

Prüfung einer CO₂-Studie für das Neubauprojekt U5 der Hamburger Hochbahn AG

15. Juli 2022

Projekt-Nr. 2022032
Bericht-Nr. 2022032-001

Auftrag der

HOCHBAHN U5 Projekt GmbH
Überseering 10
22297 Hamburg

an die

STUVA
Studiengesellschaft für
Tunnel und Verkehrsanlagen e. V.
Mathias-Brüggen-Straße 41
50827 Köln

Prüfung der
THG-Roadmap
(BR-2102111-6)

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick.....	3
1.1	Ausgangssituation	3
1.2	Aufgabenstellung.....	4
1.3	Vorgehen.....	4
2	Teil 1: Prüfung der LPI-Studie.....	5
2.1	Kapitel 2 „Strategie und Vorgehen“	5
2.2	Kapitel 3 „Beschreibung des Bauwerks und des betrachteten Systems“	6
2.3	Kapitel 4 „Untersuchungsrahmen der überschlägigen THG-Bilanz“	7
2.4	Kapitel 5 „Überschlägige Sachbilanz“	7
2.5	Kapitel 6 „Wirkungsabschätzung der THG-Potentiale für betrachtete Bereiche“	10
2.6	Kapitel 7 „Ergebnisübersicht der Bilanzierung für ‚Baseline‘ und ‚Zielszenario‘“	15
2.7	Kapitel 8 „Zielszenario – Wege zu einer zusätzlichen Reduzierung des THG-Potentials [...]“	15
2.8	Kapitel 9 „Roadmap 2040“	16
2.9	Kapitel 10 „Zukünftige Entwicklungspotentiale und weitere Schritte“	16
2.10	Fazit	17
3	Teil 2: Gegenüberstellung der Privatstudie und der LPI-Studie.....	18
3.1	Vorstellung Privatstudie	18
3.2	Vorgehen bei der Gegenüberstellung der Studien	18
3.3	THG-Emissionen aus der Materialherstellung	19
3.4	THG-Emissionen aus dem Energieverbrauch.....	22
3.5	THG-Emissionen aus dem Materialtransport.....	23
3.6	Fazit	24
4	Gesamtfazit	25
5	Literatur	26

1 Überblick

1.1 Ausgangssituation

Die in den vergangenen Jahrzehnten – und immer noch anhaltende – Zunahme der Treibhausgase (THG) in unserer Atmosphäre und die damit einhergehenden Auswirkungen auf das Klima erfordern eine konsequente Klimapolitik, welche sich in der aktuellen europäischen sowie nationalen Gesetzgebung widerspiegelt. Der Themenkomplex Klima- und Umweltschutz erhält daher auch im gesamten Bauwesen – einschließlich des unterirdischen Verkehrswegebbaus – einen immer größeren Stellenwert. Die zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist, mit welchen Maßnahmen der Treibhausgasausstoß bereits während der Bauphase effizient gesenkt werden kann.

Aus diesem Grund sind ganzheitliche Klimabilanzen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks anzustreben – vom Bau, über den Betrieb bis zum Rückbau –, um die anfallenden Treibhausgasemissionen zu ermitteln und mögliche Einsparpotentiale zu identifizieren. Das vorrangige Ziel dieser Anstrengungen muss es für die gesamte Baubranche sein, dass das Bauen an sich nicht durch die Klimawirkungen infolge des Baus in Frage gestellt wird, wenn durch das Bauwerk insgesamt positive ökonomische, soziale oder auch andere ökologische Ziele sowie Effizienzsteigerungen erzielt werden. Schlussendlich sollte die Emission von Treibhausgasen insgesamt reduziert werden, sowohl auf Seite der Baustoffe als auch bei den Bauverfahren.

Als Treibhausgase gelten dabei im Wesentlichen Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), und Lachgas (N_2O) sowie wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), Schwefelhexafluorid (SF_6) und Stickstofftrifluorid (NF_3) [1].

Der größte Anteil an Treibhausgasemissionen wird durch Kohlendioxid verursacht, welches insbesondere bei der fossilen Energiegewinnung entsteht. Darüber hinaus gibt es teils relevante rohstoffbedingte Prozessemissionen, unter anderem bei der Zementherstellung infolge der Kalzinierung von Kalkstein zu Branntkalk beim Brennen von Zementklinker. Daher wird das Treibhauspotential aller übrigen Treibhausgase auch relativ in Bezug zum CO_2 -Treibhauspotential durch das „Globale Erwärmungspotential“ (kurz GWP) normiert. Mit Hilfe des GWP können somit für alle Treibhausgase sogenannte CO_2 -Äquivalente (oder CO_2e) angegeben und deren Treibhauswirkungen verglichen bzw. aufsummiert werden. Emittiert beispielsweise ein Prozess 1 kg Methan (GWP 25), so entspricht dies den gleichen Treibhausgasemissionen – nämlich 25 kg CO_2 -Äquivalente (CO_2e) – wie bei einem Prozess, bei dem 25 kg Kohlendioxid (GWP 1) ausgestoßen werden.

Die ÖKOBAUDAT [2] als freizugängliche Datenbank vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) enthält für eine Vielzahl verschiedener Prozesse und Materialien das entsprechende spezifische GWP. Zumeist wird dabei über entsprechende Module jeweils zwischen den Emissionen aus der Herstellung (A1-A3), dem Transport (A4), dem Einbau (A5), der Nutzung (B1), dem Abbruch inkl. Abfallbehandlung (C1-C3) sowie dem Recyclingpotential (D) unterschieden.

1.2 Aufgabenstellung

Hintergrund der vorliegenden Prüfung ist das Bestreben der Hamburger Hochbahn AG die Klimawirkungen beim Neubauprojekt U5 ganzheitlich zu erfassen, zu bewerten und mit Hilfe eines strategischen Konzepts die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren. Schwerpunktmäßig stehen dabei jene Klimawirkungen im Vordergrund, welche sich aus den beim Bau entstehenden Treibhausgasen ergeben. Zur Unterstützung bei diesem Vorhaben wurde die LPI Ingenieurgesellschaft mbH beauftragt, eine Reduktionsstrategie für das Treibhausgas-Potential (THG-Potential) in Form einer sogenannten Roadmap zu entwickeln.

Mit Schreiben vom 16. Juni 2022 hat die Hamburger Hochbahn AG die STUVA damit beauftragt, diese THG-Roadmap Studie der LPI Ingenieurgesellschaft mbH (nachfolgend „LPI-Studie“ genannt) mit Stand 17. Juni 2022 zu prüfen.

Das Ziel ist, die grundsätzlichen Methoden und Annahmen, welche in der LPI-Studie zur Anwendung kommen, auf Plausibilität und Nachvollziehbarkeit zu überprüfen. Es sollen schwerpunktmäßig die identifizierten Strategien und Maßnahmen zur Reduktion des THG-Potentials bezüglich ihrer Realisierbarkeit und Zweckmäßigkeit kritisch hinterfragt und Empfehlungen abgeleitet werden.

In einem zweiten Teil dieser Studie soll eine Gegenüberstellung der LPI-Studie mit einer privat erstellten CO₂-Bilanzierung (nachfolgend „Privatstudie“ genannt) erfolgen, welche im vergangenen Jahr über die Lokalpresse veröffentlicht wurde [3]. Ein besonderes Augenmerk richtet sich dabei auf etwaige Unterschiede bzw. Widersprüche zwischen der LPI-Studie und der Privatstudie.

Eine explizite Prüfung aller – sowohl in der LPI-Studie als auch in der Privatstudie – angesetzten Mengen bzw. Massen erfolgt nicht. An verschiedenen Stellen werden jedoch auffällige Mengenansätze hinterfragt.

1.3 Vorgehen

Die Prüfung von LPI-Studie und Privatstudie erfolgt in zwei Teilen. Im ersten Teil wird zunächst eine isolierte Analyse der LPI-Studie durchgeführt. Im zweiten Teil erfolgt eine vergleichende Gegenüberstellung von LPI-Studie einerseits und Privatstudie andererseits.

Die Analyse im ersten Teil der Prüfung erfolgt in der Reihenfolge der Kapitel der LPI-Studie. Dabei erfolgt für jedes Kapitel (ausgenommen Kapitel 1 „Allgemeines und Aufgabenstellung“) eine dreiteilige Untergliederung in 1. eine kurze inhaltliche Zusammenfassung, 2. eine Prüfung auf Plausibilität und Nachvollziehbarkeit sowie gegebenenfalls 3. Verbesserungspotentiale. Die Plausibilitätsprüfung zielt darauf ab, relevante Parameter bzw. getroffene Annahmen anhand von eigenen Erfahrungswerten bzw. Nachberechnungen zu überprüfen. Die Nachvollziehbarkeit soll sicherstellen, dass das Vorgehen bzw. die Berechnungen insbesondere für außenstehende Personen im ausreichenden Maße erläutert wird. Sofern es zu wesentlichen Unstimmigkeiten bei der

Plausibilität oder der Nachvollziehbarkeit kommt, sollen nachfolgend entsprechende Verbesserungspotentiale genannt werden.

