Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

E-Baustelle

Nutzen und Machbarkeit der Elektrifizierung von Baustellen

Fachstelle nachhaltiges Bauen

Impressum

Auftraggeber
Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Amtshaus III
Lindenhofstrasse 21
Postfach
CH-8021 Zürich

Ansprechpartner
Dr. Niko Heeren

Auftragnehmer
Intep
Integrale Planung GmbH
Pfingstweidstrasse 16
8005 Zürich
T +41 43 488 38 90
F +41 43 488 38 99
www.intep.com

Verfasser

Daniel Kellenberger	Dipl. Ing. ETH/FH
Basil Hertweck	B.Sc. ZFH in Natural Resource Sciences
Maria Sautter	Dipl. Biologin
Theresa Henne	M.Sc. Sustainable Cities

Verteiler

Carolin Rösch	UGZ

Versionierung

Datum	Version	Kommentar	Verantw. Freigabe
24.08.2022	1.1	Dokument erstellt	hbi

Inhaltsübersicht

1 Abkürzungsverzeichnis 6

2 Zusammenfassung 7

3 Einleitung 8

3.1 Ausgangslage 8
3.2 Grundlagen 8
3.3 Aufgabenstellung 9

4 Erfahrungen aus anderen Projekten/Städten 11

4.1 Ziele bzgl. E-Baustellen 11
4.2 Beschaffungsstrategien bzgl. E-Baustellen 11
4.3 Elektrische Baustellenprojekte 12

5 Vorgehen 15

6 Systemgrenzen 17

6.1 Einleitung 17
6.2 Räumlich 17
6.3 Emissionen 18
6.4 Aktivitäten und Emissionensquellen 18
6.5 Zeitlich 21
6.6 Lebenszyklus 21
6.7 Typen von Baumaschinen und Transportfahrzeuge (BMTF) 21

7 Theoretische Baustelle 22

7.1 Einleitung 22
7.2 Beschreibung der theoretischen Baustelle 22
7.3 Kategorisierung der Bauphasen 23
7.4 Baustellenaktivitäten und BMTF 26

8 Datengrundlagen 27

8.1 Vorgehen 27

8.2 Datenbanken 27
8.3 Verwendete Datensätze 29

9 Mengengerüst der theoretischen Baustelle 32

10 Resultate konventionelle BMTF 35

10.1 Berechnete Umweltauswirkungen 35
10.2 Sensitivitätsanalyse Transportdistanz 37

11 Resultate elektrische BMTF 39

11.1 Ersetzbare BMTF auf der theoretischen Baustelle 39
11.2 Berechnete Umweltauswirkungen 39
11.3 Sensitivitätsanalyse Strommix 42

12 Vergleich Resultate konventionell und elektrisch 44

12.1 THG-Emissionen 44
12.2 Luftschadstoff-Emissionen 45
12.3 Anschaffungs- und Betriebskosten 46

13 Einordnen in Gesamtkontext 48

14 Fazit 49

14.1 Datenqualität 49
14.2 THG-Emissionen 49
14.3 Luftqualität 50
14.4 Umsetzung 52
14.5 Ziele und Empfehlungen für die Stadt Zürich 53

15 Ausblick 54

15.1 Folgeprojekt 54
15.2 Kriterien für die Auswahl von Pilotbaustellen 54
15.3 Kriterien für die Emissionsmessungen 55

A Anhang 56

A.1 Literaturverzeichnis 56

A.2 Fragenkatalog 60
A.3 Umfassende Liste an BM 61
A.4 Elektrische BMTF 64
A.5 Herleitung der Einsatzzeiten der einzelnen BM 69
A.6 Strommix für CH und ZH 70
A.7 Datentabellen der Ergebnisgrafiken 71

1 Abkürzungsverzeichnis

AHB	Amt für Hochbauten
BKP	Baukostenplan
BM	Baumaschinen
BMTF	Baumaschinen und Transportfahrzeuge
BUK	Bautechnologie und Konstruktion
CRB	Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung
EEA	European Environmental Agency
ICLEI	ICLEI Local Governments for Sustainability
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds (dt. Emission flüchtiger organischer Verbindungen ohne Methan
NOx	Stickstoffoxide
NPK	Normpositionen-Katalog
PM2.5	Feinstaub mit Partikelgrösse 2.5 µm
PM2.5-10	Feinstaub mit Partikelgrösse 2.5 – 10 µm
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
TF	Transportfahrzeuge
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level
UGZ	Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich
Vkm	Vehicle (Fahrzeug) Kilometer
HVO	(Hydrotreated Vegetable Oils -› synthetischer Diesel
ZH	Stadt Zürich

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

2 Zusammenfassung

Der Betrieb von konventionellen Baumaschinen und Transportfahrzeuge (BMTF), trägt global zum Klimawandel wie auch Luftverschmutzung bei. Elektrische BMTF stossen dagegen keine direkten Treibhausgase und Luftschadstoffe im Betrieb aus. Diese Studie untersucht die Änderung von konventionellen zu elektrischen BMTF für Baustellen der Stadt Zürich in Hinblick auf Nutzen für Klima und Luftqualität sowie der Machbarkeit einer zeitnahen Umsetzung.

Für die Abschätzung des Nutzens für Klima und Luftqualität wird das Einsparpotential von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen auf einer theoretischen Baustelle ermittelt. Die konventionellen BMTF werden mit dem Äquivalent der elektrischen BMTF verglichen. Während durch die Nutzung der elektrischen BMTF die direkt verursachten THG-, NOx- und NMVOC-Emissionen vermieden werden, erhöhen sich die PM2.5 resp. PM2.5-10 Emissionen um 60 % resp. 33 % im Vergleich zu den konventionellen BMTF. Bezogen auf die totalen Emissionen (direkt und indirekt) der elektrischen BMTF, können 63 % der THG-, 67 % der NOx- und 44 % der NMVOC-Emissionen eingespart werden. Betrachtet man jedoch den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, relativiert sich die Aussage. Über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, verringern sich die Emissionen der konventionellen BMTF auf einen Anteil von 2 %.

Für die Machbarkeit einer zeitnahen Umsetzung ist es relevant, dass ein Grossteil der Baumaschinen sowie erste Transportfahrzeuge elektrisch verfügbar sind. Aktuell ist die Anzahl jedoch gering und meist erst in einer Pilotphase. Um eine zeitliche Machbarkeit von elektrischen Baustellen in der Stadt Zürich weiter abschätzen zu können, werden Interviews mit Bauunternehmern empfohlen. Kombiniert mit dem Austausch weiterer europäischer Städte, können so Ziele für den Einsatz von elektrischen BMTF definiert sowie Beschaffungskriterien für städtische Baustellen festgelegt werden. Damit gelingt es elektrische Baustellen gezielt zu fördern.

3 Einleitung

3.1 Ausgangslage

Durch den Betrieb von Baumaschinen (BM) und Transportfahrzeugen (TF), die für den Transport von Baumaterial auf die Baustelle eingesetzt werden, entstehen grosse Mengen an Treibhausgasen (THG) und weiteren Luftemissionen. Zunehmend stehen dem Markt Baumaschinen und Transportfahrzeuge (BMTF) zur Verfügung, welche elektrisch oder mit Wasserstoff betrieben werden. Im Zuge der Netto Null Strategie, möchte das Amt für Hochbauten (AHB) das THG-Einsparpotential sowie den zeitlichen Umsetzungshorizont einer Elektrifizierung von Baustellen für die Stadt Zürich (ZH) evaluieren. Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) möchte zudem Erkenntnisse im Hinblick auf Luftemissionen im innerstädtischen Bereich sammeln.

3.2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Begriffe elektrische, fossilfreie und CO_2-neutrale bzw. klimaneutrale Baustelle beschrieben. Anschliessend wird kurz auf bekannte entscheidende Vorteile von elektrischen Baustellen eingegangen.

Klimafreundliche Baustellen
Als elektrische Baustellen, oder kurz E-Baustellen, werden in dieser Studie Baustellen verstanden, auf denen ausschliesslich elektrisch- und/oder wasserstoffbetriebene BMTF eingesetzt werden. Da diese BMTF keine direkten Emissionen ausstossen, werden E-Baustellen auch als emissionsfreie Baustellen bezeichnet (Bellona, 2019).

Fossilfreie Baustellen dagegen kommen ohne die Verwendung von fossilen Treibstoffen aus und erlauben - im Gegensatz zu E-Baustellen - den Einsatz von Biotreibstoffen (Bellona, 2019). Viele konventionelle BMTF können ohne Anpassung mit Biotreibstoffen, wie Bioethanol, Biodiesel, HVO 100 oder Biogas, betrieben werden (DNV GL, 2018a; Multiconsult, 2018). In Kopenhagen müssen bis 2025 die BM, die der Stadt gehören, fossilfrei betrieben werden (ICLEI Europe, o. J.e). Seit 2017 schreibt die Beschaffungsstrategie der Stadt Oslo vor, dass bei städtischen Baustellen fossilfreie BMTF einzusetzen sind. Eine Untersuchung von 19 fossilfreien Bauprojekten in Oslo zeigt, dass, um diese Anforderung zu erfüllen, grösstenteils Biotreibstoffe zum Einsatz kommen. Die TF, die für den Waren-, Abfall- und Personaltransport bei diesen Baustellen eingesetzt werden, wurden wegen hoher Anzahl an Subunternehmern und geringen direkten Einflussmöglichkeiten des Bauunternehmens mit fossilen Energieträgern betrieben. (Multiconsult, 2018)

Bei CO_2-neutralen bzw. klimaneutralen Baustellen werden unvermeidbare CO_2- bzw. THG-Emissionen reduziert und die restlichen CO_2- bzw. THG-Emissionen kompensiert (Weigert et al., 2021). Einer Studie der TU Wien zufolge, können die THG-Emissionen von Baustellen mit zurzeit verfügbaren Massnahmen halbiert werden (TU Wien, 2021). Für den Bau der Umwelt Arena[1] in Spreitenbach sollte die weltweit erste CO_2-neutrale Baustelle errichtet werden. Auf dieser Baustelle wurden die LKWs mit Kompogas/Naturgas oder Biodiesel betrieben, der

[1] https://www.umweltarena.ch/

Aushub für die Betonherstellung verwendet, eigener Strom mithilfe eines Windrades und von PV-Anlagen generiert, CO_2-neutraler Strom zugekauft sowie CO_2-reduzierter Zement, Recyclingkies und Öko-Stahl für den Bau verwendet. Die restlichen CO_2-Emissionen wurden mithilfe von Zertifikaten kompensiert. (Flyer Umwelt Arena, CH-Spreitenbach (o.J.))

Im Gegensatz zu fossilfreien und CO2-neutralen bzw. klimaneutralen Baustellen werden auf elektrischen Baustellen keine Luftschadstoff-Emissionen ausgestossen (Bellona, 2019). Bisher konnten keine Schwellenwerte identifiziert werden, unter welchen Luftverschmutzung harmlos wäre (Hoffmann, 2021). Selbst bei niedrigsten Konzentrationen an Luftschadstoffen, die deutlich unter den existierenden gesetzlichen Grenzwerten liegen, können schwerwiegende negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit beobachtet werden (Hoffmann, 2021). Daher werden in der Studie nur elektrische BMTF betrachtet.

Vorteile von elektrischen Baustellen
Neben der Einsparung von THG und Luftschadstoffen, haben elektrische Baumaschinen (BM) laut Herstellern eine etwa 50 Prozent höhere Lebensdauer als konventionelle BM, da sie weniger bewegte Teile besitzen und somit weniger Reparatur und Wartungsarbeiten benötigen (ICLEI Europe,o. J.b). Darüber hinaus sind elektrische BM signifikant leiser, indem sie fünf bis zehn Mal weniger Lärm als konventionelle BM emittieren (ICLEI Europe,o. J.c). Die Verringerung des Lärms ist förderlich für die Gesundheit der Bauarbeiter und verringert die Belästigungen für Menschen, die in der Nähe leben oder arbeiten (ICLEI Europe,o. J.d). Die Reduzierung von Lärm ist deshalb ebenfalls ein wichtiger Treiber für elektrische BM (DNV GL, 2018b).

3.3 Aufgabenstellung

Das Ziel der Studie ist es für die Elektrifizierung von Baustellen einerseits den Nutzen für Klima und Luftqualität und andererseits die Machbarkeit einer zeitnahen Umsetzung für Baustellen der Stadt Zürich zu untersuchen.

Die Studie geht daher auf folgende Fragen ein:

Thema Treibhausgasemissionen
- Wie hoch ist der Anteil von Transportfahrzeugen und Baumaschinen an den gesamten THG-Emissionen eines Bauprojektes und gesamtstädtisch?
- Welche Reduktion dieser THG-Emissionen könnte durch den Einsatz von elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen erreicht werden?
- Welchen Einfluss hat der Strommix auf das Ergebnis und ist es machbar einen Strommix auf Baustellen zu bestellen?

Thema Luftqualität (UGZ)
- Wie hoch ist die Luftbelastung, welche durch Transport und Baumaschinen auf innerstädtischen Baustellen verursacht werden?
- Welche Reduktion dieser Luftemissionen kann durch den Einsatz von elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen erreicht werden?
- Sind die aktuellen Emissionsfaktoren für Baustellen repräsentativ? Wie stark unterscheiden sich die Emissionen auf Baustellen in den unterschiedlichen Bauphasen?
- Lässt sich aus den Ergebnissen der Trübungsmessung die Partikelanzahl ableiten?

- Wie stark beeinflusst eine Baustelle über ihre gesamte Laufzeit die Luftqualität der Stadt Zürich (NOx, PM10, PM2.5, PM0.1) in unterschiedlichen Entfernungen zum Baustellenmittelpunkt (z.B. Radius: 100 m, 250 m, 500 m, etc.)?

Thema Umsetzung

- Ist die Einrichtung einer Pilotbaustelle, welche weitestgehend mit elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen betrieben wird, heute bereits umsetzbar und welche Zusatzkosten würden entstehen? (Es soll konkret eine Pilotbaustelle zusammen mit dem Auftraggeber identifiziert und eine grobe Testplanung durchgeführt werden.)
- Welche Möglichkeiten hat die Stadt Zürich als Bauherrin bereits heute um die Emissionen auf ihren Baustellen zu minimieren?
- Ab wann ist mit einer grossflächigen Umsetzung von elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen zu rechnen?
- Welche Möglichkeiten hat die Stadt Zürich als Bauherrin um die Elektrifizierung von Baustellen gezielt zu fördern und beschleunigen?

4 Erfahrungen aus anderen Projekten/Städten

Betreffend die Fragen zur möglichen Umsetzung von E-Baustellen in Zürich werden in diesem Kapitel die Ziele und Beschaffungsstrategien bzgl. E-Baustellen sowie durchgeführte und geplante elektrische Baustellenprojekte aus verschiedenen Städten in Europa basierend auf einer Literaturrecherche vorgestellt. Die beschriebenen Ziele und Beschaffungsstrategien aus anderen Städten soll als Fundus für Ideen verstanden werden und die Möglichkeit bieten, deren Erfahrungen in zukünftige Pilotprojekte der Stadt Zürich miteinzubeziehen.

4.1 Ziele bzgl. E-Baustellen

In Tabelle 2 ist eine Auswahl an Städten zu sehen, die sich Ziele bezüglich elektrischer Baustellen gesetzt haben.

Stadt	Stadt als Bauherrin	Private Bauherren
Espo, Helsinki, Turko und Vantaa	Auf Baustellen soll der Anteil von elektrischen oder mit Biogas-betriebenen BMTF bis 2030 mind. 50 Prozent betragen	
Oslo	Alle städtischen Baustellen sollen bis 2025 elektrisch sein	Alle Baustellen sollen bis 2030 elektrisch sein
Trondheim	Alle städtischen Baustellen sollen bis 2025 elektrisch sein	Alle Baustellen sollen bis 2030 elektrisch sein

Tabelle 2: Ziele von ausgewählten Städten in Bezug auf E-Baustellen, Quellen: ICLEI Europe (o. J.e); Ministry of the Environment (2020)

4.2 Beschaffungsstrategien bzgl. E-Baustellen

20 Städte, Agenturen, NGOs und Unternehmen haben sich in der Arbeitsgruppe «Zero-Emission Construction Sites« unter der Big Buyers for Climate and Environment Initiative zusammengeschlossen. Ziel der Arbeitsgruppe ist u. a. Erfahrungen, Best Practices und Marktinformationen auszutauschen, Beschaffungskonzepte gemeinsam zu entwickeln und die Vorteile elektrischer BM zu verbreiten. Eine weitere Interessante Arbeitsgruppe ist die «Electric heavy-duty vehicles for waste collection, street cleaning and maintenance». Zürich ist bereits heute in der Arbeitsgruppe «Electric heavy-duty vehicles for waste collection, street cleaning and maintenance» tätig. (ICLEI Europe, o. J.f)

Espo, Helsinki, Turko und Vantaa in Finnland
Um die gesetzten Ziele zu erreichen, haben die vier finnischen Städte Espo, Helsinki, Turko und Vantaa gemeinsam mit dem finnischen Umweltministerium und dem Kompetenzzentrum für nachhaltige und innovative öffentliche Beschaffung begonnen, Beschaffungskriterien gemeinsam mit Vertretern der Industrie inklusive eines Monitoringsystems, welches die Erreichung der Ziele überwacht, zu entwickeln (Ministry of the Environment, 2020). Da in Helsinki noch keine elektrische BM weitverbreitet verfügbar sind, wurde Biodiesel als Mindestanforderung und elektrische BM nur als freiwilliges Vergabekriterium für städtische Baustellen eingeführt (ICLEI Europe, o. J.b).

Oslo in Norwegen
In der Beschaffungsstrategie der Stadt Oslo wird vorgeschrieben, dass BM bis 2025 elektrisch betrieben und TF bis 2025 entweder den EURO 6 Emissionsstandard entsprechen und mit Biogas oder elektrisch betrieben werden sollten. Für Bauprojekte mit einem Volumen von über 5 Mio. Kronen (1 CHF = ca. 10 Kronen) sollen zudem Umweltaspekte mind. 20 Prozent der Vergabekriterien gewichtet werden. BMTF sollen dabei mit einer Gewichtung von mind. 50 Prozent in die Kategorie Umweltaspekte eingehen. In Oslo gibt es zwei Pilotprojekte, bei denen der Preis nur 25 Prozent der Beschaffungskriterien ausmacht (Kjendseth Wiik et al., 2020). Für Bauprojekte mit einem Volumen von über 51 Mio. Kronen sind zusätzlich zu den vorher beschriebenen Vorgaben Heizungs- und Trocknungssysteme zu verwenden, die keine Emissionen verursachen, wie etwa Fernwärme, elektrische oder andere Null-Emissionstechnologien. (Oslo, 2019)

Trondheim in Norwegen
In der Beschaffungsstrategie von Trondheim aus dem Jahr 2017 steht, dass fossilfreie Baustellen und elektrische BM gefordert werden, wenn diese praktikabel und ökonomisch durchführbar sind (Rennan, 2021).

Unternehmen / Behörden
Auch Unternehmen beginnen E-Baustellen bzw. elektrische BM in ihren Ausschreibungen zu fordern. Die Schweizerischen Bundesbahnen SBB zum Beispiel planen in zukünftigen Ausschreibungen die Emissionsfreiheit von Baustellen zu fordern (SBB, 2021). Die norwegische Strassenverkehrsbehörde SVV legt CO_2-Accounting, Dokumentation des Dieselverbrauchs und Standards für BMTF (EURO6 oder Stage IV) als Anforderungen fest. Darüber hinaus vergibt die SVV für den Einsatz von emissionsfreien BM Boni. Dieser Bonus beträgt für Bagger über 16 Tonnen 400 Kronen pro Stunde und ist auf 80.000 Kronen begrenzt und für Bagger über 25 Tonnen 700 Kronen pro Stunde, maximal jedoch 140.000 Kronen (Kjendseth Wiik et al., 2020).

4.3 Elektrische Baustellenprojekte

Helsinki in Finnland
Auf einer Pilotbaustelle wurden vier elektrische BM eingesetzt und für dieses Jahr sind weitere elektrische Pilotbaustellen geplant (ICLEI Europe, o. J.e).

Kopenhagen in Dänemark
In Kopenhagen wurden in der Innenstadt mithilfe von elektrischen BM Kabel verlegt (Wacker Neuson, o. J.). Durch die geringeren Lärmemissionen konnten die Arbeitszeiten pro Tag verlängert werden, wodurch das Bauprojekt in der Hälfte der Zeit fertiggestellt werden konnte (ICLEI Europe, o. J.b). In einigen städtischen Baustellenprojekten wurde vorgeschrieben, dass die BM bis zu 2,5 t elektrisch betrieben werden müssen und BM über 2,5 t entweder elektrisch oder mit Biotreibstoff zu betreiben sind (ICLEI Europe, o. J.e).

