgeleiteten durchschnittlichen Verweildauer auf der Baustelle von 62 Minuten, verursachten die Mischertrommeln insgesamt deutlich mehr Emissionen als die Autobetonpumpen, welche nur vier Mal zum Einsatz kamen. Letztere emittierten wiederum in dieser kurzen Zeit im Betrieb mehr Treibhausgase als der Kran über die gesamten 27 Arbeitstage.

Wird das Gesamtergebnis von Untersuchungsobjekt 3 auf das aus dem BIM-Modell ermittelte Gesamtvolumen an verbautem Stahlbeton (inkl. vorgefertigter Halbfertigteile) bezogen, so ergibt sich für den betrachteten Bauprozess ein THG-Emissionskennwert von $30,28 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$.

6 Fazit

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die wesentlichsten Aussagen und Inhalte aus Kapitel 1 bis Kapitel 5 zusammengefasst und die Ergebnisse analysiert. Durch die Beantwortung Forschungsfragen können die Erkenntnisse aus der Feldforschung kontextualisiert und Handlungsempfehlungen für die Zukunft abgeleitet werden. Am Ende des Kapitels werden mögliche Ansätze für weiterführende Forschungsbestrebungen präsentiert.

6.1 Zusammenfassung

Der steigende Ausstoß von anthropogenen Treibhausgasen ist ein wesentlicher Grund für die heutige Klimakrise. Durch eine zu hohe Konzentration an THG in der Atmosphäre kann die von der Erdoberfläche reflektierte Wärmestrahlung der Sonne nicht ausreichend entweichen, wodurch es zu einer Aufheizung der Atmosphäre kommt. Die Auswirkungen dieser Erwärmung werden in unserem Alltag immer sichtbarer und sind für Menschen, Tiere und Pflanzen gravierend. Neben den rein ökologischen Folgen verursachen die weltweite Veränderung der klimatischen Bedingungen und die Häufung von Extremwetterereignissen auch große ökonomische Schäden sowie soziale Probleme. [2]

Die größte Quelle für THG-Emissionen ist die Nutzung fossiler Energieträger in den Sektoren Industrie, Verkehr, Landwirtschaft und Gebäude, die mit der Industrialisierung begonnen hat. In den letzten Jahrzehnten gab es national und international Bestrebungen und Übereinkünfte darüber, die THG-Konzentration in der Atmosphäre zu senken. Die Europäische Union hat etwa beschlossen, ab 2050 netto keine THG-Emissionen mehr auszustoßen, während Österreich sich das Ziel gesetzt hat, die Klimaneutralität bereits bis 2040 zu erreichen. Da die bisherigen Maßnahmen bei weitem nicht ausreichen, um die nationalen Ziele zu erreichen, erscheint es umso wichtiger, zukünftig nach neuen Wegen zu suchen, die THG-Emissionen zu reduzieren. [2]

Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf dem Bausektor, zumal er für rund 40 % der weltweiten THG-Emissionen verantwortlich ist [3]. Der Großteil dieser Emissionen stammt aus dem Betrieb von Gebäuden, doch mit einem zunehmenden Sanierungsgrad des Gebäudebestandes und der hohen Energieeffizienz von Neubauten rücken die sogenannten grauen Emissionen immer stärker in den Fokus. Diese stammen aus der Herstellungs-, Errichtungs- und Entsorgungsphase von Bauwerken sowie aus Reparatur-, Instandhaltungs- und Modernisierungsarbeiten. [4]

Trotz des kleinen Anteils an den Gesamtemissionen spielt aus der Sicht des Baubetriebs und vieler ausführender Unternehmen vor allem die Errichtungsphase eine bedeutsame Rolle. ÖNORM EN 15978 ordnet der Errichtungsphase eines Gebäudes die Emissionen aus allen Transporten zu, die zum und vom Standort getätigt werden (Modul A4). Ebenso werden alle Emissionen aus Prozessen und Tätigkeiten vor Ort dazugezählt, die der Errichtung oder dem Einbau dienen (Modul A5). [8]

Unter Berücksichtigung dieser Systemgrenzen werden in den Kapiteln 3 bis 5 die Bauprozesse Baugrubenaushub, Spundwandaarbeiten und Betonarbeiten mit Halbfertigteilen hinsichtlich der von ihnen verursachten THG-Emission untersucht. Um dies zu bewerkstelligen, wurden im

Rahmen mehrmonatiger Feldforschung Daten auf unterschiedlichen Baustellen gesammelt. Dies umfasste neben Fotos, Videos sowie der Dokumentation eigener Beobachtungen und Gespräche vor allem Planunterlagen unterschiedlicher Art, Bautagesberichte, Lieferscheine und Aufzeichnungen zu Betriebsstoffverbräuchen. Die Emissionen aus Transportfahrten werden hauptsächlich durch erfasste Transportkilometer berücksichtigt und mithilfe von Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes berechnet, die sich auf die Kategorie des Fahrzeugs und dessen Auslastungsgrad beziehen. Für die restlichen Teilvorgänge der jeweiligen Bauprozesse und einige gesondert betrachtete Transportfahrten dienen die Betriebsstoffverbräuche als Basis für die Berechnung der THG-Emissionen. Letztere werden in diesem Fall mithilfe von Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes für die entsprechenden Energieträger ermittelt.

Das erste Untersuchungsobjekt ist eine rund 27.700 m³große Baugrube nördlich von Wien. Die Herstellung von Baugruben setzt sich in der Regel aus mehreren Teilvorgängen zusammen, für die unterschiedliche Erdbaugeräte und Nutzfahrzeuge notwendig sein können. Im untersuchten Fall war die genaue Zuordnung der ermittelten THG-Emissionen zu den Modulen A4 und A5 nach ÖNORM EN 15978 aufgrund der vorliegenden Datenlage nur für den Teilvorgang des reinen Aushubs durch einen Hydraulikbagger möglich. Die Emissionen aus dem Transport des Aushubmaterials zu Zwischenlager und Verwertungsort sowie jene, die durch das Planieren, Walzen und Herstellen von Fundamentvertiefungen verursacht wurden, konnten in ihrer Größe erfasst werden. Eine genaue Zuweisung zu den Modulen der Errichtungsphase war mit ihnen jedoch nicht möglich, weshalb sie gesondert betrachtet werden. Weitere Teilvorgänge, wie etwa die Herstellung eines Verbaus der Baugrubenwände oder eine Wasserhaltung wurden nicht ausgeführt und sind daher nicht Teil der Betrachtung. Das ausführende Unternehmen betrieb seine Fahrzeug- und Baugeräteflotte bei der Abwicklung der untersuchten Erdarbeiten zum überwiegenden Teil mit HVO100-Kraftstoff. Da dies gegenwärtig nicht der gängigen Praxis entspricht, wird zusätzlich ein fiktives Szenario untersucht, in dem angenommen wird, dass alle Teilvorgänge bei Untersuchungsobjekt 1 gänzlich mit Diesel (inkl. 5,5 % Biokraftstoffanteil) abgewickelt wurden.

Untersuchungsobjekt 2 ist die Baustelle eines Hochhausprojekts in Wien, auf der Spundwandarbeiten durchgeführt wurden. Spundwände sind eine der am weitesten verbreiteten Verbauarten in Österreich. Neben dem Rammen und Einpressen ist das Vibrieren eines der häufigsten Einbringverfahren für Stahlspundbohlen. Auf der untersuchten Baustelle wurde eine etwa 4.300 m² große Baugrube mit rund 3.450 m² Spundbohlen umschlossen. Dabei kam ein mobiles Rammsystem zum Einsatz, welches mit einem Bohrantrieb inkl. Bohrgestänge sowie einem Vibrator ausgestattet war. Das Einbringen erfolgte abschnittsweise, indem zunächst Lockerungsbohrungen in regelmäßigen Abständen angeordnet wurden, ehe die Spundbohlen versetzt und einvibriert werden konnten.

