



Neubauprojekt U5 Hamburg THG-Bilanzierung und Roadmap

Dokument Nr.

N-2203138-1

Auftraggeber

Hamburger Hochbahn AG
Steinstraße 7
20095 Hamburg

Datum

08.09.2022
Ausfertigung: 1

Verfasser

LPI Ingenieurgesellschaft mbH
Völgerstraße 9
30591 Hannover
E-Mail: begemann@lpi-ing.de
Internet: www.lpi-ing.de

Autor: Dipl.-Ing. Christoph Begemann, Dr.-Ing. Christoph Schulte-Schrepping

Dieser Bericht umfasst 14 Seiten inkl. Deckblatt und 30 Seiten Anhang. Jede Veröffentlichung, auch auszugsweise, bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 1 | Zielsetzung, Strategie und Aufgabenstellung..... | 3 |
| 2 | Bilanzierungsrahmen und Bilanzierungsablauf..... | 4 |
| 2.1 | Untersuchungsrahmen..... | 4 |
| 3 | Zusammenfassende Darstellung der Bilanzierungen..... | 5 |
| 3.1 | Allgemeines..... | 5 |
| 3.2 | Stahlbetonbauweise..... | 6 |
| 3.3 | Stahlbauweise..... | 6 |
| 3.4 | Bodenmanagement..... | 7 |
| 3.5 | Spezialtiefbauarbeiten..... | 8 |
| 3.6 | Maschinellem Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM)..... | 9 |
| 3.7 | Sonstige bilanzierte Leistungen im erweiterten Rohbau..... | 9 |
| 3.7.1 | Schienensystem..... | 10 |
| 3.7.2 | Mauerwerksarbeiten..... | 10 |
| 3.7.3 | Allg. Baustellenbetrieb..... | 10 |
| 3.8 | Sonstige pauschalisiert erfasste Leistungen im Bereich des erweiterten Rohbaus..... | 11 |
| 4 | Ergebnisübersicht der Bilanzierung für „Baseline“ und „Zielszenario“..... | 11 |
| 5 | Zukünftige Entwicklungspotentiale und weitere Schritte..... | 13 |
| A | Anhang Bilanzierungsdaten..... | 15 |
| A.0 | Bilanzierungsvorgehen..... | 16 |
| A.1 | Teil 1: Stahlbetonbauweise..... | 18 |
| A.2 | Teil 2: Stahlbauweise..... | 24 |
| A.3 | Teil 3: Bodenmanagement..... | 27 |
| A.4 | Teil 4: Maschinellem Tunnelvortrieb mittels TBM..... | 30 |
| A.5 | Teil 5: Spezialtiefbauarbeiten..... | 32 |
| A.6 | Teil 6: Schienensystem..... | 36 |
| A.7 | Teil 7: Mauerwerksarbeiten..... | 37 |
| A.8 | Teil 8: Baustellenbetrieb..... | 39 |
| A.9 | Teil 9: sonstige Leistungen..... | 42 |
| A.10 | Teil 10: tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 43 |
| A.11 | Literatur..... | 44 |

1 Zielsetzung, Strategie und Aufgabenstellung

Die Hamburger Hochbahn AG¹ (HOCHBAHN) steuert und koordiniert im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH) die Planung und den Neubau der U-Bahnlinie U5 als Teil der Mobilitätswende in der Freien und Hansestadt Hamburg. Bis Ende der 30er Jahre entsteht eine vollständig neue, ca. 25 km lange U-Bahnlinie mit insgesamt 23 Haltestellen.

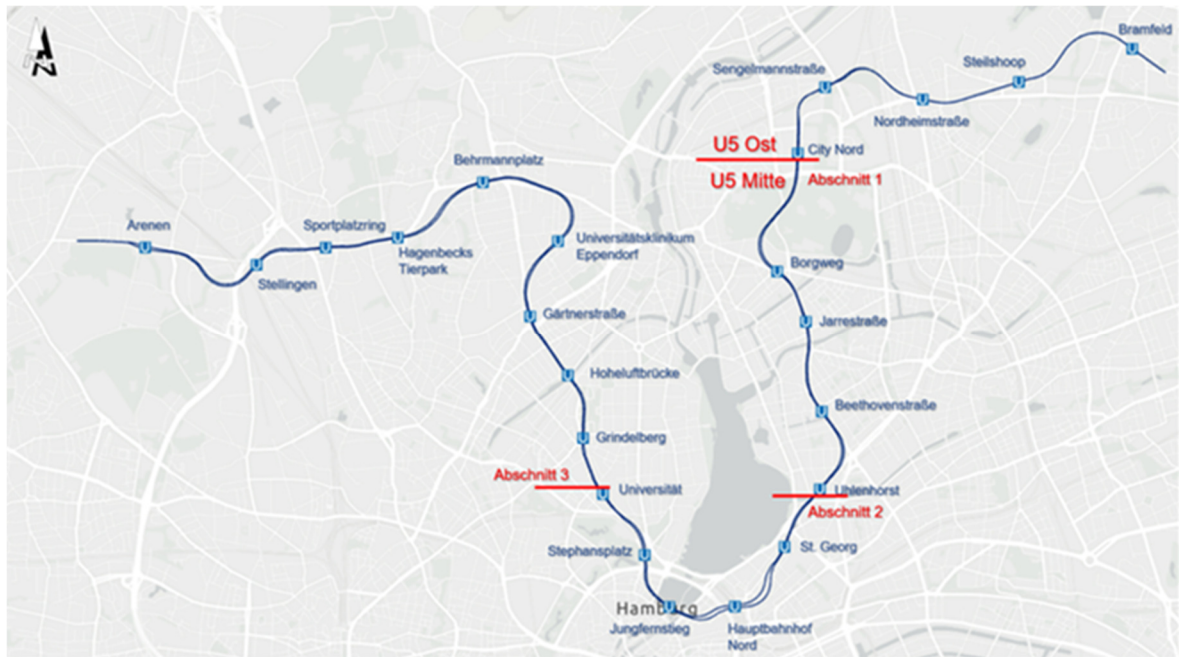


Abbildung 1: Verlauf der U5 im Hamburger Stadtgebiet und auf Aufteilung der Bau- / Planungsabschnitte, Quelle: HOCHBAHN

Die HOCHBAHN ist sich bewusst, dass der Bau eines solchen Projektes erhebliche Umweltauswirkungen hat und signifikante Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) verursacht. Diese sind vorrangig den verwendeten Materialien und den notwendigen Bauprozessen und Bauverfahren inkl. der notwendigen Energieverbräuchen geschuldet.

Die LPI Ingenieurgesellschaft mbH berät und unterstützt die HOCHBAHN bei der Entwicklung und Umsetzung einer transparenten und nachvollziehbaren THG-Reduktionsstrategie für die U-Bahnlinie U5. Das THG-Potential wird dabei im Rahmen der Planung, dem Bau und der Herstellung kontinuierlich evaluiert und mit Hilfe einer Reduktionsstrategie und darauf abgestimmten Maßnahmenpaketen minimiert. Die Integration der THG-Minimierung als Planungs- und Projektziel stellt für ein derartiges Infrastrukturgroßprojekt ein Novum dar und ist einzigartig in der angestrebten Detailtiefe und dem vorgesehenen Umfang.

Ein Teil der Strategie ist die Bilanzierung der zu erwartenden THG-Emissionen, welche in diesem Bilanzierungsbericht zusammengefasst dargestellt wird.

¹ Die Hamburger Hochbahn AG setzt für diesen Zweck die neugegründete Hochbahn U5 Projekt GmbH ein.
LPI Ingenieurgesellschaft mbH

2 Bilanzierungsrahmen und Bilanzierungsablauf

2.1 Untersuchungsrahmen

Das gewählte Bilanzierungsvorgehen folgt ISO 14040 [N.1] in vier Schritten und lehnt sich an die bekannten Normen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken z. B. DIN EN 15978 [N.2] an, vgl. Abbildung 2. Es werden auch wesentliche Teile und die Grundsystematik der derzeit noch im Entwurf befindlichen Bilanzierungsnorm für Ingenieurbauwerke E DIN EN 17472 [N.3] berücksichtigt. Nach Festlegung des Untersuchungsrahmens und der Zieldefinition erfolgt für die jeweiligen bilanzierten Bauweisen und Bauprozesse eine Sachbilanz mit allen relevanten Mengen und Prozessschritten. Im Anschluss wird den verbauten Materialien in der Wirkbilanz die spez. THG-Emissionen zugeordnet. Im vierten Schritt werden diese Emissionen zusammenfassend dargestellt und entsprechend der Zieldefinition ausgewertet.