Oslo in Norwegen
Der Umbau der Olavs Vs Gate in Oslo stellt die erste elektrische Baustelle dar. Ein Teil des Bauprojektes umfasste die Errichtung von Ladestationen für Taxis. Diese Ladestationen wurden genutzt, um die BM zu laden. Bei dem Pilotprojekt handelt es sich nicht um eine komplett elektrische Baustelle, da für die Installation einer Membran, die das Eindringen von

Wasser in das Gebäude verhindern soll, aufgrund fehlender Alternativen fossiler Treibstoff verwendet wurde (KlimaOslo, o. J.a). Nichtsdestotrotz konnten durch die Elektrifizierung ca. 35.000 Liter Diesel und 92,5 Tonnen THG eingespart werden (Klima Oslo, o. J.b). Die grösste Herausforderung bei dem Pilotprojekt stellte die Verfügbarkeit bzw. Beschaffung der elektrischen Bagger dar (KlimaOslo, o. J.a). Vor Realisierung der Pilotbaustelle wurden Gespräche mit der Bauindustrie durchgeführt. Da Bauunternehmer dort Bedenken in Bezug auf den Kauf neuester Technologie äusserten und um eine rasche Realisierung des Pilotprojektes zu ermöglichen, hat die Stadt Oslo sowohl einen Vertrag mit einem BM-Vermieter als auch mit einem Bauunternehmer abgeschlossen (C40, 2020; KlimaOslo, o. J.a). Normalerweise stellt der Auftragnehmer das Equipment. In den Verträgen wurde festgehalten, dass die gekauften elektrischen BM vom Bauunternehmer auf der Pilotbaustelle einzusetzen sind. Darüber hinaus versicherte die Stadt dem BM-Vermieter, dass diese BM in zukünftigen städtischen Bauprojekten eingesetzt werden. Rückmeldungen von bietenden Bauunternehmern zeigen, dass die Vergabe von Unteraufträgen für grössere Projekte jedoch wenig praktikabel scheint (Kjendseth Wiik et al., 2020). Das zweite grosse Bedenken, das von Bauunternehmen im Vorfeld genannt wurde, sind aufgrund der geringen Vorerfahrung die Kalkulation der Stromkosten. Die Stadt Oslo legte deshalb in den Ausschreibungsunterlagen fest, dass der während der Bauphase verwendete Strom von der Stadt bezahlt wird. (C40, 2020)

Für den Abriss und Neubau eines städtischen Kindergartens sowie eines städtischen Pflegeheimes in Oslo wurden ebenfalls hauptsächlich elektrische BM eingesetzt. Der Bau des Kindergartens wurde offen ausgeschrieben und der Bau des Pflegeheims aufgrund der Grösse und dem innovativen Charakter im Einladungsverfahren (5 Unternehmen) ausgeschrieben. Die Errichtung des Pflegeheims hatte eine Vorlaufzeit von etwa 2 ½ Jahren - angefangen mit Gesprächen mit Maschinenlieferanten, Bauunternehmern und Bauauftraggebern, um die Marktmöglichkeiten auszuloten und den Erfahrungsaustausch zu forcieren, bis zur umfassenden Logistik- und Projektplanung. Zudem erfordert die begrenzte Anzahl an verfügbaren elektrischen BM eine frühzeitige Planung und Bestellung der Fahrzeuge (DNV GL, 2018a). (Hamdan, 2018)

Weitere Beispiele
Das öffentliche Versorgungsunternehmen der Stadt Budapest in Ungarn plant Pilotbaustellen zu betreiben und hat dafür Gespräche mit Anbietern durchgeführt. Für 2021 stellt die Stadt Budapest 572'000 Euro für Pilotprojekte zur Verfügung. (ICLEI Europe, o. J.e)

Bei der Erweiterung des A14-Anschlusses Bludenz-Bürs in Österreich kam das erste batteriebetriebene Spezialtiefbaugerät und ein elektrischer Kompaktbagger zum Einsatz. Durch die Elektrifizierung können auf ein Jahr hochgerechnet ca. 35'000 Liter Diesel und 92 Tonnen CO_2 eingespart werden. (i+R Gruppe, o. J.)

Fazit
Andere Städte, wie Espoo, Helsinki, Turko, Vantaa, Kopenhagen, Oslo und Trondheim, haben sich konkrete Ziele in Bezug auf elektrische Baustellen gesetzt und haben bzw. erarbeiten Beschaffungsstrategien, um für die Ausschreibung von städtischen Bauprojekten Kriterien festzusetzen. Die Stadt Zürich ist ein wichtiger Auftraggeber und sollte ihre Rolle nutzen, um ein klares Signal an den Markt zu senden, indem Beschaffungskriterien gesetzt und kommuniziert werden. Um diese Beschaffungskriterien festlegen zu können, sind Gespräche

mit BM-Lieferanten und Bauunternehmern im Vorfeld sowie in regelmässigen Abständen zu führen.

Erfahrungen aus den bereits umgesetzten Pilotprojekten zeigen die Wichtigkeit von Gesprächen mit BM-Lieferanten und Bauunternehmern im Vorfeld, um bestehenden Bedenken aufgreifen und begegnen zu können, sowie die Wichtigkeit umfassender (Vor-)Planungen. Daher ist die Umsetzung einer Pilotbaustelle im Jahr 2022 nicht zu empfehlen. Stattdessen sollte begonnen werden, Gespräche mit BM-Lieferanten und Bauunternehmen zu führen, um die derzeitigen und zukünftigen Marktmöglichkeiten auszuloten und basierend darauf Beschaffungskriterien entwickeln zu können.

5 Vorgehen

Um das Einsparpotential von THG- und Luftemissionen zu quantifizieren, werden die Resultate einer Ökobilanz einer Baustelle, auf der konventionelle Baumaschinen und Transportfahrzeuge (BMTF) zum Einsatz kommen, mit den Resultaten der äquivalenten Baustelle, auf der elektrische BMTF zum Einsatz kommen, verglichen. Eine Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse oder Life Cycle Assessment (LCA) genannt, ermöglicht es, Umweltauswirkungen von Produkten, Dienstleistungen und Prozessen über ihren gesamten Lebenszyklus zu analysieren.

Folgende Abbildung 1 beschreibt das methodische Vorgehen und die Zusammenhänge zwischen den Arbeitsschritten.

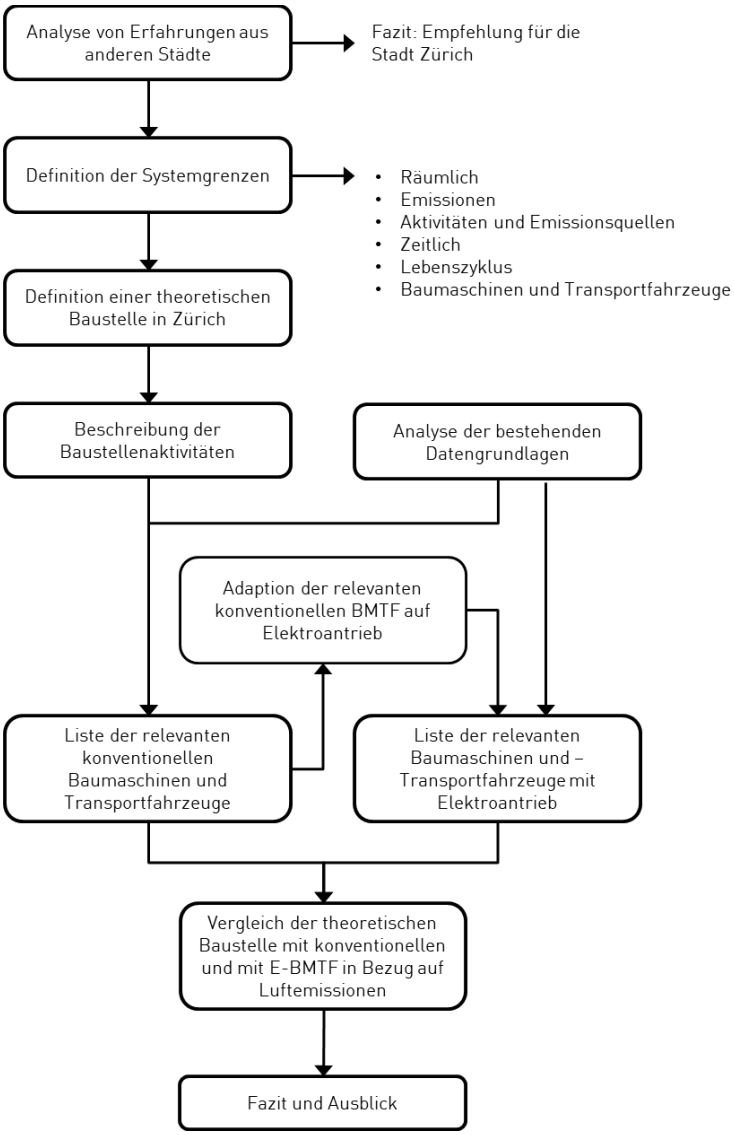

Abbildung 1: Methodisches Vorgehen

Den Auftakt in die Studie bildet eine Literaturanalyse zu den Erfahrungen aus anderen Städten in Europa mit klimafreundlichen resp. elektrifizierten Baustellen. Daraus wurden schon erste Empfehlungen für die Stadt Zürich abgeleitet. In einem nächsten Schritt wird der Untersuchungsrahmen resp. die Systemgrenzen der Studie festgelegt und die betrachteten und vernachlässigten Aspekte beschrieben. Da in den ersten Monaten nach Auftragserteilung noch keine spezifische Baustelle mit entsprechender Dokumentation gefunden werden konnte, wurde mit der Auftraggeberin vereinbart, dass stattdessen mit einer theoretischen Baustelle gearbeitet werden kann. Diese wird so beschrieben, dass bei Vorliegen von konkreten Informationen einer realen Baustelle, diese mit vernünftigem Aufwand in das Modell integriert werden kann. Als nächster Schritt werden die verfügbaren und relevanten Emissionsfaktoren aus den Datenbanken Ecoinvent, KBOB und Non-Road (siehe Kapitel 8.2) zusammengefasst und miteinander verglichen. Das Resultat ist eine Darstellung der Emissionsfaktoren, die in der Studie verwendet werden. Anschliessend werden die wichtigsten Aktivitäten und BMTF zu und auf die theoretische Baustelle anhand der Bauphasen beschrieben. Aufgrund dieser Beschreibung werden alle wichtigen konventionellen BMTF, die auf der theoretischen Baustelle eingesetzt werden, aufgeführt. Die fehlenden, aber entsprechenden Elektro-BMTF Datensätze wurden auf Basis der konventionellen neu modelliert. Anschliessend wird mit Hilfe der Emissionsfaktoren die Umweltauswirkungen für die konventionelle und elektrische Baustelle berechnet und die Ergebnisse verglichen. Am Schluss werden die erarbeiteten Resultate in den Kontext der von der Auftraggeberin präsentierten Fragen gestellt und einen Ausblick zu den noch offenen Arbeiten für das Jahr 2022 geliefert.

6 Systemgrenzen

6.1 Einleitung

Für diese Studie werden verschiedene Systemgrenzen definiert:

- Räumlich
- Emissionen
- Aktivitäten und Emissionsquellen
- Zeitlich
- Lebenszyklus
- Baumaschinen und Transportfahrzeuge (BMTF)

6.2 Räumlich

Im Fokus stehen die Transporte zu und von der Baustelle sowie die Aktivitäten auf der Baustelle. Es wird davon ausgegangen, dass die Baustelle im Zentrum der Stadt Zürich liegt. Die Transporte enthalten die LKW-Fahrten mit Aushub/Abfall zu den Entsorgungsstellen (sowie deren Anfahrten) und die Anlieferung der Baustoffe von den entsprechenden Lagerstätten zur Baustelle (sowie deren Leerfahrten zurück).

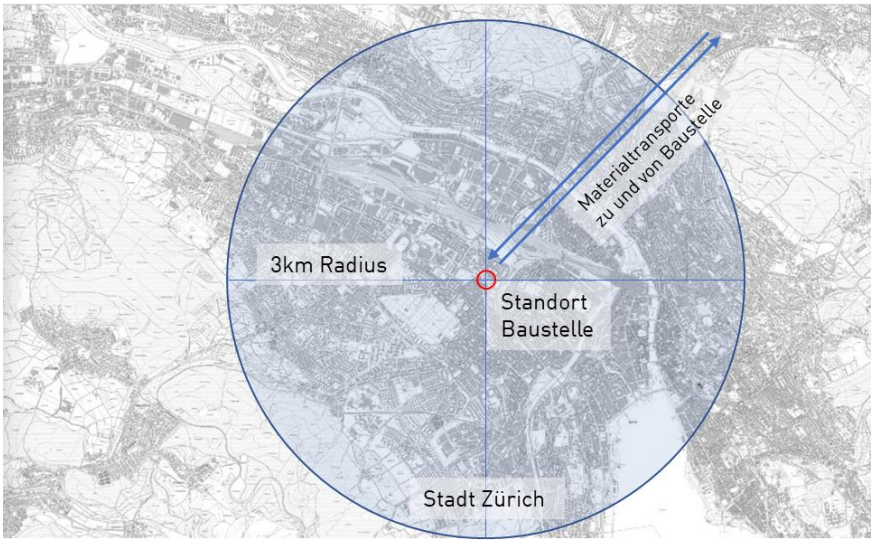

Abbildung 2: Standort Baustelle und LKW-Transporte von und zur Baustelle

Es wird unterschieden in Fahrten innerhalb (Radius von 3km) und ausserhalb des Stadtgebietes. Begründet wird dies mit dem Interesse der Stadt Zürich an den direkten Emissionen, welche sich durch die Baustelle auf die Bevölkerung auswirken. Da die Treibhausgasemissionen nicht ortsgebunden sind, werden auch die gesamten Fahrten untersucht. Alle Aktivitäten auf der Baustelle werden grundsätzlich berücksichtigt. Ausnahmen sind in den folgenden Unterkapitel beschrieben.

6.3 Emissionen

In dieser Studie werden folgende Emissionen über den Lebenszyklus aller Aktivitäten innerhalb der räumlichen Systemgrenze berücksichtigt:

- Treibhausgasemissionen (THGE)
- Emission flüchtiger organischer Verbindungen ohne Methan (engl. NMVOC)
- Stickoxide (NO_x)
- Feinstaub PM2.5 (‹ 2.5µm)
- Feinstaub PM2.5-10 (zwischen 2.5 und 10 µm)[2]

Dabei wird bei dem BMTF unterschieden in Emissionen aus dem Betrieb (bsp. Verbrennungsemissionen) und aus der Erstellung (bsp. Herstellung eines Baggers).

Die Emissionen aus dem Betrieb der TF umfassen den Verbrennungsprozess resp. die Stromherstellung, den Unterhalt und den Reifen-, Strassen- und Bremsabrieb. Bei den BM sind es die Emissionen aus dem Verbrennungsprozess resp. die Stromherstellung und den Unterhalt.

Die Emissionen aus der Erstellung enthalten die Herstellung, die Transportinfrastruktur (Strasse, Brücken, Tunnels) und die Entsorgung der BMTF.

Nicht berücksichtigt werden die nicht-motorischen Feinstäube aus dem Abbruch (v.a. Feinstäube), weil davon ausgegangen wird, dass sich diese nur unwesentlich voneinander abweichen, wenn die Maschinen fossil oder alternativ betrieben werden.

6.4 Aktivitäten und Emissionensquellen

Die Aktivitäten werden grundsätzlich unterteilt in:

- Fahrten von und zur Baustelle
- Fahrten/Aktivitäten innerhalb der Baustelle

Des Weiteren wird unterschieden in zwei Bauphasen:

- Rückbauaktivitäten inkl. Aushub und Baugrundbereitstellung
- Konstruktionsaktivitäten

Eine detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Aktivitäten befindet sich in Kapitel 7.4.

[2] Die Fraktion PM10 umfasst alle Partikel mit einem maximalen Durchmesser von 10 µm und entspricht somit der Summe von PM2.5 und PM 2.5-10. Staubpartikel PM›10 (›10 µm) wurden in der Studie nicht berücksichtigt, weil sie nicht gesetzlich reguliert sind.

Nicht berücksichtigt werden:

- Die Herstellung der Baumaterialien, die Studien zufolge 80 bis 93 Prozent der THG-Emissionen eines Bauprojektes ausmachen (Sizirici et al., 2021)
- Der Transport von Personen und Baumaschinen, sowie die Behandlung des auf der Baustelle anfallenden Abfalls.
- Arbeiten für erdverlegte Leitungen, die Entwässerung, die Kanalisation sowie der Innenausbau (Bsp. Bad, Küche, Bodenbeläge).
- Alle heute schon elektrisch betriebenen Geräte (Bsp. Stationärer Kran, Kreissäge).
- Trocknung des Gebäudes. Annahme: Entweder elektrisch oder genügend Zeit für natürliche Trocknung.

Nachfolgende Skizze stellt den Rückbau im Querschnitt dar:

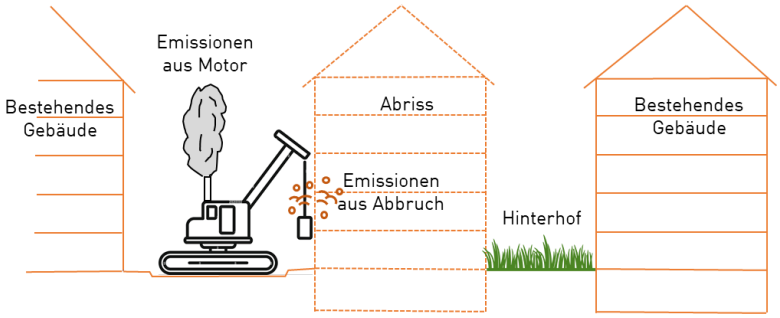

Abbildung 3: Querschnitt Rückbau/Abriss eines bestehenden Gebäudes inkl. Baugrundvorbereitung für Neubau

Betrieb
Bei den Emissionen aus dem Betrieb wird grundsätzlich unterschieden in direkte (Scope 1) und indirekte Emissionen (Scope 2) aus den BMTF. Die direkten Emissionen entstehen aus den Verbrennungsprozessen der fossil betriebenen BMTF und dem Pneuabrieb der Transportfahrzeuge (TF). Der Pneuabrieb aus den BM werden vernachlässigt, weil sie im Vergleich zu den TF irrelevant sind. Unter die indirekten Emissionen (Scope 2) fällt vor allem die Stromproduktion. Diese Emissionen entstehen fast ausnahmslos ausserhalb des Stadtgebietes da der Strom bis auf einige Ausnahmen (Bsp. Flusskraftwerk unterer Letten) auch ausserhalb des Stadtgebietes generiert wird. In dieser Studie werden die Emissionen aus Scope 1 und 2 nicht separat ausgewiesen.

Erstellung
Ebenfalls untersucht werden die Emissionen aus der Produktion der BMTF. Dabei handelt es sich um Scope 3 Emissionen.

Die folgende Skizze zeigt schematisch den Konstruktionsprozess im Querschnitt:

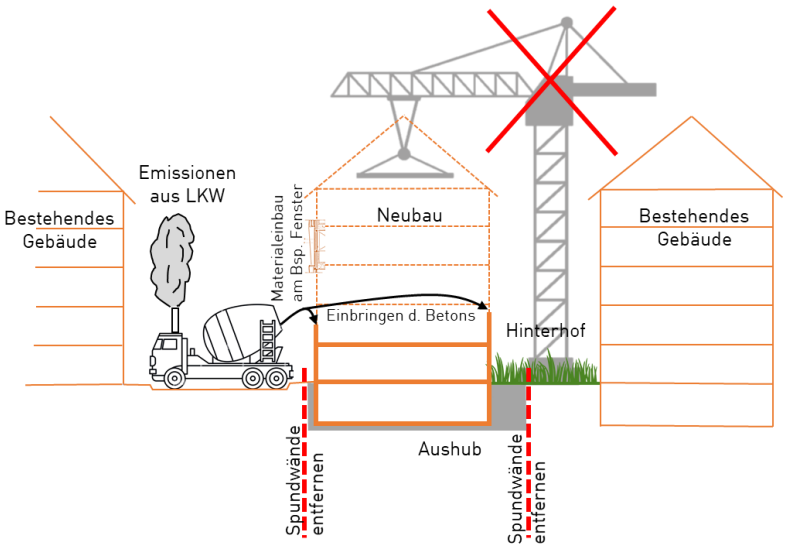

Abbildung 4: Querschnitt Konstruktion des Neubaus

Bei den Aktivitäten innerhalb der Baustelle werden nur die Baumaschinen berücksichtigt, die heute schon fossil betrieben werden. Dies bedeutet, dass die strombetriebenen Maschinen wie zum Beispiel der Kran, nicht berücksichtigt werden. Bei der Konstruktion steht die Anlieferung der Baustoffe auf die Baustelle im Vordergrund.

Zu guter Letzt noch eine Skizze der Aufsicht der Baustelle inkl. Umgebung:

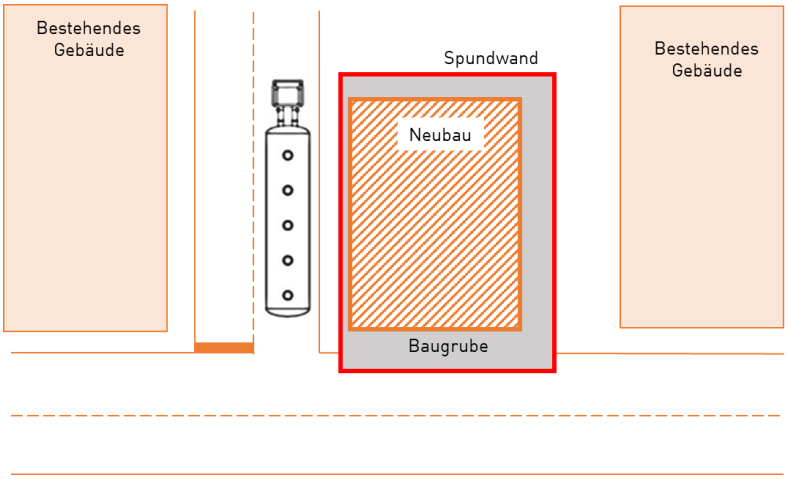

Abbildung 5: Aufsicht der Baustelle

Neben der Baugrube, die umfasst wird durch eine Spundwand, werden alle Bauaktivitäten mit BMTF die fossil betrieben werden und im Zusammenhang mit dem Rückbau und dem Neubau stehen, berücksichtigt. Diese stehen und bewegen sich meistens ausserhalb der Baugrube.

6.5 Zeitlich

Die Aktivitäten werden über die gesamte Dauer der Baustelle, angefangen beim Rückbau bis zur Fertigstellung berücksichtigt. Es wird von einer Dauer von 8 Monaten ausgegangen. Der Innenausbau wird nicht berücksichtigt, weil die verbauten Mengen im Vergleich zum Rohbau eher gering sind.

6.6 Lebenszyklus

Es wurde der gesamte Lebenszyklus aller betrachteten Aktivitäten von der Herstellung über den Betrieb bis zur Entsorgung abgebildet. Die Herstellung und die Entsorgung wurden zusammengefasst unter «Erstellung». Die Unterscheidung zwischen den Emissionen aus der Erstellung und aus dem Betrieb gemäss den verwendeten Datensätzen aus der UVEK-Datenbank sind in Kapitel 8.3 beschrieben.