Im zweiten Teil – der Gegenüberstellung der LPI-Studie mit der Privatstudie – erfolgt ein Vergleich der getroffenen Annahmen, der Mengenermittlungen sowie den THG-Emissionen. Dabei sollen etwaige Unterschiede und Widersprüche aufgezeigt, anhand ausgewählter wesentlicher Einzelpositionen gegenübergestellt sowie schlussendlich kritisch hinterfragt werden. Hierfür sind im Sinne einer ABC-Analyse zunächst jene Einzelpositionen zu identifizieren, welche die höchsten THG-Emissionen zur Folge haben. Anschließend sind die in diesen Positionen getroffenen Annahmen aus ingenieurtechnischer Sicht auf Plausibilität zu prüfen. Hierfür sind gegebenenfalls eigene überschlägige Berechnungen anzustellen.

2 Teil 1: Prüfung der LPI-Studie

2.1 Kapitel 2 „Strategie und Vorgehen“

2.1.1 Zusammenfassung

In Kapitel 2 werden die wesentlichen strategischen Ziele der Studie festgelegt sowie ferner die für das Erreichen eben jener Ziele gewählten Ansätze beschrieben. Das übergeordnete Ziel stellt in diesem Zusammenhang eine THG-reduzierte Bauweise dar. Schwerpunktmäßig stehen somit jene Aspekte im Vordergrund, welche mit der Erstellung des Bauwerks im Zusammenhang stehen.

Ausgehend von den genannten Zielen bzw. Ansätzen wird das Vorgehen beschrieben, um schlussendlich von der derzeitigen konventionell geplanten hin zu einer klimaschonenderen Herstellung der U-Bahnlinie U5 zu gelangen.

2.1.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Die vorgestellte Strategie ist insbesondere für den Infrastrukturbau als innovativ und in dieser Detailausarbeitung als einmalig zu bezeichnen. Die Berücksichtigung sowohl technischer als auch organisatorischer Belange ermöglicht es einerseits, neue klima- und ressourcenschonende Materialien bzw. Bauverfahren beim Bau der U-Bahnlinie U5 anzuwenden. Andererseits wird auch für zukünftige Infrastrukturprojekte eine Grundlage geschaffen, derartige Projekte nachhaltig zu planen, auszuschreiben und zu bauen.

Das grundsätzliche Vorgehen beruht im Wesentlichen auf zwei Szenarien, welche über den Zeithorizont bis 2040 aufgespannt sind. Dies ermöglicht einen kontinuierlichen Soll-Ist-Vergleich in Abhängigkeit des Baufortschritts. Das sogenannte Baseline-Szenario stellt in diesem Zusammenhang ein Trendszenario dar, d. h. es beschreibt die Entwicklung der THG-Emissionen ausgehend vom derzeitigen Planungstand bei unveränderter konventioneller Bauweise. Das Zielszenario stellt ein sogenanntes Best-

Case-Szenario dar, dessen Realisierung insbesondere auch von industriellen Entwicklungen in der Zement- und Stahlindustrie abhängig ist. Dabei wird angenommen, dass aus heutiger Sicht potenziell mögliche Verbesserungen der Bauweisen bzw. der Baumaterialien umgesetzt und so zu einer signifikanten Reduktion von THG-Emissionen führen werden. Ein Worst-Case-Szenario wird hingegen nicht entwickelt. Dies erscheint jedoch auch nicht notwendig, da davon auszugehen ist, dass zukünftig keine klimaschädlicheren Bauverfahren bzw. Materialien als bislang zum Einsatz kommen werden.

2.1.3 Verbesserungspotentiale

Die Beschreibung der angestrebten Ziele und des Vorgehens ist insgesamt als nachvollziehbar und plausibel zu bewerten, sodass sich an dieser Stelle keine Verbesserungspotentiale ergeben.

2.2 Kapitel 3 „Beschreibung des Bauwerks und des betrachteten Systems“

2.2.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird das Gesamtbauwerk der U-Bahnlinie U5 vorgestellt. Neben allgemeinen Informationen über die Gesamtlänge von 25 km sowie über die neu zu errichtenden 23 Haltestellen wird auf einzelne Planungs- und Bauabschnitte eingegangen. So befindet sich der Bauabschnitt U5-Ost bereits in der Ausschreibungsphase, die bauvorbereitenden Maßnahmen haben bereits begonnen; im Gegensatz dazu ist für die U5-Mitte gerade erst die Vorplanung abgeschlossen.

2.2.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Die wesentlichen Informationen über das Gesamtprojekt U5 werden hinreichend beschrieben. Insbesondere die Unterschiede bezüglich des Planungsstandes der beiden Bauabschnitte werden verständlich erläutert sowie dargelegt, dass es dadurch bei der späteren THG-Bilanzierung zu Abweichungen zwischen der U5-Ost bzw. U5-Mitte kommen kann.

2.2.3 Verbesserungspotentiale

Auf Grund des lediglich beschreibenden Charakters dieses Kapitels ergeben sich keine Verbesserungspotentiale.

2.3 Kapitel 4 „Untersuchungsrahmen der überschlägigen THG-Bilanz“

2.3.1 Zusammenfassung

Die Grenzen des Untersuchungsrahmens der LPI-Studie sowie das allgemeine Bilanzierungsvorgehen sind Gegenstand des Kapitel 4. In Bezug auf den Untersuchungsrahmen wird der Prozess zur Bildung der einzelnen Kategorien, welche im Rahmen der eigentlichen Bilanzierung berücksichtigt werden, erläutert. Ausgehend von den größten THG-Emittenten, der Stahlbeton- und Stahlbauweise, werden sukzessive weitere Bereiche ermittelt, die einerseits wesentlicher Bestandteil der Bauwerkserstellung sind oder andererseits hohe THG-Emissionen erwarten lassen.

Die Grenzen ergeben sich aus dem in Kapitel 2 formulierten Ziel, der THG-reduzierten Bauweise. Diese werden so festgelegt, dass sich die Bilanzprognose auf die Errichtung des erweiterten Rohbaus beschränkt. Daraus folgt, dass bei der späteren THG-Bilanzierung im Wesentlichen nur die Module A1 bis A5 gemäß ÖKOBAUDAT zu berücksichtigen sind.

2.3.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Die allgemeine Beschreibung des Untersuchungsrahmens bzw. des Vorgehens bei der Bilanzierung sind stimmig und gut formuliert. Lediglich die Ausnahme für die Stahlbauweise, welche bei den berücksichtigten Modulen zu einer Erweiterung auf die Modul C und D führt, erscheint nicht plausibel und führt innerhalb der Studie zu einzelnen widersprüchlichen Aussagen, auf die in Abschnitt 2.5.2 dieser Prüf-Studie konkret eingegangen wird. Der Ansatz der Module C und D sollte daher genauer begründet oder angepasst werden.

2.3.3 Verbesserungspotentiale

Bezüglich der generellen Beschreibung ergeben sich keine Verbesserungspotentiale. Die erwähnten Widersprüche sind jedoch auszuräumen, Einzelheiten hierzu siehe Abschnitt 2.5.3 dieser Prüf-Studie.

2.4 Kapitel 5 „Überschlägige Sachbilanz“

2.4.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der überschlägigen Sachbilanz erfolgt die Ermittlung aller für die THG-Bilanzierung relevanten Mengen sowie der zugehörigen Materialeigenschaften für das Baseline-Szenario, differenziert nach den Bauabschnitten U5-Ost und U5-Mitte. Dies begründet sich durch die unterschiedlichen Planungsphasen der beiden Bauabschnitte und dem damit einhergehenden Detailierungsgrad der gegenwärtig verfügbaren Informationen. So liegen für den Abschnitt U5-Ost bereits detaillierte Angaben über die

einzelnen Bauwerke und den damit verbundenen Materialmengen aus den Ausschreibungsunterlagen (Leistungsphase 5) vor. Für den Abschnitt U5-Mitte, welcher sich in der Leistungsphase 2 „Vorplanung“ befindet, werden die Materialmengen hingegen vielfach durch Schätzungen ergänzt. Letzteres ermöglicht jedoch eine Anpassung in der sogenannten „Vorplanung 2.0“, in der aktuell eine Optimierung der Materialmengen vorgenommen wird. Diese Mengenanpassung wird im Zielszenario für den Abschnitt U5-Mitte berücksichtigt und führt dort zu Änderungen bzw. Verschiebungen der benötigten Materialmengen.

2.4.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Das grundsätzliche Vorgehen, d. h. die Bilanzierung entsprechend der Bauweise durchzuführen, ist als zweckmäßig zu bewerten, da so Unterschiede in den Bauweisen bzw. -verfahren gut erkennbar und entsprechende THG-Potentiale direkt ersichtlich sind. Ferner ist eine Aufteilung in die beiden Bauabschnitte U5-Ost und U5-Mitte zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Planungsphasen sinnvoll.

Die neun gewählten Kategorien zur Einteilung der Bauweisen bzw. Bauverfahren umfassen dabei das gesamte Spektrum an Tätigkeitsfeldern zur Erstellung des erweiterten Rohbaus und spiegeln im Wesentlichen die größten THG-Emittenten wider. Lediglich wird eine eigene Kategorie für den An- und Abtransport des Materials, ausgenommen der Erdarbeiten, aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit empfohlen. Jedoch werden etwaige THG-Emissionen aus dem Transport bereits in den Umweltproduktdeklarationen durch das Modul A4 berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.5). Nachfolgend erfolgt auszugsweise noch eine dezidierte Erläuterung einzelner Kategorien.