Abbildung 2: Ablauf einer Bilanzierung in Anlehnung an ISO 14040 [N.1]

Der Fokus der THG-Bilanzierung liegt auf der Herstellungsphase bis zur Fertigstellung des erweiterten Rohbaus (Lebenszyklusphasen A1-A5 gemäß DIN EN 15978 [N.2]). Zudem wurde bei Betonen die Karbonatisierung in der Nutzungsphase (Lebenszyklusphase B1) sowie beim Profilstahl die Entsorgungs- und Recyclingphase inkludiert (Lebenszyklusphasen C1-C3, D), vgl. Abbildung 3. Eine entsprechende Begründung für die Wahl kann dem Anhang A entnommen werden.

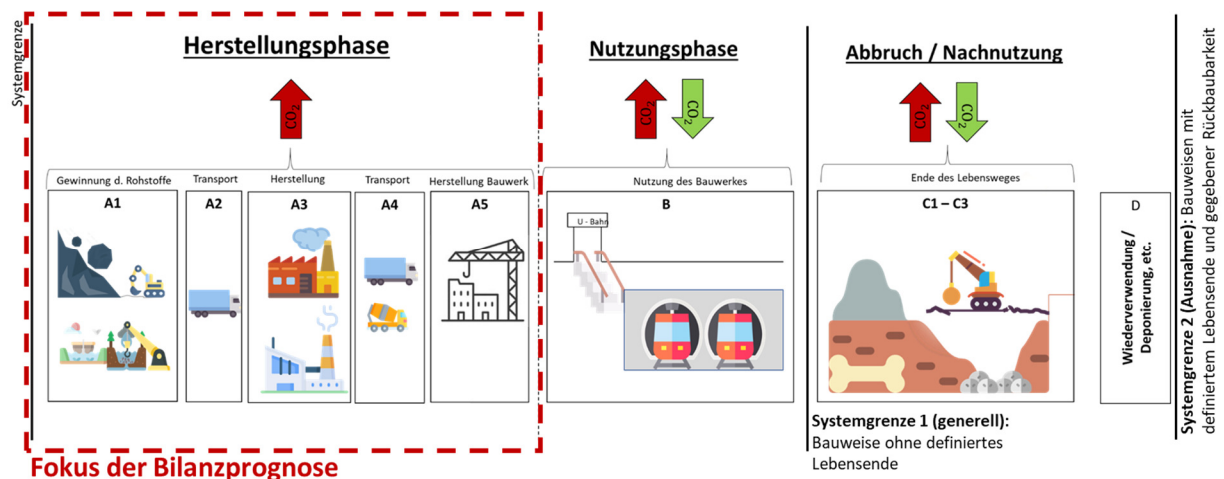


Abbildung 3: Darstellung der Lebenszyklusphasen und betrachteten Systemgrenzen für die Bilanzprognose

Die Bilanzierung des erweiterten Rohbaus erfolgte differenziert nach zwei Szenarien:

- Baseline-Szenario (Do-nothing-Szenario, konventioneller Bau)
- Zielszenario: (Klimaschonender Bau, Berücksichtigung von heutigen und zukünftigen THG-Reduktionspotentialen (u.a. Entwicklung in der Stahl- und Zementindustrie))

Die heutigen und zukünftigen Reduktionsmaßnahmen im Zielszenario umfassen Reduzierungen der Materialmengen, Reduzierungen spezifischer Materialemissionen und die Verbesserung oder Optimierung

von Bauprozessen. Die grundsätzliche Funktion und Leistungsfähigkeit des Bauwerkes werden nicht beeinträchtigt (Beibehaltung der funktionalen Qualität). Darüber hinaus werden zukünftige, zu erwartende Reduktionen infolge von technologischen Entwicklungen in der Stahl- und Zementherstellung zur Vermeidung von THG-Emissionen berücksichtigt. Die Annahmen beruhen auf einem Austausch mit Unternehmen und Verbänden der Zement- und Stahlindustrie, welcher durch die HOCHBAHN und die LPI initiiert wurde. Die einzelnen heutigen und zukünftigen Reduktionsmaßnahmen werden im folgenden Kapitel 3 differenziert nach Bereichen (z.B. Stahlbetonbauweise, Spezialtiefbau) dargestellt.

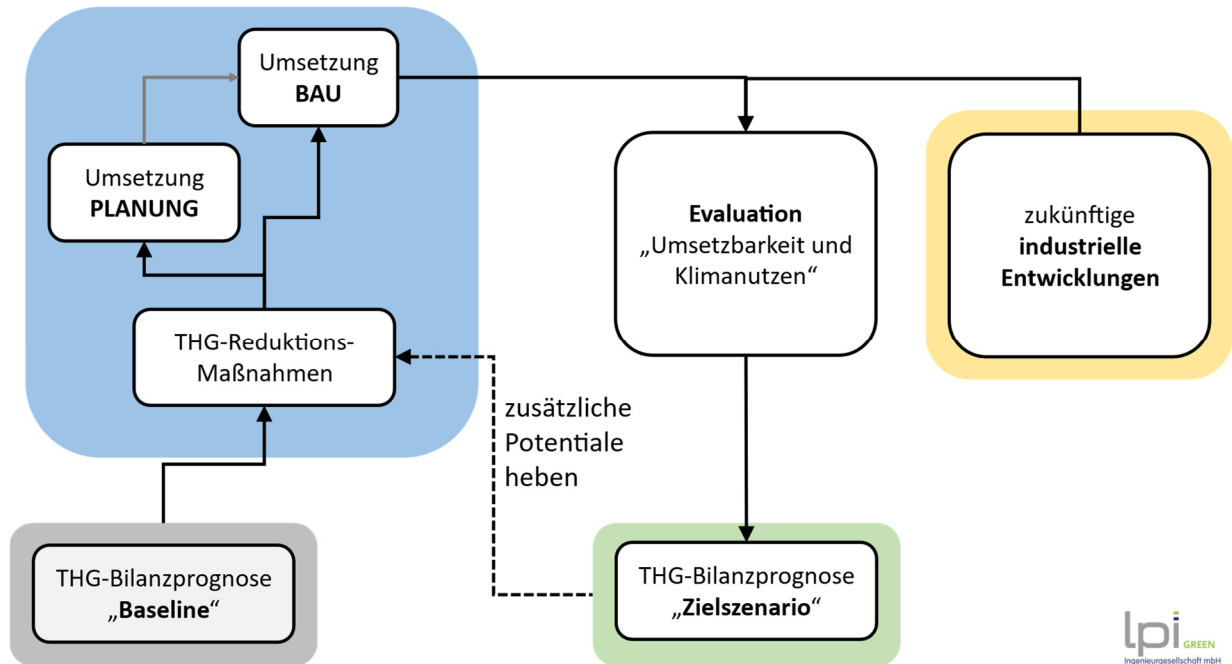


Abbildung 4: Übersicht der Entwicklung vom Baseline- zum Zielszenario

3 Zusammenfassende Darstellung der Bilanzierungen

3.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Bilanzierungsbereiche vorgestellt, die Datengrundlagen aus der Sachbilanz dargelegt und die resultierenden Emissionen aus der Baseline-Bilanzierung (Do-nothing-Szenario) und dem klimaschonenden Zielszenario zusammengefasst. In der Bilanzierung wurden folgende Bereiche genauer betrachtet:

- Stahlbetonbauweise
- Stahlbauweise
- Bodenmanagement
- Spezialtiefbauarbeiten
- Maschinelles Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine im geschlossenen Tunnelbau
- Schienensystem
- Mauerwerksarbeiten
- genereller Baustellenbetrieb (Wassermanagement und Energieversorgung)
- Sonstige Leistungen im Bereich des erweiterten Rohbaus

Eine vollständige Darstellung der Bilanzierung kann dem Anhang dieses Dokumentes entnommen werden.

3.2 Stahlbetonbauweise

Die Stahlbetonbauweise stellt eine wesentliche Kernbauweise für die Herstellung der U5 dar. Auf Grund der erheblichen materialimmanenten THG-Emissionen, insbesondere aus der Produktion des enthaltenen Zementes, wurde hier ein besonderer Fokus hinsichtlich möglicher THG-Reduktionspotentiale durch optimierte Planung und Materialzusammensetzung gelegt.