6.7 Typen von Baumaschinen und Transportfahrzeuge (BMTF)

Für längere Strecken scheinen Wasserstoffbetriebene LKWs aufgrund einer grösseren Reichweite, einer leichteren und schnelleren Aufladung bzw. Betankung und des deutlich geringeren Gewichts besser geeignet zu sein als batteriebetriebene. Da wasserstoffbetriebene LKWs sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, ist nicht mit einer nennenswerten Produktion vor 2023-2025 zu rechnen und werden deshalb nicht berücksichtigt (Nadel und Huether, 2021).

7 Theoretische Baustelle

7.1 Einleitung

Da leider im Moment noch ungenügende Daten zu den verwendeten Materialien und BMTF für ein konkretes Bauprojekt verfügbar sind, werden in dieser Studie die Emissionen einer theoretischen Baustelle untersucht. Mit der theoretischen Baustelle können die Struktur, die Rechenvorgänge und erste Resultate ermittelt werden. Sobald genauere Daten aus einem konkreten Projekt vorliegen, können diese mit wenig Aufwand in die erarbeitete Struktur übernommen, die Annahmen überprüft und die Resultate präzisiert werden.

7.2 Beschreibung der theoretischen Baustelle

Die theoretische Baustelle steht auf einer Parzelle im Zentrum der Stadt Zürich im Kreis 4, nahe des Bullingerplatzes (siehe auch Abbildung 2 in Kapitel 6.2). Geplant ist ein Mehrfamilienhaus mit acht Wohneinheiten als Zweispänner auf vier Geschosse verteilt. Folgende Abbildung 6 beschreibt die Geometrie des zu erstellenden Gebäudes und die anschliessende Liste, die wichtigsten Elemente.

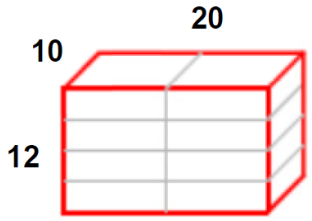

Abbildung 6: Steckbrief des zu bauenden Mehrfamilienhauses

- 8 Wohneinheiten à 100m^2 (10 m x 10 m) mit 3m Raumhöhe
- Massivbau mit Kompaktfassade
- Fensteranteil im Mittel ca. 35 Prozent
- Isolierverglasung 3fach mit 0,7 W/m^{2}K
- Orientierung der grösseren Fassadenflächen nach Süden und Norden
- U-Wert opak 0,2 W/m^{2}K
- Wärmepumpe Erdwärme/Wasser (Jahresarbeitszahl Wärme/Kälte: 2,8 / 2,5)
- Aushubvolumen: 200 m^3
- Humusdicke: 5 cm
- Dauer der Baustelle: 8 Monate

7.3 Kategorisierung der Bauphasen

Zur Kommunikation zwischen den Baubeteiligten und zur Abrechnung der Leistungen werden Bauprojekte meist in verschiedene Bauphasen unterteilt (Bautechnologie und Konstruktion (BUK), o. J.; Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB), o. J.). Im Folgenden werden die in der Schweiz gängigen Kategorisierungssysteme vorgestellt. Dabei handelt es sich um:

- SIA 112 des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA)
- Baukostenplan (BKP) der Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB)
- Normpositionen-Katalog (NPK) der Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB)

SIA 112
Die Verständigungsnorm zu SIA 112 (2017) «Nachhaltiges Bauen – Hochbau» ist ein Instrument zur Verständigung zwischen Auftraggebenden und Planenden bei der Bestellung und Erbringung spezieller Planerleistungen für nachhaltiges Bauen in den Bereichen Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt. Sie gliedert den Lebenszyklus eines Bauwerkes in sechs Planungsphasen. Relevant für die Studie ist nur die Teilphase 52 «Ausführung». (Professur für Architektur und Bauprozess, o. J.)

Die Teilphase 52 «Ausführung» umfasst folgende Leistungen (nach Professur für Architektur und Bauprozess, o. J.):

- Grundstücksvorbereitung, wie Räumungen, Terrainvorbereitung und ggf. Sicherung oder Abbruch bestehender Gebäude
- Aushub der Baugrube mit Baugrubensicherung und Massnahmen zur Grundwasserhaltung, Verlegung Kanalisationsleitung
- Erste Rohbauphase mit Fundament und Tragwerk
- Zweite Rohbauphase mit Gebäudehülle
- Erste Ausbauphase mit Gebäudetechnikinstallation
- Zweite Ausbauphase mit Innenausbau
- Je nach Projekt kommen noch Betriebseinrichtung und Umgebungsarbeiten hinzu

Baukostenplan (BKP)
Der Baukostenplan BKP regelt die Kontierung (= Gliederung) der Anlagekosten und umfasst einige wenige Seiten. Er dient zur Kommunikation zwischen den Baubeteiligten und kann gut als Organisationsstruktur für ein Projekt oder eine Realisation dienen.

Alle Bautätigkeiten sind mit einer BKP-Zahl benannt. Die Zahlen können 1-stellig bis 4-stellig sein, wobei die steigende Anzahl Stellen der BKP-Zahlen gleichbedeutend ist mit einer feineren Betrachtung. 2-stellige Zahlen sind somit Unterkapitel von 1-stelligen Zahlen usw.

1-stellige BKP-Zahlen bezeichnen die folgenden Hauptkapitel:

- 0 Grundstück
- 1 Vorbereitungsarbeiten
- 2 Gebäude
- 3 Betriebseinrichtungen
- 4 Umgebung
- 5 Baunebenkosten und Übergangskonten
- 6-8 Reservepositionen
- 9 Ausstattung

Für das Gebäude selbst sind also die Zahlen, welche mit einer 2 beginnen, anzuwenden. Im Normalfall bieten 3-stellige Zahlen eine genügend genaue Orientierung.

Die BKP-Zahlen resp. die damit bezeichneten Arbeiten sind ungefähr dem Bauablauf entsprechend geordnet; 201 Aushub, darauf folgt 211 Baumeister, 221 Fenster, 225 Dämmung etc.

Normpositionen-Katalog (NPK)
Der Normpositionen-Katalog NPK ist die Basis des Datenverbunds der schweizerischen Bauwirtschaft. Er bildet die Grundlage für standardisierte und rechtssichere Leistungsbeschreibungen. Die Arbeit mit dem NPK beginnt in der Ausschreibungsphase. Auf der Grundlage der Werk- und Detailpläne werden mithilfe des NPK Leistungsverzeichnisse erstellt. Sie beschreiben die für das zu erstellende Bauwerk notwendigen Leistungen und Materialien nach Arbeitsgattungen. So ist sichergestellt, dass alle offerierenden Unternehmer über die gleichen Informationen verfügen und die von ihnen gelieferten Preise vergleichbar sind. Während der Realisierungsphase wird das Leistungsverzeichnis zur Kostenkontrolle, zur Rechnungsstellung sowie für das Baustellen-Controlling verwendet. Zudem ist der NPK mit den Kostengliederungssystemen BKP und eBKP verknüpft.

Die Aufteilung des NPKs in Kapitelgruppe, Unterkapitelgruppe und Kapitel ist beispielhaft in Abbildung 7 für die Kapitelgruppe Rohbauarbeiten und die Unterkapitelgruppe Baumeisterarbeiten gezeigt. Das NPK enthält rund 200 Kapitel. Die in einem Kapitel enthaltenen Leistungen werden i. d. R. von einem Unternehmer erbracht. (CRB, o. J.)

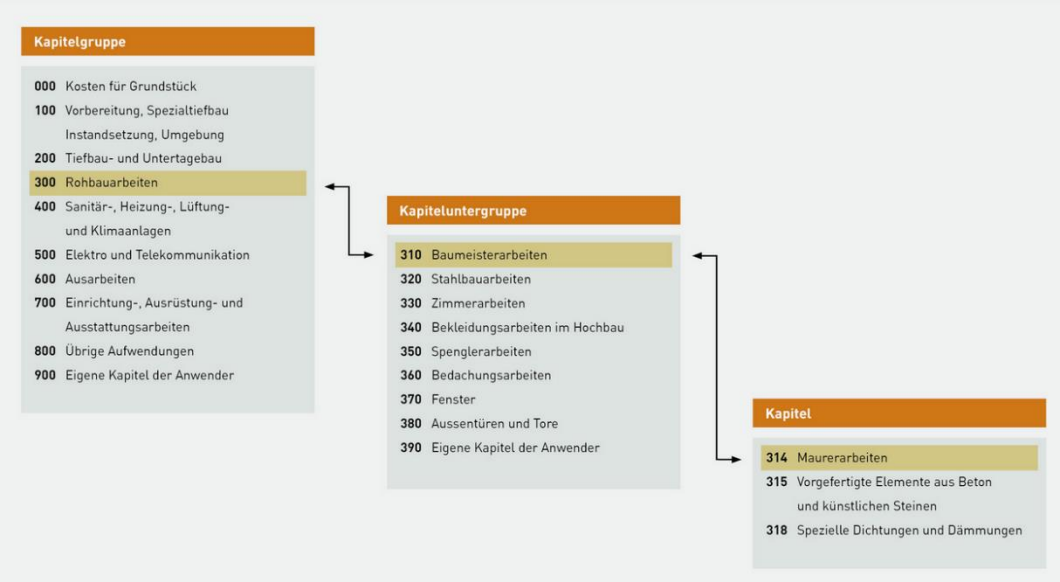

Abbildung 7:Struktur des NPKs, Graphik übernommen aus CRB (o. J.)

Verwendete Kategorien
Da mit dieser Studie v.a. die Aktivitäten im Zusammenhang mit den BMTF untersucht werden, eignet sich der NPK am besten. Er beschreibt die für das zu erstellende Bauwerk notwendigen Leistungen und Materialien nach Arbeitsgattungen.

Folgende Kapiteluntergruppen, die mit Aktivitäten von BMTF im Zusammenhang stehen, wurden in der Studie berücksichtigt:

- 117 Abbrüche und Demontagen
- 160 Baugrubensicherungen und Wasserhaltung
- 170 Spezialfundationen und Grundwasserabdichtungsarbeiten
- 181 Garten- und Landschaftsbau
- 210 Erdbauarbeiten
- 310 Baumeisterarbeiten
- 320 Stahlbauarbeiten
- 340 Bekleidungsarbeiten im Hochbau
- 370 Fenster

7.4 Baustellenaktivitäten und BMTF

Folgende Baustellenaktivitäten, entsprechend den oben aufgeführten Norm-Positionen, wurden für diese Studie berücksichtigt:

- Rückbau der Obergeschosse des bestehenden Gebäudes mit Rückbaubagger inkl. Abtransport zur Deponie oder Recyclingstätte
- Einbringen der Spundwände mit mobilem Spezialkran
- Aushub des Erdreichs zwischen der Spundwand und dem verbleibenden Kellergeschoss, mit einem Bagger und Abtransport zu einem Zwischenlager
- Rückbau des Kellergeschosses inkl. Bodenplatte mit Rückbaubagger
- Planierungsarbeiten mit kleineren Maschinen
- Erdsondenbohrungen mit mobilem Spezialkran zur Gewinnung von Erdwärme für den Betrieb der Wärmepumpe
- Einbringen des Betons für die Flächengründung mit Fundamentverstärkung mittels Krans (auf Pfahlgründung soll, wenn möglich verzichtet werden (Baudirektion Kanton Zürich (2019))
- Baumeisterarbeiten: Erstellen des Rohbaus inkl. Baugerüst und Schalungen sowie Materialanlieferungen
- Einbau von div. Baumaterialien/-teile (Bsp. Fenster, Dachabdeckungen, etc.): Distanzen von Bauteillager innerhalb der Schweiz zur Baustelle
- Garten- und/oder Wegarbeiten: Einsatz kleinerer Bagger und Radlader (anhand geschätzter Einsatzzeit)

Im Anhang A.3 sind in Tabelle 15 alle möglichen Baumaschinen, die theoretisch auf einer Baustelle zum Einsatz kommen können, aufgelistet. Nachfolgende Tabelle ordnet die oben beschriebenen Baustellenaktivitäten den Normpositionen zu und beschreibt die dafür eingesetzten BMTF. Die verschiedenen kleineren Transporte auf der Baustelle werden keinen Normpositionen zugeordnet, dafür anhand von geschätzten Einsatzzeiten berücksichtigt.

Normposition	Baustellenaktivität	Eingesetzte BMTF	Kürzel
117	Abbruch bestehendes Gebäude	Raupenbagger	BM0
117	Abtransport Abbruchmaterial Gebäude	LKW 32-40t	LKW0
160	Spundwände einschlagen	Rammbären aller Art mit Hydraulik-Aggregaten	BM1
160	Spundwände entfernen	Rammbären aller Art mit Hydraulik-Aggregaten	BM3
170	Planierungsarbeiten (Baugrundvorbereitungen)	Planierraupe	BM5
170	Bohrlöcher für die Erdwärmesonden	Erdbohrmaschine	BM6
181	Kleinere Abschluss- und Gartenarbeiten	Minibagger	BM7
210	Aushub	Raupenbagger	BM2
210	Abtransport Aushub	LKW 32-40t	LKW1
310	Transport Beton auf Baustelle	LKW 32-40t	LKW2
320	Transport Gerüst auf Baustelle	LKW	LKW4
340	Transport Dämmmaterial auf Baustelle	LKW	LKW3
370	Transport Fenster auf Baustelle	LKW	LKW5
Div.	Transporte auf der Baustelle	Dumper	BM4

Tabelle 3: Berücksichtigte Baustellenaktivitäten und dafür notwendige BMTF

8 Datengrundlagen

In diesem Kapitel werden die für die Berechnung verwendeten Datenbanken und Datensätze aufgeführt.

8.1 Vorgehen

In der folgenden Tabelle 4 wird das Vorgehen anhand der zur Verfügung stehenden Datengrundlagen beschreiben:

Verwendete Grundlagen	Vorgehen und Output
Ausgangslage	Baustellenaktivitäten und BMTF (siehe Kapitel 7.4)
UVEK-Datenbank	Passende Datensätze recherchieren. Output: Diesel-Datensätze mit Emissionen pro Referenzeinheit
Mobitool	Gewichtsangaben eines E-Fahrzeugs recherchieren. Output: Gewicht wird verwendet, um aus den Diesel-Datensätze E-Datensätze für die gleichen Fahrzeuge zu modellieren
UVEK-Datenbank	Erstellung neuer Datensätze für E-BMTF in der UVEK-Datenbank Output: Elektro-Datensätze mit Emissionen pro Referenzeinheit
Non-Road	Dieselverbräuche der verschiedenen BM recherchieren, um über die geschätzte Einsatzdauer (siehe nächster Punkt), die Dieselmenge in MJ über die gesamte Bauzeit zu ermitteln
Input-Daten	Einsatzdauer der BM, Transportdistanzen, Gewicht der Baumaterialien bestimmen
Umrechnung	Umrechnung der vorliegenden Input-Daten auf die Referenzeinheiten der benötigten Datensätze
Resultat	Output: Emissionen aus den BMTF der gesamten Baustelle über 8 Monate.

Tabelle 4: Vorgehen zur Ermittlung aller notwendigen Datengrundlagen

8.2 Datenbanken

Ecoinvent
Die internationale ecoinvent Datenbank ist ein derzeit weltweit führendes Datensystem vom schweizerischen ecoinvent-Zentrum zur zentralen Erfassung, Berechnung, Verwaltung und zum Anbieten von Ökobilanzdaten mit über 4500 Nutzern und Nutzerinnen in mehr als 40 Ländern. Der Datenbestand der Version v3.8 aus dem Jahr 2021 umfasst mehr als 18'000 Datensätze. Aufgeführt werden Sachbilanzdaten zu Energie, Materialien, Abfallentsorgung, landwirtschaftliche Produkte und Prozesse, Transporte, Elektronik, Metallverarbeitung und Gebäudelüftung, die mit Industriedaten von unabhängigen Experten erstellt wurden. Neben den Sachbilanzen enthält die ecoinvent Datenbank zu diesen Bereichen auch Bewertungsmethoden wie u. a. dem EcoIndicator 99, IPCC 2013, EF v3.0, Methode der ökologischen Knappheit 06 oder ReCiPe.

UVEK-Datenbank
Der UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2018 basiert auf ecoinvent v2.2 und wurde in wesentlichen Bereichen, nämlich Erdöl-, Erdgas-, Kernbrennstoff- und Strom-Bereitstellung, Transport- und Entsorgungsdienstleistungen und Forst- und Holzwirtschaft aktualisiert. Er wurde von den Schweizer Bundesämtern in Auftrag gegeben und publiziert. Diese Daten basieren auf den ecoinvent Datenqualitätsrichtlinien v2 (DQRv2) und werden auf der Webseite ecoinvent v2 angeboten. Diese Datenbank bildet die Grundlage für die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich. Alle in dieser Studie verwendeten Datensätze basieren grundsätzlich auf der UVEK Datenbank.

Ökobilanzdaten im Baubereich
Die Ökobilanzdaten im Baubereich basieren auf branchenbezogenen Stoff- und Energieflüssen (gemäss Ecoinvent-Methodik). Sie sind die akzeptierte Datengrundlage für die Berechnung der Primärenergie, der Treibhausgasemissionen sowie der Umweltbelastungen für Baumaterialien, Gebäudetechnik, Energie und Transporte. Die Datensätze stammen entweder direkt aus der UVEK Datenbank oder aus Studien basierend auf Datensätze der UVEK Datenbank.

Mobitool-Faktoren v2.1
Die mobitool-Faktoren sind in einer Liste zusammengefasst und umfassen die Emissions- und Umweltwerte von über 150 Verkehrsmitteln. Wann immer eine Energieeffizienz- oder Umweltbewertung im Mobilitätsbereich gemacht wird, kommen in der Regel die mobitool-Faktoren zum Einsatz. Sie gelten somit als de facto Standard für die Ökobilanz-Umweltbewertung von Mobilität in der Schweiz.

Für jedes Verkehrsmittel stehen aktuelle Angaben zum Betrieb, zur Energiebereitstellung, zur Fahrzeugherstellung und -unterhalt sowie zur Fahrweginfrastruktur zur Verfügung. Für diese Studie wurden aus der Mobitool-Liste nur die Fahrzeug- und Batteriegewichte verwendet.

Non-Road-Datenbank
Die Non-Road-Datenbank vom BAFU stellt als Internet-Tool die relevanten Grundlagen für die Berechnungen von Schadstoffemissionen im Non-Road-Sektor bereit. Sie dient als Arbeitshilfe für Planungsbüros z.B. bei der Erarbeitung von Umweltverträglichkeitsberichten (UVB). Die aus der Datenbank resultierenden Emissionsfaktoren orientieren sich an die geltenden Emissionsgrenzwerten und bilden somit den aktuellen Stand der Technik dar (letzte Aktualisierung im Jahr 2015, mit Prognosen bis 2050). Allerdings müssen folgende Beschränkungen berücksichtigt werden:

- Emissionsfaktoren nur für Baumaschinen aber nicht für Transportfahrzeuge
- Nur motorische Emissionen: keine Aussage über den gesamten Lebenszyklus möglich
- Keine Emissionsfaktoren für Elektro-Baumaschinen

Vergleich Emissionsfaktoren UVEK- und Non-Road-Datenbank
Da die UVEK-Datensätze schon etwas älter sind, wurden diese anhand der aktuelleren Non-Road-Datenbank validiert. Dabei wurden die Non-Road Emissionsfaktoren für die Baumaschinen der theoretischen Baustelle ermittelt und mit den UVEK-Datensätzen verglichen. Als Beispiel sind in Tabelle 5 die Emissionsfaktoren einer Baumaschine für Planierungsarbeiten dargestellt. Für die Umrechnung der Ecoinvent-Emissionsfaktoren wurde ein Dieselverbrauch von 6.9 kg/h oder 293.9 MJ/h angenommen (Quelle: Non-Road-Datenbank). Die PM-Emissionsfaktoren sind aufgrund der unterschiedlichen Grössenklassen der Baumaschinen schwierig zu vergleichen und wurden entsprechend nicht dargestellt).

	Emissionsfaktor UVEK Datenbank Total	Emissionsfaktor UVEK Datenbank Anteil Motor	Emissionsfaktor UVEK Datenbank umgerechnet	Emissionsfaktor Non-Road-Datenbank
Datensatz	diesel, burned in building machine, with particle filter			Planierraupe 56-75 kW
THG / CO_2	0.101 kg/MJ	0.074 kg/MJ	21.731 kg/h	21.627 kg/h
Nox	0.408 g/MJ	0.330 g/MJ	0.097 kg/h	0.036 kg/h
NMVOC	77.198 mg/MJ	20.072 mg/MJ	0.006 kg/h	0.004 kg/h

Tabelle 5: Vergleich Emissionsfaktoren Ecoinvent und Non-Road Datenbank für eine Baumaschine für Planierungsarbeiten

Wie aus dem Beispiel ersichtlich ist, enthalten die UVEK Daten höhere Luftschadstoff-Emissionen aus der Verbrennung als in der Non-Road Datenbank. Die UVEK-Datensätze für Baumaschinen stammen aus dem Jahr 2007 und entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Für die vorliegende Studie hat man trotzdem diese Datensätze gewählt, weil sie einen ersten Vergleich der Emissionen über den ganzen Lebenszyklus ermöglichen. In einer Folgestudie wird empfohlen die Datensätze zu korrigieren.

8.3 Verwendete Datensätze

In der Studie wurden die in Tabelle 6 abgebildeten Diesel-Datensätze der UVEK-Datenbank verwendet. Für alle Transportfahrzeuge wurde der aktuelle und höchste Emissionsstandard EURO 6 angenommen. Bei den Baumaschinen wurden jeweils Maschinen mit einem Partikelfilter verwendet.

Datensatz	Referenzeinheit
excavation, hydraulic digger, with particle filter/CH U	1 m^3 Aushub
diesel, burned in building machine, with particle filter/CH U	1 MJ Diesel (≈ 0.023 kg Diesel)
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	1 tkm
transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	1 tkm
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	1 tkm
transport, freight, lorry 32-40 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	1 tkm

Tabelle 6: Verwendete Datensätze für die dieselbetriebenen BMTF

Anhand dieser Datensätze wurden elektrische Alternativen in SimaPro modelliert. Dabei wurden jeweils die «Diesel»-Datensätze kopiert und einzelne Anpassungen vorgenommen.