Stahlbetonbauweise und Spezialtiefbau

Bei der Einteilung in Stahlbetonbauweise bzw. Spezialtiefbauarbeiten ist nicht klar ersichtlich, auf Basis welches Kriteriums eine Zuordnung in eine der beiden Kategorien erfolgt. Dies gilt vor allem für Schlitzwände, welche an sich wie Mikropfähle und DSV-Körper ebenfalls dem Spezialtiefbau zuzuordnen sind.

Einerseits ist für Schlitzwände charakteristisch, dass ihre Herstellung mit einem zusätzlichen Materialeinsatz verknüpft ist und teils energieintensives Equipment benötigt wird, das nicht unbedingt durch den typischen Baustrom abgedeckt wird. Beide genannten Punkte sprechen für eine Zuordnung in die Kategorie „Spezialtiefbauarbeiten“, da sie insbesondere mit einem gesteigerten THG-Potential verbunden sind. Konkret werden für Schlitzwände Separationsanlagen mit Pumpen, Hydrozyklonen und Schwingsieben zur Aufbereitung der Stützflüssigkeit benötigt.

Andererseits erhalten Schlitzwände eine Bewehrung, was bei den anderen beiden genannten Spezialtiefbauverfahren nicht der Fall ist (Mikropfähle erhalten vielmehr einen zentrisch angeordneten Stahlkern), sodass daher prinzipiell auch eine Zuordnung zur „Stahlbetonbauweise“ möglich ist. Die getätigte Zuordnung ist somit grundsätzlich nicht als falsch zu bewerten, wenngleich die Komplexität und die damit verbundenen zusätzlichen stofflichen und energetischen Aufwände so in den Hintergrund rücken (siehe Abschnitt 2.5.2). Kritiker könnten dies fehlinterpretieren. Daher wäre es

empfehlenswert eine Umgruppierung der Schlitzwandarbeiten aus dem Bereich „Stahlbetonbauweise“ in den Bereich „Spezialtiefbauarbeiten“ vorzunehmen.

Durch die aufgeführten Mengen Beton sowie den für die Bewehrung benötigten Stahl lässt sich der mittlere Bewehrungsgehalt ermitteln. Dieser beträgt für den Bauabschnitt U5-Ost rund 78 kg/m^3 und für den Abschnitt U5-Mitte ca. 105 kg/m^3 . Beide Werte sind grundsätzlich als plausibel anzusehen, werden aber nicht konkret belegt. Der Unterschied könnte damit begründet sein, dass die unterschiedlich detaillierten Planungsunterlagen auf der sicheren Seite liegend zu einer höheren Annahme des Bewehrungsgehalts beim Bauabschnitt U5-Mitte führen. Dieser könnte im weiteren Planungsprozess noch reduziert werden.

Maschinelles Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM)

Im Rahmen der Energiebedarfsermittlung für den maschinellen Tunnelvortrieb werden in der LPI-Studie keine Angaben zur erforderlichen Leistung der TBM gemacht. Daher wird nachfolgend die benötigte Leistung der Tunnelbohrmaschine für die U5-Ost zunächst auf Basis eigener Erfahrungswerte abgeschätzt und sich daraus ergebende Energieverbräuche ermittelt. Dabei werden folgende Annahmen getroffen.

Die Bauzeit für den maschinellen Vortrieb beträgt rund 2,5 Jahre für die U5-Ost. Dabei sind in der Regel erhebliche Stillstandszeiten, einerseits für unplanmäßige Stillstände (z. B. Ausfälle aus Defekten und Logistik) und andererseits für planmäßige Stillstände (z. B. Wechsel der Abbauwerkzeuge am Schneidrad) von etwa der Hälfte der Bauzeit anzunehmen. Auf der Grundlage von Erfahrungswerten beträgt die installierte Gesamtleistung bei vergleichbaren Tunnelbohrmaschinen (mit einem Schneidraddurchmesser von rund 10 m) 7.000 bis 9.000 kW. Unter Einbeziehung einer üblichen Sicherheitsreserve von 50 % beträgt die für den Betrieb in etwa erforderliche Leistung der TBM rund $8.000/1,50 = 5.333 \text{ kW}$.

Für die Bauzeit von 2,5 Jahren unter Berücksichtigung der erwähnten Stillstandszeiten ergibt sich damit ein Energiebedarf von ca. $2,5 \cdot \frac{1}{2} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 5.333 \approx 58.400.000 \text{ kWh}$ bzw. 58.400 MWh. Neben dem Energiebedarf der TBM selbst ist ergänzend eine Separationsanlage zur Aufbereitung der Stützflüssigkeit und Abscheidung des Ausbruchmaterials zu berücksichtigen. Unter der Annahme einer auf die TBM-Größe abgestimmten Separationsanlage mit einer Kapazität von 2.000 bis 2.500 m^3/h kann von einer Leistungsaufnahme der Separationsanlage von rund 1.700 kW ausgegangen werden. Unter Ansatz einer hierfür üblichen Sicherheitsreserve von etwa 40 % sowie identischen Randbedingungen bezüglich Bauzeit und Stillstandszeiten wie der TBM selbst resultiert ein Energiebedarf von ca. $2,5 \cdot \frac{1}{2} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 1.700/1,40 \approx 13.300.000 \text{ kWh}$ bzw. 13.300 MWh. Der so ermittelte Gesamtstromverbrauch für den maschinellen Tunnelvortrieb beläuft sich damit auf ca. $58.400 + 13.300 = 71.700 \text{ MWh}$ (Tabelle 1), was ziemlich exakt dem in der LPI-Studie angegebenen Verbrauch von 70.000 MWh entspricht, so dass dieser als plausibel angesehen werden kann.

Tabelle 1: Nachberechnung des Gesamtstromverbrauchs beim maschinellen Tunnelvortrieb

	Menge	Einheit
Leistung TBM (inkl. Sicherheitsreserve)	8.000	kW
Sicherheitsreserve TBM	50	%
Leistung Separation (inkl. Sicherheitsreserve)	1.700	kW
Sicherheitsreserve Separation	40	%
Bauzeit	2,5	Jahre
	<i>entspricht</i>	913
Stillstandzeiten (1/2 der Bauzeit)	456	Tage
Stromverbrauch TBM	58.400	MWh
Stromverbrauch Separation	13.300	MWh
Gesamtstromverbrauch maschineller Vortrieb	71.700	MWh

2.4.3 Verbesserungspotentiale

Aus fachlicher Sicht ergeben sich im Kapitel 5 keine Verbesserungspotentiale. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird jedoch empfohlen, folgende Anmerkungen zu berücksichtigen.

- Die Zuordnung der Schlitzwände zur Stahlbetonbauweise statt zu den Spezialtiefbauarbeiten sollte näher erläutert werden.
- Die Gründe für die Annahme unterschiedlicher Bewehrungsgehalte bei U5-Ost bzw. U5-Mitte sollten möglichst konkret benannt werden.
- Eine Kategorie bzw. weitere erläuternde Informationen für den Materialtransport sollte in Analogie zum Bodenmanagement zwecks besserer Übersichtlichkeit mit entsprechenden Kennzahlen eingeführt werden, beispielsweise aus den Umweltproduktdeklarationen.
- Für die Wasserhaltung sowie -aufbereitung sollte eine überschlägige Berechnung der Pumpenleistung ergänzt bzw. entsprechende Eingangskennzahlen angegeben werden.

2.5 Kapitel 6 „Wirkungsabschätzung der THG-Potentiale für betrachtete Bereiche“

2.5.1 Zusammenfassung

Nach Ermittlung der erforderlichen Mengen erfolgt in diesem Kapitel eine Abschätzung der sich ergebenden THG-Emissionen. Zusätzlich werden zur Bilanzierung des Baseline-Szenarios auch material- und prozessspezifische Optimierungen beschrieben und deren Auswirkungen im Zielszenario dargestellt.

Die diesbezüglich zur Bilanzierung benötigten THG-Potentiale stammen überwiegend aus der freizugänglichen Datenbank ÖKOBAUDAT und berücksichtigen dabei die

materialimmanenten Emissionen sowohl aus der Herstellung (A1 bis A3) als auch aus dem Transport (A4) und dem Einbau (A5).

2.5.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Für jede Kategorie (siehe Abschnitt 2.4.2) wird zunächst die Herkunft der Emissionen näher erläutert. Im Konkreten werden dort einerseits Angaben über die berücksichtigten Materialien oder Prozesse aufgeführt, welche zu den THG-Emissionen beitragen. Andererseits wird beispielsweise auch das Modul gemäß ÖKOBAUDAT mit dem größten Emissionsanteil angegeben. Insbesondere Letzteres ermöglicht es, gezielt sinnvolle Optimierungswege bzw. -potentiale zu identifizieren.

Es folgt die Ermittlung der THG-Emissionen, jeweils getrennt für das Baseline-Szenario sowie das Zielszenario. Für beide Szenarien werden entsprechende Angaben erläutert, auf deren Basis die THG-Bilanzierung vorgenommen wird, beispielsweise zu den gewählten Transportentfernungen. Speziell für das Zielszenario werden darüber hinaus Maßnahmen zur Optimierung der im Baseline-Szenario ermittelten THG-Emissionen genannt und detailliert beschrieben. Beispielsweise beziehen sich die im Zielszenario der Stahlbetonbauweise berücksichtigten Optimierungswege bzw. -maßnahmen im Wesentlichen auf die betontechnologische Ebene und geben den aktuellen Wissensstand wieder. Die angesetzten GWP sind um bis zu 25 % niedriger als im Baseline-Szenario und entsprechen damit den zu erwartenden Einsparpotentialen.

Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erfolgt an dieser Stelle eine dezidierte Betrachtung ausgewählter Kategorien.

Stahlbetonbauweise

Die Stahlbetonbauweise weist typischerweise den größten Anteil an THG-Emissionen bei der Herstellung eines Bauwerks auf. Folglich sind große Einsparpotentiale bei eben dieser Bauweise möglich. Entsprechend wird im Rahmen der LPI-Studie detailliert auf die einzelnen Aspekte der Stahlbetonbauweise eingegangen, von denen jedoch zwei im Hinblick auf Plausibilität bzw. Nachvollziehbarkeit nicht detailliert genug aufgeschlüsselt sind und auf die im Folgenden daher näher eingegangen wird.

Ein Aspekt betrifft den Ansatz der Nutzungsdauer, d. h. die Recarbonatisierung des Betons. Die Herkunft der Emissionen wird im betreffenden Abschnitt zunächst ausführlich und nachvollziehbar erläutert. Die wesentlichen Module mit den höchsten Anteilen an den THG-Emissionen werden ebenso genannt wie der größte Faktor auf Materialebene – der Zementgehalt des Betons bzw. der darin enthaltene Zementklinker. Im Einklang mit dem übergeordneten Ziel – eine THG-reduzierte Bauweise – (siehe Abschnitt 2.1) werden die für die Herstellung eines Bauwerks wesentlichen Module (A1 bis A5) aufgeführt. In diesem Zusammenhang ist es jedoch nicht nachvollziehbar, warum bei der Zusammenstellung der spezifischen GWP nunmehr das Modul für die Nutzungsdauer (B1) berücksichtigt wird, welches zu einer (geringen) Reduzierung der THG-Emissionen je Kubikmeter führt.

Grundsätzlich ist die Annahme, dass durch Carbonatisierung die Betonbauteile Kohlendioxid aus der Luft aufnehmen, aus betontechnologischer Sicht richtig. Jedoch geschieht dieser Vorgang kontinuierlich über mehrere Jahrzehnte, d. h. nicht während der im Rahmen der LPI-Studie eigentlich fokussierten Bauzeit, sondern erst über die Nutzungsdauer. Darüber hinaus verringert sich die sogenannte Carbonatisierungstiefe und damit das CO₂-Aufnahmevermögen des Betons durch drei wesentliche Faktoren: 1. eine hohe Festigkeitsklasse, 2. eine lange und feuchte Nachbehandlung sowie 3. eine gute Verdichtung des Betons. Insbesondere die beiden letztgenannten Faktoren können bei dem gegenständigen Bauprojekt jedoch unterstellt werden. Dies und das oben erwähnte Ziel einer THG-reduzierten Bauweise lassen den Ansatz einer negativen THG-Emission in Höhe von -10 kg-CO₂-Äq./m³ über die Nutzungsdauer nicht plausibel erscheinen. Zumindest sollte eine Begründung für die gewählte Größenordnung ggf. unter Ausweisung der dafür getroffenen Annahmen angegeben werden. Klargestellt sei doch nochmals, dass eine solche Annahme grundsätzlich zulässig ist, in den branchenspezifischen Umweltproduktdeklarationen ausgewiesen wird und dies aufgrund des geringen Anteils zu keiner großen Änderung der THG-Gesamtemissionen führt.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Volumina der Baubehelfe, und hier im Speziellen die Schlitzwände, welche den insgesamt größten Mengenanteil aufweisen. Aus den Ausführungen wird nicht ersichtlich, ob es sich bei den aufgeführten Mengen lediglich um die tatsächlich einzubauenden Betonmengen handelt oder ob bereits bauverfahrensseitige Zuschläge berücksichtigt sind. Die in der LPI-Studie gewählte Zuordnung von Schlitzwänden, wonach diese unter „Stahlbetonbauweise“ und nicht etwa unter „Spezialtiefbauarbeiten“ fallen, legt jedoch den Schluss nahe, dass keine Zuschläge berücksichtigt sind.

Bei Schlitzwänden ist jedoch zu beachten, dass die in Plandaten aufgeführten Wandstärken als idealisierte Bauteilhöhe anzusehen sind. Im Gegensatz zum Hochbau, bei dem die Wandstärke durch den Einsatz einer Schalung vergleichsweise exakt vorgegeben wird, ist dies bei Schlitzwänden anders. Der Aushub des flüssigkeitsgestützten Erdschlitzes erfolgt zumeist mit einem speziellen Schlitzwandgreifer, der allein durch Seile (und nicht etwa starr wie bei einem Hydraulikbagger) geführt ist. Im Zuge des mehrmaligen Ablassens und Hinaufziehens des Schlitzwandgreifers bis zum Erreichen der Endtiefe, kommt es unweigerlich zu einem Mehraushub von Bodenmaterial im Vergleich zum theoretischen Volumen, das sich allein aufgrund der Breite des Schlitzwandgreifers ergeben würde. Dieser Mehraushub wird beim Betonieren nach dem Kontraktorverfahren ebenfalls mit Konstruktionsbeton verfüllt. Zudem kommt es infolge der Druckdifferenz zwischen fließfähigem Beton und Grundwasser zu einem Abströmen von Filtratwasser (also Wasser aus dem Beton) in den Baugrund. Der so entstandene Volumenverlust äußert sich ebenfalls in einem verfahrensbedingten Mehrverbrauch. Für beide Anteile, d. h. Mehraushub und Filtratwasserverlust, ist auf der Grundlage von Erfahrungswerten ein Mehrverbrauch von Beton in der Größenordnung von ca. 15 % unvermeidbar. Dieser Mehrverbrauch ist dementsprechend auch bei der GWP-Bilanzierung zu berücksichtigen.

Dementsprechend sollte das in der LPI-Studie angesetzte GWP in Tabelle 15 für das Schlitzwandverfahren von 215 auf 247 kg-CO₂-Äq./m³ erhöht werden. Dieser GWP-Wert bezieht sich dann also nicht mehr auf den Kubikmeter eingesetzten Beton,

sondern auf den Kubikmeter Schlitzwand mit einer Soll-Wandstärke. Eine weitere Erhöhung dieses Wertes könnte sinnvoll sein, falls die vergleichsweise energieintensiven Separationsanlagen, die für das Aufbereiten der Stützflüssigkeit bzw. das Abscheiden von Bodenkorn erforderlich sind, nicht unter den „allgemeinen Stromverbrauch“ (Abschnitt 5.9.1 der LPI-Studie) fallen. An der genannten Stelle sind Separationsanlagen zumindest nicht explizit erwähnt.

Basierend auf dem erhöhten GWP-Einzelwert für „Schlitzwand“ in Tabelle 15 der LPI-Studie resultiert auch eine Erhöhung für das „gewichtete, mittlere GWP“ von 214 auf 242 kg-CO₂-Äq./m³. Im nächsten Schritte erhöht sich folglich in Tabelle 16 der LPI-Studie das THG für die Summe aller Baubehelfe (U5-Ost und U5-Mitte) von 348.379 t-CO₂-Äq. auf das $242/214 = \text{ca. } 1,13\text{-fache}$, d. h. auf 393.961 t-CO₂-Äq. Damit erhöht sich schlussendlich auch die Gesamtlast „Stahlbetonbauweise“ für das Baseline-Szenario von 1.021.690 um 45.582 t-CO₂-Äq. bzw. ca. 4,5-% auf 1.067.272 t-CO₂-Äq.

Stahlbauweise

Für die Stahlbauweise gilt in Bezug auf die berücksichtigten Module ähnliches wie zuvor bei der Stahlbetonbauweise. So werden bei der Berechnung des GWP für den Stahl Gutschriften für Rückbau und Recycling (Module C und D) angesetzt. Zwar werden Stahlprofile mitunter nur für den temporären Baugrubenverbau verwendet – und für diese ist eine Berücksichtigung der Module Rückbau und Recycling angebracht. Jedoch ist kritisch zu diskutieren, ob die gesamte Stahlmenge lediglich temporär zum Einsatz kommt. Hier entsteht vielmehr ein Widerspruch zu den Aussagen im Abschnitt 5.3 der LPI-Studie sowie dem in Abschnitt 4.1 festgelegten Untersuchungsrahmen (siehe Abschnitt 2.3), wonach einerseits ein Anteil der Stahlbauwerke dem Dauerbauwerk zugerechnet werden, andererseits jedoch für die volle Stahlmenge ein Rückbau vorgesehen ist. Dies sollte in der Fortschreibung präzisiert werden.

Spezialtiefbau

Bei der Herstellung von DSV-Körpern tritt bauverfahrenstechnisch bedingt ein sogenannter Rücklauf am Bohrlochmund auf. Dies hat zur Folge, dass Mehrmengen an Zementsuspension und somit auch erhöhte THG-Emissionen im Vergleich zu einem Ersatz von Boden durch Zement im Verhältnis 1:1 zu beobachten sind. Die LPI-Studie berücksichtigt diese Tatsache und setzt dementsprechend ein hohes spezifisches GWP – inklusive eines Zuschlags von 10 % – in Höhe von 1.710 kg-CO₂-Äq./m³ an. Auf Basis eigener Erfahrungswerte wird dieser Wert als deutlich zu hoch angesehen.