Baseline-Szenario

Die Gesamtbetonmenge für U5-Gesamt beträgt ca. 3,43 Mio. m³ Stahlbeton sowie 343.000 t Bewehrungsstahl (Mengenermittlung HOCHBAHN, (u.a.,[3],[4],[5])). Den Beton- und Betonstahlmengen wurden in Abhängigkeit der geforderten Betonqualität spez. THG-Emissionen zugeordnet, die auf den anerkannten und freizugänglichen Datensätzen der ÖKOBAUDAT [1] basieren (genaues Vorgehen s. Anhang A.1). Dabei werden neben der Herstellung auch die Transporte und der Einbau inkludiert. Die Berechnungen ergeben eine mittlere THG-Emission von:

- 233 kg CO₂-äq/m³- unbewehrten Beton
- 693 kg CO₂-äq/t Bewehrungsstahl

Im Baseline-Szenario ergibt sich eine Gesamt-THG-Last von ca. 1,02 Mio. t CO₂-äq. für den Stahlbeton.

Zielszenario

Heutige THG-Reduktionsmaßnahmen im Rahmen von Planung und Bauausschreibung:

- Reduzierung der erforderlichen Stahlbetonmenge durch planerische Anpassungen
Ergebnis: 3,21 Mio. m³ Stahlbeton (ca. -218.000 m³) mit ca. 303.000 t Bewehrungsstahl (ca. - 40.000 t Stahl)
- Verwendung Zement(klinker)reduzierter Betone durch Zement- und Betonoptimierung
Ergebnis: spez. mittlere THG-Last des unbewehrten Ökobetons: ca. 190 kg CO₂-äq/m³ (-18,5 %)

Zukünftig zu erwartende technologische Entwicklungen (Basis: Industriaustausch):

- Ab 2025: Reduzierung spez. THG-Last des Bewehrungsstahls auf 400 kg CO₂-äq/t durch Verwendung von Ökostrom in der Herstellung und hohe Recyclingschrottanteile
- Ab 2028: Reduzierung spez. THG-Lasten des unbewehrten Betons auf ca. 96 kg CO₂-äq durch teilweise CO₂-Abscheidung bei der Zementherstellung (CCUS), etc.
- Ab 2035: Reduzierung spez. THG-Lasten des unbewehrten Betons auf 47 kg CO₂-äq durch vollständige CO₂-Abscheidung bei der Zementherstellung (CCUS), etc.

Mit den vorgenannten Reduktionsmaßnahmen und den aktuell zu erwartenden industriellen Entwicklungen wird eine Reduzierung der THG-Emissionen des Stahlbetonbaus im Zielszenario von insgesamt ca. 440.000 t CO₂-äq (-57%) prognostiziert. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.1 des Anhanges.

3.3 Stahlbauweise

Die mit der Stahlbauweise verbundenen Arbeiten sind materialintensiv und führen auf Grund des spez. THG-Potentials von Stahlprodukten aus deren Herstellung zu einer hohen THG-Last. Der überwiegende Teil des Stahlbaus wird für die temporäre Baugrubenherstellung oder für die Erstellung von oberirdischen Bauwerken verwendet, so dass der komplette Lebenszyklus in die Bilanz einbezogen wird.

Baseline-Szenario:

Für die Herstellung der vorgesehenen Bauteile und Bauwerke im erweiterten Rohbau werden vornehmlich Walz- und Profilstähle mit einer Gesamtmasse von ca. 198.200 t Stahl eingesetzt. Für die Bilanzierung wird eine spez. THG-Last gemäß Ökobaudat von 720 kg CO₂-äq / t-Stahl über den gesamten Lebenszyklus verwendet. Dieser Wert enthält auch die Transporte zur Baustelle. Der Einbau wird über die allgemeinen Baustellenemissionen, vgl. Abschnitt A.2 erfasst.

Es ergibt sich ein gesamtes THG-Potential von ca. 142.700 t CO₂-äq im Baseline-Szenario.

Zielszenario:

Für das Zielszenario wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

- Erhöhung der Stahlmengen, um andere deutlich energieintensivere Bauweisen zu reduzieren

Zukünftig zu erwartende technologische Entwicklungen (Basis: Industrieaustausch):

- Ab 2025: Reduzierung spez. THG-Last auf 400 kg CO₂-äq durch vermehrte Stahlherstellung im Elektrolichtbogenverfahren (ELV) und entsprechender THG-Zertifizierung durch Händler
- Ab 2035: Reduzierung spez. THG-Last auf 100 kg CO₂-äq durch klimafreundliche Produktion mittels CO₂-Abscheidung (CCUS), Elektrolichtbogenverfahren (ELV), klimaneutralen Hochöfen

Infolge der vorgenannten Veränderungen und zukünftig zu erwartenden industriellen Entwicklungen wird eine Reduzierung der THG-Emissionen des Stahlbaus im Zielszenario von insgesamt ca. 66.200 t CO₂- äq. (ca. - 54 %) prognostiziert. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.2 des Anhanges.

3.4 Bodenmanagement

Das Bodenmanagement umfasst umfangreiche Erd- und Transportarbeiten, weshalb in diesem Bereich vor allem der Prozess auf der Baustelle (Aushub) und der (Ab-)Transport und der Verwertungsprozess betrachtet und bilanziert werden muss.

Baseline-Szenario:

Für den Aushub fallen insgesamt ca. 12 Mio. t Bodenmaterial an, welches mittels Bagger und weiterem Aushubgerät ausgebaut und durch geeignete Transportmittel (LKW, Bahn oder Schiff) über eine Deklarierungsfläche im Hamburger Hafen zu einer zukünftigen Verwertungsstelle verbracht wird. Für die Bilanzierung wird daher eine übliche Transportkette mittels LKW-Fahrten simuliert und ein Verbringungs-ort in einer Entfernung von 75 km (Fahrstrecke: 2 x 75 km, inkl. Leerfahrt) angesetzt. Die notwendigen spez. THG-Lasten der Prozessschritte wurden über die verfügbaren Datensätze für Transportmittel und Aushubgeräten in der Ökobaudat abgebildet.

Es ergibt sich ein gesamtes THG-Potential von ca. 170.150 t CO₂-äq im Baseline-Szenario.

Zielszenario

Es wurden verschiedene, heute umsetzbare Reduktionsmaßnahmen für die Anwendung auf die U5 überprüft:

- Wahl eines Verwertungsortes mit geringer Entfernung und guter verkehrlicher Anbindung
- Variation des Transportmittels in Abhängigkeit der Anbindung des Verwertungsortes
- Vermeidung von Leerfahrten durch Integration des Transportprozesses in eine Transportkette

Es konnte folgendes, optimiertes Szenario in Verbindung mit einem Logistikpartner herausgearbeitet werden:

- Entfernung des Verwertungsortes: 70 km mit LKW-Anbindung
- Zugesicherte Vermeidung von Leerfahrten (Rückweg) durch Kombination mit weiterer Logistikkette

Infolge der vorgenannten Optimierung in den Prozessen wird eine Reduzierung der THG-Emissionen des Bodenmanagement im Zielszenario von insgesamt ca. 102.100 t CO₂-äq. (- 40 %) prognostiziert. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.3 des Anhanges.

3.5 Spezialtiefbauarbeiten

Im Rahmen der Spezialtiefbauarbeiten werden besondere baugrund- und auftriebssichernde Arbeiten, wie Abdichtungs-, Aussteifungs- und auftriebssichernde Elemente in Form von Düsenstrahlkörpern oder Verpressankern ausgeführt. Aufgrund des intensiven Einsatzes von zementären Bindemitteln und dem hohen Materialverbrauch besitzen diese Arbeiten einen signifikanten Einfluss auf die Gesamt-THG-Last und gleichzeitig ein hohes Reduktionspotential durch geeignete Maßnahmen.

Baseline-Szenario:

Im Rahmen der Bilanzierung wird die Herstellung der Düsenstrahlkörper und der Verpressanker exklusive der darin enthaltenen Tragglieder, welche bereits im Bereich des Bewehrungsstahl mitberücksichtigt wurden, erfasst. Der betrachtete Teillebenszyklus der Herstellung umfasst die Herstellung der Ausgangsstoffe (Zement), die Transporte und die Herstellprozesse auf der Baustelle (Bohren, Düsenstrahlverfahren, Verpressen, etc.). Unter Berücksichtigung der Bauteilanforderungen, der möglichen Herstellungseinflüsse und Materialparametern wurden folgende Materialmengen und spez. THG-Lasten ermittelt:

- Düsenstrahlkörper (DSV): Volumen = 485.325 m³, spez. THG-Last 1.710 kg CO₂-äq. / m³
- Verpressanker: Gesamtlänge = 604.000 m; spez. THG-Last 250 kg CO₂-äq. / m

Es ergibt sich ein gesamtes THG-Potential von ca. 980.900 t CO₂-äq. im Baseline-Szenario.