Dieseldatensatz (UVEK) (D) Datensatz Elektrisch €		Einheit	Input Diesel- resp. Stromverbrauch	Energie-einheit	Wirkungs-grad	Produzierte Energie	Energie-einheit	Input Herstellung & Entsorgung	Einheit	Input H & S Batterie	Einheit	Input Schmiermittel	Einheit	Output Diverse Luftemissionen
D	excavation, hydraulic digger, with particle filter/CH U	1 m3	4.00	MJ	0.40	1.60	MJ	0.015	kg	0	kg	0.0018	kg	Diverse aus Verbrennungs-prozess
E	excavation, elctric hydraulic digger/CH U	1 m3	0.52	kWh	0.85	1.60	MJ	0.013	kg	0.015	kg	0.0018	kg	Keine Scope 1 Emissionen
Umrechnungfaktor Diesel zu Stromverbrauch			7.65											
D	diesel, burned in building machine, with particle filter/CH U	1 MJ	1.00	MJ	0.40	0.40	MJ	0.003	kg	0	kg	0.0005	kg	Diverse aus Verbrennungs-prozess
E	Electricity used in building machine/CH U	1 MJ	0.13	kWh	0.85	0.40	MJ	0.003	kg	0.011	kg	0.0005	kg	Keine Scope 1 Emissionen
Umrechnungfaktor Diesel zu Stromverbrauch			7.65											
D	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	1 tkm	4.69	MJ	0.40	1.88	MJ	0.000025	kg	0	kg	-	-	Diverse aus Verbrennungs-prozess und Abriebsemissionen
E	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, electric/RER U	1 tkm	0.61	kWh	0.85	1.88	MJ	0.000022	kg	0.0051	kg	-	-	Abriebsemissionen
D	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6/RER U	1 tkm	2.02	MJ	0.40	0.81	MJ	0.000006	kg	0	kg	-	-	Diverse aus Verbrennungs-prozess und Abriebsemissionen
E	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, electric/RER U	1 tkm	0.26	kWh	0.85	0.81	MJ	0.000005	kg	0.0012	kg	-	-	Abriebsemissionen
D	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6/RER U	1 tkm	1.57	MJ	0.40	0.63	MJ	0.000009	kg	0	kg	-	-	Diverse aus Verbrennungs-prozess und Abriebsemissionen
E	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, electric/RER U	1 tkm	0.21	kWh	0.85	0.63	MJ	0.000008	kg	0.002	kg	-	-	Abriebsemissionen
D	transport, freight, lorry 32-40 metric ton, EURO 6/RER U	1 tkm	0.97	MJ	0.40	0.39	MJ	0.000009	kg	0	kg	-	-	Diverse aus Verbrennungs-prozess und Abriebsemissionen
E	transport, freight, lorry 32-40 metric ton, electric/RER U	1 tkm	0.13	kWh	0.85	0.39	MJ	0.000008	kg	0.002	kg	-	-	Abriebsemissionen

Tabelle 7: Ermittlung der E-BMTF aus den Diesel-BMTF

Der Stromverbrauch der BMTF wurde wie folgt ermittelt:

- Der Dieselverbrauch des Diesel-Datensatzes in MJ wurde mit dem Wirkungsgrad eines Dieselmotors multipliziert, um die produzierte Energie zu ermitteln.
- Die produzierte Energie wurde wiederum durch den Wirkungsgrad eines Elektromotors dividiert, um den Strombedarf in kWh zu erhalten.

Der Wirkungsgrad des Dieselmotors wird gemäss EnergieDienst (2018) mit 40 Prozent und der eines Elektromotors mit 85 Prozent angenommen. Die Lade- und Entladeverluste der Elektrobatterie wurden dabei nicht berücksichtigt.

Die Fahrzeuggewichte für die Herstellung wurden wie folgt ermittelt:

- Das Fahrzeug-Gewicht jeder dieselbetriebenen Baumaschine und jedes Transportfahrzeuges wurde durch den Faktor 1.12 dividiert. Der Faktor entspricht dem Gewichtsunterschied zwischen einem dieselbetriebenen und einem elektrischen Personenfahrzeug (ohne Batterie) auf Basis der Mobitool-Daten.
- Für die Umrechnung auf die Referenzeinheit musste das Fahrzeuggewicht über die gesamte Einsatzzeit resp. Lebensdauer wie folgt ermittelt werden:
  - Für Einheit «1 MJ» bei Baumaschine: Gewicht 15 t, durchschnittlicher Dieselverbrauch von 299 MJ/h und 10'000h Einsatzzeit → 0.003 kg/MJ
  - Für Einheit «1 m³» bei Baumaschine: Gewicht 10 t, Aushubmenge 100 m³/h und 10'000h Einsatzzeit → 0.015 kg/m³
  - Für Einheit «1 tkm» für Fahrzeuge: durchschnittliche Transportladung von (2.75t, 11.75t, 12t, 18t) * 540'000km Einsatzstrecke → zw. 0.00025 bis 0.000009 kg/tkm je nach Ladegewicht des Transportfahrzeuges
- Die Batterie wurde ebenfalls ausgehend vom Elektroautogewicht inkl. 320 kg Batteriegewicht auf das Gewicht der BMTF hochskaliert und ebenfalls auf die Referenzeinheit umgerechnet.

Alle Emissionen aus dem Verbrennungsprozess der Dieselmotoren entfallen bei den Elektro-BMTF, weil diese keine direkten Emissionen produzieren. Die entsprechenden Emissionen sind den Stromdatensätzen hinterlegt.

Die Datensätze für die in dieser Studie verwendeten elektrisch betriebenen BMTF sind in folgender Tabelle 8 zusammengefasst.

Bezeichnung	Referenzeinheit
excavation, elektro hydraulic digger, CH U	1 m³ Aushub
electricity, used in building machine, CH U	1 MJ Strom (0.13 kWh Strom)
transport, freight, E-lorry 3.5-7.5 metric ton, tkm/RER U	1 tkm
transport, freight, E-lorry 7.5-16 metric ton, tkm/RER U	1 tkm
transport, freight, E-lorry 16-32 metric ton, tkm/RER U	1 tkm
transport, freight, E-lorry 32-40 metric ton, tkm/RER U	1 tkm

Tabelle 8: verwendete Datensätze für die elektrischen BMTF

Für die in den BMTF eingebauten Batterien wurde der Datensatz «Battery Lilo, rechargeable, at plant/GLO U» mit der Referenzeinheit Kilogramm verwendet.

9 Mengengerüst der theoretischen Baustelle

Die Datensätze aus dem vorherigen Kapitel wurden den Aktivitäten aus dem Kapitel 7.4 zugeordnet. Für die Baumaschinen und Transportfahrzeuge wurde unterschiedliche vorgegangen. Eine umfangreiche Liste aller Baumaschinen und Transportfahrzeuge auf einer Baustelle ist im Anhang A.3 zu finden.

Baumaschinen
Bei den Baumaschinen wurden die Aktivitäten einer Leistungsklasse inkl. des Dieselverbrauchs gemäss der Non-Road-Datenbank zugeordnet. Der Stromverbrauch (kWh) wurde anhand des Umrechnungsfaktors aus Tabelle 7 ermittelt und beträgt 1 / 7.65 = 0.13. Die Betriebsstunden wurden basierend auf den Volllaststunden abgeschätzt (siehe Anhang A.5). Die Diesel- und Stromverbräuche der einzelnen Aktivitäten sind in folgender Tabelle 9 zusammengefasst abgebildet:

Baumaschinenkennzeichnung und Aktivität		Verwendeter UVEK Datensatz	Betriebs-stunden [h]	Verbrauch Diesel [MJ/h]	Verbrauch Strom [kWh/h] [3]	Summe Diesel [MJ]	Summe Strom [kWh]
BM0	Abbruch mit Rauppenbagger (75 – 130kW)	diesel, burned in building machine, with particle filter/CH U	50	488	63	24'400	3'150
BM1	Spundwände einschlagen mit Rammbären (75-130kW)		20	243	32	4'860	640
BM3	Spundwände entfernen mit Rammbären (75-130kW)		10	243	32	2'430	320
BM4	Transport auf der Baustelle mit Dumper (56-75kW)		640	223	29	142'720	18'560
BM5	Planierungs arbeiten mit Planierraupe (56 – 75kW)		24	295	38	7'080	912
BM6	Bohrlöcher für die Erdwärmesonden mit Erdbohrmaschine (75 – 130kW)		20	338	44	6'760	880
BM7	Kleinere Abschluss- und Gartenarbeiten mit Minibagger (18 – 37kW)		48	111	14	5'328	672
BM2	Aushub mit Rauppenbagger	excavation, hydraulic digger, with particle filter/CH U	nicht relevant, da die Referenzeinheit 1 m³ ist, Aushubmengen sind in Tabelle 10 beschrieben.				

Tabelle 9: Energieverbräuche der verwendeten Baumaschinen je Diesel- und Elektro- Antrieb

[3] Der Stromverbrauch wurde anhand der doppelten Umrechnungsfaktoren von Diesel (MJ) zu Strom (kWh) (0.13) ermittelt.

Bei der Baumaschine BM2 zuständig für den Aushub, ist für die Ermittlung der Umweltauswirkungen nur die Aushubmenge relevant. Entsprechend wurden keine Betriebsstunden verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass durch den Rückbau des bestehenden Gebäudes (inkl. Keller) nur ein Bruchteil der Baugrube ausgehoben werden muss (Annahme 200 m³).

Transportfahrzeuge
Die Transportmengen zu und von der Baustelle sind in der folgende Tabelle 10 aufgeführt:

Bauteil	Mengen	Annahmen / Berechnungen
Abbruch	3'046 t	Die gesamte Menge an Baustoffen, welche auch für das neue Gebäude benötigt wird
Aushub	200 m³, entspricht 360 t Aushubmaterial [4]	grobe Abschätzung ausgehend vom gesamten Aushubvolumen. Annahme Dichte Aushub: 1,8 t pro m³
Aussenwand	913 m² Bauteilfläche (total 30cm Dicke), dafür werden 343t Stahlbeton und 2t Dämmung benötigt	▪ 15 cm Stahlbeton => 913 m² Bauteilfläche * 0,15 m Dicke ≈ 137 m³ ▪ 2.5 t/m³ Dichte Stahlbeton (Beco Treat Aps, o. J.) => 137 m³ * 2.5 t/m³ = 342,5 t ▪ 15 cm Dämmung => 913 m² Fläche * 0,15 m Dicke ≈ 137 m³ ▪ 15 kg/m³ Dichte Polystyrol Dämmung (Wikipedia, 2021a) => 137 m³ * 15 kg/m³ = 2055 kg
Fenster	491 m² Bauteilfläche, dafür werden 19t an Fenstermaterial benötigt	▪ 38 kg pro m² Fenstergewicht mit Rollladenaufsatzelement (FensterHAI, o. J.) => 491 m² * 38 kg/m² ≈ 19 t
Innenwände	3'200 m² Bauteilfläche[5] (15cm Dicke), dafür werden 1'200 t Stahlbeton benötigt	▪ 15 cm Backstein => 3200 m² * 0,15 m = 480 m³ 1,6 t/m³ Dichte Backstein[6] => 480 m³ * 1,6 t/m³ =768 t
Decke	3'200 m² Bauteilfläche (25cm Dicke) dafür werden 1'280t Stahlbeton und 4.3 t Dämmung benötigt	▪ 15 cm Stahlbeton => 3'200 m² * 0,16 m = 512 m³ => 512 m³ * 2.5 t/m³ = 1'280 t ▪ 10cm Schalldämmung => 3'200 m² * 0,09 m = 288 m³ => 288 m³ * 15 kg/m³ ≈ 4'320 kg
Dach	800 m² Bauteilfläche (25cm Dicke) dafür werden 300t Stahlbeton und 1.2t Dämmung benötigt	▪ 15 cm Stahlbeton => 800 m² * 0,15 m = 120 m³ => 120 m³ * 2.5 t/m³ = 300 t ▪ 10 cm Dämmung => 800 m² * 0,10 m = 80 m³ => 80 m³ * 15 kg/m³ ≈ 1'200 kg
Gerüst	13t Gewicht	▪ 380 kg Gerüst pro 27 m² Fläche[7]

Tabelle 10: Transportierte Mengen der Transportfahrzeuge

Weitere Materialien wurde aufgrund der kleineren Mengen und Gewichte vernachlässigt.

[4] https://www.abfallscout.de/umrechnungsfaktor-aushub-gewicht
[5] Gemäss Berechnungen mit SIA 2040 Tool
[6] https://architektenordner.backstein.com/de/8-technische-regeln/8-2-1-2-backstein-kennwerte_5_202.html
[7] https://leitern-ebertz.de/produkte/gerueste-und-zubehoer/27-qm-layher-blitz-geruest-neu-feld-2-57-m/

Für den Transport der Materialien aus vorheriger Tabelle kommen die folgenden Transportfahrzeuge mit den folgenden Datensätzen und Transportdistanzen (grobe Abschätzung) zum Einsatz:

Transportfahrzeugkennzeichnung und Aktivität		Datensatz	Distanz (Hin- und Rückweg)[8] [km]	Transportmenge [t]	Tonnenkilometer [tkm]
LKW0	Transport des Abbruchmaterials	transport, freight, lorry 32-40 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	20	3'046	60'920
LKW1	Transport des Aushubs		20	360	7'200
LKW2	Transport des Betons		40	3'142	125'680
LKW3	Transport des Dämmmaterials		60	7.5	450
LKW4	Transport des Gerüsts	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	40	13	520
LKW5	Transport der Fenster	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	60	19	1'140

Tabelle 11: Tonnenkilometer der Transportfahrzeuge

Die verwendeten Datensätze haben einen durchschnittlichen Auslastungsfaktor des Fahrzeugs hinterlegt[9]. Somit werden mit dem Hin- und Rückweg die Leerfahrten wie auch voll ausgelastete Fahrten mitberücksichtigt. Die aufgeführten Distanzen sind grobe Abschätzungen und liegen in Realität wohl deutlich höher. Aufgrund der sehr variablen Lieferdistanzen, abhängig vom bestellten Produkt ist jedoch keine genauere Einordnung möglich.

Anhand der Tabelle 11 wurden anschliessend mit den Datensätzen aus der Tabelle 6 resp. Tabelle 8 die zu erwartenden Emissionen ermittelt.

[8] Für die Emissionen innerhalb der Stadt Zürich wurde wie in Kapitel 6.2 erwähnt eine reduzierte Distanz von 3 km verwendet.
[9] https://www.mobitool.ch/admin/data/files/marginal_download/file_de/21/544-mobitool-hintergrundbericht-v2.0.pdf?lm=1479747138

10 Resultate konventionelle BMTF

Das folgende Kapitel stellt die Resultate der Ökobilanz für die theoretische Baustelle, auf der konventionelle BMTF eingesetzt werden, dar.

10.1 Berechnete Umweltauswirkungen

Die Emissionen für die konventionelle Baustelle wurden unterteilt in Emissionen aus der Erstellung und dem Betrieb der BMTF. Die Resultate sind entsprechend in den folgenden Unterkapitel dargestellt (im Anhang A.7 ist die ausführliche Datentabelle der Ergebnisgrafiken zu finden).

Reminder (siehe auch Kapitel 6.4):
Dem Betrieb der BMTF wurden die folgenden Prozesse zugeordnet:

- Abgasemissionen
- Herstellung Schmieröl
- Dieselherstellung
- Wartung BMTF
- Wartung Strasse
- Emissionen durch Bremsenverschleiss
- Emissionen von Straßenverschleiss
- Emissionen von Reifenverschleiss

Der Erstellung der BMTF wurde die folgenden Prozesse zugeordnet:

- Herstellung BMTF
- Herstellung Strasse
- Entsorgung BMTF und Strasse

THG-Emissionen

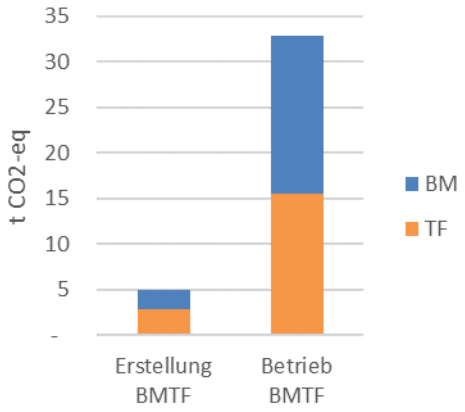

Abbildung 8: THG-Emissionen der konventionellen BMTF durch die theoretische Baustelle

Bei den Treibhausgasemissionen verursacht der Betrieb den Grossteil der Emissionen. Grund dafür ist hauptsächlich der Verbrennungsprozess des Diesels. Bei der Erstellung ist hauptsächlich der Strassenbau für die THGE verantwortlich. Die Baumaschinen und die Transportfahrzeuge haben im Betrieb etwa die gleichen THGE.

Luftschadstoff-Emissionen
Die Luftschadstoff-Emissionen können eine lokale bis regionale Wirkung auf die Luftqualität haben. Aus diesem Grund wurde bei den Luftschadstoffen neben der Unterscheidung Erstellung/Betrieb noch zusätzlich in Emissionen innerhalb der Stadt Zürich (ZH) und ausserhalb (Umland) unterschieden (gemäss Kapitel 6.2). In den Emissionen innerhalb der Stadt sind nur die Abgas- und Abriebsemissionen berücksichtigt (direkte Emissionen).

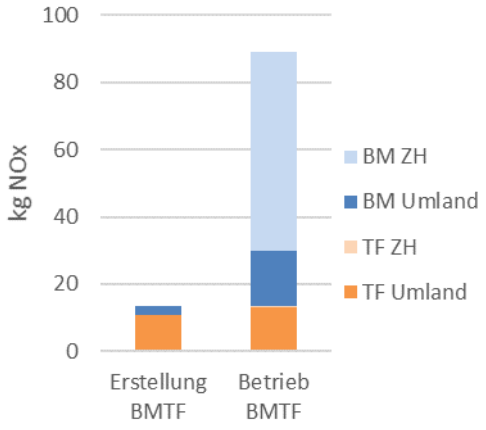

Abbildung 9: NOx-Emissionen der konventionellen BMTF durch die theoretische Baustelle

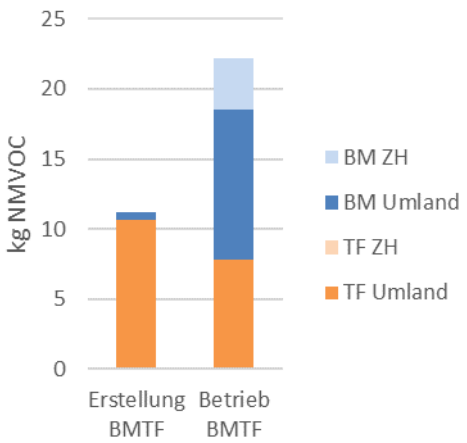

Abbildung 10: NMVOC-Emissionen der konventionellen BMTF durch die theoretische Baustelle

Wie bei den THGE verursachen bei den NOx-Emissionen in der Abbildung 9, der Betrieb signifikant mehr Emissionen als die Erstellung. Grund dafür sind die motorischen Emissionen bei der Verbrennung des Diesels. Zudem verantworten die Baumaschinen im Vergleich zu den Transportfahrzeugen den signifikant höheren Anteil.

Bei den NMVOC-Emissionen (Abbildung 10) verursacht der Betrieb etwa doppelt so viele Emissionen wie die Erstellung. Dafür verantwortlich sind die Dieselherstellung und der Verbrennungsprozess im Motor. Die grössten Emissionen bei der Erstellung werden wiederum vor allem durch den Strassenbau erzeugt. Die Baumaschinen im Vergleich zu den Transportfahrzeugen sind auch hier verantwortlich für den leicht grösseren Anteil der NMVOC.

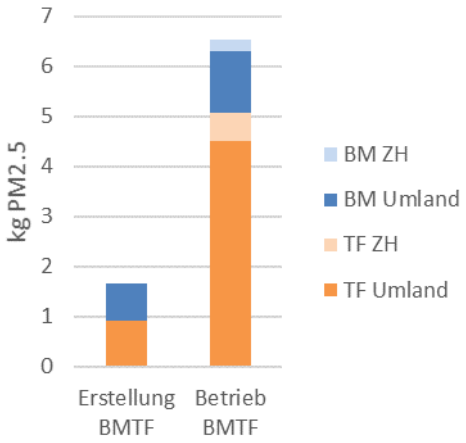

Abbildung 11: PM2.5-Emissionen der konventionellen BMTF durch die theoretische Baustelle

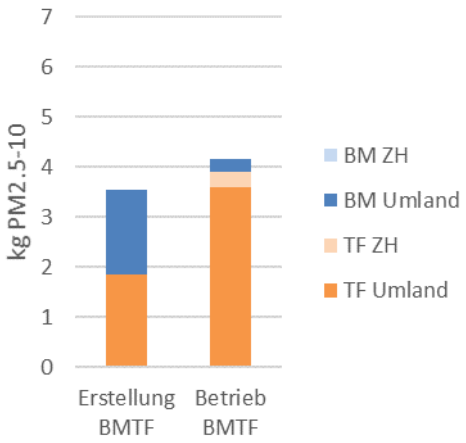

Abbildung 12: PM2.5-10-Emissionen der konventionellen BMTF durch die theoretische Baustelle

In Abbildung 11 sind die PM2.5-Emissionen und in Abbildung 12 die PM2.5-10-Emissionen (PM2.5-10-Emissionen) dargestellt. Bei beiden Indikatoren sind im Betrieb der Strassen- sowie der Reifen- und Bremsabrieb ausschlaggebend: diese verursachen 63 Prozent (PM2.5) resp. 52 Prozent (PM2.5-10) aller Betriebsemissionen. Bei den PM2.5 ist zusätzlich noch die Dieselherstellung relevant. Bei der Erstellung sind in beiden Fällen der Strassenbau sowie die Fahrzeugerstellung ausschlaggebend. Die PM2.5 Emissionen innerhalb des Stadtgebietes betragen etwa 10% aller Betriebsemissionen. Bei den PM2.5-10 Emissionen beträgt der Anteil Emissionen innerhalb des Stadtgebiets etwa 4% des Betriebs, dabei stammen diese Emissionen nur aus den TF. In den BM-Datensätze sind keine direkte PM2.5-10 -Emissionen (Abgas und Abriebsemissionen) aufgeführt.