Grundsätzlich hängt das zu erwartende GWP von einer Vielzahl von Einflussfaktoren, z. B. Bodenkennwerten oder Herstellungsverfahren, etc. ab. Ein GWP von 1.100 kg-CO₂-Äq./m³ ist im vorliegenden Fall als durchaus realistisch anzusehen und würde zu einer Verringerung der THG-Emissionen von derzeit 829.905 t-CO₂-Äq. gemäß der LPI-Studie auf 533.857 t-CO₂-Äq. führen. Dies entspricht einer Differenz von ca. 296.000 t-CO₂-Äq.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung des GWP ergibt sich aus Sicht der Gutachter in Bezug auf die anfallende Rückflusssuspension, welche nach dem Stand der Technik

in der Regel auf einer Deponie entsorgt wird. Aktuell sind spezielle Messsysteme und Aufbereitungsverfahren bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, so dass der Rücklauf zukünftig aufbereitet und erneut zur Herstellung von DSV-Körpern benutzt werden kann.

Schienensystem

Die THG-Emissionen des Schienensystems ergeben sich maßgeblich einerseits durch die verwendete Schienengüte und andererseits durch die Wahl des Schienenprofils. Die Schienengüte hängt dabei von einer Vielzahl verschiedener Anforderungen ab, beispielsweise den geplanten Instandhaltungsintervallen oder der angestrebten Gleisliegedauer, und hat direkten Einfluss auf die bei der Herstellung ausgestoßenen THG-Emissionen. Ferner wird über das Schienenprofil das sich ergebende Gewicht und damit die erforderliche Schienenstahlmenge festgelegt. In der Regel kann ein Schienengewicht von 50 kg/m angesetzt werden.

In der LPI-Studie wird für die Systemvariante „feste Fahrbahn“ nur das reine Schienensystem ohne Betonunterkonstruktion berücksichtigt und ein GWP von 85 kg-CO₂-Äq./m angesetzt. Das Schienensystem besteht dabei aus zwei Schienensträngen und einer Stromschiene. Bei Ansetzung des oben aufgeführten Schienengewichts – für die Stromschiene wird vereinfacht dasselbe Gewicht angesetzt – ergibt sich aus dem GWP für das Schienensystem ein spezifisches GWP für den Stahl in Höhe von knapp $85/(3 \cdot 50/1000) = 570$ kg-CO₂-Äq./t. Dieser Wert erscheint vor dem Hintergrund üblicher THG-Emissionen aus der Stahlherstellung als zu niedrig.

Da die wesentlichen Anforderungen an das Schienensystem nicht bekannt sind, kann an dieser Stelle keine adäquate Vergleichsrechnung erfolgen. Aufgrund des geringen Anteils des Schienensystems an den THG-Gesamtemissionen der U5 kann dennoch angenommen werden, dass ein größeres spezifisches GWP für den Schienenstahl im Verhältnis nur zu sehr geringfügig höheren THG-Gesamtemissionen führt.

2.5.3 Verbesserungspotentiale

Aus fachlicher Sicht sowie aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird empfohlen, folgende Anmerkungen in Kapitel 6 zu berücksichtigen bzw. zu ergänzen:

- Anpassung, d. h. Erhöhung des angesetzten GWP der Schlitzwände im Baseline-Szenario.
- Überprüfung des angesetzten GWP der DSV-Körper im Baseline-Szenario.
- Streichung der Nutzungsphase bei der Berechnung des GWP des Stahlbetons oder alternativ Darlegung der Gründe.
- Vereinheitlichung der Aussagen zu den verwendeten Modulen bei der Stahlbauweise in den Kapitel 4, 5 und 6.
- Aufschlüsselung der Berechnungen zum GWP in der Kategorie Schienensysteme sowohl für das geschotterte System als auch für die feste Fahrbahn.
- Überprüfung der voraussichtlich rundungsbedingten Unterschiede im angesetzten GWP in den Tabellen 14 und 15 für den Beton der Festigkeitsklasse C30/37.

- Überprüfung der voraussichtlich rundungsbedingten Unterschiede im angesetzten Volumen der DSV-Körper für U5-Ost in Tabelle 8 (Kapitel 5.6) und Tabelle 28.

2.6 Kapitel 7 „Ergebnisübersicht der Bilanzierung für ‚Baseline‘ und ‚Zielszenario‘“

2.6.1 Zusammenfassung

In Kapitel 7 erfolgt eine Zusammenfassung der bisherigen Kapitel und wesentlicher Ergebnisse. Abschließend werden ermittelte THG-Emissionen grafisch dargestellt.

2.6.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Unter dem Aspekt der Nachvollziehbarkeit sollten möglichst alle Ergebnisse der Bilanzierung in tabellarischer Form dargestellt werden. An dieser Stelle erscheint zudem eine strikte Unterscheidung der Bauabschnitte U5-Ost und U5-Mitte zweckmäßig, um die unterschiedliche Planungstiefe zu berücksichtigen.

2.6.3 Verbesserungspotentiale

Folgende Ergebnisse sollten in einer tabellarischen Darstellung enthalten sein:

- THG-Emissionen der einzelnen Kategorien.
- THG-Gesamtemissionen, getrennt für die Bauabschnitte U5-Ost und U5-Mitte.
- THG-Gesamtemissionen der U5.

2.7 Kapitel 8 „Zielszenario – Wege zu einer zusätzlichen Reduzierung des THG-Potentials [...]“

2.7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Kapitel 8 werden die zukünftig erwartbaren Innovationen beschrieben, welche zu einer wesentlichen THG-Reduktion beitragen können. Der Fokus liegt vordergründig auf der Verbesserung der THG-Emissionen bei der Materialherstellung bzw. -verwendung. Im Speziellen werden Innovationen der Beton- und Zementindustrie sowie der Stahlindustrie vorgestellt. Diese sollen bereits innerhalb der nächsten zehn Jahre zum Einsatz kommen.

2.7.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Der Fokus auf die Beton- und Zementindustrie sowie der Stahlindustrie erscheint vor dem Hintergrund des hohen Anteils dieser Baustoffe an den THG-Gesamtemissionen zweckmäßig. Dennoch sei angemerkt, dass Klima- und Umweltschutz ganzheitlich zu betrachten sind und Bestrebungen zu Einsparungen in ausgewählten Segmenten nicht

zulasten anderer Bereiche gehen sollten. Da das Neubauprojekt U5 mit dem vorgestellten Weg der THG-Bilanzierung als eine Art Leuchtturm angesehen werden kann, sollten zukünftige Überlegungen im Rahmen der kontinuierlichen Implementierung, wie sie in der ingenieurtechnischen Strategie vorgesehen ist (Kapitel 2 der LPI-Studie), auch Bauverfahren bezüglich ihres THG-Verbesserungspotentials verstärkt berücksichtigen.

2.7.3 Verbesserungspotentiale

Mit Verweis auf oben genannten Hinweis ergeben sich keine weiteren Verbesserungspotentiale.

2.8 Kapitel 9 „Roadmap 2040“

2.8.1 Zusammenfassung

Kapitel 9 beschreibt die Verteilung der THG-Emissionen über die Gesamtbauzeit, wobei getrennt nach Baseline- und Zielszenario die jährlich anfallenden THG-Emissionen graphisch dargestellt sind. Für das Zielszenario werden in diesem Zusammenhang die in Kapitel 8 beschriebenen technologischen Fortschritte auf Seiten der THG-reduzierten Materialherstellung in Ansatz gebracht.

2.8.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Im Wesentlichen werden die im Kapitel 6 ermittelten THG-Emissionen grafisch über die Gesamtbauzeit dargestellt. Die sich ergebenden Unterschiede zwischen beiden Szenarien als Folge umgesetzter Maßnahmen werden erneut aufgenommen und nachvollziehbar erläutert.

2.8.3 Verbesserungspotentiale

Es ergeben sich keine Verbesserungspotentiale.

2.9 Kapitel 10 „Zukünftige Entwicklungspotentiale und weitere Schritte“

2.9.1 Zusammenfassung

Die angestrebte Gesamtstrategie, deren wesentlicher Teil die vorgestellte THG-Bilanzierung ist, wird im Kapitel 10 beschrieben. Als weitere Bausteine werden in diesem Zusammenhang das THG-Monitoring sowie das Bestreben einer Verankerung in alle Prozesse im Zuge Planung und Ausführung genannt. Das THG-Monitoring soll hierbei sowohl der kontinuierlichen Fortschreibung und Evaluierung der THG-Bilanzierung als auch durch Abgleich mit den tatsächlich verbauten Materialien als Soll-Ist-Vergleich dienen.

2.9.2 Plausibilität und Nachvollziehbarkeit

Die Vorstellung der Gesamtstrategie sowie der angestrebten Bausteine zeigt einen Weg auf, hin zu einer ganzheitlichen Klimabilanz über den Lebenszyklus eines Bauwerks. Dies ermöglicht einerseits, anfallende THG-Emissionen zu erfassen und andererseits entsprechende Einsparpotentiale zu identifizieren. Richtigerweise werden abschließend jene Herausforderungen aufgezeigt, die sich im Zusammenhang aktuellen finanziellen und vergaberechtlichen Möglichkeiten ergeben können bzw. sogar als wahrscheinlich zu erachten sind.