Zielszenario

Es werden folgende heute umsetzbare Reduktionsmaßnahmen umgesetzt:

- Reduktion der erforderlichen Materialmengen durch Planungsoptimierung
Ergebnis: Düsenstrahlkörper auf 287.135 m³ und Verpressanker auf 412.000 m reduziert.
- Verwendung klinkerreduzierter Zement mit geringer spez. THG-Last
Ergebnis: reduzierte spez. THG-Last von 810 kg CO₂-äq. / m³ im DSV und 85 kg CO₂-äq. / m für Verpressanker

Darüber hinaus werden in der Bilanzierung die über die Projektlaufzeit verlaufende absehbare industrielle Entwicklung zur Reduktion der THG-Lasten im Zement analog zu Abschnitt 3.2 berücksichtigt.

Infolge der vorgenannten Optimierung wird eine Reduzierung der THG-Emissionen des Spezialtiefbauarbeiten im Zielszenario von insgesamt ca. 117.000 t CO₂-äq. (ca. - 88 %) prognostiziert. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.5 des Anhanges.

3.6 Maschinelles Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM)

Die Herstellung der Tunnelabschnitte erfolgt mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine (TBM) im maschinellen Tunnelvortrieb. Für den Betrieb der Maschine fällt ein erheblicher Energiebedarf in Form von elektrischer Energie an. Die herzustellenden Tunnelröhren in Stahlbetonbauweise und die weiteren Begleitmaterialien (Ringspaltmörtel) wurden bereits im Bereich 3.2 (Stahlbetonbauweise) miterfasst.

Baseline-Szenario:

Für den Betrieb der Tunnelbohrmaschine inklusive aller Begleitarbeiten (Baustelleneinrichtung, Separationsanlagen, Abtransport von Abraum aus der Röhre, etc.) wird ein Gesamtenergiebedarf auf Grundlage der zu erzielenden Tunnelabmessungen und Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten in Höhe von 420.000 MWh gedeckt durch elektrische Energie erwartet [6]. Für die Herstellung der elektrischen Energie wird der deutschlandweite Strommix mit folgenden spez. THG-Lasten gemäß Ökobaudat angesetzt:

- Ab 2022: 0,5894 kg CO₂-äq. / kWh
- Ab 2030: 0,5028 kg CO₂-äq. / kWh

Damit ergibt sich eine Gesamt-THG Last von 217.240 t CO₂-äq. im Baseline-Szenario.

Zielszenario

Es werden folgende heute umsetzbare Reduktionsmaßnahmen umgesetzt:

- Verwendung von Ökostrom für alle Bauprozesse der durch die HOCHBAHN beigestellt wird.
Ergebnis: Reduzierung der spez. THG-Last auf 0,01048 kg CO₂-äq. / kWh (Ansatz Windstrom)

Infolge der vorgenannten Optimierung wird eine Reduzierung der THG-Emissionen für die TBM im Zielszenario von insgesamt ca. 4.405 t CO₂-äq. (- 98 %) prognostiziert. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.4 des Anhanges.

3.7 Sonstige bilanzierte Leistungen im erweiterten Rohbau

Neben den zuvor dezidiert betrachteten energie- und materialintensiven Bereichen des erweiterten Rohbaus und darauf aufbauenden Reduktionsmaßnahmen werden folgende weitere Bereiche bilanziert:

- Schienensystem
- Mauerwerksarbeiten in den Haltestellen
- Baustellenbetrieb mit allgemeinem Stromverbrauch und Wassermanagement

Derzeit wird jedoch nur der Baustellenbetrieb hinsichtlich möglicher Reduktionspotentiale untersucht, da die oben genannten Arbeiten am Gesamt-THG-Potential eine untergeordnete Rolle spielen. Eine genauere Untersuchung ist in dem weiteren Planungs- und Bauprozess vorgesehen, vgl. Abschnitt 5.

3.7.1 Schienensystem

Für die Herstellung des Schienensystems werden derzeit zwei unterschiedliche Systemaufbauten je nach Streckenerfordernis verwendet, sodass in der Bilanzierung zwei Regelquerschnitte bewertet werden. Derzeit ist geplant im Bereich U5-Ost ca. 12,4 km Schiene im Schotterbett zu verbauen. Im Bereich U5-Mitte sind jeweils 24,3 km Schiene im Schotterbett und 24,3 km Schienenstrang als feste Fahrbahn auf einem Betonkörper (im Rahmen des Stahlbetons bereits miterfasst) zu verlegen. Die Bilanzierung umfasst sowohl die erforderliche Herstellung der Materialien (Schiene, Schotter, Schwellen, Stromschiene, etc) als auch den Transport und den Einbau der Systeme. Auf Basis der Regelquerschnitte werden folgende spez. THG-Lasten je Schienenmeter ermittelt:

- Schienenstrang feste Fahrbahn (ohne Betonkörper): 85 kg CO₂-äq./m
- Schienenstrang im Schotterbett: 218 kg CO₂-äq./m

Damit ergibt sich eine Gesamt-THG Last von 10.070 t CO₂-äq. für beide Szenarien. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.6 des Anhanges.

3.7.2 Mauerwerksarbeiten

Die erforderliche Mauerwerksarbeiten umfassen die Herstellung von Kalksandsteinwänden in unterschiedlicher Bauform (z. B. Wanddicke, verputzt / unverputzt, etc.). Je Haltestelle fallen diese Arbeiten in unterschiedlichem Umfang an. Daher wurden für die unterschiedlichen Haltestellen gemittelte Werte für die Menge der herzustellenden Wände und den damit verbundenen spez. THG-Lasten je Wand ermittelt:

- Durchschnittliche Wandfläche je Haltestelle: 756 m²
- Mittlere spez. THG-Last je Wandfläche: 84 kg CO₂-äq./m²

Auf Basis der Anzahl der Haltestellen und den vorgenannten Parameter ergibt sich eine Gesamt-THG-Last für die Mauerwerksarbeiten von 3.505 t CO₂-äq. in beiden Szenarien. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.7 des Anhanges.

3.7.3 Allg. Baustellenbetrieb

Der allgemeine Baustellenbetrieb umfasst die elektrische Energie für die Baustelle (Einrichtung, Hub- und Arbeitsgeräte, etc.) und das Wassermanagement (Wasserhaltung und Wasseraufbereitung). Zur Bilanzierung der entsprechenden Bedarfe wurde die erforderliche elektrische Energiemenge auf Basis von Erfahrungswerten und auf Grundlage von bisherigen Auslegungsdokumenten (z. B. erforderliche Pumpen- und Aufbereitungskapazität des Wassermanagements) berechnet. Hieraus ergibt sich folgender notwendiger Energiebedarf:

- Allg. Baustrombedarf: 88.320 MWh
- Wassermanagement: 77.441 MWh

Unter Berücksichtigung der spez. THG-Last des deutschlandweiten Strom-Mixes vgl. Abschnitt 3.6 ergibt sich eine Gesamt-THG-Last von 86.075 t CO₂-äq. im Baseline-Szenario.

Da die HOCHBAHN für den Bau der U5 Ökostrom verwendet, kann unter Annahme einer reduzierten THG-Last für Ökostrom (Windstrom) die Gesamt-THG-Last auf 1.742 t CO₂-äq. im Zielszenario reduziert werden. Eine Gesamtübersicht der Bilanzierung enthält Abschnitt A.8 des Anhanges.

3.8 Sonstige pauschalisiert erfasste Leistungen im Bereich des erweiterten Rohbaus

Neben den zuvor beschriebenen und einzeln bilanzierten Bauweisen und Bauverfahren fallen weitere Arbeiten an, die im Rahmen der bisherigen Bilanz pauschal erfasst werden. Zu den so abgeschätzten Arbeiten und Prozessen gehören u.a.:

- genereller Fahrzeugverkehr,
- Räumungsarbeiten,
- provisorische Wegeföhrung,
- sonstige Verbauarbeiten,
- Abdichtungsarbeiten,
- Nebenarbeiten für kleinere Arbeitsschritte,
- Baustellenräumung,
- nicht bilanzielle abgeschätzte Installations- und Montagearbeiten.