10.2 Sensitivitätsanalyse Transportdistanz

Die Sensitivität der angenommenen zurückgelegten Distanzen mit den Transportfahrzeugen wird als sehr variabel, abhängig von dem Herstellungsort, bewertet und ist somit mit grosser Unsicherheit verbunden. Am Beispiel der THGE wurde die definierten Distanzen (aus Kapitel 9) einmal halbiert und einmal verdoppelt.

in km	LKW0	LKW1	LKW2	LKW3	LKW4	LKW5
halbe Strecke	10	10	20	30	20	30
Standard	20	20	40	60	40	60
doppelte Strecke	40	40	80	120	80	120

Tabelle 12: zurückgelegte Distanzen der Sensitivitätsvarianten

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 13 zu sehen:

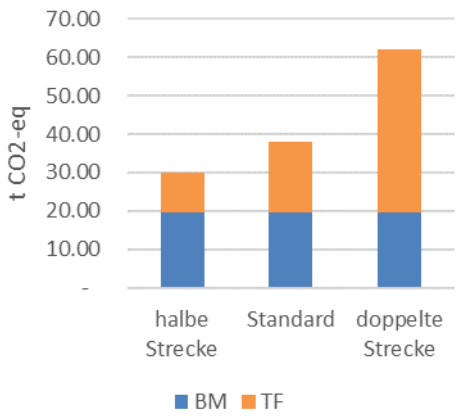

Abbildung 13: Sensitivitätsanalyse der Transportdistanz anhand einer dieselbetriebenen Baustelle

Bei einer kürzeren Strecke, was als eher unrealistisch eingeschätzt wird, reduzieren sich die Emissionen und der Einfluss der BM an den gesamten Emissionen vergrössert sich signifikant. Bei der doppelten Strecke verdoppeln sich die Emissionen der Transportfahrzeuge. Die THGE nehmen aufgrund der Transportdistanzen linear zu und der Anteil der Anteil der BM an den Gesamtemissionen wird immer kleiner.

11 Resultate elektrische BMTF

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Ökobilanz für die theoretische Baustelle, auf der elektrische BMTF zum Einsatz kommen, dargestellt.

11.1 Ersetzbare BMTF auf der theoretischen Baustelle

Im Rahmen dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass theoretisch alle dieselbetriebenen BMTF mit einer elektrischen Variante ersetzt werden können. Im Anhang A.4 ist eine umfangreiche Liste mit einer Übersicht aller elektrischen BMTF, welche bereits heute im Einsatz sind. Für den Rammbären mit Hydraulik-Aggregaten und die Erdbohrmaschine, welche beide sehr viel Energie benötigen, bestehen im Moment noch keine elektrisch-betriebenen Alternativen. Eine vollständig elektrifizierte Baustelle mit den benötigten BMTF ist kurzfristig schwierig umsetzbar. Gründe sind in Kapitel 4.3 und 14.4 beschrieben.

11.2 Berechnete Umweltauswirkungen

Für die elektrischen Baumaschinen und Transportfahrzeuge ergeben sich die folgenden Resultate (im Anhang A.7 ist die ausführliche Datentabelle der Ergebnisgrafiken zu finden):

Reminder (siehe auch Kapitel 6.4):
Dem Betrieb der BMTF wurden die folgenden Prozesse zugeordnet:

- Herstellung Schmieröl
- Herstellung Strommix
- Wartung BMTF
- Wartung Strasse
- Emissionen durch Bremsenverschleiss
- Emissionen von Straßenverschleiss
- Emissionen von Reifenverschleiss

Der Erstellung der BMTF wurde die folgenden Prozesse zugeordnet:

- Herstellung BMTF
- Herstellung Strasse
- Entsorgung BMTF und Strasse
- Herstellung Batterie

THG-Emissionen

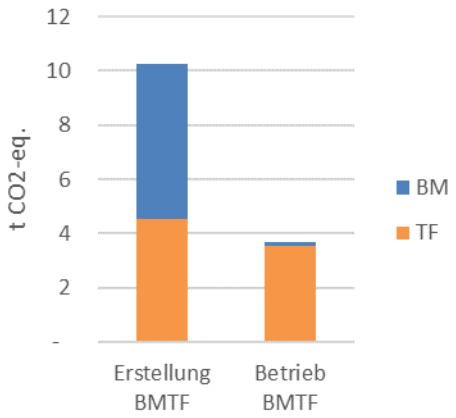

Abbildung 14: THG-Emissionen der elektrischen BMTF durch die theoretische Baustelle

Die Abbildung 14 stellt die THG-Emissionen der elektrischen BMTF auf der theoretischen Baustelle dar. Rund drei Viertel der THG-Emissionen werden bei der Herstellung der Batterie und der Strasseninfrastruktur ausgestossen. Im Betrieb ist die Stromproduktion des CH Strommixes für das Laden der Transportfahrzeuge der grösste Emittent.

Luftschadstoff-Emissionen

Die Luftschadstoff-Emissionen können eine lokale bis regionale Wirkung auf die Luftqualität haben. Aus diesem Grund wurde bei den Luftschadstoffen neben der Unterscheidung Erstellung/Betrieb noch zusätzlich in Emissionen innerhalb der Stadt Zürich (ZH) und ausserhalb (Umland) unterschieden (gemäss Kapitel 6.2). In den Emissionen innerhalb der Stadt sind nur die Abgas- und Abriebsemissionen berücksichtigt (direkte Emissionen).

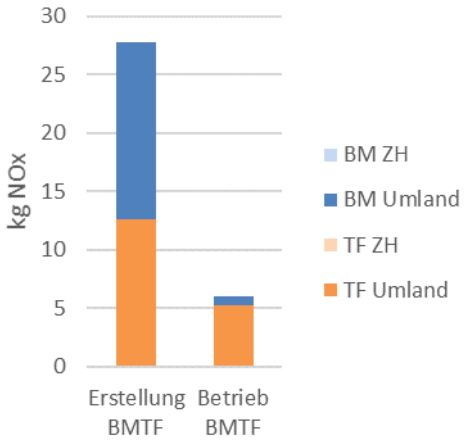

Abbildung 15: NOx-Emissionen der elektrischen BMTF durch die theoretische Baustelle

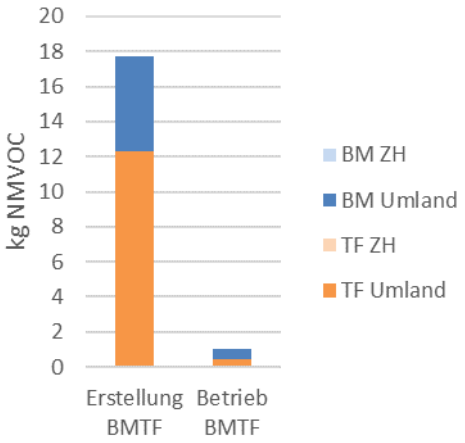

Abbildung 16: NMVOC-Emissionen der elektrischen BMTF durch die theoretische Baustelle

Die NOx-Emissionen aus der Erstellung (Abbildung 15) entstehen hauptsächlich bei der Batterieherstellung und der Strasseninfrastruktur. Beim Betrieb ist es hauptsächlich der CH Strommix, welcher den grössten Teil der Emissionen verursacht. Innerhalb der Stadt entstehen dafür keine direkten Emissionen mehr, da keine Abgase mehr ausgestossen werden.

In Abbildung 16 sind die NMVOC-Emissionen, die von den elektrischen BMTF auf der theoretischen Baustelle emittiert werden, dargestellt. Die Strasseninfrastruktur trägt zu etwa drei Viertel der Emissionen bei der Erstellung der Transportfahrzeuge bei. Bei den BM ist die Batterieherstellung massgebend. Im Betrieb sind nur noch das Schmieröl und der CH-Strommix bei den BM und TF relevant. Wie auch bei den NOx Emissionen gibt es auch bei den NMVOC keine direkten Emissionen mehr innerhalb der Stadtgrenze.

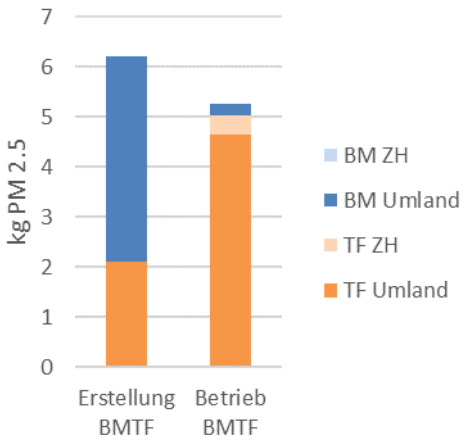

Abbildung 17: PM2.5-Emissionen der elektrischen BMTF durch die theoretische Baustelle

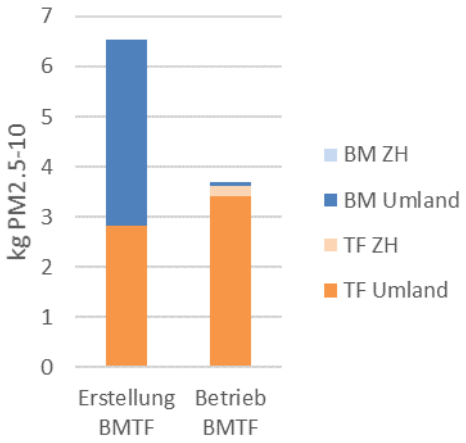

Abbildung 18: PM2.5-10-Emissionen der elektrischen BMTF durch die theoretische Baustelle

In Abbildung 17 sind die PM2.5-Emissionen und in Abbildung 18 die PM2.5-10-Emissionen, die von der theoretischen Baustelle der elektrischen BMTF ausgestossen werden, dargestellt. Der grösste Emittent bei der Erstellung ist sowohl bei PM2.5 als auch bei PM2.5-10 die Batterieherstellung. Bei den Emissionen aus dem Betrieb sind bei PM2.5 der benötigte Strom (Menge und Mix) und der Reifen- bzw. Bremsabrieb und bei PM2.5-10 der Reifen- bzw. Bremsabrieb, der den grössten Anteil der Emissionen ausmacht. Sowohl bei den PM2.5 als auch bei den PM2.5-10 Emissionen fallen innerhalb der Stadt Zürich weniger als 10% der gesamten Betriebsemissionen an.

11.3 Sensitivitätsanalyse Strommix

Für den Betrieb aller elektrischen TF wurde mit dem schweizerischen (CH) Strommix gerechnet, weil unklar ist, wo und mit welchem Strommix die Transportfahrzeuge geladen werden. Die eingesetzten BM auf der Baustelle wurden dagegen mit dem ZH-Mix bilanziert. Der CH Strommix beinhaltet Atomkraft sowie importierten Braunkohlestrom aus Deutschland. Der Basis-Strommix der Stadt Zürich (ewz natur) setzt sich hingegen nur aus erneuerbaren Energieträgern zusammen und hat damit eine deutlich bessere Bilanz. Die genaue Zusammensetzung des beiden Strommixe ist im Anhang A.6 zu finden.

Aufgrund von dieser Ausgangslage wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, welche untersuchte, was für Einsparungen mit einem 100% ökologischen Strommix erzielt werden können. Dazu wurde vom gesamten Stromverbrauch der TF (derjenige der BM ist ja bereits 100% Ökostrom) ausgehend von «100% CH-Strommix» zu «50% CH-Strommix / 50% ZH-Strommix» zu «100% ZH-Strommix» verändert. Als Referenz wurde der durchschnittlichen Strommix der EU (ENTSO-Mix) ebenfalls berechnet, da viele Materialtransporte auch aus dem Ausland in die Schweiz transportiert werden können.

Als Umweltindikator wurden die THGE verwendet. Die Auswirkungen dieser Varianten auf das Gesamtergebnis sind in der folgenden Grafik abgebildet.

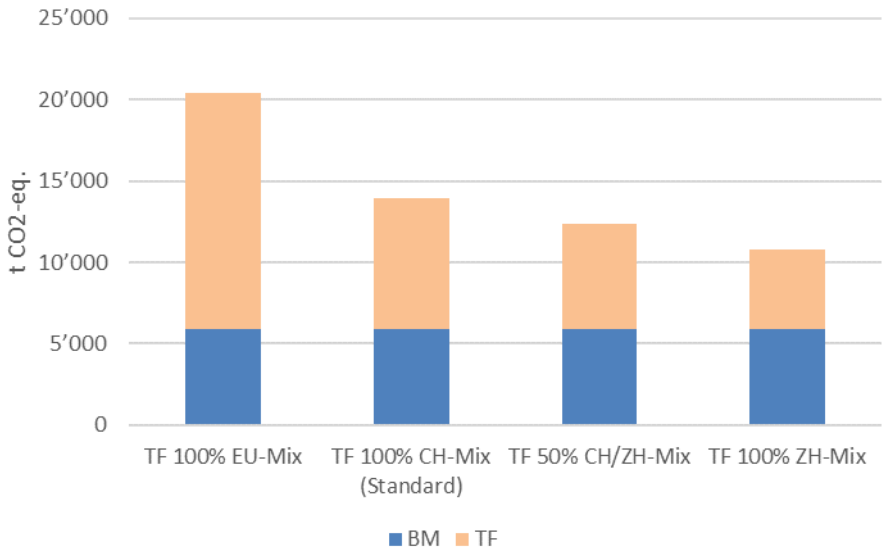

Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse des Strommixes anhand einer elektrischen Baustelle

Die Auswirkungen der BM blieben bei allen Varianten unverändert. Die THGE der TF konnten ausgehend von der Ausgangslage (Standard) auf 20% resp. 40% reduziert werden. Gesamthaft (BM und TF) können mit einem Mix aus dem CH und ZH Strommix („TF 50% CH/ZH-Mix") 11% der THGE eingespart werden. Wird nur Ökostrom („TF 100% ZH-Mix) verwendet, sind es 23% gesamthafte Einsparungen. Sobald auch noch ein gewisser Anteil des Stromverbrauchs mit dem europäischen Mix gedeckt wird, werden sich die THG-Emissionen der Transportfahrzeuge deutlich erhöhen. Im Vergleich zu dem CH-Mix und dem ZH-Mix vergrössern sich die TF-Emissionen des EU-Mix um den Faktor 2 resp. 3.

12 Vergleich Resultate konventionell und elektrisch

Um den Nutzen der elektrischen BMTF für Klima und Luftqualität zu quantifizieren, werden die in den beiden vorherigen Kapiteln dargestellten THG- und Luftschadstoff-Emissionen miteinander verglichen und bewertet. In einem weiteren Kapitel werden die Anschaffungs- und Betriebskosten von konventionellen und elektrischen BMTF qualitativ miteinander verglichen.

12.1 THG-Emissionen

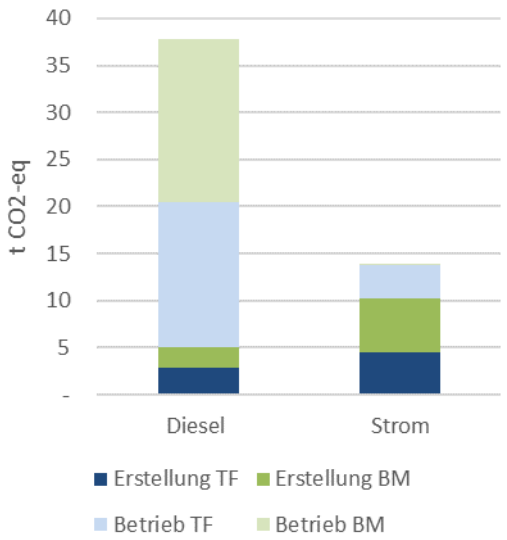

Abbildung 20: Vergleich der THG-Emissionen der theoretischen Baustelle

Im Betrieb entstehen bei den dieselbetriebenen BMTF mehr als drei Viertel der gesamten Emissionen. Bei der elektrischen Variante liegen die Erstellungsemissionen etwas höher als beim Diesel dafür sind die Betriebsemissionen deutlich tiefer. Durch den Einsatz von elektrischen BMTF können auf der theoretischen Baustelle rund 63 Prozent der THG-Emissionen, die von konventionellen BMTF ausgestossen werden, eingespart werden.

12.2 Luftschadstoff-Emissionen

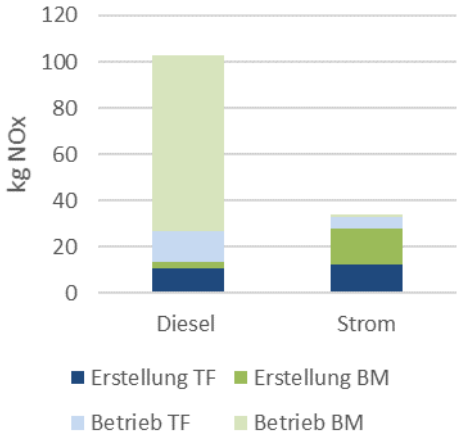

Abbildung 21: Vergleich der NOx-Emissionen der theoretischen Baustelle

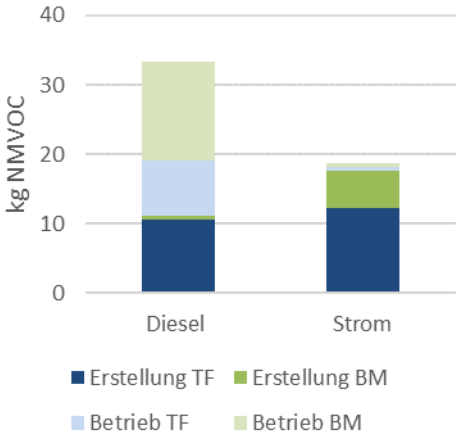

Abbildung 22: Vergleich der NMVOC-Emissionen der theoretischen Baustelle

Wie bei den THGE sind die NOx-Emissionen aus der Erstellung und dem Betrieb der Dieselfahrzeuge deutlich höher als von den elektrisch betriebenen BMTF. Der Anteil der Auswirkungen ist bei den elektrisch betriebenen BMTF aufgrund der Batterien in der Erstellung dominierend. Bei den NMVOC zeigt sich ein ähnliches Bild: Der Anteil der Erstellung der Transportfahrzeuge ist jedoch klar grösser als bei den NOx- und den THG-Emissionen. Dies ist auf die Emissionen des Strassenbaus (v.a. die Verwendung von Bitumen bei Pflasterarbeiten) und die Batterieherstellung zurückzuführen. Im Betrieb entstehen bei beiden Indikatoren hauptsächlich nur noch durch die Stromproduktion, Emissionen. Durch den Einsatz elektrischer BMTF auf der theoretischen Baustelle können insgesamt rund 67 Prozent der Nox-Emissionen und 44 Prozent der NMVOC-Emissionen, die von konventionellen BMTF ausgestossen werden, eingespart werden. Werden nur die Emissionen betrachtet, die in der Stadt Zürich entstehen, ergeben sich Einsparungen in Höhe von 100 Prozent für Nox-Emissionen und NMVOC-Emissionen.

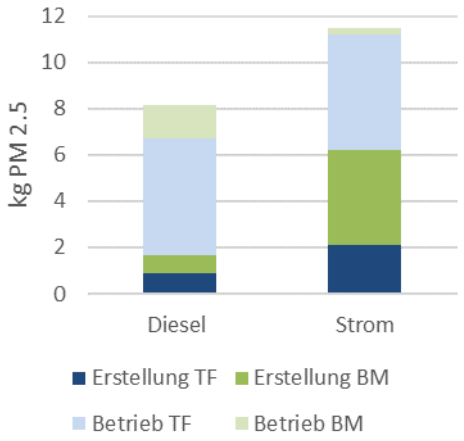

Abbildung 23: Vergleich der PM2.5-Emissionen der theoretischen Baustelle

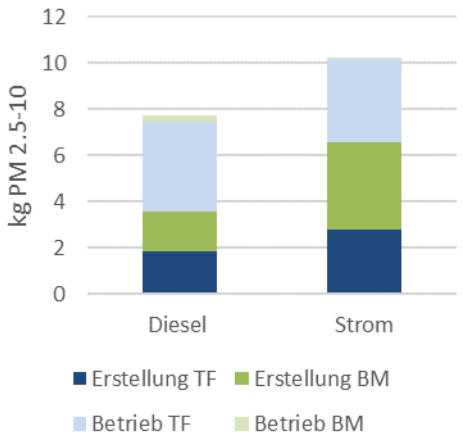

Abbildung 24: Vergleich der PM2.5-10-Emissionen der theoretischen Baustelle

Beim Feinstaub verursachen die elektrisch betriebenen BMTF die höheren Emissionen. Grund dafür ist die Herstellung der Batterie. Im Betrieb sind die Abriebemissionen bei beiden Antriebsvarianten hauptausschlaggebend. Die PM2.5 Emissionen im Betrieb bei den TF sind bei beiden Varianten etwa gleich gross. Grund dafür ist einerseits der CH-Strommix, welcher Braunkohle-Strom aus dem Ausland beinhaltet und somit hohe Emissionen bei der Erstellung verursacht. Anderseits sind die Abriebemissionen von elektrisch betriebenen TF gleich gross wie bei konventionellen TF. Vergleicht man den Betrieb der BM, (welche mit dem Strommix der Stadt ZH aufgeladen werden), sieht man eine deutliche Verkleinerung der Feinstaubemissionen zu der Dieselvariante. Durch den Einsatz elektrischer BMTF auf der theoretischen Baustelle werden insgesamt rund 40 Prozent mehr PM2.5 und rund 33 Prozent mehr PM2.5-10 Emissionen als von konventionellen BMTF ausgestossen. Werden nur die Emissionen betrachtet, die in der Stadt Zürich entstehen, so werden bei den PM2.5 knapp 50%und bei den PM2.5-10 in etwa 30% der Emissionen eingespart.