2.9.3 Verbesserungspotentiale

Aufgrund der ausführlichen Vorstellung der Gesamtstrategie bzw. Erläuterung der weiteren Schritte ergeben sich keine Verbesserungspotentiale.

2.10 Fazit

Wie einleitend in Abschnitt 1.2 erwähnt, ist es die vorrangige Aufgabe der vorliegenden Studie Plausibilität und Nachvollziehbarkeit der LPI-Studie zu prüfen. Dabei erfolgt eine kapitelweise Betrachtung der grundsätzlichen Strategien, Methoden und Annahmen. Auszugsweise werden zudem THG-Emissionen durch eigene Erfahrungswerte bzw. Nachberechnungen ingenieurtechnisch überprüft.

Im Ergebnis ist der methodische Aufbau der LPI-Studie als positiv zu bewerten. Das übergeordnete Ziel, die sich daraus ergebende Strategie sowie das Vorgehen werden im ersten Teil der Studie nachvollziehbar beschrieben. Die sich daran anschließende THG-Bilanzierung berücksichtigt die relevanten Aspekte der Bauwerkserstellung und ist aus ingenieurtechnischer Sicht plausibel dargestellt. Die erläuternden Ausführungen zu den zukünftigen technischen Innovationen der Beton- und Zementindustrie sowie bei der Stahlherstellung spiegeln den aktuellen Wissensstand wider.

Bei einer detaillierten Betrachtung ergeben sich bei der überschlägigen Sachbilanz (Kapitel 5) sowie der eigentlichen THG-Bilanzierung (Kapitel 6) einige wenige Verbesserungspotentiale. Bei der Sachbilanz betrifft dies vor allem Aspekte zur besseren Nachvollziehbarkeit. Hier sollte durch detailliertere Erläuterungen die Verständlichkeit noch weiter verbessert werden.

Im Rahmen der THG-Bilanzierung werden die Herkunft der Emissionen, die getroffenen Annahmen sowie das gewählte GWP überprüft. Festzuhalten bleibt, dass die für das Bauprojekt U5 ermittelten THG-Gesamtemissionen in Höhe von rund 2,7 Mio. t-CO₂ aus dem Baseline-Szenario im Wesentlichen als zutreffend zu bewerten sind. Lediglich bei den Schlitzwänden bzw. den DSV-Körpern weichen die gewählten GWP von den eigenen Erfahrungswerten ab, so dass es einerseits zu Mehrmengen an THG-Emissionen bei den Schlitzwänden kommt, dem andererseits aber Mindermengen an THG-Emissionen bei den DSV-Körpern gegenüberstehen. In Summe ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede bei den THG-Gesamtemissionen. In diesem Zusammenhang wird auch darauf hingewiesen, dass insbesondere das Schlitzwandverfahren sowie

die Herstellung der DSV-Körper von einer Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren abhängt, beispielsweise den Bodenverhältnissen, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vollumfänglich berücksichtigt werden können. Daraus resultierende Unsicherheiten beim Ansatz der GWP werden in der LPI-Studie durch entsprechende Zuschläge adäquat berücksichtigt.

3 Teil 2: Gegenüberstellung der Privatstudie und der LPI-Studie

3.1 Vorstellung Privatstudie

Im März 2021 erstellten Günther Betz, Thomas Philipp und Stefan Knittel unter dem Titel „Eine umweltfreundliche U-Bahn für Hamburg?“ eine private Studie über die CO₂-Bilanz beim Neubau der U5 in Hamburg. Die Autoren ermittelten in dieser Privatstudie die wahrscheinlich anfallenden CO₂-Emissionen während der Bauphase des Abschnitts U5-Ost (Tabelle 2). Im zweiten Schritt erfolgte eine Hochrechnung anhand der Tunnelmeter für den zweiten Abschnitt U5-Mitte sowie als Summe für die gesamte U5. Zum Abschluss wurde die Dauer bis zur Amortisierung der während der Bauphase ermittelten anfallenden CO₂-Emissionen berechnet, welche den CO₂-Einsparungen durch PKW- und Busumsteiger gegenüberstehen. Die Privatstudie konzentriert sich dabei auf drei wesentliche Aspekte der Bauwerkserstellung:

- den Materialtransport,
- die Materialherstellung, insbesondere der Stahlbetonbauwerke, sowie
- den Energieverbrauch.

Als Grundlage für die in der Privatstudie aufgestellten Berechnungen dienten die öffentlich ausgelegten Planungsunterlagen, Informationen seitens der Hamburger Hochbahn AG sowie weitere Presseveröffentlichungen. Ferner wurden Annahmen getroffen, welche teilweise auf Eigenrecherche oder Angaben von Baumaschinenherstellern basieren, jedoch keinen wissenschaftlichen Anspruch auf Richtigkeit bzw. Vollständigkeit erheben.

Tabelle 2: THG-Emissionen gemäß Privatstudie

Material	THG-Emissionen [t-CO ₂ -Äq.]
Materialtransport	59.922
Materialherstellung	1.490.999
Energieverbrauch	813.888

3.2 Vorgehen bei der Gegenüberstellung der Studien

Im Rahmen der Gegenüberstellung von Privatstudie und LPI-Studie werden im Sinne einer ABC-Analyse die wesentlichen Einzelpositionen mit dem jeweils höchsten Anteil

an CO₂-Emissionen bzw. THG-Emissionen gegenübergestellt. Diese sind in der Reihenfolge der höchsten Emissionen:

- die Materialherstellung,
- der Energieverbrauch,
- der Materialtransport.

Aufgrund der detaillierteren Planungsgrundlage und dem Umstand, dass die Privatstudie die Angaben für den Bauabschnitt U5-Mitte lediglich über die Tunnelstrecke hochrechnet, wird sich im Folgenden auf den Bauabschnitt U5-Ost fokussiert.

3.3 THG-Emissionen aus der Materialherstellung

Die THG-Emissionen aus der Materialherstellung für den Bauabschnitt U5-Ost belaufen sich in der Privatstudie auf ca. 1.491.000 t-CO₂-Äq. bzw. rund 232.000 t-CO₂-Äq. in der LPI-Studie. Es fällt auf, dass die beiden Gesamtemissionen erheblich voneinander abweichen, insbesondere bei der Einzelposition Stahlbetonbauweise (Tabelle 3). Dies lässt sich nur durch wesentliche Unterschiede in den Materialmengen oder den zugrundeliegenden Annahmen zur Berechnung der THG-Emissionen begründen.

Daher sind zur Gegenüberstellung der THG-Emissionen aus der Materialherstellung zunächst die zugrundeliegenden Mengen bzw. Massen, d. h. die für die Herstellung des erweiterten Rohbaus im Bauabschnitt U5-Ost benötigten Materialien zu betrachten. Den summenmäßig größten Materialanteil stellt dabei in beiden Studien der Stahlbeton dar.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der THG-Emissionen aus der Materialherstellung

Privatstudie		LPI-Studie	
Kategorie/Bauweise	THG-Emissionen [t-CO ₂ -Äq.]	Kategorie/Bauweise	THG-Emissionen [t-CO ₂ -Äq.]
Beton	1.073.113	Stahlbeton	169.238
Stahl (inkl. Bewehrung)	117.887	Stahl (ohne Bewehrung)	785
Sonstiges	300.000	Spezialtiefbau	41.370
		Schienensystem	2.705
		Mauerwerksarbeiten	760
		Sonstiges (10 %)	16.924
SUMME	1.490.999		231.782

In der Privatstudie wird eine Gesamtmasse an benötigtem Beton in Höhe von 1.828.130 t berechnet. Die in der Privatstudie angenommene Dichte für den Beton von 2,40 t/m³ ist grundsätzlich als plausibel anzusehen und führt damit zu einem Gesamtvolumen von 761.721 m³ Beton (Tabelle 4). Im Gegensatz dazu ergibt sich in der LPI-Studie aus den Mengenermittlungen im Bereich der Stahlbetonbauweise mit einem Volumen von 592.050 m³ sowie den Spezialtiefbauarbeiten, d. h. Mikropfähle und DSV-Körper mit einem Volumen von 107 m³ bzw. 8.545 m³, ein Gesamtvolumen von

600.702 m³ Beton. Darin sind jedoch nicht die Betonmengen zur Herstellung der Betonschwellen für das Schienensystem enthalten. Diese werden im Rahmen der THG-Potentialberechnung je lfd. Meter Gleis zwar berücksichtigt, jedoch mengenmäßig nicht explizit angegeben.

Tabelle 4: Differenz der ermittelten Gesamtmengen Beton

Studie	Betonmenge [m ³]
Privatstudie	761.721
LPI-Studie	600.702
DIFFERENZ	161.019

In Tabelle 5 sind die Stahlmengen dargestellt, wobei sich der überwiegende Anteil aus der Bewehrung für die Stahlbetonbauteile ergibt. Daraus folgt, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Stahlbetonmengen (s. o.), bei ähnlich angesetzten Bewehrungsanteilen von ca. 3,5 % (Privatstudie) bzw. 3,2 % (LPI-Studie) zwischen beiden Studien ebenfalls Abweichungen in den aufgeführten Stahlmengen ergeben. Ein weiterer Unterschied begründet sich (wie schon bei den Betonmengen) dadurch, dass in der LPI-Studie die Stahlmenge für die Schienen im Gegensatz zu Privatstudie, dort ist diese mit 1.723 t ausgewiesen, nicht explizit angegeben wird.