Als Abschätzung der Arbeiten werden 10 % der aus den Stahl- und Stahlbetonarbeiten entstehenden THG-Emissionen im Baseline-Szenario angenommen. **Damit werden für die Arbeiten eine Gesamt-THG- Last von 102.295 t CO₂-äq. prognostiziert.**

4 Ergebnisübersicht der Bilanzierung für „Baseline“ und „Zielszenario“

Im Rahmen der vorangegangenen Abschnitte wird die Bilanzierung des THG-Potentials zum Bau der U- Bahnlinie U5 im Baseline- (Do-nothing, konventioneller Bau) und klimaschonendem Zielszenario zusammengefasst und gegenübergestellt.

Abbildung 5 zeigt vergleichend die Ergebnisse der THG-Bilanz aus den unterschiedlichen betrachteten Bereichen als gestapelte Säulen für die beiden Szenarien.

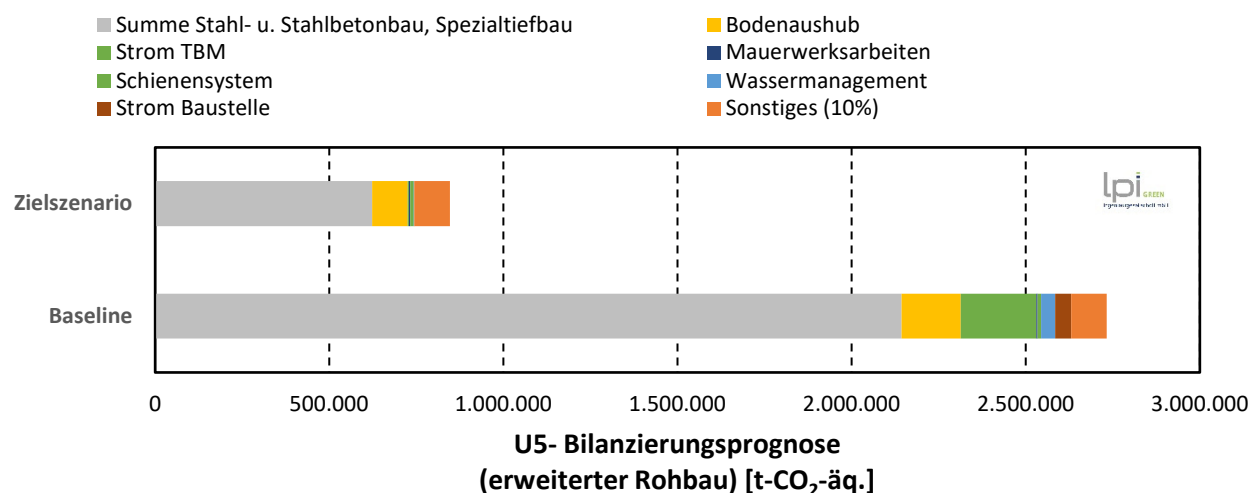


Abbildung 5: Gesamtbilanzübersicht des THG-Potentials im Baseline- und Zielszenario für den erweiterten Rohbau

Anhand der Darstellung zeigt sich, dass das Gesamt-THG-Potential des U-Bahnbaus im Zielszenario ggü. dem Baseline Szenario deutlich reduziert werden kann. Im derzeitigen Verlauf ergibt sich im Zielszenario ein gesamtes THG-Potential für den erweiterten Rohbau von ca. 850.000 t CO₂-äq. Umgelegt auf die Lebensjahre des zu erstellenden Bauwerkes, entspräche dies ca. 7.727 t CO₂-äq. pro Jahr bei einer

Lebensdauer des Bauwerkes von 110 Jahren. Im Baseline-Szenario werden Gesamtemissionen für den erweiterten Rohbau von ca. 2,74 Mio. t CO₂-äq. erwartet.

Neben der gesamtheitlichen Darstellung ist ebenfalls der zeitliche Verlauf der THG-Emissionen über die Bauzeit interessant, um sowohl zeitliche Effekte von Reduktionsmaßnahmen zu veranschaulichen als auch eine Abschätzung der noch verbleibenden, jährlichen THG-Potentiale zu erhalten. Es ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten jährlichen Emissionen und die in Abbildung 7 dargestellten, kumulierten THG-Emissionen.

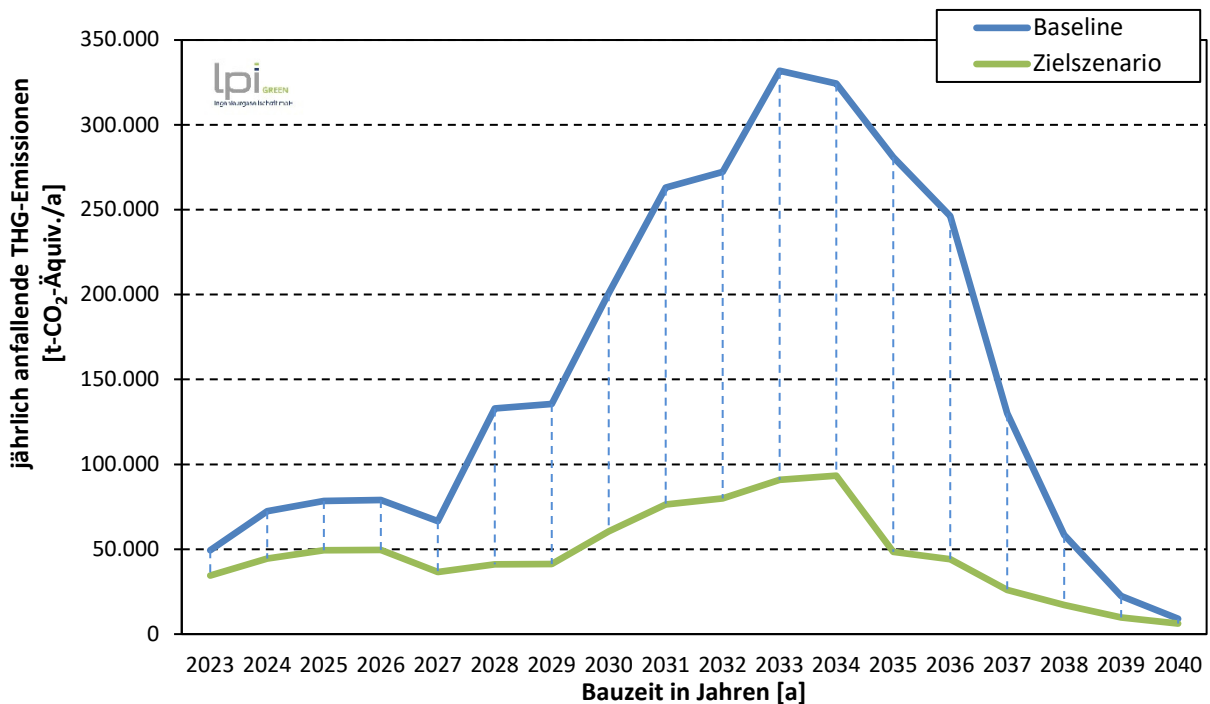


Abbildung 6: prognostizierte, jährlich anfallende THG-Emissionen im Baseline- und Zielszenario

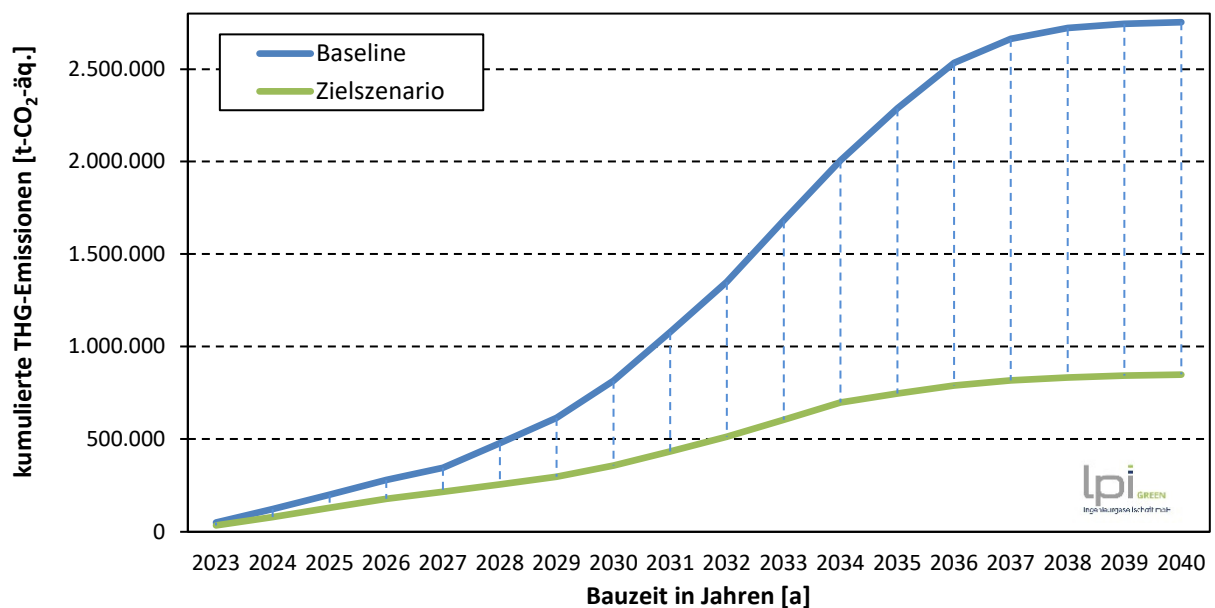


Abbildung 7: prognostizierte, kumulierte THG-Emissionen im Baseline- und Zielszenario

Die Umsetzung weiterer projektspezifischer Maßnahmen ist vorgesehen und soll kontinuierlich weiter vorangetrieben werden (vgl. Abschnitt 5). Es wird davon ausgegangen, dass durch die laufende Integration der THG-Bilanzierung in den Planungs- und Bauprozess und den darauf aufbauenden Optimierungen weitere Reduktionspotentiale in einer Größenordnung von mindestens 5-10 % gehoben werden können.