12.3 Anschaffungs- und Betriebskosten

Die Anschaffungskosten von elektrischen BMTF sind deutlich höher als die von konventionellen BMTF. Batteriebetriebene BM sind je nach Art 20 bis 300 Prozent teurer als konventionelle BM v. a. wegen der Batteriepreise. Für die Zukunft wird eine deutliche Reduktion der Anschaffungskosten erwartet, da der Preis von Batterien in den letzten Jahren deutlich gesunken ist und vermutlich auch in Zukunft weiter sinken wird. (DNV GL, 2018b)

Herstellern von elektrischen BMTF zufolge können die Mehrkosten durch Treibstoffeinsparung, geringere Wartungs- und Reparaturkosten, höhere Lebenserwartung und evtl. höhere Produktivität fast immer kompensiert werden. Denn elektrische BM sind etwa 2.5-mal effizienter als Verbrennungsmotoren und besitzen weniger bewegte Teile. Dadurch, dass sie auch signifikant leiser sind, können sie auch ausserhalb der üblichen Arbeitszeit eingesetzt werden. (ICLEI Europe, o. J.b)

In Zukunft ist zudem mit steigenden CO_2-Abgaben zu rechnen. 2022 wird die CO_2-Abgabe für alle fossilen Brennstoffe 120 Franken pro Tonne CO_2 betragen. (Bundesamt für Umwelt, 2020)

13 Einordnen in Gesamtkontext

Mithilfe des SIA2040-Tools wurden in der folgenden Tabelle die Gesamtemissionen eines Gebäudes für die Erstellung (inkl. Entsorgung) und den Betrieb berechnet. Nach SIA2040 werden die Aktivitäten und benötigten BMTF auf der Baustelle nicht mitberücksichtigt, sondern nur die benötigten Materialien und deren Lebenszyklus.

	THGE in kg	THGE in %
Erstellung nach SIA 2040	1'604'824	67%
Betrieb nach SIA2040	734'470	31%
BMTF	37'849	2%
Total nach SIA2040	**2'339'294**	**98%**
Total nach SIA2040 inkl. BMTF	**2'377'143**	**100%**

Tabelle 13: Gesamtauswirkungen eines Gebäudes über die gesamte Lebensdauer

Das Gebäude der theoretischen Baustelle verursacht nach dem SIA2040-Tool über den gesamten Lebenszyklus 2'339 t CO_2-eq.. Werden die dieselbetriebenen BMTF mitberücksichtigt ergibt diesen Gesamtemissionen von 2'377 t CO_2-eq.. Die BMTF verursachen somit von der gesamten Baustelle weniger als 2 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen.

In Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes sind die Emissionen der BMTF somit kaum relevant. Dies wird auch aus verschiedener Literatur bestätigt (Min-Seop et al. 2016, Brilakis et al. 2019). Es gilt trotzdem zu beachten, dass sich die Emissionen über die zahlreichen Baustellen in der Stadt Zürich rasch aufsummieren und die Stadt bis 2040 das Ziel hat, keine direkten Treibhausgasemissionen mehr zu verursachen.[10]

[10] https://www.stadt-zuerich.ch/content/site/zuerich-co2/de/index/nettonull.html

14 Fazit

Das Fazit gliedert sich nach den von der Stadt Zürich in der Ausschreibung und in Kapitel 3.3 aufgeführten Fragen.

14.1 Datenqualität

Die Qualität der verwendeten Daten wird als schwach beurteilt. Die vorliegenden Resultate sollten deshalb nur zur ersten Orientierung verwendet werden. Die weitere Verwendung der Resultate würde zuerst einer Verbesserung der Datengrundlage bedingen. Die grössten Unsicherheiten befinden sich in den folgenden Datengrundlagen:

- Baumaschinen-Datensätze aus UVEK Datenbank:
  Die verwendeten Datensätze für die Baumaschinen mit Partikelfilter wurden im Jahr 2007 erstellt und sind seither nicht mehr aktualisiert worden. Damals sollten sie als grobe Richtgrösse für die entsprechenden Baumaschinen dienen und basieren nicht auf realen Daten zur Herstellung der entsprechenden Maschinen. Die Elektro-BM wurden ebenfalls basierend auf diesen Datensätzen erstellt. Ein Vergleich mit der Non-Road-Datenbank zeigt, dass die bei der Verbrennung entstehenden Luftschadstoff-Emissionen (NOx und NMVOC) in der UVEK-Datenbank deutlich höher liegen als in der Non-Road-Datenbank. Dagegen gibt es bei den PM2.5-10 Emissionen der Baumaschinen mit Partikelfilter in der UVEK-Datenbank gar keine Emissionen, wobei diese zumindest in kleineren Mengen erwartet worden wäre. Da es sich in dieser Studie um einen ersten Vergleich der Datensätze handelt, wurden dennoch die groben Datensätze aus der UVEK-Datenbank verwendet. Für eine allfällige Folgestudie wird empfohlen diese Datensätze zu prüfen und zu aktualisieren.
- Die angenommenen Daten der Baustelle:
  Da im kurzen Rahmen der Studie keine Daten einer realen Baustelle zusammengestellt werden konnten, wurde die verwendeten BMTF, die Zeitaufwände der BM und zurückgelegte Strecke der TF allesamt grob abgeschätzt. Vor allem die Strecke der TF ist sehr variabel und stark abhängig von dem einzelnen Bauprojekt resp. den benötigten Materialien. Die geschätzten Daten wurden aufgrund des Radius um den Standort der fiktiven Baustelle erstellt. Es wird vermutet, dass die Strecken in Realität höher ausfallen. Die Sensitivitätsanalyse der Transportdistanz (Kapitel 10.2) hat auch aufgezeigt, dass die Emissionen der TF linear zur zurückgelegten Distanz zunehmen und somit Materialien, die eine weite Distanz zur Baustelle benötigen das Ergebnis stark verändern können. Für eine allfällige Folgestudie wird empfohlen eine reale Baustelle als Grundlage zu verwenden.

14.2 THG-Emissionen

Wie hoch ist der Anteil von Transportfahrzeugen und Baumaschinen an den gesamten THG-Emissionen eines Bauprojektes und gesamtstädtisch?
Der Anteil der BMTF an den gesamten THG-Emissionen eines Gebäudes macht in Bezug auf den Lebenszyklus ca. 2 Prozent aus. Der Gebäudesektor ist für ungefähr 1/4 der gesamtschweizerischen Treibhausgasemissionen (inkl. graue THGE) verantwortlich[11]. Da in

[11] https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/treibhausgasinventar/gebaeude.html

diese Statistik auch die Betriebsenergie mitberücksichtigt wurde, ist der Anteil der BMTF gesamtschweizerisch gesehen sogar ‹1 Prozent.

Welche Reduktion dieser THG-Emissionen könnte durch den Einsatz von elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen erreicht werden?
Mit dem Ersatz aller BMTF mit einer elektrischen Alternative können anhand der theoretischen Baustelle 63 Prozent der Emissionen gegenüber einer konventionellen Baustelle eingespart werden.

Welchen Einfluss hat der Strommix auf das Ergebnis und ist es machbar einen Strommix auf Baustellen zu bestellen?
Der schweizerische Strommix ist um einen Faktor 19 grösser als der Zürcher (Öko-) Strommix. Der CH-Mix wurde angewendet, weil unklar ist, welche Stromqualität die Transportfahrzeuge ausserhalb des Stadtgebietes tanken. Wenn alle BMTF das zürcherische Basisstromprodukt für das Laden der Fahrzeuge verwenden würden (anstelle von CH-Strommix), wäre eine gesamthafte Einsparung von ca. 23 Prozent der gesamten verursachten THGE möglich.

14.3 Luftqualität

Wie hoch ist die Luftbelastung, welche durch Transport und Baumaschinen auf innerstädtischen Baustellen verursacht werden?
Für konventionelle Baustellen wurde die Menge der Luftschadstoff-Emissionen, die in der Stadt Zürich entsteht (siehe Resultate, Kap 9.1), ermittelt. Diese sind auch in der unterstehenden Tabelle 14 zusammengefasst und wurden mit den Gesamtemissionen der Stadt Zürich verglichen.[12] Für die Berechnung der PM10 Emissionen aus der theoretischen Baustelle wurden die Werte für PM2.5 und PM2.5-10 summiert. Für NMVOC sind die Gesamtemissionen nicht bekannt, darum wurde das Resultat mit den Gesamten VOC-Emissionen verglichen (inkl. Methan). Unter der Annahme, dass jährlich 100 Baustellen in der Stadt betrieben werden, ist die Belastung durch Baumaschinen und Transporte hinsichtlich NOx, NMVOC und PM10 sehr klein.

	NOx (t)	NMVOC (t)	PM2.5 (t)	PM10 (t)
Theoretische Baustelle (Menge Stadt ZH)	0.059	0.0036	0.0008	0.0011
Hochrechnung für 100 Baustellen	5.95	0.36	0.08	0.11
Gesamtemissionen Stadt Zürich	1'344	2'206 (VOC)	kA	207
Prozent	0.44%	0.02%	-	0.05%

Tabelle 14: Vergleich berechnete Emissionen in der Stadt ZH (konventionelle Baustelle) mit Gesamtemissionen aus dem Emissionskataster 2015.

[12] https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/luftqualitaet/schadstoffquellen/emissionskataster.html

Welche Reduktion dieser Luftemissionen kann durch den Einsatz von elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen erreicht werden?
Elektrische BMTF verursachen in der Stadt Zürich keine direkten NOx und NMVOC aus dem Betrieb, weil die Stromproduktion fast ausschliesslich ausserhalb des Stadtgebietes anfallen. Somit wäre bei 100 Baustellen theoretisch eine Reduktion von 5.95t NOx und 0.36t NMVOC (siehe Tabelle 14) möglich. Für PM2.5 und PM10 ist die Situation anders. Der grösste Anteil der direkten Betriebsemissionen in der Stadt Zürich entsteht aus dem Abrieb (Strassen-, Reifen- und Bremsabrieb) der Transportfahrzeuge. Diese Emissionen bleiben auch bei elektrischen Fahrzeugen bestehen. Im nationalen und globalen Kontext müsste man zudem berücksichtigen, dass die Herstellung der Batterien und des Stroms hohe PM-, NOx- und NMVOC-Emissionen verursachen. Durch die Nutzung von reinem Ökostrom könnte einen Teil dieser Emissionen reduziert werden.

Sind die aktuellen Emissionsfaktoren für Baustellen repräsentativ?
Die Emissionsfaktoren von Transportfahrzeugen sind aktuell und durchaus repräsentativ: neben motorischen Emissionen werden auch nicht-motorische PM-Emissionen berücksichtigt (Abriebemissionen). Die Ecoinvent-Emissionsfaktoren für Baumaschinen stammen aus dem Jahr 2007 und entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Dies wurde im Vergleich mit den Non-Road-Emissionsfaktoren dargelegt (siehe Kap. 8.2, letzter Abschnitt). Zudem enthalten die Ecoinvent Datensätze nur die motorischen Emissionen von Baumaschinen. Die nicht-motorischen Emissionen aus den Bauprozessen wie Abbruch, Erdarbeiten oder Belagsarbeiten sind nicht enthalten. Eine Aktualisierung der motorischen Emissionsfaktoren wäre möglich und sinnvoll. Für eine Erweiterung der bestehenden Datensätze mit nicht-motorischen Emissionen aus den Bauprozessen müsste auf Basis der Aktivität (d.h. Baumaschine und entsprechende Aktivität) Daten aus Messungen und/oder aus der Literatur ermittelt werden.

Wie stark unterscheiden sich die Emissionen auf Baustellen in den unterschiedlichen Bauphasen?
In der Baurichtlinie Luft (BAFU, 2016) ist das Ausmass der zu erwartenden Luftschadstoff-Emissionen aus Bauaktivitäten auf S. 20 dargestellt. Im Hochbau entstehen Emissionen hauptsächlich während folgenden Bauphasen: Abbruch, Aushub, Erdarbeiten (Umgebung) und Betonarbeiten (Rohbau). Diese Bauphasen wurden in dieser Studie berücksichtig. Andere Arbeiten wie Malarbeiten, Bodenbelagsarbeiten und Beschichtungen verursachen hohe nicht-motorische VOC-Emissionen, sind aber für die Fragestellung der Studie nicht relevant Eine Unterteilung der Emissionen in die unterschiedlichen Bauphasen ist mit der aktuellen Datengrundlage nicht möglich. In einer Folgestudie könnten die Berechnungen mit effektiven Zahlen (Betriebsstunden, Mengen pro Bauphase) aus einem Bauprojekt in die Bauphasen unterteilt werden.

Lässt sich aus den Ergebnissen der Trübungsmessung die Partikelanzahl ableiten?
Die Frage kann aufgrund von Literaturrecherche und Abklärungen mit Fachexperten beantwortet werden. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Trübung (Opazität) und Partikelmasse: dieser wird im Allgemeinen nach dem Beer/Lambert'schen Gesetz hergleitet (SAE-Norm 1996). Mit der sogenannte M.I.R.A-Korrelation lassen sich Ergebnisse aus Trübungsmessung direkt die Partikelmasse herleiten. Der Zusammenhang zwischen Trübungsmessung und Partikelanzahl ist hingegen komplex und hängt von der Art der Partikel ab. Man kann dabei drei Szenarien unterscheiden:

- Bei sehr viel Russ ist die Partikelanzahl konstant, aber die Masse und die Opazität ändern sich
- Bei modernen Motoren ist die Opazität fast null, obwohl sich die Anzahl über 5 Grössenordnungen verändert
- Dazwischen gibt es in gewissen Fällen eine Korrelation

Dies wurde in einer Untersuchung von Tartakovsky et al. 2015 bestätigt: Der Vergleich von Motoren verschiedener Generationen zeigt, dass sich von Euro 2 bis Euro 5 zwar die Partikelmasse verändert, nicht aber die Partikelanzahl. Zudem ist noch folgendes zu beachten: Weil es aus experimentellen Gründen nicht möglich ist, exakt an der gleichen Stelle im Abgassystem die Trübung und die Partikelanzahl zu messen und die Partikelanzahl aufgrund der Agglomeration der Partikel sehr dynamisch ist, ist eine Umrechnung der beiden Messgrössen nicht belastbar.

Wie stark beeinflusst eine Baustelle über ihre gesamte Laufzeit die Luftqualität der Stadt Zürich (NOx, PM10, PM2.5, PM0.1) in unterschiedlichen Entfernungen zum Baustellenmittelpunkt (z.B. Radius: 100 m, 250 m, 500 m, etc.)?
Diese Frage kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht beantwortet werden. In Rahmen dieser Studie wurden nur die Emissionen aus den BMTF ermittelt. Für eine Beurteilung der räumlichen Verteilung der Emissionen, müssten diese mit entsprechenden Verdünnungsfaktoren in Immissionen umgerechnet und unter Berücksichtigung der Meteodaten modelliert werden. Das könnte in Rahmen eines Folgeprojektes durchgeführt werden (siehe Kapitel 15).

14.4 Umsetzung

Ist die Einrichtung einer Pilotbaustelle, welche weitestgehend mit elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen betrieben wird, heute bereits umsetzbar und welche Zusatzkosten würden entstehen?
Es wurden bereits erste Pilotbaustellen in Norwegen, Dänemark und Österreich durchgeführt. Hersteller von elektrischen Baumaschinen geben an, dass die deutlich höheren Anschaffungskosten durch niedrigere Betriebskosten möglicherweise kompensiert werden können. Wie das Pilotprojekt in Oslo zeigt, sind Stromkosten ein neuer Kostenfaktor für Bauunternehmer, der bei diesen erstmal Bedenken hervorruft und mitzuberücksichtigen ist. Die Machbarkeit einer E-Baustelle zum heutigen Zeitpunkt wird in der übernächsten Frage beantwortet.

Welche Möglichkeiten hat die Stadt Zürich als Bauherrin bereits heute um die Emissionen auf ihren Baustellen zu minimieren resp. die Elektrifizierung von Baustellen gezielt zu fördern und beschleunigen?
Die Stadt Zürich könnte, wie bereits andere Städte, Pilotprojekte durchführen und gezielt finanzielle Anreize schaffen und, basierend auf Gesprächen mit BM-Lieferanten und Bauunternehmern, Beschaffungskriterien für städtische Bauprojekte festlegen. Weitere mögliche Massnahmen sind im Kapitel 4 aufgeführt. Konkret umsetzbare Massnahmen für die Stadt Zürich müssen in einem Folgeprojekt unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen genauer untersucht werden.

Ab wann ist mit einer grossflächigen Umsetzung von elektrischen Transportfahrzeugen und Baumaschinen zu rechnen?
Ein Grossteil der Baumaschinen ist bereits heute elektrisch verfügbar, auch bei den Transportfahrzeugen gibt es erste elektrische Alternativen. Die Frage bleibt, wie rasch die Bauunternehmer ihre Flotte elektrifizieren wollen/können. Sobald die Nachfrage steigt oder Anforderungen durch den Bauherrn gemacht werden, wird ein Wechsel beschleunigt. In Interviews mit grossen Bauunternehmern ist noch genauer abzuklären in was für einem Zeitrahmen eine grossflächige Umsetzung realisierbar ist. Ein Fragenkatalog wurde hierzu bereits vorbereitet und ist im Anhang A.2 zu finden.

14.5 Ziele und Empfehlungen für die Stadt Zürich

Der Anteil der Baustelle auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes ist sehr gering. Dennoch hat sich die Stadt Zürich das Ziel gesetzt bis 2040 keine direkten Emissionen mehr in der Stadt zu verursachen. Daher besteht hier Zugzwang und die Entscheidungsträger müssen frühzeitig hinzugezogen werden, damit eine zeitnahe Umsetzung ermöglicht werden kann. Als erstes wird empfohlen die berechneten Werte von der theoretischen Baustelle mit derjenigen einer realen Baustelle in einem vergleichbaren Grössenrahmen zu überprüfen. Dabei sollen die Ergebnisse im Kapitel 10 bis 12 validiert werden. In Zuge dessen soll auch eine Aktualisierung der verwendeten Datensätze, in Betracht gezogen werden (Kapitel 8.2). Interviews mit ausgewählten Bauherren zu E-Baustellen sollen ein Gespür für den momentanen Stand der Dinge geben. Gleichzeitig soll ein Austausch mit anderen Städten bezüglich best practices stattfinden. Dazu bietet sich die «Big Buyers for Climate and Environment Initiative» (Kapitel 4.2) an. Aufgrund dessen sollen die weiteren Ziele zur Klimaneutralität 2040 definiert werden. Schwerpunkte beim weiteren Vorgehen sollen auf dem Miteinbezug der wichtigsten Entscheidungsträgern sowie dem Aufbau einer gesetzlich geeigneten Grundlage für Beschaffungskriterien auf einer städtischen Baustelle sein.

15 Ausblick

15.1 Folgeprojekt

Aufgrund der kurzen Bearbeitungszeit konnten gewisse Arbeiten nicht wie vorgesehen ausgeführt werden. Dem Amt für Hochbauten wurde entsprechen im Dezember 2021 eine Leistungsübersicht 2021/2022 zugestellt (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Folgende Aufgaben sollen in Rahmen einer Folgestudie erarbeitet werden:

- Interview mit 2 bis 3 grossen Bauunternehmungen um die Annahmen, welche der theoretischen Baustelle hinterlegt sind, zu verifizieren. Diese Interviews sollen auch Informationen zu den Fragen bezüglich «Umsetzung» liefern (siehe Kapitel 14.4)
- Zusammen mit dem AHB 2 bis 3 Pilotbaustellen identifizieren mit dem Ziel, genügend (nun bekannte) Informationen zu erhalten, um die theoretische Baustelle durch reale Baustellen zu ersetzen.
- Emissionsmessungen und Modellierung der Schadstoffausbreitung aufgrund der 2-3 exemplarischen Baustellen. Vergleich der Messwerte mit den gerechneten Emissionen aus der theoretischen Baustelle. Hinweis: Das könnte schwierig werden, da eine Unterscheidung der motorischen und der Bauprozessemissionen nicht möglich ist. Ein entsprechendes Vorgehen ist vorgängig zu bestimmen.
- Die Möglichkeiten der Stadt Zürich, E-Baustellen zu fordern, bedingt Gespräche innerhalb und mit der Stadt, um zu verstehen, was juristisch möglich resp. nicht möglich ist.
- Mögliche Datensätze von Elektro-BMTF so aufbereiten, dass diese in die Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» (KBOB-Liste) aufgenommen werden können.
- Schlussbericht inkl. der oben aufgeführten Arbeiten sowie einer Präsentation.

In den folgenden Unterkapitel sind einige Gedanken zur Auswahl der Pilotbaustellen sowie zu den Emissionsmessungen

15.2 Kriterien für die Auswahl von Pilotbaustellen

Bei der Auswahl von Pilotbaustellen sollten folgende Kriterien beachtet werden:

- Hochbauprojekt
- Innerhalb der Stadtgrenzen von Zürich
- Alle Bauausführungsphasen (inkl. Abbruch des bestehenden Gebäudes)
- Folgende Verbräuche der BMTF sollen erfasst werden:
  - Leistung der BMTF
  - Dieselverbrauch resp. Stromverbrauch pro Fahrzeug
  - Einsatzdauer aller BM über die gesamte Baulaufzeit
  - Zurückgelegte Strecke aller TF über die gesamte Baulaufzeit
  - Menge der transportieren Baumaterialien (inkl. Aushub und Bauschutt des Abbruchs) auf und von der Baustelle

15.3 Kriterien für die Emissionsmessungen

Für eine realistische Beurteilung der Luftbelastung durch Baustellen sollen in einem Folgeprojekt Emissionsmessungen und Modellierungen der Schadstoffausbreitung durchgeführt werden.

Die Messungen von Luftschadstoffen sollen an einer konventionellen und einer Pilot-E-Baustelle durchgeführt werden. Falls eine Pilot-E-Baustelle im Jahr 2022 nicht umsetzbar ist, könnten zuerst Messungen an einer konventionellen Baustelle durchgeführt werden. Die konventionelle Baustelle müsste mit der Pilot E-Baustelle vergleichbar sein (gemäss Kriterien Pilot-Baustelle, siehe Kap. 15.2).