Der dritte Bauprozess, nämlich die Betonarbeiten mit Halbfertigteilen, konnte ebenfalls auf einer innerstädtischen Baustelle beobachtet werden. Die Halbfertigteilbauweise zeichnet sich gegenüber der Ort betonbauweise durch eine Aufwandsersparnis auf der Baustelle durch teilweise Vorfertigung von Bauteilen im Werk aus. Mit dem Einsatz von Elementdecken und Elementwänden kann ein Großteil der Schalungsarbeiten entfallen. Die Halbfertigteile werden in der Regel direkt vom LKW gehoben und in Position gebracht. Nach den Schalungs- und Bewehrungsarbeiten folgt das Betonieren und Verdichten. Im konkreten Fall von Untersuchungsobjekt 3 wurde die

Errichtung von zwei Dachgeschoßstockwerken eines Wohngebäudes untersucht. Die Halbfertigteile wurden dabei mit einem Turmdrehkran versetzt. Das Betonieren der Wände und Dachschrägen erfolgte mit Kran und Betonkübel, während die großflächigen Decken mithilfe von Autobetonpumpen betoniert wurden.

6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Anhand der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln können die zwei in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen beantwortet werden:

6.2.1 Forschungsfrage 1

Wie groß sind die jeweiligen THG-Emissionen (pro Leistungseinheit), die durch die drei Bauprozesse Baugrubenaushub, Spundwandarbeiten und Betonarbeiten mit Halbfertigteilen in der Errichtungsphase verursacht werden?

Beim Baugrubenaushub müssen die zwei berechneten Szenarien grundsätzlich getrennt voneinander betrachtet werden. Im tatsächlich untersuchten Fall mit hauptsächlichem Einsatz von HVO100 als Kraftstoff wurden für den reinen Aushub der Baugrube (Teilprozess a) – Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger rund 6,2 t CO₂-eq emittiert, während es bei reinem Dieseltreibstoff 26,2 t CO₂-eq waren. In Abb. 6.1 sind die ermittelten THG-Emissionskennwerte (THG-Emissionen pro Leistungseinheit) der beiden Szenarien im Vergleich zueinander abgebildet.

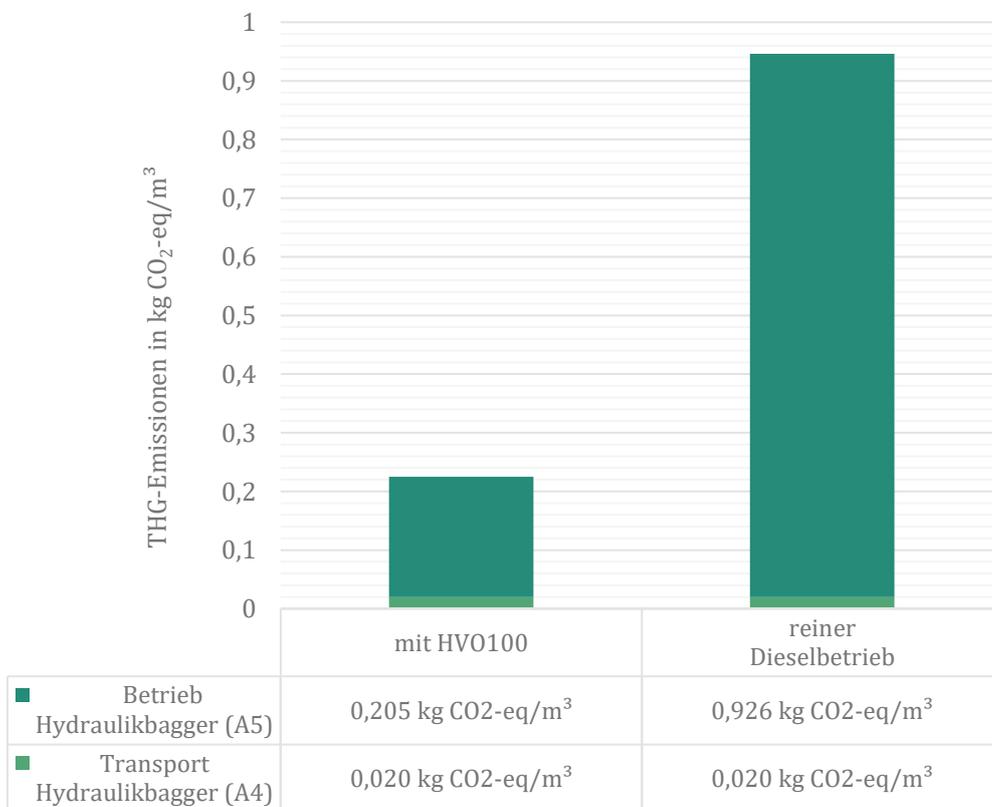


Abb. 6.1: THG-Emissionskennwerte für Aushub mit Hydraulikbagger – Vergleich untersuchter Szenarien

Das Balkendiagramm in Abb. 6.2 stellt die zusätzlich ermittelten Gesamtemissionen der Teilprozesse a) und b) der beiden Szenarien gegenüber und zeigt eindeutige THG-Einsparungen bei der tatsächlich ausgeführten Variante mit HVO100 gegenüber jener mit reinem Dieselbetrieb, welche zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch den Standardfall in der Baubranche darstellt. Teilprozess a) wird dabei jeweils grün und Teilprozess b) grau dargestellt. Während im Szenario mit reinem Dieselbetrieb insgesamt rund 57,4 t CO₂-eq anfallen würden, waren es in der Realität durch die Substitution eines Großteils des Diesels mit HVO100 nur etwa 20,8 t CO₂-eq.