5 Zukünftige Entwicklungspotentiale und weitere Schritte

Mit der derzeitigen THG-Bilanz wird eine Bewertungsgrundlage für die zu erwartenden THG-Emissionen geschaffen und ein Ausblick gegeben, welche Reduktionspotentiale durch die Anwendung einer Reduktionsstrategie mit abgestimmten Maßnahmen zu erreichen sind. Für die Zukunft ist geplant, die Bilanzierung weiter fortzuschreiben und mit zunehmendem Projektfortschritt weiter zu detaillieren. Es sollen bisher noch pauschalisiert erfasste Arbeitsschritte bilanziert und weitere Arbeiten, wie zum Beispiel die TGA oder der raumbildende Ausbau einbezogen werden, sobald hierfür eine ausreichende Datengrundlage aus der Planung bereitsteht.

Gerade die jetzt kurzfristig umgesetzten ersten Maßnahmen haben eindrucksvoll bewiesen, dass insbesondere durch eine effiziente Planung mit dem Ziel einer Materialvermeidung signifikante Verbesserungen ohne physischen Aufwand erreicht werden. Der gesamte Planungs- und natürlich auch der spätere Bauprozess wird aus diesem Grund intensiv begleitet und – soweit erforderlich – auch entsprechend validiert und verifiziert.

Das Ziel der THG-reduzierten Bauweise ist in der Planung verankert worden. Neben der Gesamtschau der THG-Bilanz über das Gesamtprojekt wird die THG-Bilanzierung daher auch ein wesentliches Hilfsmittel für die Planungsarbeiten sein. Von der Auswahl der Materialien und Bauverfahren bis zur Teilbilanzierung von Ausführungsvarianten für anschließende Entscheidungsfindungen finden THG-Bilanzierungen und Auswertungen statt, so dass im Anschluss diese Ergebnisse belastbar für eine begründete Entscheidungsfindung unter zu Hilfenahme aller Bewertungskriterien zur Verfügung steht. Die daraus resultierenden Erfolge und Zwischenstände werden für Bauwerksabschnitte erfasst und können auf nachfolgende Arbeitsabschnitte übertragen werden.

Ein weiteres Ziel dieser Bilanz ist es, nicht nur eine Prognose der zu erwartenden THG-Emissionen zu erhalten, sondern auch mit Fortschreiten der Arbeiten die tatsächlich erzeugten THG-Potentiale zu bewerten. So werden auch die durchgeführten Arbeiten durch ein THG-Monitoring zukünftig erfasst und die bisherigen Berechnungen und Prognosen mit diesen Daten validiert.

Aus der bisherigen Bilanzierung und den Untersuchungen von möglichen Reduktionspotentialen erwächst jedoch auch die Notwendigkeit entsprechende Vorgaben zur Reduzierung der THG-Last umzusetzen. Hier kommt der HOCHBAHN als Vergabestelle eine besondere Bedeutung zu, da sie die Anforderung an die zu leistenden Arbeiten und einzusetzenden Produkte definieren wird. Nur durch diese definierten Anforderungen werden die weiteren Projektbeteiligten aufgefordert, entsprechende Planungs- und Ausführungsschritte von Anfang an zu ergreifen und die THG-Reduktionswege umzusetzen. Dazu werden in den Ausschreibungsunterlagen zunehmend Anforderungen hinsichtlich der Umweltwirkungen, insbesondere hinsichtlich der THG-Potentiale der verwendeten Materialien und Anforderungen an die Bauprozesse, integriert. Außerdem wird der Planungs- und Bauprozess beratend begleitet. Im

Ingenieurbau stellt dieses Vorgehen gerade in öffentlichen Ausschreibungen noch eine Ausnahme dar, so dass die entsprechende Umsetzung zunächst schrittweise unter Berücksichtigung der zu erwartenden technischen und vergaberechtlichen Konsequenzen erfolgen kann.

Die Abbildung 8 veranschaulicht das Zusammenwirken der verschiedenen Bilanzierungsebenen.

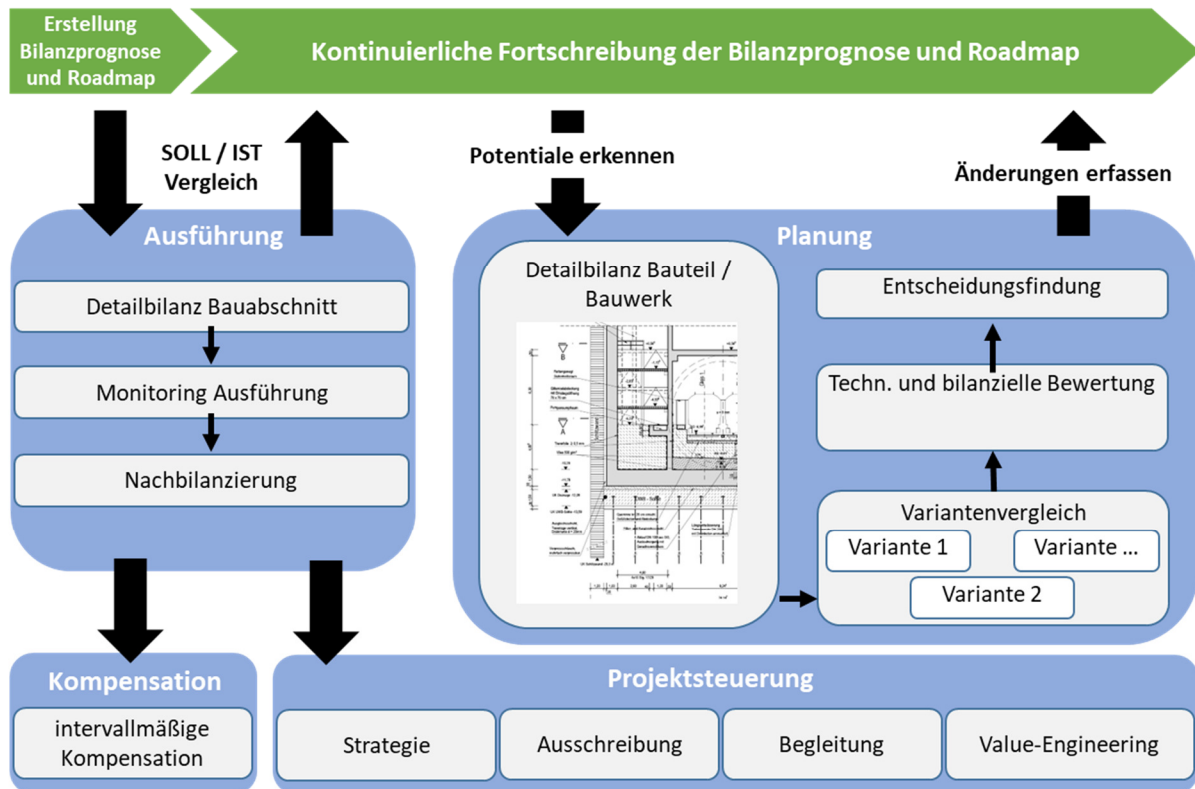


Abbildung 8: Integration von THG-Monitoring und Berichtswesen in die Projektablauf und die Reduktionsstrategie des THG-Potentials

gez. die Autoren:

Dipl.-Ing. Christoph Begemann

Leitung Nachhaltigkeitsberatung / Projektleiter

Dr.-Ing. Christoph Schulte-Schrepping

stellv. Projektleiter

A Anhang Bilanzierungsdaten

Überblick:

- A0 – Teil 0: Beschreibung Bilanzierungsvorgehen
- A1 – Teil 1: Stahlbetonbauweise
- A2 – Teil 2: Stahlbauweise
- A3 – Teil 3: Bodenmanagement
- A4 – Teil 4: Spezialtiefbauarbeiten
- A5 – Teil 5: Maschinelles Tunnelbauvortrieb mit TBM
- A6 – Teil 6: Schienensysteme
- A7 – Teil 7: Mauerwerksarbeiten
- A8 – Teil 8: Baustellenbetrieb
 - Teil 8a: allgemeiner Baustrom
 - Teil 8b: Wassermanagement
- A9 - Teil 9: sonstige Leistungen
- A10 – Teil 10: tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse
- A11 – Literatur

A.0 Bilanzierungsvorgehen

Aufbauend auf den in Kapitel 3 dargestellten allgemeinen Aussagen zum Bilanzierungsvorgehen, werden in den nachfolgenden Textteilen Details und Vorgehensweisen beleuchtet und näher beschrieben.