Die Messungen sollen folgende Kriterien erfüllen:

- Verschiedene Bauphasen müssen abgedeckt werden
- Die Wahl der Messorte müsste eine Differenzierung bezgl. einer Unterteilung in Prozessemissionen und Emissionen aus den Fahrzeugen und Baumaschinen ermöglichen
- Messparameter /Methoden:
  - Partikelanzahl oder LDSA (Lung Deposited Surface Area): wenn möglich mittels Umweltbox von Naneos
  - NOx (nicht zwingend): Messmethode zu definieren
  - VOC (nicht zwingend): Messmethode zu definieren
- Mit der darauffolgenden Modellierung der Ausbreitung der Schadstoffe radial zu den Baustellen sollen folgende Fragen beantwortet werden:
  - Höhe der Luftbelastung durch innerstädtische Baustelle, Ausbreitung
  - Einfluss einer Baustelle über die gesamte Laufzeit auf die Luftqualität der Stadt Zürich
- Die Emissionsmessungen und Modellierungen sollen durch eine dafür spezialisierte Messfirma durchgeführt werden. Dabei müsste die Messfirma folgende Aufgaben übernehmen:
  - Planung Messung, Festlegung Messorte, Messdauer
  - Installation Geräte: Eigene Geräte oder Geräte vom UGZ
  - Datenerfassung und Auswertung inkl. Modellierung der Schadstoffausbreitung

Anschliessend sollen die gerechneten Emissionen mit den Messresultaten verglichen und zusammengefasst werden. Die Auswertung und der daraus folgende Bericht könnte folgende Aspekte berücksichtigen:

- Umrechnung der berechneten Emissionen aus der theoretischen Baustelle für die aktuell untersuchten Baustelle
- Vergleich der berechneten und gemessenen motorischen Emissionen aus Baumaschinen
- Ableitung der nicht-motorischen Emissionen (Prozessemissionen) aus den Messungen und Schätzung eines Emissionsfaktor für nicht-motorische Prozessemissionen (momentan rechnet das AHB für die nicht-motorischen PM10 Emissionen mit der EMIS Datenbank des Bundes:89.2 g PM10non pro Betriebsstunde)
- Unterteilung der Emissionen pro Bauphase
- Implementierung der neuen Resultate in die Ökobilanz

A Anhang

A.1 Literaturverzeichnis

BAFU (2016). Luftreinhaltung auf Baustellen. Richtlinie über betriebliche und technische Massnahmen zur Begrenzung der Luftschadstoff-Emissionen von Baustellen (Baurichtlinie Luft).

Baudirektion Kanton Zürich (2019). Bauvorhaben in Grundwasserleitern und Grundwasserschutzzonen.

Bautechnologie und Konstruktion (BUK), ETH Zürich (o. J.). Baukostenplan BKP. Zugriff: 09.12.2021: https://www.buk.arch.ethz.ch/Dokumentation/Baukostenplan

Beco Treat Aps (o. J.). Gewicht je Kubikmeter. Wie schwer ist ein 1m³ Beton? Zugriff: 21.12.2021: https://www.betonversiegelung.com/wie-schwer-ist-ein-1m-beton/

Bellona (2019). Zero Emission Construction Sites. Status 2019. Zugriff: 08.12.2021: https://bellona.org/publication/zero-emission-construction-sites-status-2019.

Bellona (2021). Zero Emission Construction Machinery -Products. Database: Emission-free Construction Equipment (by product type). Zugriff: 20.12.2021: https://bellona.org/database-emission-free-construction-equipment-by-product-type

Brilakis, I., Kim, M. K., Ahn, C., & Szamocki, N. (2019). Reducing Greenhouse Gas Emission of Construction Equipment at Construction Sites: A Field Study Approach. Journal of Construction Engineering and Management - ASCE, 145 (9) https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001690

Bundesamt für Energie (2020). Elektrobagger senken CO2-Emissionen auf Baustellen. Zugriff: 20.12.2021: https://energeiaplus.com/2020/10/27/elektrobagger-senken-co2-emissionen-auf-baustellen/

Bundesamt für Umwelt (2020). CO2-Abgabe. Zugriff: 14.12.2021: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/co2-abgabe.html

C40 (2020). How Oslo is driving a transition to clean construction. Zugriff: 15.12.2021: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-Oslo-is-driving-a-transition-to-clean-construction?language=en_US

DNV GL (2018a). Fossil- and emission-free building sites: Guide to arranging fossil- and emission-free solutions on building sites.

DNV GL (2018b). Emission-reduction potential of fossil- and emission-free building and construction sites.

EMEP & EEA (2016). Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

EnergieDienst (2018). Der Elektromotor hat noch viel Potenzial. Zugriff: 21.12.2021: https://blog.energiedienst.de/der-elektromotor-hat-noch-viel-potenzial/

European Environmental Agency (EEA) (2020). Air quality in Europe. 2020 report. Zugriff: 06.12.2021: https://www.eea.europa.eu//publications/air-quality-in-europe-2020-report

Fan, H. (2017). A Critical Review and Analysis of Construction equipment emission factors.

FensterHAI (o. J.). Häufig gestellte Fragen. Zugriff: 21.12.2021: https://fensterhai.de/service/haeufig-gestellte-fragen

Flyer Umwelt Arena, CH-Spreitenbach (o.J.) Zugriff: 23.12.2021: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjpmt3hr_z0AhXa8LsIHUdICdMQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Freneschmid.ch%2Fassets%2Fprojects%2FUmweltarena%2FUmwelt-Arena.pdf&usg=AOvVaw3q7WPRm3CEBhxIUIRgmBZ4

Fufa, S.M. (2018). GHG emission calculation from construction phase of Lia barnehage. Zugriff: 06.12.2021: https://www.researchgate.net/publication/335676747_GHG_emission_calculation_from_construction_phase_of_Lia_barnehage/download

Gerüste und Leitern Marc Ebertz (o. J.). Layher Blitz Baugerüst. Neu. Zugriff: 21.12.2021: https://leitern-ebertz.de/produkte/gerueste-und-zubehoer/27-qm-layher-blitz-geruest-neu-feld-2-57-m/

Gesundheits- und Umweltdepartement Stadt Zürich (2021). Zürich soll bis 2040 klimaneutral werden. Medienmitteilung. Zugriff: 06.12.202: https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/departement/medien/medien-mitteilungen/2021/april/210421a.html

Giunta, M., Lo Bosco, D., Leonardi, G. and Scopelliti, F. (2019). Estimation of Gas and Dust Emissions in Construction Sites of a Motorway Project.

Hamdan, H. (2018). The Potential of Public Procurement to Achieve Low or Zero-emission Construction Sites. A case study from Norway.

Hoffmann, B., Boogaard, H., de Nazelle, A., Andersen, Z., Abramson, M., Brauer, M., Brunekreef, B., Forastiere, F., Huang, W., Kann, H., Kaufman, J., Katsouyanni, K., Michal Krzyzanowski, M., Künzli, N., Kutlar Joss, M., Laden, F., Nieuwenhuijsen, M., Mustapha, A., Powell, P., Rice, M., Soares, A., Straif, K., Thurston, G., Weinmay, G. (2021). Die WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021. Gesündere Luft für alle.

i+R Gruppe (o. J.). Die weltweit erste elektrifiziere Baustelle im Spezialtiefbau. Zugriff: 15.12.2021: https://www.ir-bauen.com/de/news/die-weltweit-erste-elektrifizierte-baustelle-im-spezialtiefbau

Keino (o. J.). Pilot for zero-emission worksites. The Kulosaaren puistotie project.

Kjendseth Wiik, M., Flyen, C., Fufa, S.M., Venås, C. (2020). Lessons learnt from green public procurement in the Norwegian construction sector.

KlimaOslo (o. J.a). Electric excavators may become the norm in Oslo. Zugriff: 15.12.2021: https://www.klimaoslo.no/2019/11/07/electric-excavators-in-oslo/

KlimaOslo (o. J.b). New pedestrian street brings new life to Oslo city centre. Zugriff: 15.12.2021: https://www.klimaoslo.no/2021/02/09/new-pedestrian-street-brings-new-life-to-oslo-city-centre/

Local Governments for Sustainability (ICLEI) Europe (o. J.a). Zero-emission construction sites. Zugriff: 06.12.2021: https://bigbuyers.eu/working-groups/past/zero-emission-construction-sites

Local Governments for Sustainability (ICLEI) Europe (o. J.b). Public Procurement of Zero-Emission Construction Sites. Lessons learned from the Big Buyers Initiative working group.

Local Governments for Sustainability (ICLEI) Europe (o. J.c). Big Buyers Initiative Factsheet for Policymakers. Zero-Emission Construction Sites. Changing the way we build in cities.

Local Governments for Sustainability (ICLEI) Europe (o. J.d). Big Buyers Initiative Factsheet for Citizens. Zero-Emission Construction Sites. Changing the way we build in cities.

Local Governments for Sustainability (ICLEI) Europe (o. Je). Procuring Zero-Emission Construction Sites. Cities' current and future procurement plans.

Ministry of the Environment (2020). Ministry of the Environment, Senate Properties and the cities of Espoo, Helsinki, Turku and Vantaa sign a voluntary agreement to reduce emissions at construction sites. Zugriff: 08.12.2021: https://www.ymparisto.fi/en-US/Climate_and_air/Ministry_of_the_Environment_Senate_Prope(58592)

Min-Seop Seo, Taeyeon Kim, Goopyo Hong and Hyungkeun Kim (2016). On-Site Measurements of CO2 Emissions during the Construction Phase of a Building Complex.

Multiconsult (2018). Review of implementation of fossil free building sites.

Nadel, S. und Huether, P. (2021). Electrifying Trucks. From delivery vans to buses to 18-wheelers.

Oslo (2019). Climate and environmental requirements for the City of Oslo's construction sites. Version 1.0. Zugriff: 08.12.2021: https://www.klimaoslo.no/wp-content/uploads/sites/88/2019/11/Climate-and-enviromental-requirements.pdf

Professur für Architektur und Bauprozess, ETH Zürich (o. J.). Ausführung. Zugriff: 09.12.2021: https://map.arch.ethz.ch/artikel/9/Ausf%C3%BChrung

Rennan, J.E. (2021). Design of procurement strategies for zero emission construction sites from an innovative public procurement perspective.

SBB (2021). Baugeräteliste / Baurelevante Maschinen dekarbonisiert. Zugriff: 08.12.2021: https://data.sbb.ch/explore/dataset/baugerateliste/information/

Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB) (o. J.). Normpositionen-Katalog NPK. Zugriff: 09.12.2021: https://www.crb.ch/Normen-Standards/Normpositionen/Katalog.html

Seo, M.-S., Kim, T., Hong, G., and Kim, H. (2016). On-Site Measurements of CO2 Emissions during the Construction Phase of a Building Complex.

Sizirici, B., Fseha, Y., Chung-Suk, C., Yildiz, I., and Byon, Y.-J. (2021). A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry, from Design to Operation.

The Explorer (2020). How Norway helps to commercialise environment-friendly energy techology. Zugriff: 20.12.2021: https://www.theexplorer.no/stories/energy/how-norway-helps-to-commercialise-environment-friendly-energy-techology/

TU Wien (2021). Die CO2-neutrale Baustelle. Zugriff: 15.12.2021: https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/news/die-co2-neutrale-baustelle

Übereinkommen von Paris (2016). Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.

Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich (UGZ) (2019). Massnahmenplan Luftreinhaltung 2011 der Stadt Zürich. Revision 2019. Zugriff: 06.12.2021: https://www.stadt-zu-erich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/luftqualitaet/publikationen/Massnahmenplan_Luftreinhaltung.html

Vereinte Nationen (2015). Transformation unserer Welt. Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015.

Wacker Neuson (o. J.). Eine komplett emissionsfreie Baustelle in Kopenhagen. Zugriff: 15.12.2021: https://magazine.wackerneuson.com/eine-komplett-emissionsfreie-baustelle-in-kopenhagen/

Weigert, M., Winkler, L., und Obernosterer, R. (2021). CO2-neutrale Baustelle. In OIAZ 166.

Wikipedia (2021a). Polystyrol. Zugriff: 21.12.2021: https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol

Wikipedia (2021b). Liste von Baumaschinen und Baugeräten. Zugriff: 17.12.2021: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Baumaschinen_und_Bauger%C3%A4ten#Klassifikation%20

A.2 Fragenkatalog

Vorbemerkung: Wenn wir von Baumaschinen mit alternativem Antrieb sprechen, meinen wir die Baumaschinen, die derzeit mit fossilen Treibstoffen betrieben werden

- Haben Sie bereits Erfahrungen und Meinungen zu E-Baustellen?
- Sind Baumaschinen mit alternativem Antrieb bei Ihnen bereits heute ein Thema im In- und Ausland? Wenn ja, für welche Maschinen?
- Sind Baumaschinen mit alternativem Antrieb bereits heute ein Thema bei der Anschaffung?
- Haben Sie eine Strategie zur Umstellung?
- Könnten Sie sich vorstellen in naher Zukunft Baumaschinen mit alternativem Antrieb zu mieten bzw. zu kaufen?
- Wie würden Sie reagieren, wenn die Stadt Zürich das in Zukunft (1, 5, oder 10 Jahre) fordert?
- Ab wann wären Sie in der Lage eine Pilotbaustelle mittlerer Grösse mit e-Produkten anzubieten?
- Wie schnell können Sie ihren Fuhrpark auf alternative Antriebe umstellen?
- Wissen Sie mit welchem Strommix Ihre elektrischen Geräte heute betrieben werden? Können Sie das Stromprodukt frei wählen?
- Welches sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Hemmnisse und wie könnten diese Überwunden werden?
- Sehen Sie noch weitere Potentiale, um Luftemissionen und Umweltauswirkungen auf Baustellen zu reduzieren?

A.3 Umfassende Liste an BM

Die nachfolgende Tabelle, Tabelle 15, kategorisiert und listet die BM, die auf Baustellen eingesetzt werden.

Klassifikation		BM	Verwendung
Erdbaugeräte	Standbagger (für Arbeiten weitgehend an einem Ort)	Hydraulikbagger	Für nahezu jede Geländeform und Bauaufgabe
		Teleskopbagger	Spezialform des Hydraulikbaggers
		Schreitbagger	Für unwegsames oder steiles Gelände
		Minibagger	Für stark eingeengte Platzverhältnisse
		Kompaktbagger	Baugrösse und Leistungsfähigkeit zwischen Mini- und Hydraulikbagger
		Seilbagger	Für den Einsatz im Bagger- und Kranbetrieb sowie für Spezialtiefbauaufgaben
	Fahrbagger (für kurze Distanzen geeignet)	Radlader	Für mittleren Transportdistanzen
		Kompaktlader	Wie Radlader, Grösse vergleichbar mit Minibagger
		Baggerlader	Kombination aus Hydraulikbagger und Radlader
		Laderaupe	Für wenig tragfähige und dicht gelagerte Böden
	Flachbagger (für Flachab- bzw. -auftrag, z.T. Transport über weitere Distanzen)	Planierraupe	Für Planierarbeiten und Förderung von Erdreich über kurze Strecken
		Grader	Für genaue Planierarbeiten
		Schürfwagen	Für Flachabtrag und Transport
		Schürfkürbelraupe	Vereint Funktionen von Schürfwagen und Planierraupe
Bohr- und Schlitzwandgeräte		Drehbohrgerät	Für (un-)verrohrte Bohrungen im Boden
		Schlitzwandgreifer/-fräser	Für Herstellung von Schlitzwänden
Transportgeräte für horizontalen Transport		Baustellenkipper	Beladen mithilfe von Baggern
		Schwerkraftwagen	Keine Strassenzulassung, beladen mithilfe von Baggern
		Vorderkipper	Für Baustofftransporte auf Kleinbaustellen und im Garten- und Landschaftsbau
		Förderband	I.d.R. für längere Zeiträume und besonders unwegsames Gelände
		Tieflader	Für Transport von Baugeräten, die nicht auf öffentlichen Strassen fahren dürfen oder Bauteile oder Bauhilfsstoffe
Maschinen für Transport und Verarbeitung von Beton und Mörtel		Betonmischer	Zur Herstellung von Frischbeton
		Fahrmischer	Für Transport von Frischbeton
		Betonpumpe	Für Transport von Beton mit verlegter Rohrleitung
		Silosteller	Transport von Trockenmaterialsilos
		Mörtelpumpe	Zur Mischung und Transport von Mörtel
		Spritzbetongerät	Zum Verarbeiten von Spritzbeton
		Betonsäge	Hauptsächlich für Betonfahrbahnbau
		Rotationsglätter	Zum Glätten der Oberfläche von Betonböden
		Innen-/ Aussenrüttler	Zum Verdichten von Frischbeton
Hebegeräte für vertikalen Transport		Turmdrehkran	Standard-Hebezeug im Hochbau
		Portalkran	Besitzt zwei Auflager

Klassifikation	BM	Verwendung
	Kabelkran	Besonders für schwer zugängliche oder lange linienartige Baustellen
	Fahrzeugkran	Für grössere Strecken, mit/ohne Strassenzulassung
	Teleskoplader	Besonders für häufig wechselnde Einsatzorte und geringe Lasten
	Bauaufzug	Für vertikalen Transport
	Minikran	Für geringe Lasten und kurze Distanzen
	Arbeitsbühne	Für schwer zugängliche Arbeitsstellen
	Hubarbeitsbühne	Für horizontal versetzten vertikalen Transport
	Flaschenzug	Für kleinere Hebevorvorgänge
Ramm- und Ziehgeräte	Ramme	Zum Einbringen und Entfernen von Spundwänden und Stahlträgern in Boden
Geräte zum Bau von Asphalt- und Betonfahrbahnen	Schwarzdeckenfertiger	Für Erstellung von Asphaltdecken
	Kompaktasphaltfertiger	Sonderform des Schwarzdeckenfertiger
	Sprühfertiger	Sonderform des Schwarzdeckenfertiger
	Betondeckenfertiger	Für Erstellung von Betondecken
	Brückenfertiger	Für geneigte oder gewölbte Flächen aus Schotter, Beton oder Asphalt
	Strassenfräse	Für Entfernen von Asphalt- oder Betonschicht
	Dreiradwalze	Zur Verdichtung der frischen Asphaltschicht
	Gummiradwalze	Wie Dreiradwalze, für Porenschluss der Asphaltfläche
	Tandemvibrationswalze	Zur Verdichtung
	Kombiwalze	Für Einbau von Asphaltbetondecken, vereinen Funktion von Gummirad- und Tandemvibrationswalze
	Rampenspritzgerät	Zum Aufbringen von Bindemittel auf Fahrbahn
	Bankettfertiger	Zur Herstellung von Bankett
	Beschicker	Zur Sicherstellung des ständigen Mischgutnachschubs
	Pflasterverlegemaschine	Zur Verlegung grosser Pflasterflächen
	Bodenstabilisierer, Bodenfräse	Zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Böden
	Bindemittelstreuer	Zur Verteilung von hydraulischem Bindemittel
	Kaltmischanlage	Zur Herstellung von hydraulisch gebundenen Tragschichten
	Gussasphaltkocher	Zum Wärmen und Transport von Gussasphalt

Klassifikation	BM	Verwendung
	Gussasphaltbohle	Zum Einbauen von Gussasphalt
	Wasserwagen	Zum Wässern grosser Flächen
	Heizmaschine	Zum Wärmen von Asphaltbefestigungen
	Heissrecycler	Zum Sanieren von Asphaltdeckschichten
Kanal- und Rohrleitungsbaugeräte	Grabenfräse	Hauptsächlich für Graben- oder Kabelbau, für leicht bis mittelschwer lösbare Böden
	Verlegepflug	Zum Einpflügen von teilflexiblen Rohren und Kabeln ins Erdreich
	Verbaugerät	Zur Abstützung von Gräben
	Schweissraupe	Für Schweissen im unwegsamen Gelände, beim Rohrleitungsbau
	Rohrleger	Für Auslegung von Rohrleitungen
	Horizontalbohrmaschine	Zur Verlegung von Leerrohren und Leitungen ohne Graben
Verdichtungsgeräte	Vibrationsstampfer	Für kleine Verdichtungsaufgaben
	Vibrationsplatte	Für mittelgrosse Flächen
	Walzenwagen	Für grossflächige Verdichtung
	Duplexwalze	Leistungsmässig zwischen Vibrationsplatte und Walzenwagen
	Grabenwalze	Für enge Gräben
	Plattenverdichter	Für ungebundenen Schichten aus Kies oder Schotter
Kompressorgeräte	Baukompressor	Zur Erzeugung von Druckluft für Abbruchhämmer, Bohrgeräte und Spritzgeräte
Reinigungsgeräte	Kehrmaschine	Zur Reinigung nach Bautätigkeit

Tabelle 15: Liste von BM, übernommen aus Wikipedia (2021b)

A.4 Elektrische BMTF

Die nachfolgende Tabelle 16 enthält eine Liste der elektrischen BM, die derzeit auf dem Markt verfügbar sind. Die Liste ist nicht abschliessend und wurde basierend auf den Datenbanken von Bellona (2021) und SBB (2021) erstellt.