Tabelle 5: Differenz der ermittelten Gesamtmengen Stahl

Studie	Stahlmenge [t]
Privatstudie	76.179
LPI-Studie	46.890
DIFFERENZ	29.289

Zusammenfassend ergeben sich somit zwischen der Bürger- und LPI-Studie Mengendifferenzen von rund 161.000 m³ für Beton und ca. 29.300 t für Stahl. Dies lässt sich durch einen unterschiedlichen Informationstand bzw. Detaillierungsgrad bezüglich der zur Berechnung herangezogenen Plan- und Ausschreibungsunterlagen begründen, führt jedoch nicht allein zu den oben erwähnt hohen Unterschieden hinsichtlich der THG-Emissionen.

Im zweiten Schritt werden daher die entsprechenden Annahmen und Berechnungen der THG-Emissionen geprüft. Als Referenz zur Überprüfung der Annahmen dient das jeweilige spezifische GWP gemäß ÖKOBAUDAT für das Modul Herstellung (A1 bis A3) für ausgewählte Materialien gemäß Tabelle 6.

Tabelle 6: Referenz-Treibhauspotential ausgewählter Materialien

Material	Bezugsgröße	GWP je Bezugsgröße [kg-CO ₂ -Äq./Einheit] Modul A1-A3
Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45	1 m ³	244
Bewehrungsstahl	1 kg	0,683
Baustahl	1 t	1.125

Die Privatstudie führt als Rechengrundlage zwei wesentliche Werte zur Berechnung der THG-Emissionen bei der Betonherstellung auf. Zum einen wird angenommen, dass 1 t Zement ca. 587 kg-CO₂-Äq. emittiert (deutschlandweiter Durchschnittswert lt. Umweltproduktdeklaration, enthalten in ÖKOBAUDAT). Zum anderen wird angenommen, dass 1 m³ wasserundurchlässiger Stahlbeton 1,84 t-CO₂-Äq emittieren soll. Diese Annahme entstammt einer ähnlich gelagerten, ebenfalls privat erstellten Studie aus Berlin [4]. Aus ingenieurtechnischer Sicht ist dieser Wert nicht haltbar, zum einen, da der Volumenanteil der Bewehrung von 8 % viel zu hoch angesetzt wird. Dies entspräche bei einer Stahlrohddichte von 7,85 t/m³ einem Bewehrungsgehalt von 630 kg/m³. Für die U5-Ost wird jedoch nur ein Bewehrungsgehalt von rund 78 kg/m³ bzw. 0,99 Vol.-%/m³ angesetzt (siehe Abschnitt 2.4).

Noch schwerwiegender ist das Nichtbeachten der Referenzgröße beim Ansatz des spezifischen GWP. So wird in der Studie aus Berlin zunächst das Betonvolumen über die Betonrohddichte in die Betonmasse umgerechnet und diese jedoch anschließend mit dem GWP pro Kubikmeter multipliziert. Dadurch entsteht ein systematischer Fehler, welcher die THG-Emissionen alleine für den Beton um den Faktor 2,4 – der angenommenen Betonrohddichte – überschätzt. Tabelle 7 zeigt im Gegensatz dazu eine adäquatere Berechnung für 1 m³ Stahlbeton der Festigkeitsklasse C35/45 unter Annahme des Bewehrungsgehalts der U5-Ost, die schlussendlich zu rund 295 kg-CO₂-Äq. bzw. 0,295 t-CO₂-Äq. führt.

Tabelle 7: Korrigierte THG-Emissionen für 1 m³ Stahlbeton C35/45

THG-Emission von 1 m ³ Stahlbeton (C35/45)	Volumenanteil [%]	Rohddichte [t/m ³]	Masse [t]	spez. GWP [kg-CO ₂ -Äq./Einheit]	spez. GWP [kg-CO ₂ -Äq./t]	THG-Emission [kg-CO ₂ -Äq.]
Beton	99,01	2,4	2,38	244 kg-CO ₂ -Äq./m ³	102	242
Stahl	0,99	7,85	0,08	683 kg-CO ₂ -Äq./t	683	53
SUMME	100	-	2,47	-	-	295

Die Privatstudie überschätzt ebenfalls in Folge des gleichen systematischen Fehlers, d. h. das Verrechnen der Gesamtmasse in Tonnen mit dem spez. GWP pro Kubikmeter, die tatsächlichen THG-Emissionen. Ferner wird zusätzlich jedoch noch das falsche spezifische GWP angenommen, nämlich das GWP von 1 t Zement in Höhe von 587 kg/m³ und nicht das GWP für einen Beton C35/45 gemäß Tabelle 6. Im Ergebnis sind die so ermittelten THG-Emissionen für den Beton um den Faktor 5,8 überschätzt und betragen korrigiert demnach nur noch $1.073.113/5,8 = 185.019$ t-CO₂-Äq.

Die korrigierten THG-Emissionen der Privatstudie in Höhe von 185.019 t-CO₂-Äq. liegen somit in ähnlicher Größenordnung wie die der LPI-Studie (169.238 tCO₂Äq.), wobei letztgenannte aufgrund eines höheren Detaillierungsgrades in der Datengrundlage für die eingesetzten Betone verschiedener Festigkeitsklassen spezifische GWP-Werte von 0,214 bis 0,294 t-CO₂-Äq./m³ verwendet.

Für die THG-Emissionen aus den Kategorien „Stahl“ und „Sonstiges“ gilt ähnliches. So wird für den Stahl mit einem gewählten spezifischen GWP von 1,5 t-CO₂-Äq./t gerechnet, obwohl über 60.000 t der insgesamt 76.179 t Stahl der Bewehrung zugeordnet werden und somit für diesen Anteil das GWP laut ÖKOBAUDAT von 0,683 t-CO₂-Äq./t angesetzt werden muss. Aus diesem Grund ist die so ermittelte THG-Emissionen um mehr als das Zweifache überschätzt und liegt schlussendlich bei rund 40.980 t-CO₂-Äq.

Zusammenfassend ergeben sich für die Privatstudie unter Berücksichtigung der korrigierten Annahmen THG-Emissionen für den Beton bzw. Stahlbeton von rund 225.999 t-CO₂-Äq. Gemäß LPI-Studie betragen diese insgesamt 210.608 t-CO₂-Äq. (Tabelle 8), so dass nunmehr von einer gleichen Größenordnung gesprochen werden kann.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der THG-Emissionen für den Stahlbeton unter Verwendung korrigierter Annahmen

Kategorie	Privatstudie [t-CO ₂ -Äq.]	LPI-Studie [t-CO ₂ -Äq.]
Beton	185.019	41.370 (aus Spezialtiefbau)
Bewehrung	40.980	in Stahlbeton enthalten
Stahlbeton	-	169.238
SUMME	225.999	210.608

3.4 THG-Emissionen aus dem Energieverbrauch

Die THG-Emissionen aus dem Energieverbrauch für den Bauabschnitt U5-Ost belaufen sich in der Privatstudie auf ca. 813.900 t-CO₂-Äq. bzw. rund 60.000 t-CO₂-Äq. in der LPI-Studie (Tabelle 9). Die THG-Emissionen beruhen dabei auf dem grauen Anteil am deutschen Strom-Mix. Dieser wurde bei der Privatstudie mit 0,400 kg-CO₂-Äq./kWh angenommen. Laut ÖKOBAUDAT bzw. in der LPI-Studie verwendet beträgt das GWP infolge aktuellem Strom-Mix 0,589 kg-CO₂-Äq./kWh.

Obwohl die LPI-Studie mit einem höheren GWP je Kilowattstunde rechnet, weichen, wie schon im Rahmen der Materialherstellung, die Ergebnisse beider Studien deutlich voneinander ab. Dabei zeigt die Überprüfung, dass die in der Privatstudie gemachten Annahmen hinsichtlich der angesetzten Leistungsaufnahme sowie der Einsatzdauer der Gerätschaften in nahezu allen Kategorien den baupraktischen Erfahrungen deutlich entgegenstehen und schlussendlich deutlich zu hohe Energieverbräuche berechnet werden. Nachfolgend sei dies exemplarisch am Energieverbrauch beim Schildvortrieb dargelegt.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der THG-Emissionen aus dem Energieverbrauch

Privatstudie		LPI-Studie	
Energiebedarf	THG-Emissionen [t-CO ₂ -Äq.]	Kategorie/Bauweise	THG-Emissionen [t-CO ₂ -Äq.]
Schildvortrieb TBM	133.590	Schildvortrieb TBM	41.260
Separationsanlagen	30.660	Baustellenbetrieb	11.320
Offene Bauweise	583.744		
Wasserhaltung	9.984	Wasserhaltung	2.794
Bauwasser	19.968		
Wasseraufbereitung	35.942	Wasseraufbereitung	4.441
SUMME	813.888		59.815

Der maschinelle Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschinen (TBM) stellt im Gegensatz zum konventionellen Tunnelbau einen zwar eher kontinuierlichen, aber dennoch zyklischen Prozess dar. Die sich ergebenden Stillstandzeiten sowie weitere bauverfahrenstechnische Randbedingungen werden bereits in Abschnitt 2.4.2 erläutert.