Das Projekt U5 ist auf Grund der Art, der Größe, dem Umfang und der damit zusammenhängenden Laufzeit auch im Sinne einer umweltbilanziellen Betrachtung eine besondere Baumaßnahme. Während standardisierte Bilanzierungen der Umweltwirkungen bisher vor allem im Hochbau vermehrt eingesetzt werden, kommt im Bereich der Infrastruktur- und Ingenieurbauwerke eine derartige Methodik nicht standardisiert zum Einsatz. Für derartige Bauweisen sind zudem herstellungsbedingte Besonderheiten, wie besondere Bauweisen oder energieintensive Bauprozesse (Tunnelbohrarbeiten, Spezialtiefbauarbeiten, etc.), mit zu betrachten. Eine weitere Besonderheit ist die abschnittsweise Planung und Herstellung des Gesamtbauwerkes, was zu einer unterschiedlichen Detailtiefe der vorhandenen Datengrundlagen zu einem definierten Zeitpunkt führt. Entsprechend lagen für den Bereich der U5-Mitte überschlägige Mengenermittlungen und Grobplanungen für die damit verbundenen Arbeiten vor. Dagegen sind für den Bereich der U5-Ost bereits detailreichere Ausschreibungsplanungen vorhanden. Um eine entsprechende Gesamtbilanzierung vornehmen zu können, wurde eine gemeinsame Mengenermittlung der Bauweisen und Bauprozesse durchgeführt. Für die THG-Bilanzierung sind weitere Details (z. B. Materialeigenschaften) erforderlich, um z. B. spez. THG-Potentiale für Baustoffe auszuwählen oder festzulegen. Diese können jedoch aus dem bisherigen Planungsstand der U5-Mitte nicht entnommen werden. Um diese Informationen möglichst nah an den Gegebenheiten der Realität abzuschätzen, wurde eine „Basishaltestelle“ im Bereich der U5-Ost so gewählt, dass sie möglichst repräsentativ für die Gesamtmaßnahme steht. In der Folge konnten die notwendigen Detailinformationen in der Gesamtübersicht auf Grundlage der Basishaltestelle ergänzt und damit die Datengrundlage für die Sach- und Wirkbilanz erstellt werden, vgl. Abbildung 9.

Um in der Wirkbilanz THG-Potentiale zu ermitteln, wurden vornehmlich und soweit möglich freizugängliche Datensätze für die spez. THG-Potentiale von Materialien und Prozesse aus der Umweltdatenbank ÖKOBAUDAT verwendet. Auch wenn andere Datenbanken eine höhere Detailtiefe und differenziertere Datensätze anbieten wurde sich zunächst für diese Bilanzierung auf die freizugänglichen und nachvollziehbaren Datensätze soweit möglich beschränkt.

Für die Entwicklung des Zielszenarios werden projektspezifische THG-Reduktionsmaßnahmen verfolgt, so dass auf die allgemeinen, in der Ökobaudat ausgewiesenen THG-Potentiale von Materialien (z. B. Betone) und Bauprozessen nicht mehr zurückgegriffen werden kann. Stattdessen wurden Neuberechnungen, z. B. für THG-reduzierte Betonzusammensetzungen auch unter Berücksichtigung projektspezifischer Informationen durchgeführt. Hierbei werden Umsetzbarkeit, technische Randbedingungen und Anforderungen sowie weitere Aspekte der Planung und Ausführung berücksichtigt.

Die resultierenden, geänderten THG-Potentiale werden zusammenfassend beschrieben und sind, z. B. für die angesetzten THG-reduzierten Betone, industrieseitig verifiziert worden.

Das Zielszenario enthält ggü. dem Baseline-Szenario ebenfalls Anpassung in der Menge der verwendeten Materialien, die aus einer ersten Optimierungsstufe der Vorplanung für die U5-Mitte herrühren.

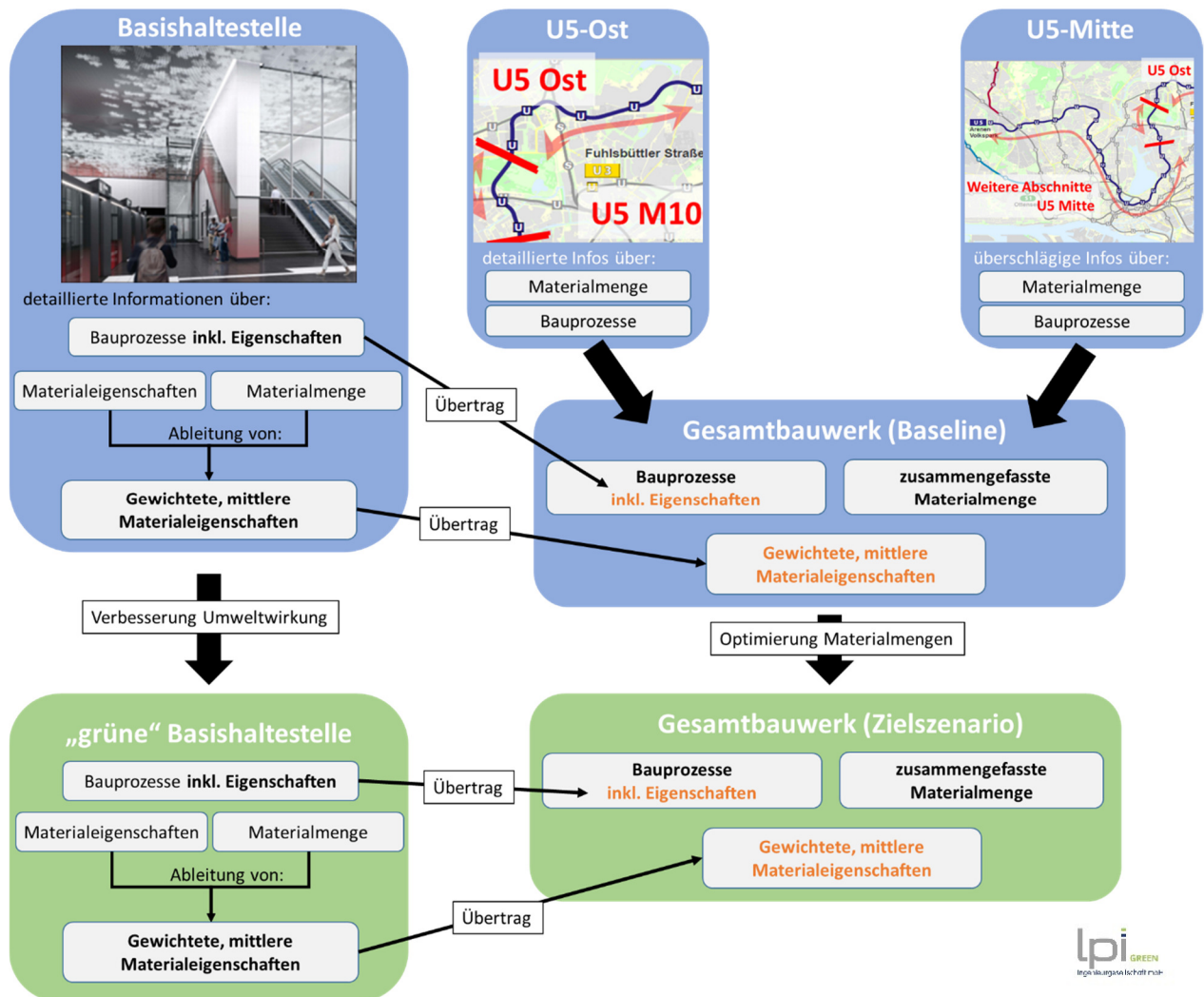


Abbildung 9: Beschreibung Bilanzierungsvorgehen und Umgang mit variierenden Detailtiefen zwischen den unterschiedlichen Bau- / Projektabschnitten, eigene Darstellung