Klassifikation	BM	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen
Erdbaugeräte	Kompaktbagger	Batterie	Volvo	Ladezeit 1-6h (abhängig vom Ladegerät), Operationszeit 8 h
		Batterie und Stromkabel	Hitachi	Ladezeit 45 Min -4 h (abhängig vom Ladegerät), Operationszeit 4-5 h
	Kleine Bagger (< 7 t)	Batterie	Bobcat, JCB, Kobelco, Kubota, Limach, Subncar HK (durch Huppenkothen vertrieben), Takeuchi, Volvo, Wacker Neuson	Motorleistung 12,8-75 kW, Ladezeit 1,1 bis 12 h (abhängig vom Ladegerät), Operationszeit 3–9 h (viele 8-9 h)
	Standardbagger (> 7 t und < 45 t)	Batterie	Kubota, Mecalac, Nasta, Pon Cat, Sucar HK (durch Huppenkothen vertrieben)	Motorleistung 11-300 kW, Ladezeit 2 bis 7 h (je nach Ladegerät), Operationszeit 1-8 h (viele 5-6 h)
		Batterie und Stromkabel	Nasta	Motorleistung ab 43 kW, Operationszeit 0,5 h mit Batterie bzw. kontinuierlich mit Stromkabel
		Stromkabel	Nasta	Motorleistung 210 kW
	Radlader	Batterie	Ahlmann, Giant, Kramer, Knikmpos, Schäffer, Scherpa, Volvo, Wacker Neuson, Weidemann	Motorleistung 6,5-66 kW, Ladezeit 2-12 h (viele 5-6 h, viele 2h mit internen Ladesystem pro Pack und 15 Min mit externem Ladesystem), Operationszeit 2,5-8 h (meiste 5 h)
	Kompaktlader	Batterie	Gehl, Green Machine	Operationszeit 8-9 h
	Baggerlader	Batterie	CASE Construction	Geschätzte Amortisationszeit 5 Jahre, Motorleistung

Klassifikation	BM	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen
				90 kW, 8h Operationszeit
	Knicklader	Batterie	Giant	Motorleistung 6,5 kW, Ladezeit 5 h, Operationszeit 5 h
	Lader	Batterie	Scherpa, Wacker Neuson	Operationszeit 3 h
Bohr- und Schlitzwandgeräte	Drehbohrgeräte	Batterie	Liebherr	Motorleistung 265 kW, Technology Readiness Level (TRL) 8, Operationszeit 10 h
	Bohrturm	Batterie	Liebherr	Motorleistung 265 kW, Ladezeit 7 h, Operationszeit 10 h
Transportgeräte für horizontalen Transport	Kipper	Batterie	JBC, Komatsu, Wacker Neuson	Kleine Kipper gibt es viele elektrisch, Motorleistung 4.9-700 kW, Ladezeit 7,5-8 h bzw. 1,7-2,6 h mit Schnellladegerät, Operationszeit 6,5-8 h
	Muldenlastwagen	Batterie	Futuricum	200-250 km Reichweite, Motorleistung 500 kW, TRL 8
Maschinen für Transport und Verarbeitung von Beton und Mörtel	Betonmischer	Batterie	Futuricum	200-250 km Reichweite, Motorleistung 500 kW, TRL 8
	Zementfahrmischer	Vollelektrisch mit Batterie	Liebherr	Bis zu 380 km Reichweite, Motorleistung 500 kW, Ladezeit 1,3 – 15 h (je nach Batterie und Ladegerät)
		Halbelektrisch mit Batterie und Diesel-betriebenem LKW	CIFA, Futuricum, Liebherr, Sany	Motorleistung 28-36 kW, Ladezeit 1 h mit Schnellladegerät, Operationszeit 1 Arbeitstag
Hebegeräte für vertikalen Transport	Raupenkran	Batterie	Liebherr, Valla Manitex	Motorleistung 196 kW, Ladezeit bis zu 4,5 Stunden (je nach Ladegerät), Operationszeit 4 Stunden, kann plugged-in betrieben werden

Klassifikation	BM	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen
	Teleskoplader	Batterie	JBC, Manitou, Snorkel, Solmec	Motorleistung 24- 40 kW, Ladezeit 2 h mit Schnellladegerät, Operationszeit 1 Arbeitsschicht
Ramm- und Ziehgeräte	Rammgeräte	Batterie	Wacker Neuson	Batteriesystem kann für Rammgeräte, Rüttelplatten und Innenrüttler eingesetzt werden, Operationszeit 1 Arbeitstag
Geräte zum Bau von Asphalt- und Betonfahrbahnen	Tandem-/Asphaltwalze	k. A.	Dynapac, Bomag	k. A.
Kompressorgeräte	Druckluftkompressoren	Stromkabel	Kaeser	Motorleistung 7,5-160 kW

Tabelle 16: Auf dem Markt verfügbare elektrische BM

Die nachfolgende Tabelle 17 enthält eine Liste von Prototypen von elektrischen BM. Die Liste ist nicht abschliessend und wurde basierend auf den Datenbanken von Bellona (2021) erstellt. NorBetong bspw. entwickelt und erprobt gemeinsam mit seinen Partnern vollelektrische Zementmischer, Betonpumpen und einen Tranktoranhänger für den Transport schwerer Lasten (The Explorer, 2020).

Klassifikation	BM	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen
Erdbaugeräte	Minibagger	Batterie	Hyundai Construction Equipment, Komatsu	Motorleistung 4,4-36 kW, Ladezeit 3h bzw. Schnellladeoption, 1 Operationszeit 2 h - 1 Arbeitsschicht
	Grabenbagger	Batterie	John Deere	k. A.
	Bagger	Batterie	Takeuchi, Volvo	Motorleistung 15,6-35,5 kW., Ladezeit 8 h, Operationszeit 8 h
		Batterie und Stromkabel	Hitachi, WackerNeuson,	Motorleistung 16,5-18,5 kW
		Brennstoffzelle	Hyundai Construction Equipment, JCB	Prototyp 2021, kommerzielles Produkt 2022/23
	Raupenbagger	Batterie	Nasta	Ladezeit 2,5 h bzw. 1 h mit Schnellladegerät, Operationszeit 4 h

Klassifikation	BM	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen
		Stromkabel	Nasta	k. A.
	Löffelbagger	Batterie	John Dheere	k. A.
	Radlader	Batterie	Pon Cat, Caterpillar, Danfoss Editron	Motorleistung 41 kW, Ladezeit 3 h, Operationszeit 4,5 h
	Kompakt-Radlager	Batterie	Volvo	Motorleistung 38 kW, Operationszeit 8 h, autonomes fahren möglich bzw. aus der Ferne steuerbar
	Kompaktlader	Komplett elektrisch	Bobcat	k. A.
Transportgeräte für horizontalen Transport	Lastenträger	Batterie	Volvo	Autonomes fahren möglich
Maschinen für Transport und Verarbeitung von Beton und Mörtel	Zementfahrmischer		Oshkosh	
Hebegeräte für vertikalen Transport	Hebebühne	Batterie	Snorkel	Motorleistung 17 kW, Ladezeit 0,33 h mit Off-Board-Ladegerät bzw. 6,5 h mit On-Board-Ladegerät

Tabelle 17: Prototypen von elektrischen BM

Kleinlastwagen sind derzeit u. a. von Tesla, Rivian, und GM verfügbar und werden u.a. von Atlis und Bollinger entwickelt. Diese werden bereits für kurze Strecken in der Spedition eingesetzt. Mehrere Hersteller testen Prototypen, die mehrere 100 Kilometer Reichweite besitzen. Daimler, Peterbilt, Tesla und Volvo scheinen dabei am weitesten zu sein. (Nadel und Huether, 2021)

Die Webseiten der genannten Hersteller wurden durchsucht und basierend auf dieser Recherche, die verfügbaren TF in Tabelle 18 dargestellt.

TF	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen	Quelle
LKW, bis zu 16,7 t	Batterie	Volvo	Motorleistung bis zu 135 kW, bis zu 300 km Reichweite, Ladezeit 2 bzw. 11 h	https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fl/volvo-fl-electric.html
LKW, bis zu 27 t	Batterie	Volvo	Motorleistung bis zu 300 kW, bis zu 200 km Reichweite, Ladezeit 2 bzw. 11 h	https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fe/volvo-fe-electric.html

TF	Antriebsart	Hersteller	Weitere Informationen	Quelle
LKW, bis zu 44 t	Batterie	Volvo	Motorleistung bis zu 490 kW, bis zu 300 bzw. 380 km Reichweite, Ladezeit 2,5 bzw. 9,5 h	https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fmx/volvo-fmx-electric.html
Semi, k. A.	Batterie	Tesla	Bis zu 300 oder 500 Meilen (bzw. 480 bis 800 km) Reichweite, Verbrauch ‹ 2 kWh/Meile (bzw. ‹ 1,3 kWh/km)	https://www.tesla.com/semi

Tabelle 18: Auf dem Markt verfügbare elektrische TF

A.5 Herleitung der Einsatzzeiten der einzelnen BM

Aktivität		Schätzung	Einsatzdauer
BM0	Abbruch	sehr grobe Schätzung aus Erfahrungswerten	50 h
BM1	Spundwände einschlagen	einzelne Spundwand hat eine Breite von 0.5m, der Umfang des Gebäudes beträgt 60m, somit werden insgesamt 120 Spundwände benötigt. Pro Spundwand hat man jeweils 10 min volle Einsatzzeit	20 h
BM2	Aushub	keine Einsatzdauerabschätzung notwendig	
BM3	Spundwände entfernen	Zum Entfernen der Spundwände wird jeweils 5min pro Spundwand benötigt	10 h
BM4	Transport auf der Baustelle	Durchgehend auf der Baustelle, 20 Arbeitstage à 8h/Tag je Monat	640h
BM5	Planierungsarbeiten	sehr grobe Schätzung aus Erfahrungswerten	24h
BM6	Erdwärmebohrung	sehr grobe Schätzung aus Erfahrungswerten	20h
BM7	Gartenarbeiten	8 Arbeitstag à 6h Einsatzzeit bei voller Auslastung	48h

A.6 Strommix für CH und ZH

Materials/fuels Strommix CH	Menge		Anteil
electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/CH U	0.13439	kWh	13%
electricity, hydropower, net, at reservoir power plant/kWh/CH U	0.17767	kWh	17%
electricity, hydropower, at small hydropower plant/kWh/CH U	0.033007	kWh	3%
electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/CH U	0.0094131	kWh	1%
Electricity, at cogen 6400kWth, wood, emission control, allocation exergy/CH U	0.0035909	kWh	0%
Electricity, at cogen with biogas engine, agricultural covered, alloc. exergy/CH U	0.0011729	kWh	0%
electricity, at cogen with biogas engine, methane 96%-vol allocation exergy/CH U	0.0026562	kWh	0%
Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U	0.011263	kWh	1%
electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/kWh/CH U	0.15561	kWh	15%
electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/kWh/CH U	0.13992	kWh	13%
Electricity, at cogen 500kWe lean burn, allocation exergy/CH U	0.0011544	kWh	0%
Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U	0.017317	kWh	2%
electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/RER U	0.06605	kWh	6%
electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/kWh/RER U	0.012581	kWh	1%
electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/DE U	0.00012827	kWh	0%
Electricity, at wind power plant/RER U	0.0063089	kWh	1%
Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U	2.47E-05	kWh	0%
Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U	7.74E-05	kWh	0%
Electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/FR U	0.038353	kWh	4%
Electricity, oil, at power plant/IT U	0.00025654	kWh	0%
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0.0037199	kWh	0%
Electricity, hard coal, at power plant/DE U	0.00025654	kWh	0%
electricity, european attribute mix, at plant/RER U	0.23179	kWh	22%

Tabelle 19: Zusammensetzung des Strommix CH

Materials/fuels Strommix ZH	Menge		Anteil
Electricity, hydropower, at power plant/CH U	0.8771	kWh	88%
Electricity, at wind power plant/CH U	0.0731	kWh	7%
electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/CH U	0.0173	kWh	2%
Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0.0325	kWh	3%

Tabelle 20: Zusammensetzung des Strommix ZH

A.7 Datentabellen der Ergebnisgrafiken

In den folgenden Tabellen sind die Summen der jeweils berücksichtigten Datensätze aufgeführt, welche in den Ergebnisgrafiken in den Kapitel 10, 11und 12 dargestellt sind. Die prozentualen und absoluten Mengen beziehen sich jeweils auf die Summe der einzelnen Datensätze in den obersten 5 Zeilen.

Diesel-BMTF			**BM**				**TF**					
Stoff		Einheit	diesel, burned in building machine, with particle filter/CH U		excavation, hydraulic digger, with particle filter/CH U		transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6/tkm/RER U		transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6/tkm/RER U		transport, freight, lorry 32-40 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	
IPCC GWP 100a		kg CO2 eq		19'397		83		245		104		18'079
Nitrogen oxides		g		78'002		408		310		135		23'775
NMVOC, non-methane volatile organic		mg		14'767'821		69'068		207'085		90'519		18'262'738
Particulates, < 2.5 um		mg		2'171'351		10'128		41'353		39'514		5'926'185
Particulates, > 2.5 um, and < 10um		mg		1'943'158		8'992		39'009		36'401		5'709'244
THGE (kg CO2 eq)												
Betrieb	Auspuff / Abgas		74%	14'295.6	73%	60.7	70%	170.2	69%	72.0	67%	12'040.5
	Schmieröl		1%	115.0	1%	0.4						
	Dieselherstellung		15%	2'987.1	15%	12.6	14%	33.0	14%	14.2	13%	2'332.2
	Wartung Fahrzeug						3%	7.0	3%	2.9	3%	546.0
	Wartung Strasse						1%	3.6	1%	1.1	1%	150.2
	Herstellung Strommix											
Herstellung	Herstellung BMTF		9%	1'726.3	10%	8.1	5%	11.3	5%	5.1	5%	923.8
	Herstellung Strasse						8%	18.4	8%	8.4	11%	2'006.8
	Entsorgung		1%	0.0	1%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0
	Herstellung Batterie											
Nitrogen oxides (g)												
Betrieb	Auspuff / Abgas		81%	62'948.0	84%	343.2	23%	71.5	24%	32.2	19%	4'517.2
	Schmieröl		0%	382.2	0%	1.4						
	Dieselherstellung		16%	12'090.4	13%	51.4	45%	139.1	44%	59.3	41%	9'771.4
	Wartung Fahrzeug						4%	11.6	4%	4.8	4%	924.8
	Wartung Strasse						2%	5.5	1%	1.7	1%	227.0
	Herstellung Strommix											
Herstellung	Herstellung BMTF		3%	2'535.1	3%	11.9	7%	22.9	8%	10.2	8%	1'835.4
	Herstellung Strasse						19%	58.2	20%	26.7	27%	6'371.6
	Entsorgung		0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	1%	0.0
	Herstellung Batterie											
NMVOC (mg)												
Betrieb	Auspuff / Abgas		26%	3'839'634	34%	23'207	2%	3'479	2%	1'647	2%	294'030
	Schmieröl		8%	1'206'531	6%	4'434						
	Dieselherstellung		62%	9'185'585	56%	38'954	42%	87'597	41%	37'384	34%	6'154'543
	Wartung Fahrzeug						5%	10'872	5%	4'372	5%	904'006
	Wartung Strasse						1%	2'589	1%	807	1%	106'289
	Herstellung Strommix											
Herstellung	Herstellung BMTF		4%	537'549	4%	2'521	5%	10'168	4%	4'037	4%	692'158
	Herstellung Strasse						45%	92'153	47%	42'182	55%	10'081'031
	Entsorgung		0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
	Herstellung Batterie											

Particulates, < 2.5 um (mg)											
Betrieb	Auspuff / Abgas	23%	490'725	29%	2'927	2%	666	1%	303	1%	51'736
	Schmieröl	2%	33'222	1%	119						
	Dieselherstellung	42%	907'625	37%	3'717	26%	10'917	12%	4'702	13%	770'404
	Wartung Fahrzeug					4%	1'456	2%	695	2%	142'228
	Wartung Strasse					3%	1'224	1%	384	1%	50'491
	Herstellung Strommix										
	brake wear emissions					14%	5'665	24%	9'365	22%	1'274'130
	road wear emissions					8%	3'370	14%	5'571	13%	758'552
	tyre wear emissions					21%	8'477	35%	13'988	32%	1'902'306
Herstellung	Herstellung BMTF	34%	736'088	33%	3'342	11%	4'590	6%	2'229	7%	419'574
	Herstellung Strasse					12%	4'921	6%	2'256	9%	539'283
	Entsorgung	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
	Herstellung Batterie										
Particulates, > 2.5 um, and < 10um (mg)											
Betrieb	Auspuff / Abgas	0%	-	0%	-						
	Schmieröl	1%	10'376	0%	38						
	Dieselherstellung	13%	250'667	12%	1'061	7%	2'699	3%	1'161	3%	191'260
	Wartung Fahrzeug					3%	1'311	2%	699	2%	118'752
	Wartung Strasse					1%	531	0%	167	0%	22'038
	Herstellung Strommix										
	brake wear emissions					22%	8'504	39%	14'124	34%	1'924'015
	road wear emissions					7%	2'859	13%	4'732	11%	645'145
	tyre wear emissions					9%	3'604	16%	5'970	14%	816'422
Herstellung	Herstellung BMTF	87%	1'682'775	88%	7'895	28%	10'923	15%	5'606	19%	1'056'210
	Herstellung Strasse					22%	8'504	11%	3'931	16%	936'316
	Entsorgung	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
	Herstellung Batterie										

Elektro-BMTF			**BM**				**TF**					
Stoff		Einheit	electricity, used in building machine, average/MJ/CH U		excavation, elektro hydraulic digger, average/m3/CH U		transport, freight, E-lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6/tkm/RER U		transport, freight, E-lorry 16-32 metric ton, EURO 6/tkm/RER U		transport, freight, E-lorry 32-40 metric ton, EURO 6/tkm/RER U	
IPCC GWP 100a		kg CO2 eq	5'897		21		87		43		7'951	
Nitrogen oxides		g	15'935		53		172		89		17'650	
NMVOC, non-methane volatile organic		mg	6'023'815		19'166		111'221		55'790		12'585'854	
Particulates, < 2.5 um		mg	4'315'899		15'317		46'707		44'780		7'070'924	
Particulates, > 2.5 um, and < 10um		mg	3'778'915		14'497		40'355		38'969		6'385'175	
THGE (kg CO2 eq)												
Betrieb	Auspuff / Abgas											
	Schmieröl		1%	54.1	2%	0.4						
	Dieselherstellung											
	Wartung Fahrzeug						1%	0.5	6%	2.6	0%	18.8
	Wartung Strasse						4%	3.7	3%	1.1	2%	150.3
	Herstellung Strommix		2%	96.7	8%	1.7	54%	46.7	46%	20.0	42%	3'307.8
Herstellung	Herstellung BMTF		14%	813.7	37%	7.6	12%	10.3	11%	4.6	11%	842.8
	Herstellung Strasse						21%	18.4	20%	8.4	25%	2'011.7
	Entsorgung						1%	0.0	1%	0.0	1%	0.0
	Herstellung Batterie		84%	4'935.5	53%	11.0	8%	6.7	14%	6.1	20%	1'550.5
Nitrogen oxides (g)												
Betrieb	Auspuff / Abgas											
	Schmieröl		1%	180.1	3%	1.4						
	Dieselherstellung											
	Wartung Fahrzeug						0%	0.7	5%	4.0	0%	29.7
	Wartung Strasse						3%	5.5	2%	1.7	1%	227.7
	Herstellung Strommix		3%	546.6	18%	9.3	41%	69.9	34%	30.0	28%	4'942.0
Herstellung	Herstellung BMTF		7%	1'191.9	21%	10.9	10%	17.7	9%	8.3	9%	1'560.3
	Herstellung Strasse						34%	58.2	30%	26.6	36%	6'354.0
	Entsorgung						1%	0.0	1%	0.0	1%	0.0
	Herstellung Batterie		88%	14'022.7	59%	31.2	11%	19.1	20%	17.5	25%	4'394.9
NMVOC (mg)												
Betrieb	Auspuff / Abgas											
	Schmieröl		9%	566'841	23%	4'427						
	Dieselherstellung											
	Wartung Fahrzeug						0%	404	4%	2'271	0%	16'739
	Wartung Strasse						2%	2'580	1%	809	1%	106'225
	Herstellung Strommix		1%	58'009	5%	993	4%	3'950	3%	1'674	2%	276'889
Herstellung	Herstellung BMTF		4%	252'398	12%	2'300	4%	4'871	4%	2'349	4%	463'159
	Herstellung Strasse						83%	92'202	76%	42'177	80%	10'081'269
	Entsorgung						0%	0	0%	0	0%	0
	Herstellung Batterie		85%	5'144'338	60%	11'442	6%	6'985	12%	6'416	13%	1'610'989

Particulates, < 2.5 um (mg)											
Betrieb	Auspuff / Abgas										
	Schmieröl	0%	15'624	1%	122						
	Dieselherstellung										
	Wartung Fahrzeug					0%	107	1%	622	0%	4'582
	Wartung Strasse					2%	1'163	1%	375	1%	49'284
	Herstellung Strommix	5%	222'700	25%	3'814	33%	15'320	15%	6'762	16%	1'117'206
	brake wear emissions					12%	5'371	20%	9'135	18%	1'244'483
	road wear emissions					7%	3'209	12%	5'463	11%	742'447
	tyre wear emissions					17%	8'034	31%	13'658	26%	1'859'653
Herstellung	Herstellung BMTF	8%	346'135	20%	3'079	8%	3'849	4%	1'948	5%	369'102
	Herstellung Strasse					10%	4'671	5%	2'208	7%	526'784
	Entsorgung					0%	0	2%	1	0%	0
	Herstellung Batterie	87%	3'733'253	54%	8'302	10%	4'811	10%	4'568	16%	1'145'490
Particulates, > 2.5 um, and < 10um (mg)											
Betrieb	Auspuff / Abgas										
	Schmieröl	0%	4'875	0%	38						
	Dieselherstellung										
	Wartung Fahrzeug					0%	52	1%	311	0%	2'286
	Wartung Strasse					1%	488	0%	161	0%	21'199
	Herstellung Strommix	2%	57'817	7%	993	14%	5'569	6%	2'510	6%	414'398
	brake wear emissions					19%	7'829	35%	13'561	29%	1'851'701
	road wear emissions					7%	2'627	12%	4'559	10%	620'639
	tyre wear emissions					8%	3'313	15%	5'728	12%	785'377
Herstellung	Herstellung BMTF	21%	789'793	48%	6'944	22%	8'959	12%	4'793	14%	900'310
	Herstellung Strasse					19%	7'829	10%	3'764	14%	900'310
	Entsorgung					0%	0	0%	0	0%	0
	Herstellung Batterie	77%	2'924'880	45%	6'509	9%	3'640	9%	3'515	14%	887'539

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

M-System-Nr.