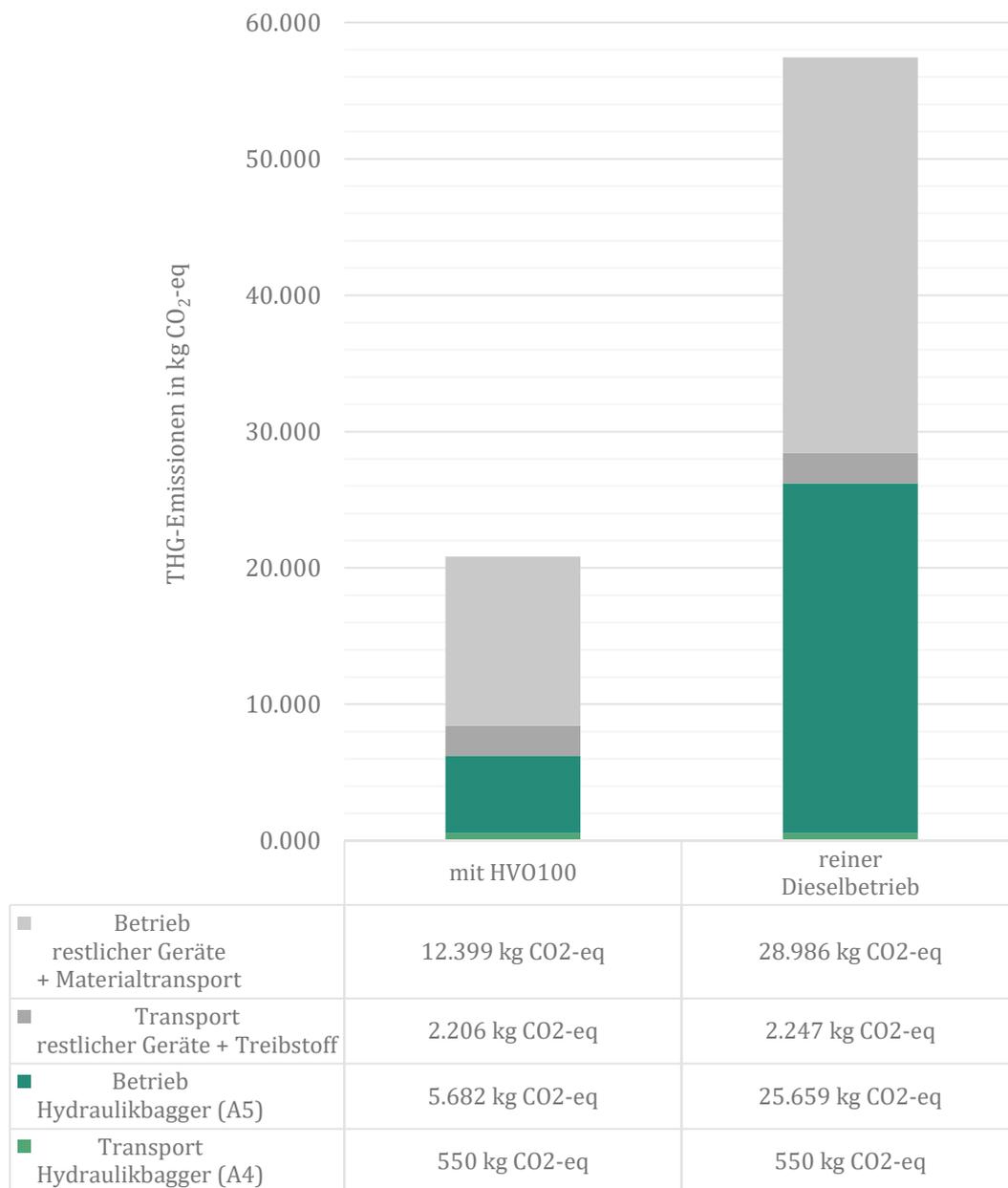


Abb. 6.2: THG-Emissionen bei der Baugrubenherstellung – Vergleich untersuchter Szenarien

Bezogen auf das Aushubvolumen des ungelösten Bodens von ca. 27.700 m³ ergeben sich die THG-Emissionskennwerte zu 0,752 kg CO₂-eq/m³ für den gesamten Prozess der Baugrubenherstellung inklusive aller beobachteten Teilvorgänge bzw. zu 2,074 kg CO₂-eq/m³ für das Szenario mit reinem Dieselbetrieb. Die genaue Verteilung der Gesamtemissionen auf die Module der

Errichtungsphase ist aufgrund der Datenlage nicht möglich. Wie bereits in Kapitel 3.2 erklärt wurde, enthalten diese zwei Kennwerte außerdem die Emissionen aus dem Betrieb der Planier- raupe beim Einbau des Aushubmaterials am Ort der Verwertung. Der kombinierte Treibstoffver- brauch durch den Betrieb von Bagger 2, Planier- raupe und Walze macht mit 2.709 l etwa 15 % des insgesamt gemessenen Treibstoffverbrauchs von 17.436 l aus (exkl. Treibstoffverbrauch durch Transport aller Geräten, des Treibstofftanks und des Treibstoffs). Die THG-Emissionskennwerte für die Herstellung der untersuchten Baugrube entsprechen also nicht gänzlich den gewählten Systemgrenzen der Errichtungsphase, werden an dieser Stelle aber trotzdem angeführt, da sie als indikativ für die Größenordnung der Emissionen des Gesamtprozesses betrachtet werden kön- nen.

Durch die Spundwandarbeiten wurden bei Untersuchungsobjekt 2 rund 28,8 t CO₂-eq emittiert, was bezogen auf die rund 3.447 m² Spundwandfläche einen THG-Emissionskennwert von ca. 8,35 kg CO₂-eq/m² ergibt. Die Verteilung der Emissionen auf die Module A4 und A5 ist in Abb. 6.3 ersichtlich. Die berechneten Werte basieren, wie in Kapitel 4.2 beschrieben lediglich auf der Her- stellung und nicht auf dem Ziehen der Spundwände.

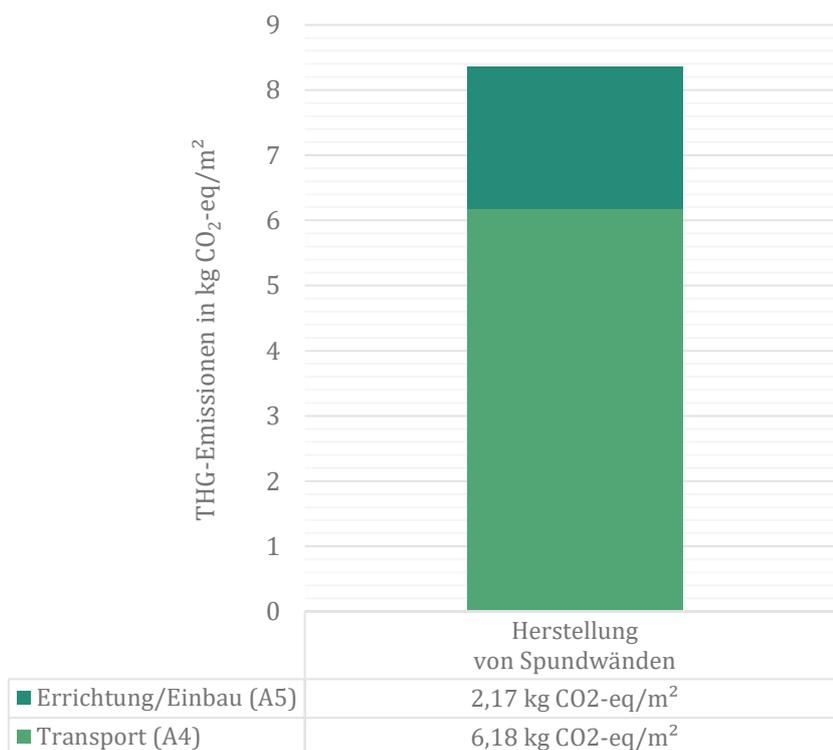


Abb. 6.3: THG-Emissionskennwerte für die Herstellung von Spundwänden

Die bei Untersuchungsobjekt 3 insgesamt für die Betonarbeiten mit Halbfertigteilen berechneten THG-Emissionen belaufen sich auf etwa 18,5 t CO₂-eq. Auf das Gesamtvolumen des im betrachte- ten Gebäudeabschnitt verbauten Stahlbetons (inkl. vorgefertigter Halbfertigteile) bezogen ergibt sich ein THG-Emissionskennwert von 30,28 kg CO₂-eq/m³. Abb. 6.4 zeigt die Verteilung der Emis- sionen auf die beiden Module der Errichtungsphase.

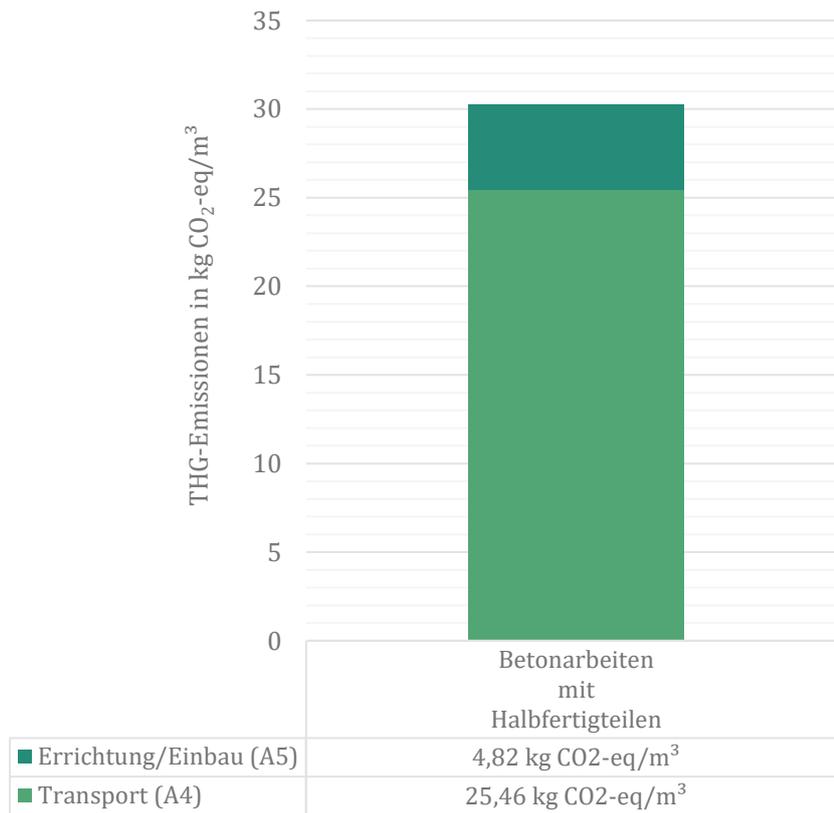


Abb. 6.4: THG-Emissionskennwerte für Betonarbeiten mit Halbfertigteilen

Die in dieser Diplomarbeit ermittelten THG-Emissionskennwerte dürfen nur als Richtwerte im Rahmen der getroffenen Annahmen und Abgrenzungen angesehen werden. Sie sind nur sehr bedingt dazu geeignet, Bauprozesse hinsichtlich ihrer Umweltwirkung zu bewerten oder miteinander zu vergleichen. Die Verwendung der Ergebnisse dieser Arbeit zu diesen oder anderen Zwecken muss immer im Bewusstsein über die Rahmenbedingungen geschehen, die der Ermittlung dieser Kennwerte zugrunde liegen.