Die Privatstudie vernachlässigt bei der Berechnung des Energieverbrauchs für die TBM sowie der Separationsanlage diese Randbedingungen und geht davon aus, dass beide Anlagen über die gesamte Bauzeit kontinuierlich, d. h. 24 Stunden am Tag unter Verwendung der maximalen Leistung im Einsatz sind. Daraus folgt, dass der ermittelte Energieverbrauch um den Faktor 2,3 überschätzt wird. Zusammenfassend ergeben sich somit aus dem Energieverbrauch beim maschinellen Vortrieb lediglich $133.590/2,3 = 58.083$ t-CO₂-Äq.

3.5 THG-Emissionen aus dem Materialtransport

Die THG-Emissionen aus dem Materialtransport für den Bauabschnitt U5-Ost belaufen sich in der Privatstudie auf knapp 60.000 t-CO₂-Äq. In der LPI-Studie werden die THG-Emissionen hingegen nur für den Bereich Bodenmanagement, d. h. für die zu verwendenden Bodenmengen aus den Baugrubenbereichen und Tunnelabschnitten, dezidiert aufgeführt. Diese belaufen sich auf rund 39.000 t-CO₂-Äq. Da die THG-Emissionen aus den übrigen Kategorien jedoch bereits in den jeweiligen spezifischen GWP enthalten sind, beispielsweise für die Stahlbetonbauweise (Modul A4, siehe Tabelle 10), ist davon auszugehen, dass die THG-Emissionen der LPI-Studie infolge Materialtransports in ähnlicher Höhe wie in der Privatstudie liegen. Dies lässt sich ohne detaillierte Nachberechnungen jedoch nicht exakt quantifizieren.

Tabelle 10: Übersicht des GWP für EPD-Betone gemäß ÖKOBAUDAT

Betonfestigkeitsklasse	Module			Gesamt CO ₂ -Äquiv. für unbewehrten Beton kg-CO ₂ -Äq./m ³
	A1-A3	A4	A5	
C20/25	178	3,9	1,08	183
C30/37	219	4,5	1,08	224
C35/45	244	9,1	1,08	254

Aus diesem Grund erscheint eine direkte Gegenüberstellung der THG-Emissionen – ohne Nachberechnungen – an dieser Stelle nicht sinnvoll. Daher erfolgt nachfolgend lediglich ein kurzer Vergleich der getroffenen Annahmen.

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich, ergeben sich sowohl Unterschiede bei der Transportmittelwahl als auch bei der zugehörigen Transportentfernung. Insbesondere das in der Privatstudie gewählte spezifische GWP entspricht einem LKW mit 17,3 t Nutzlast und ist aus baupraktischer Sicht als kritisch zu bewerten, da es sich hier maximal um einen klassischen Vier-Achs-Kipper handeln kann, welcher in der Regel bei großen Infrastrukturprojekten – wie im vorliegenden Fall – lediglich für Zwischentransporte im Bereich der Baustelle selbst zum Einsatz kommt. Für den Materialabtransport beim Baugrubenaushub einer U-Bahnhaltestelle ist die Wahl eines LKW-Sattelzuges aus logistischen, ökonomischen und ökologischen Gründen anzunehmen. Ferner wird eine etwas geringere Nutzlast der LKW in Höhe von 24 t gegenüber der LPI-Studie von 27 t angenommen. Der Umstand, dass in der Privatstudie einerseits eine Nutzlast von 24 t angenommen, andererseits jedoch mit dem spezifischen GWP eines LKWs mit 17,3 t Nutzlast gerechnet wird, lässt sich anhand der aufgeführten Informationen nicht erklären.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der getroffenen Annahmen zur Ermittlung der THG-Emissionen aus dem Materialtransport

Kategorie	Privatstudie	LPI-Studie
Transportmittel	LKW (17,3 t Nutzlast)	LKW-Zug (27 t Nutzlast)
Transportentfernung	15 km	75 km
GWP (ÖKOBAUDAT)	0,08969 kg-CO ₂ -Äq/tkm	0,06444 kg-CO ₂ -Äq/tkm

3.6 Fazit

Die Gegenüberstellung der Privatstudie und der LPI-Studie zeigt zunächst, dass es zwischen beiden Studien zu deutlichen Differenzen bei den THG-Emissionen kommt. Insbesondere in der Kategorie Stahlbetonbauweise weichen die ermittelten THG-Emissionen erheblich voneinander ab. Bei der detaillierten Analyse der Berechnungen für die Materialherstellung und dem Energieverbrauch werden zunächst die einzelnen Mengen sowie im Anschluss die daraus resultierenden THG-Emissionen auf Plausibilität geprüft. Hier zeigt sich jedoch, dass die Privatstudie sowohl aus ingenieurtechnischer als auch baupraktischer Sicht wesentliche Aspekte nicht berücksichtigt, beispielsweise Stillstandszeiten oder die Einsatzdauer von Maschinen. Darüber hinaus wurden insbesondere die spezifischen GWP-Kennwerte teilweise falsch zugeordnet bzw. nicht einheitengetreu umgerechnet, was schlussendlich zu fehlerhaften Berechnungen führt.

Aus diesem Grund sind die in der Privatstudie ermittelten THG-Emissionen um ein Vielfaches zu hoch. Anhand eigener Nachberechnungen kann beispielsweise für die Stahlbetonbauweise dargelegt werden, dass die ermittelten THG-Emissionen um knapp das sechsfache überschätzt werden.

Unter Berücksichtigung korrigierter Annahmen, welche die bauverfahrenstechnischen Aspekte hinreichend genau widerspiegeln, zeigt sich im Vergleich mit der LPI-Studie

schlussendlich, dass ähnliche THG-Emissionen ermittelt werden. Dies ist insoweit auch schlüssig, da beispielsweise die berechneten Materialmengen für den Stahlbeton sowohl in der Privatstudie als auch in der LPI-Studie auf den nahezu gleichen Planunterlagen beruhen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Privatstudie trotz umfangreicher und gut aufgeschlüsselter Darstellungen des Vorgehens keine realistische Abschätzung der beim Neubau der U5-Ost anfallenden THG-Emissionen zulässt. Vielmehr kann konstatiert werden, dass die THG-Emissionen gemäß LPI-Studie eine realistische Größenordnung darstellen.

4 Gesamtfazit

Die Prüfung der LPI-Studie hinsichtlich Plausibilität und Nachvollziehbarkeit hat ergeben, dass die grundsätzlichen Methoden und Annahmen aus ingenieurtechnischer Sicht im Wesentlichen als richtig zu bewerten sind. Die übergeordnete Strategie erscheint vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Klimabilanz für das Bauprojekt U5 als zweckmäßig. Ebenso erscheinen die ermittelten THG-Emissionen auf Basis eigener Erfahrungswerte bzw. eigener überschläglicher Vergleichsrechnungen grundsätzlich plausibel. Entsprechende Unwägbarkeiten aufgrund der sich ergebenden Planungsstände werden in der LPI-Studie mit Hilfe eines Zuschlags adäquat berücksichtigt. Zusammenfassend ist die LPI-Studie sowie deren Ergebnisse als geeignetes Hilfsmittel anzusehen, um die anfallenden THG-Emissionen bei der Erstellung des erweiterten Rohbaus der U5 zunächst abzuschätzen sowie anschließend strategische Maßnahmen zu deren Reduktion zu ergreifen.

Bei der Gegenüberstellung von LPI-Studie und Privatstudie im zweiten Teil der vorliegenden Studie konnten Widersprüche bzw. Unterschiede in Form abweichender THG-Emissionen ermittelt werden. Ausnahmslos ergaben sich diese auf Seiten der Privatstudie, entweder durch fehlerhafte bzw. fehlende Annahmen oder durch Berechnungsfehler. Anhand eigener überschläglicher Vergleichsrechnungen kann gezeigt werden, dass entsprechende THG-Emissionen in der Privatstudie um ein Vielfaches überschätzt werden. Unter Berücksichtigung entsprechender Korrekturen ergaben sich aus den in der Privatstudie ermittelten Mengen schlussendlich auf Stahlbeton bezogene THG-Emissionen in ähnlicher Größenordnung wie bei der LPI-Studie.

STUDIENGESELLSCHAFT
für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V.

Prof. Dr.-Ing. Roland Leucker
Geschäftsführer

Dr.-Ing. Christian Thienert
Bereichsleiter Tunnelbau

Dipl.-Ing. Christoph Klaproth
Projektingenieur

5 Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Thema: Die Treibhausgase, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>, abgerufen am 17.06.2022
- [2] ÖKOBAUDAT-Datenbank des Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), <https://www.oekobaudat.de/>
- [3] Betz, G., et al.: Eine umweltfreundliche U-Bahn für Hamburg?, veröffentlicht im Hamburger Abendblatt, Studie: Bau der U5 gefährdet Hamburgs Klimaziele, <https://www.abendblatt.de/hamburg/article233480611/studie-bau-der-u5-gefaehrdet-hamburgs-klimaziele-verkehr-hochbahn-ubahn-schadstoffe.html>, abgerufen am: 28.06.2022
- [4] Dittmer, M., et al.: Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen, <https://klimabilanz-ubahn-tram.de/download/klimabilanz-ubahn-tram.pdf>, abgerufen am: 28.06.2022