Durch die ausschließliche Betrachtung von Prozessen der Errichtungsphase können Effekte der Emissionsverschiebung in andere Lebenszyklusphasen nicht berücksichtigt werden. Im Falle von Untersuchungsobjekt 3 wurde etwa ein THG-Emissionskennwert für den Bauprozess der Betonarbeiten mit Halbfertigteilen errechnet. Wäre der gleiche Gebäudeabschnitt in reiner Ortbetonbauweise errichtet worden, so hätten sich mit Sicherheit deutlich mehr Einsatzzeiten für Fahrbetonmischer, Autobetonpumpen und Rüttler sowie ein höherer Materialbedarf und Aufwand für Schalungs- und Bewehrungsarbeiten ergeben. Ein Vergleich der Umweltauswirkungen beider Methoden mit Beschränkung auf die Errichtungsphase wäre demnach nicht sinnvoll, da sich bei der Halbfertigteilbauweise durch die Vorfertigung im Werk ein Teil wesentlicher Teil der THG-Emissionen in die Herstellungsphase (A1-A3) verschiebt.

Ein weiteres Beispiel sind die Spundwandarbeiten. Eine ganzheitliche Beurteilung der Umweltwirkung dieser Methode im Vergleich zu anderen Verbauarten ist nur mit Blick auf den gesamten Lebenszyklus möglich. Hier müsste unter anderem die energieintensive Herstellung der Stahlspundbohlen, aber auch deren Wiederverwendbarkeit berücksichtigt werden.

6.2.2 Forschungsfrage 2

Welche Parameter beeinflussen die THG-Emissionskennwerte für die Bauprozesse Baugrubenaushub, Spundwandaarbeiten und Betonarbeiten mit Halbfertigteilen wesentlich?

Die errechneten THG-Emissionskennwerte hängen von zahlreichen Parametern ab, die teilweise nur durch sehr hohen Aufwand und zusätzliche technische Mittel quantifiziert und berücksichtigt werden könnten. Da die Rahmenbedingungen einer jeden Baustelle verschieden sind, wäre es denkbar, dass eine Untersuchung der gleichen Bauprozesse mit der gleichen Methodik und den gleichen Systemgrenzen deutlich andere Kennwerte liefert als diese Arbeit.

Um die in dieser Diplomarbeit erarbeiteten Ergebnisse in einen Kontext zu setzen, werden nachfolgend für jeden der drei untersuchten Prozesse einige der wesentlichsten Faktoren genannt, die sich erheblich auf die Größe der Emissionen auswirken. Abschließend folgt eine Reihe allgemeiner Anmerkungen, die für alle bearbeiteten Prozesse gleichermaßen gelten.

Baugrubenaushub:

Ein bedeutender Teil der Emissionen bei der Herstellung einer Baugrube stammt aus Transportprozessen. Der Treibstoffverbrauch und damit auch die THG-Emissionen hängen demnach unmittelbar von den zurückzulegenden Wegstrecken ab. Im Falle von Untersuchungsobjekt 1 herrschten diesbezüglich besonders günstige Bedingungen, da sich das Zwischenlager unmittelbar neben der Baugrube befand und der Verwertungsort für das Aushubmaterial nur rund 600 m entfernt war. Hätte die Möglichkeit zur Wiederverwendung des Materials nicht bestanden, so hätte dieses zur nächsten geeigneten Deponie in rund 11 km Entfernung transportiert werden müssen, was einen erheblichen Anstieg der Emissionen zur Folge gehabt hätte.

Bei Untersuchungsobjekt 1 befand sich der Grundwasserspiegel unter der Baugrubensohle, sodass keine Wasserhaltungsmaßnahmen ausgeführt werden mussten. Aufgrund der hohen Standfestigkeit des Bodens war auch keine Baugrubensicherung erforderlich. Stattdessen konnte eine steile Böschung ausgeführt werden. Dies zeigt, wie wichtig die genaue Abgrenzung der untersuchten Bauprozesse ist, da die Berücksichtigung von zusätzlichen Teilprozessen oder ein Wegfallen ebendieser die Emissionen stark beeinflusst.

Auch die geologischen Verhältnisse vor Ort spielen eine wichtige Rolle und können den Betriebsstoffverbrauch von Baugeräten beeinflussen. Der vorhandene Lössboden war nach Angaben des ausführenden Unternehmens durchschnittlich zu graben und löste sich leicht aus der Baggerschaufel, was sich positiv auf die Grableistung und somit auch den Treibstoffverbrauch ausgewirkt hat.

Aufgrund der hier genannten vorteilhaften Rahmenbedingungen ist davon auszugehen, dass die ermittelten THG-Emissionen niedriger sind als es beim Bauprozess Baugrubenaushub durchschnittlich der Fall ist.

Spundwandaarbeiten:

Auch beim Herstellen der Spundwände herrschten dank der geologischen Gegebenheiten vor Ort günstige Bedingungen zum Einvibrieren der Spundbohlen. Im Untergrund fanden sich ausschließlich nichtbindige Bodenschichten, von denen eine frühere Anschüttung den Großteil ausmachte.

Beim Einbringen der Spundbohlen wurden keinerlei Hindernisse im Boden angetroffen. Den Erfahrungsberichten des ausführenden Personals zufolge können schwierige Untergrundverhältnisse zu einem deutlich langsameren Vorankommen des Rammgeräts und somit zu erhöhtem Treibstoffverbrauch führen.

Ein weiterer bedeutender Faktor ist auch bei den Spundwandarbeiten der Transport. Die Anlieferung der Spundbohlen hat aufgrund von deren Gewicht und Größe einen besonders hohen Einfluss auf die Emissionen. Durch die weiten Transportwege machen sie im Falle von Untersuchungsobjekt 2 fast drei Viertel der Emissionen aus.

Betonarbeiten mit Halbfertigteilen:

Die Größe der THG-Emissionen bei den Betonarbeiten mit Halbfertigteilen wird ebenfalls maßgeblich vom Transport der Geräte und vor allem der Materialien geprägt. Insbesondere die Entfernungen des Fertigteilwerks und des Betonwerks zur Baustelle sind hierbei maßgebend. Beim Betoneinbau ist die Förderhöhe mit Sicherheit ein bedeutender Faktor für den Betriebsstoffverbrauch. Die Auswirkung unterschiedlicher Einbauhöhen auf die THG-Emissionen konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Aus den Ergebnissen lässt sich deutlich ablesen, dass der Betoneinbau mittels Kran und Betonkübel weniger Emissionen verursacht als mit Autobetonpumpen.

Wichtig ist zu betonen, dass die Berechnung der Emissionen aus Modul A5 zum Teil auf Annahmen, nicht überprüfbaren Erfahrungswerten sowie theoretischen Berechnungsansätzen basiert, die zu einer Unschärfe der Ergebnisse dieser Untersuchung führen.

Anmerkungen:

Zum Abschluss dieses Kapitels werden einige wichtige Beobachtungen und Überlegungen angestellt, die die Ermittlung der THG-Emissionen bei allen drei Bauprozessen betreffen:

- Als Erstes sei noch einmal daran erinnert, dass THG-Emissionen zufolge der Leerfahrten, die mit den einzelnen Bauprozessen in Zusammenhang stehen, in den meisten Fällen nicht erfasst werden konnten und daher auch nicht in die Berechnung eingeflossen sind. Eine genaue Erfassung dieser zusätzlichen Transportkilometer und der daraus folgenden Emissionen würde sich mit Sicherheit deutlich auf die Ergebnisse der Berechnung auswirken.
- Personaltransporte werden in dieser Arbeit in Anlehnung an ÖNORM EN 15978 nicht berücksichtigt, obwohl sie in der Praxis zusätzliche THG-Emissionen verursachen. Die zu diesem Zeitpunkt als Entwurf vorliegende Überarbeitung der Norm sieht die Berücksichtigung des Transportes von Bauarbeitern zu und von der Baustelle in Modul A5 vor. Sofern dieser Personaltransport gemeinsam mit einzubauenden Gütern erfolgt, soll er Modul A4 zugewiesen werden, um die Doppelzählung zu vermeiden [48]. Zukünftige Berechnungen nach dieser Regelung könnten deutlich größere THG-Emissionskennwerte ergeben. Die genaue Quantifizierung dieser Personaltransporte könnte sich jedoch in der Praxis, besonders bei größeren Baustellen mit einer Vielzahl an Subunternehmen schwierig gestalten.

- Im Rahmen der Feldforschung konnte vielfach beobachtet werden, wie Baugeräte und Nutzfahrzeuge für mehrere Minuten oder im Einzelfall sogar Stunden im Leerlauf betrieben werden und somit Treibstoff verbrauchen, ohne Arbeit zu verrichten. Nur vereinzelt konnte bei Arbeitern, Polieren und Bauleitern eine Sensibilität für dieses Problem beobachtet werden. Eine Verringerung der Leerlaufzeiten durch den Einsatz von Geräten mit Abschaltautomatik oder das manuelle Abschalten hätte einen positiven Einfluss auf die THG-Emissionen in der Errichtungsphase.
- Bei Bauprozessen, die verstärkt auf den Einsatz von Geräten mit Elektroantrieb setzen, besteht in Zukunft die Möglichkeit einer „passiven“ Emissionsreduktion. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich der Strommix in Zukunft verändern und hin zu erneuerbaren Energiequellen entwickeln wird. Bei dieselintensiven Prozessen könnte eine zukünftige Emissionsreduktion durch die Entwicklung neuer elektrisch betriebener Ersatzgeräte bzw. durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe ermöglicht werden.

6.3 Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Bearbeitung dieser Diplomarbeit dazu genutzt, Empfehlungen für die Ermittlung von THG-Emissionskennwerten einzelner Bauprozesse auszusprechen.

Zu Beginn sollten alle Teilvorgänge des zu untersuchenden Prozesses bekannt sein, damit dieser richtig abgegrenzt werden kann. Hierzu können Baustellenbesuche, Experteninterviews sowie Literatur- und Medienrecherchen hilfreich sein.

Noch vor der Ausführung sollte abgeklärt werden, welche Daten genutzt werden können, um THG-Emissionskennwerte zu ermitteln und ob diese vom ausführenden Unternehmen und möglichen Subunternehmen zur Verfügung gestellt werden können. In der Praxis zeigte sich, dass seitens der Führungskräfte oftmals eine Bereitschaft zur Unterstützung der Forschung vorhanden war, der damit verbundene Aufwand jedoch unterschätzt wurde. Die Folge waren Schwierigkeiten in der Kommunikation, Verzögerungen beim Datenaustausch und unvollständig aufgezeichnete Daten. Um dies zu vermeiden, sollten idealerweise Beteiligte aller am Bauprozess mitwirkenden Unternehmen vorab mit dem Ziel der Untersuchung und dem von ihnen verlangten Aufwand vertraut gemacht werden.

Ein mehrfaches Problem war die Messung des Betriebsstoffverbrauchs auf der Baustelle. Im Zuge der Spundwandarbeiten stellte sich etwa heraus, dass der dokumentierte Dieselverbrauch beim Teilprozess b) (Ziehen der Spundwände) nicht plausibel bzw. unvollständig war und deshalb nicht ausgewertet werden konnte. Beim Baugrubenaushub wurde ein stationärer Treibstofftank aufgestellt, über den ein Teil der Geräteflotte betankt wurde. Der Summe der Kraftstoffverbräuche dieser Geräte ist daher bekannt, die Einzelverbräuche jedoch nicht. Eine Möglichkeit, um diese Schwierigkeiten in Zukunft zu umgehen, bietet die wachsende Verbreitung von Telematiksystemen in Baugeräten. Die genaue und lückenlose Dokumentation von Gerätedaten erleichtert die Messung und Zuordnung von Kraftstoffverbräuchen zu einzelnen Bauprozessen.

Auch bei elektrisch betriebenen Geräten können Telematiksysteme zur Erfassung des Stromverbrauchs hilfreich sein. Sind diese nicht vorhanden, ist nach Möglichkeit das Zwischenschalten von

zusätzlichen Stromzählern ratsam. Im Falle von Untersuchungsobjekt 3 wäre ein zusätzlicher Stromzähler für den Turmdrehkran hilfreich gewesen, um den Stromverbrauch genau zu messen. Die Berechnung des Stromverbrauchs anhand von Formeln aus der Literatur stellt allenfalls eine Annäherung dar und wird daher zur groben Plausibilitätsprüfung mit dem am Baustromzähler gemessenen Gesamtstromverbrauch der Baustelle abgeglichen.

6.4 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die ermittelten THG-Emissionskennwerte besitzen aufgrund der getroffenen Annahmen und Abgrenzungen nur eine begrenzte Aussagekraft. Sie können unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen allenfalls als grobe Richtwerte für die untersuchten Bauprozesse dienen.

Um verlässlichere Kennwerte zu erhalten, müssten einzelne Prozesse auf einer größeren Anzahl von Baustellen nach denselben Regeln untersucht werden. Durch eine größere Stichprobe könnte der Einfluss standort- und objektspezifischer Besonderheiten sowie möglicher Fehler in der Datenerhebung reduziert werden. Dabei sollte nach Möglichkeit der Einsatz neuer Technologien, etwa von Telematiksystemen forciert werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Längerfristig wäre die Schaffung einer Datenbank erstrebenswert, in der die THG-Emissionskennwerte einer Vielzahl unterschiedlicher Bauprozesse hinterlegt werden könnten. Durch die Verknüpfung mit BIM-Modellen wäre beispielsweise eine Zuweisung dieser Bauprozesse und der damit einhergehenden THG-Emissionen zu Bauteilen und Leistungspositionen denkbar. Im Hinblick auf die Besteuerung von THG-Emissionen würde eine derartige Datenbank die Möglichkeit eröffnen, besonderes THG-intensive Prozesse und Teilvorgänge zu erkennen, um sie zu vermeiden oder zu verbessern.

Bereits in frühen Projektphasen könnten Variantenvergleiche auf Basis fundierter Daten durchgeführt werden. Mit der Quantifizierung der Umweltauswirkungen unterschiedlichster Prozesse in der Errichtungsphase könnte die Höhe der THG-Emissionen als Kriterium in Vergabeverfahren etabliert werden.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Anteil einzelner Treibhausgase gemessen am CO ₂ -Äquivalent in Österreich 2020 nach [2, S. 84].....	2
Abb. 1.2:	Entwicklung der österreichischen THG-Emissionen und Szenarien mit und ohne Emissionshandel (EH) bis 2050 [2, S. 64].....	3
Abb. 1.3:	Verteilung der weltweiten THG-Emissionen im Jahr 2021 nach [3].....	4
Abb. 1.4:	Quellen grauer Emissionen für Gebäude im Vereinigten Königreich nach [5, S. 26 ff].....	5
Abb. 1.5:	Prozessdiagramm zur Forschungsmethodik.....	8
Abb. 2.1:	Modulare Informationen für die verschiedenen Phasen der Gebäudebewertung nach [8, S. 23].....	12
Abb. 2.2:	Bruttostromerzeugung in Österreich 2020 nach [19, S. 16].....	18
Abb. 3.1:	Aufbau eines Mobilbaggers [27, S. 98].....	23
Abb. 3.2:	Aufbau eines Raupenbaggers [27, S. 99].....	24
Abb. 3.3:	3-Achs-LKW-Muldenkipper [28].....	25
Abb. 3.4:	Aufbau einer Planierraupe [27, S. 153].....	25
Abb. 3.5:	Aufbau eines Walzenzugs [27, S. 208].....	26
Abb. 3.6:	Übersicht – Baugrubenaushub.....	27
Abb. 3.7:	Verteilung der THG-Emissionen beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger.....	29
Abb. 3.8:	Verteilung der THG-Emissionen beim Baugrubenaushub.....	32
Abb. 3.9:	Verteilung der THG-Emissionen beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger im Szenario Dieselbetrieb.....	33
Abb. 3.10:	Verteilung der THG-Emissionen beim Baugrubenaushub im Szenario Dieselbetrieb.....	35
Abb. 4.1:	Übersicht Spundwandprofile [29, S. 330].....	37
Abb. 4.2:	Beispiele für bewährte Schlossformen von Stahlspundbohlen [32, S. 314].....	38
Abb. 4.3:	Arbeitsweise einer Spundwandpresse [31, S. 398].....	40
Abb. 4.4:	Mobiles Rammsystem bestehend aus Trägergerät mit Teleskopmäkler und Bohrantrieb zum Vorbohren (links) bzw. Vibrator (rechts) [34, S. 7].....	41
Abb. 4.5:	Beispiele für Arbeitsgeräte: Vibrator (links), Bohrantrieb (mittig) und Dieselrammbär (rechts) [34, S. 7].....	41
Abb. 4.6:	Varianten von Pressgeräten: mäklergeführt (links) [35, S. 3] und selbstschreitend (rechts) [36, S. 2].....	42
Abb. 4.7:	Übersicht – Spundwandarbeiten.....	43
Abb. 4.8:	Verteilung der THG-Emissionen beim Einbringen von Spundwänden.....	48
Abb. 5.1:	Nahaufnahme Gitterträger [38, S. 1].....	49
Abb. 5.2:	Hebevorgang einer Elementdecke mittels Kran [39, S. 4].....	50
Abb. 5.3:	Montierte Elementwände und Montageunterstützung für eine Elementdecke.....	51

Abb. 5.4:	Auslegerformen obendrehender Turmdrehkrane nach [43, S. 33].....	52
Abb. 5.5:	Betonkübel mit Funkfernsteuerung und Schlauch [44].....	53
Abb. 5.6:	Aufbau eines Fahrmischers [27, S. 20].....	53
Abb. 5.7:	Autobetonpumpe [45].....	54
Abb. 5.8:	Übersicht – Betonarbeiten mit Halbfertigteilen.....	56
Abb. 5.9:	Liniendiagramm – Gesamtstromverbrauch der Baustelle.....	61
Abb. 5.10:	Verteilung der THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen.....	67
Abb. 6.1:	THG-Emissionskennwerte für Aushub mit Hydraulikbagger – Vergleich untersuchter Szenarien	70
Abb. 6.2:	THG-Emissionen bei der Baugrubenherstellung – Vergleich untersuchter Szenarien	71
Abb. 6.3:	THG-Emissionskennwerte für die Herstellung von Spundwänden	72
Abb. 6.4:	THG-Emissionskennwerte für Betonarbeiten mit Halbfertigteilen	73

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Emissionsfaktoren für Diesel und Strom nach [6]	19
Tab. 2.2:	Emissionsfaktoren dieselbetriebener Fahrzeuge bezogen auf Tonnenkilometer nach [21]	20
Tab. 3.1:	THG-Emissionen durch den Gerätetransport für den Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger – Emissionsfaktor nach [21].....	28
Tab. 3.2:	THG-Emissionen durch den Geräteeinsatz beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger (Modul A5) – Emissionsfaktor nach [11].....	29
Tab. 3.3:	THG-Emissionen durch den Transport von Bagger 2, Planierdrape, Walzenzug, Treibstofftank und Treibstoff – Emissionsfaktor nach [21].....	30
Tab. 3.4:	Kraftstoffverbrauch durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie Herstellung von Fundamentvertiefungen.....	31
Tab. 3.5:	THG-Emissionen durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie Herstellung von Fundamentvertiefungen – Emissionsfaktoren nach [6] und [11]....	31
Tab. 3.6:	THG-Emissionen durch den Geräteeinsatz beim Aushub (Lösen und Aufladen) mittels Hydraulikbagger (Modul A5) im Szenario Dieselbetrieb – Emissionsfaktoren nach [6]	33
Tab. 3.7:	THG-Emissionen durch den Transport von Bagger 2, Planierdrape, Walzenzug, Treibstofftank und Treibstoff im Szenario Dieselbetrieb – Emissionsfaktor nach [21]	34
Tab. 3.8:	THG-Emissionen durch Fördern, Abladen, Planieren und Verdichten sowie Herstellung von Fundamentvertiefungen im Szenario Dieselbetrieb – Emissionsfaktor nach [6]	35
Tab. 4.1:	Ermittlung der Transportkilometer für Spundwandarbeiten.....	44
Tab. 4.2:	Flächenermittlung Spundwände.....	44
Tab. 4.3:	Massenermittlung Spundwände	45
Tab. 4.4:	Transportbedingte THG-Emissionen bei der Herstellung von Spundwänden (Modul A4) – Emissionsfaktoren nach [21]	45
Tab. 4.5:	Dieserverbrauch des mobilen Rammsystems bei der Herstellung von Spundwänden.....	46
Tab. 4.6:	THG-Emissionen beim Einbauprozess von Spundwänden (Modul A5) – Emissionsfaktoren nach [6]	47
Tab. 4.7:	Verteilung der THG-Emissionen beim Einbringen von Spundwänden	47
Tab. 5.1:	Ermittlung der Transportkilometer für Betonarbeiten mit Halffertigteilen.....	57
Tab. 5.2:	Transportbedingte THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halffertigteilen (Modul A4) exklusive Transportbeton/Fahrmischer – Emissionsfaktoren nach [21]	58
Tab. 5.3:	Transportbedingte THG-Emissionen durch Transportbeton/Fahrmischer (Modul A4) – Emissionsfaktoren nach [6].....	59
Tab. 5.4:	Transportbedingte THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halffertigteilen (Modul A4).....	59
Tab. 5.5:	Massenermittlung Frischbeton	60

Tab. 5.6:	monatlicher Gesamtstromverbrauch von Beginn der Baustelle bis zwei Tage vor Fertigstellung des untersuchten Gebäudeabschnitts.....	61
Tab. 5.7:	Leistung und Benutzungsdauer der Kleingeräte im Betrachtungszeitraum.....	64
Tab. 5.8:	Stromverbrauch bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Modul A5).....	64
Tab. 5.9:	Treibstoffverbrauch von Autobetonpumpen (Auszug aus Monatsstatistik August) .	65
Tab. 5.10:	THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen (Errichtung – Modul A5)..	66
Tab. 5.11:	Verteilung der THG-Emissionen bei Betonarbeiten mit Halbfertigteilen.....	66

Literaturverzeichnis

- [1] *Almond R., Grooten M., Bignoli D. J., Petersen T.*, Living Planet Report 2022, Building a nature-positive society, Gland, Switzerland: WWF, 2022.
- [2] *Zechmeister A.*, Klimaschutzbericht 2022, Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2022.
- [3] *IEA*, „Global energy and process emissions from buildings, including embodied emissions from new construction, 2021,“ IEA. Licence: CC BY 4.0, Last updated 26 Oct 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-and-process-emissions-from-buildings-including-embodied-emissions-from-new-construction-2021>. [Zugriff am 13. 04. 2023].
- [4] *M. Röck, M. Ruschi Mendes Saade, M. Balouktsi, F. Nygaard Rasmussen, H. Birgisdottir, R. Frischknecht, G. Habert, T. Lützkendorf und A. Passer*, „Embodied GHG emissions of buildings - The hidden challenge for effective climate change mitigation,“ *Applied Energy*, Bd. 258, S. Article 114107, 2020.
- [5] *London Energy Transformation Initiative*, „LETI Climate Emergency Design Guide - How new buildings can meet UK climate change targets,“ January 2020. [Online]. Available: https://www.leti.uk/files/ugd/252d09_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf. [Zugriff am 13. 04. 2023].
- [6] *Umweltbundesamt GmbH*, „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger, Datenbasis: 2020, Aktualisierung Nov. 2022,“ [Online]. Available: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>. [Zugriff am 05. 04. 2023].
- [7] *ÖNORM EN ISO 14040*, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Ausgabe: 2021-03-01, Wien: Austrian Standards International, 2021.
- [8] *ÖNORM EN 15978 (2011)*, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode, Wien: Austrian Standards International, Ausgabe 2012-10-01.
- [9] *Schach R., Otto J.*, Baustelleneinrichtung: Grundlagen - Planung - Praxishinweise - Vorschriften und Regeln, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.
- [10] *Merker G., Teichmann R.*, Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise, Simulation, Messtechnik, 7., vollständig überarbeitete Auflage, Tettngang, Graz: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [11] *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)*, „Erneuerbare Kraftstoffe und Energieträger im Verkehrssektor in Österreich 2022,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2022.
- [12] *Maus W. (Hrsg.)*, Zukünftige Kraftstoffe: Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel, Bergisch Gladbach: Springer Vieweg, 2019.

- [13] *Umweltbundesamt GmbH*, „Synthetische Verbrennungskraftstoffe,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/mobilitaet/technologie/synthetische-verbrennungskraftstoffe>. [Zugriff am 17. 07. 2023].
- [14] *Weller K., Hausberger S., Dippl M., Aschauer T., Schutting E., Grabner P.*, „Relevanz von eFuels bei der Dekarbonisierung von Baumaschinen,“ Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH, Graz, 2023.
- [15] *Reif K., Dietsche K.*, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2011.
- [16] *Winkler C.*, Betriebsstoffverbrauch von Baumaschinen als Faktor einer ökoeffizienten Bauprozessoptimierung, Dissertation, Wien, 2017.
- [17] *Salchenegger S.*, „Emissionen von Wasserstofffahrzeugen: Abschätzung der Emissionen von wasserstoff- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2006.
- [18] *Umweltbundesamt GmbH*, „Wasserstoff-Brennstoffzelle,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/mobilitaet/technologie/wasserstoff-fzg>. [Zugriff am 17. 07. 2023].
- [19] *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)*, „Energie in Österreich: Zahlen, Daten, Fakten,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2022.
- [20] *Kranzl S.*, „Treibhausgasemissionen von Strom: Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2018.
- [21] *Umweltbundesamt GmbH*, „Emissionskennzahlen Datenbasis 2020, bezogen Besetzungs-/Auslastungsgrad (g/Pkm bzw. g/Tkm), aktualisiert November 2022,“ [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_pkm_tkm_verkehrsmittel.pdf. [Zugriff am 01. 03. 2023].
- [22] *Yara Deutschland*, „AdBlue® für Nutzfahrzeuge,“ YARA GmbH & Co. KG, 2023. [Online]. Available: <https://www.yara.de/chemikalien-und-umweltlosungen/adblue-fur-fahrzeuge/adblue-fur-nutzfahrzeuge/>. [Zugriff am 05. 07. 2023].
- [23] *Fritz D., Heinfellner H., Lambert S.*, „Die Ökobilanz von Personenkraftwagen: Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2021.
- [24] *FRIEDRICH SCHARR KG*, „Klimadatenblatt für das Produkt Schmierstoffe von FRIEDRICH SCHARR KG,“ 03. 01. 2022. [Online]. Available: <https://scharr.de/fileadmin/media/KG/Dateien/Engagement/Klimadatenblaetter/Klimadatenblatt-Schmierstoffe.pdf>. [Zugriff am 18. 07. 2023].
- [25] *Hestermann U., Rongen L.*, Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1, Erfurt: Springer Vieweg, 2015.
- [26] *Bauer H.*, Baubetrieb, Hamm: Springer-Verlag, 2007.

- [27] *König H.*, Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung, 4., aktualisierte Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [28] *F.X. Meiller Fahrzeug- und Maschinenfabrik GmbH & Co KG*, „Hinterkipper: Innovativ und effizient in jedem Detail,“ [Online]. Available: https://www.meiller.com/media/Fahrzeugbau/DE/documents/produkte/hinterkipper/de_1610_hinterkipper_allgemein.pdf. [Zugriff am 26. 07. 2023].
- [29] *Witt K. J. (Hrsg.)*, Grundbau-Taschenbuch: Teil 3. Gründungen und geotechnische Bauwerke, 8. Auflage, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG., 2018.
- [30] *Wietek B.*, Böschungen und Baugruben, Sicherung und Wirtschaftlichkeit, 2. Auflage, Sistrans: Springer Vieweg, 2017.
- [31] *Möller G.*, Geotechnik Grundbau, 3. Auflage, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG., 2016.
- [32] *Grabe J.*, Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen: EAU 2012. Herausgegeben vom Arbeitsausschuss "Ufereinfassungen" der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 11. Auflage, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2012.
- [33] *Adam D.*, Grundbau und Bodenmechanik, Studienunterlagen zur Vorlesung, Auflage SS 2019, Wien: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2019.
- [34] *ABI GmbH*, „Teleskopmäkler, Mobilram-System TM 13/16 SL,“ Versionsdatum 02/2022. [Online]. Available: https://www.abi-gmbh.com/teleskopmaekler.html?file=files/content/pdf_ABI_Prospekte/ABI_TM1316SL_SR30_SR35_deen.pdf&cid=18693. [Zugriff am 24. 08. 2022].
- [35] *ABI GmbH*, „Hydro-Press-System, HPU HPZ,“ Versionsdatum 03/2021. [Online]. Available: https://www.abi-gmbh.com/arbeitsgeraete-fuer-mobilram-system.html?file=files/content/pdf_ABI_Prospekte/ABI_HPS_deen.pdf&cid=421. [Zugriff am 24. 08. 2022].
- [36] *Infra Rentals B.V.*, „Spundwandpresse ZU-100,“ [Online]. Available: <https://www.infrarentals.com/files/spundwandpresse-zu-100.pdf>. [Zugriff am 24. 08. 2022].
- [37] *Bergmeister K., Fingerloos F., Wörner J.-D.*, Beton-Kalender 2021 : Schwerpunkte: Fertigteile; Integrale Bauwerke (2 Bände), Newark: Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, 2020.

- [38] *AVI Alpenländische Veredelungs-Industrie Gesellschaft m.b.H.*, „Produktbroschüre Gitterträger GT,“ April 2017. [Online]. Available: <https://www.avi.at/produkte/gittertraeger-2/>. [Zugriff am 25. 05. 2023].
- [39] *innbau-beton GmbH & Co. KG*, „Anleitung zum Abladen und Verlegen der Elementdecke,“ Mai 2021. [Online]. Available: https://innbau.de/wp-content/uploads/2021/05/elementdeckenverlegung_anleitung.pdf. [Zugriff am 25. 05. 2023].
- [40] *Moro J. L.*, *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail, Band 2 - Konzeption*, 2. Auflage, Stuttgart: Springer Vieweg, 2019.
- [41] *Malpricht W., Rupp C.*, *Schalungsplanung im Baubetrieb*, Ein Lehr- und Übungsbuch, München: Hanser Verlag, 2022.
- [42] *Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke (VÖB)*, „Fertigteile, VÖB-Richtlinie Montageanleitung für Doppelwände,“ Juli 2021. [Online]. Available: https://www.voeb.com/material/richtlinien/VOEB_RILI_Montageanleitung_fuer_Doppelwaende.pdf. [Zugriff am 25. 05. 2023].
- [43] *Drees G., Krauß S.*, *Baumaschinen und Bauverfahren: Einsatzgebiete und Einsatzplanung*, Renningen: expert verlag, 2002.
- [44] *Schär Baumaschinen GmbH*, „Betonsilo mit Funkfernsteuerung,“ [Online]. Available: <https://schaer-baumaschinen.ch/portfolio/betonsilo-mit-funkfernsteuerung/>. [Zugriff am 10. 06. 2023].
- [45] *Putzmeister Concrete Pumps GmbH*, „M42-5: Die nächste Generation der M42-5,“ [Online]. Available: <https://www.putzmeister.com/web/european-union/product-detail/-/product/173/m42-5?referer=%2Fweb%2Feuropean-union%2Fproducts%2F-%2Fproduct-navigation%2Ftruck-mounted-concrete-pumps>. [Zugriff am 11. 06. 2023].
- [46] *Krause T., Ulke B.*, *Zahlentafeln für den Baubetrieb*, 9. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [47] *WOLFFKRAN International AG*, „WOLFF 6020.8 clear,“ [Online]. Available: https://www.wolffkran.com/resources/ecics_208.pdf. [Zugriff am 19. 06. 2023].
- [48] *Entwurf ÖNORM EN 15978-1:2021-10*, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Qualität von Gebäuden: Teil 1: Umweltqualität*, Wien: Austrian Standards International, 2021.

Anhang

Emissionsfaktoren für Verkehrsmittel bezogen auf Personen-/Tonnenkilometer

aktualisiert November 2022

bezogen auf Besetzungs-/Auslastungsgrad (g/Pkm bzw. g/Tkm)			Emissionskennzahlen Datenbasis 2020											Verbrauch in kWh/Pkm oder Tkm		
			Direkte Emissionen in g/Pkm oder Tkm				Indirekte Emissionen in g/Pkm oder Tkm**				Gesamte Emissionen in g/Pkm oder Tkm			spezif. Ver- brauch	KEA*****	
			CO ₂ - Äquiva- lente***	CO ₂	NO _x	Parti- kel****	CO ₂ - Äquiva- lente	CO ₂	NO _x	Parti- kel****	CO ₂ - Äquiva- lente	CO ₂	NO _x			Parti- kel****
STRASSE	PKW Durchschnitt B+D*	g/Pkm	146,4	144,6	0,50	0,006	71,1	64,5	0,13	0,023	217,6	209,1	0,63	0,029	0,58	0,83
	PKW Benzin (B)*	g/Pkm	143,9	143,5	0,09	0,002	80,1	73,6	0,15	0,026	224,0	217,1	0,25	0,028	0,57	0,86
	PKW Diesel (D)*	g/Pkm	149,7	147,2	0,69	0,009	66,9	60,2	0,12	0,021	216,6	207,4	0,82	0,030	0,59	0,82
	BEV (Ö. Stromaufbringung inkl. Importen)	g/Pkm	-	-	-	-	93,8	87,9	0,14	0,019	93,8	87,9	0,14	0,019	0,18	0,51
	BEV (Ö. Stromproduktionspark)	g/Pkm	-	-	-	-	85,7	80,0	0,13	0,018	85,7	80,0	0,13	0,018	0,18	0,47
	BEV Ökostrom (Umweltzeichen 46 Strom)	g/Pkm	-	-	-	-	58,4	53,9	0,11	0,018	58,4	53,9	0,11	0,018	0,18	0,46
	LKW LNF (< 3,5 t) (D)*	g/Tkm	644,1	634,5	3,19	0,059	288,4	260,4	0,52	0,089	932,5	894,9	3,71	0,148	2,62	3,66
	LKW SNF (< 18 t) (D)*	g/Tkm	293,5	287,2	1,00	0,014	86,6	76,6	0,15	0,021	380,0	363,8	1,14	0,035	1,18	1,44
	LKW SNF (> 18 t) (D)*	g/Tkm	111,8	110,2	0,31	0,004	37,5	33,4	0,06	0,009	149,3	143,6	0,37	0,014	0,45	0,57
	Sattelzüge (40 t) (D)*	g/Tkm	51,7	51,2	0,06	0,001	16,9	15,0	0,03	0,004	68,7	66,2	0,09	0,005	0,21	0,26
Durchschnitt LKW SNF (> = 3,5t - 40t) D*	g/Tkm	67,0	66,1	0,12	0,002	21,4	19,0	0,04	0,005	88,4	85,1	0,16	0,007	0,27	0,34	
Reisebus (D)*	g/Pkm	36,9	36,3	0,10	0,002	14,1	12,7	0,02	0,004	51,0	49,0	0,13	0,005	0,15	0,20	
Linienbus (ÖV) (D inkl. E)*	g/Pkm	44,2	43,7	0,09	0,002	15,2	13,7	0,03	0,004	59,5	57,4	0,12	0,006	0,17	0,22	
BAHN	Personenverkehr (PV) Schiene in Ö	g/Pkm	6,9	6,8	0,05	0,003	12,2	5,4	0,02	0,001	19,2	12,2	0,07	0,004	0,14	0,18
	Güterverkehr (GV) Schiene in Ö	g/Tkm	1,7	1,6	0,01	0,001	3,0	1,3	0,00	0,000	4,6	2,9	0,02	0,001	0,03	0,04
FLUG	Flugzeug Durchschnitt (national)*	g/Pkm	1 845,5	677,0	2,43	0,243	152,5	146,1	0,28	0,036	1 997,9	823,1	2,71	0,279	2,59	2,89
	Flugzeug Durchschnitt (international)*	g/Pkm	560,9	206,0	1,02	0,071	46,4	44,5	0,08	0,011	607,3	250,5	1,11	0,082	0,79	0,88
	Flugzeug Durchschnitt (national+international)*	g/Pkm	561,2	206,1	1,02	0,071	46,5	44,5	0,08	0,011	607,7	250,6	1,10	0,082	0,79	0,88

SNF... schwere Nutzfahrzeuge >= 3,5 t
LNF... leichte Nutzfahrzeuge < 3,5t hzG
Fzkm... Fahrzeugkilometer
B... Benzin
D... Diesel
kWh... Kilowattstunde

* Direkte Emissionen bzw. Daten aus der Österreichischen Luftschadstoffinventur 2022 (1990-2020)
** Indirekte Emissionen Datenbasis GEMIS Österreich, Herstellungsbedingte Emissionen, bezogen auf die Lebensfahrleistung der Verkehrsmittel, sowie vorgelagerte Emissionen der Treibstoffbereitstellung
*** Beim Flugverkehr ist ein RFI Faktor (Radiative Forcing Index) von 2,7 berücksichtigt (Empfehlung IPCC)
**** Feinstaub/particulate matter (< 10 µm) exkl. Reifen-, Bremsabrieb und Aufwirbelung
***** kumulierte Energieaufwand

Besetzungsgrade 2020	in Personen
PKW*	1,14
Reisebus*	18,81
Linienbus/Reisebus*	18,81
Personenverkehr Schiene	na
Flugzeug Personen Durchschnitt national*	10,27
Flugzeug Personen Durchschnitt international*	61,02
Flugzeug Personen (Durchschnitt inter+national)*	60,18

Auslastungsgrade 2020	in Tonnen
LKW LNF (< 3,5t) (D)*	0,33
LKW SNF (< 18 t)*	1,58
LKW SNF (> 18 t)*	6,56
Sattelzüge (40 t)*	15,44
Durchschnitt LKW SNF (> = 3,5t - 40t) B+D*	10,55
Güterverkehr Schiene	na

Abb. A.1: Emissionsfaktoren für Verkehrsmittel bezogen auf Personen-/Tonnenkilometer