A.1 Teil 1: Stahlbetonbauweise

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 3.2 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. A.0) wird nachfolgend die Bilanzierung der Stahlbetonbauweise zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Aus den durch die HOCHBAHN zur Verfügung gestellten Mengenermittlungen und Ausschreibungsunterlagen wurden die vorgesehenen Mengen analysiert und kategorisiert (u.a. [2],[3],[4],[5]). Es wurden drei Kategorien für die hergestellten Stahlbetonbauteile geschaffen: Baubehelfe / Verbau, Dauerbauwerk – Offene Bauweise (vor allem Haltestellen) und Dauerbauwerk – Tunnelbau, vgl. Tabelle 1. Insgesamt wird im Baseline-Szenario von einer Gesamtbetonmenge von ca. 3,43 Mio. m³ Stahlbeton ausgegangen. In der angegebenen Gesamtmenge ist ein Bewehrungsstahlanteil von ca. 343.000 t enthalten.

Tabelle 1: Massenermittlung der zu verbauenden Stahlbetonmengen (gerundet), Szenario BASELINE

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|---|----------------------|----------------|------------------|------------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Baubehelfe / Verbau | m ³ | 284.550 | 1.343.390 | 1.627.940 |
| Dauerbauwerk - Offene Bauweise | m ³ | 230.000 | 1.163.600 | 1.393.600 |
| Dauerbauwerk - Tunnelbau | m ³ | 77.500 | 329.860 | 407.360 |
| Summe Stahlbeton | m³ | 592.050 | 2.836.850 | 3.428.900 |
| enthaltene Bewehrung² | t | 45.800 | 296.890 | 342.690 |

Auf Grund des besonderen Wissens über die THG-Emissionen aus der Stahlbetonbauweise wurde in einem ersten Optimierungsschritt gezielt die Betonmengen durch Planungsänderungen in dem Abschnitt U5-Mitte reduziert. Dies führt bisher zu einer Einsparung von ca. 10 % ggü. der ersten Mengenermittlung, weil die materialintensiven Haltestellen verkürzt und Tunnelabschnitte verlängert werden konnten, vgl. Tabelle 2. Die reduzierten Gesamtmengen belaufen sich so auf 3,21 Mio. m³ Beton und ca. 303.000 t Bewehrungsstahl.

Tabelle 2: Massenermittlung der zu verbauenden Stahlbetonmengen (gerundet), Zielszenario

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|---|----------------------|----------------|------------------|------------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Baubehelfe | m ³ | 284.550 | 1.209.050 | 1.493.600 |
| Dauerbauwerk - Offene Bauweise | m ³ | 230.000 | 1.047.240 | 1.277.240 |
| Dauerbauwerk - Tunnelbau | m ³ | 77.500 | 362.850 | 440.350 |
| Summen | m³ | 592.050 | 2.619.140 | 3.211.190 |
| enthaltene Bewehrung³ | t | 45.800 | 256.650 | 302.450 |

²Der Unterschied in den sich ergebenden Bewehrungsverhältnissen (Bewehrung / Beton) zwischen U5-Mitte und U5-Ost ergibt sich aus dem noch frühen Planungsstand der U5-Mitte, so dass hier noch entsprechende Sicherheiten eingeplant sind. Der Bewehrungsanteil fällt daher in der U5-Mitte derzeit noch höher aus.

³ s.o.

Wirkbilanz:

Auf Basis der beschriebenen Mengen fand die Berechnung der THG-Emissionen statt. Diese Berechnung setzt sich im Wesentlichen aus 4 Hauptschritten zusammen und wird nachfolgend beschrieben:

1. Ermittlung der spez. THG-Emissionen je Kubikmeter unbewehrtem Beton für die genannten Bauwerkskategorien
 - a. Sortierung der Betonmengen und Anforderungen nach Bauteilkategorien (vgl. Tabelle 5)
 - b. Zusammentragen der erforderlichen THG-Potentiale für die verwendeten Betone auf Basis der anerkannten und freizugänglichen Datensätze der Ökobaudat (vgl. Tabelle 3)
 - c. Zuordnung der spez. THG-Emissionen je m³ unbewehrtem Beton zu den Betonen in einer Bauwerkskategorie (vgl. Tabelle 5)
 - d. Berechnung der gesamten THG-Last in einer Kategorie (Tabelle 5)
 - e. Ermittlung der mittleren, gewichteten THG-Last je m³ unbewehrtem Beton in einer Bauteilkategorie (Tabelle 5)
2. Ermittlung der Gesamten THG-Last für den unbewehrten Beton
 - a. Übertragung der mittleren, gewichteten THG-Last aus der Basishaltestelle auf die Bauteilkategorie in der Gesamtübersicht (vgl. Tabelle 6)
 - b. Berechnung der resultierende Gesamt THG-Last je Bauwerkskategorie (vgl. Tabelle 6⁴)
 - c. Berechnung der resultierenden Gesamtlast THG-Last
 - d. Reduzierung der THG-Last um den Anteil der Bewehrung
3. Ermittlung der THG-Last der Bewehrung
 - a. Erfassung des THG-Potentials für die Bewehrung auf Basis der anerkannten und freizugänglichen Datensätze der ÖKOBAUDAT (vgl. Tabelle 4)
 - b. Zuordnung der spez. THG-Emissionen je t Bewehrungsstahl (Tabelle 6)
 - c. Berechnung des THG-Potentials infolge der Bewehrung (Tabelle 6)
4. Ermittlung des Gesamt-THG-Potentials für die Stahlbetonbauweise (Tabelle 6)

Im Baseline-Szenario wurde eine Gesamt-THG-Last von 1,02 Mio. t CO₂-äq. für die Stahlbetonbauweise ermittelt.

⁴ Im Rahmen dieser Darstellung wurde auf eine möglichst kurze zusammenfassende Darstellung geachtet. Die weiteren Berechnungen der weiteren Bauteilkategorien können auf Nachfrage bei der HOCHBAHN bei der LPI-Ingenieurgesellschaft mbH eingesehen werden.

Tabelle 3: Übersicht des Treibhausgaspotentials für die EPD-Betone, gelistet in der ÖKOBAUDAT [1]

| Betonfestigkeitsklasse | Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -äq./ m ³] | | | | Gesamt THG für unbewehrten Beton (Rohdichte: 2400 kg/m ³) | | Quelle/Jahr |
|------------------------|--|-----|------|-----|---|----------------------------|---|
| | A1-A3 | A4 | A5 | B1 | kg CO ₂ -äq./ m ³ | kg CO ₂ -äq./ t | |
| C 20/25 | 178 | 3,9 | 1,08 | -10 | 173 | 72 | ÖKOBAUDAT: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25 IZB 2018 |
| C 30/37 | 219 | 4,5 | 1,08 | -10 | 215 | 89 | ÖKOBAUDAT: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37 IZB 2018 |
| C 35/45 | 244 | 9,1 | 1,08 | -10 | 244 | 102 | ÖKOBAUDAT: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 35/45 IZB 2018 |

Hinweis zu Tabelle 3: Die Daten enthalten sowohl materialimmanente Emissionen für deren Herstellung (A1-A3) als auch für den Transport (A4) und den Einbau (A5) zur und auf der Baustelle. Darüber hinaus nimmt der Beton im Zuge seines Lebens ebenfalls CO₂ wieder auf, welches hier als kleinerer, positiver Bonus berücksichtigt wird. Dies ist in erster Näherung zulässig, da davon ausgegangen wird, dass die Betonoberflächen nicht versiegelt werden und durch entsprechende Umgebungsluft beaufschlagt werden. Die CO₂-Aufnahme durch Carbonatisierung ist ein zeitabhängiger Prozess und der oben angegebene Wert stellt einen Durchschnittswert für einen Zeithorizont von 50 Jahren lt. Umweltproduktdeklaration dar. Für die U5 wird von einer Lebensdauer von ≥110 Jahren ausgegangen. Weitere Faktoren aus der Betonzusammensetzung und den Umgebungsbedingungen haben hier ebenfalls einen Einfluss. Eine genauere Betrachtung wird mit Fortschreibung der Studie angestrebt.

Tabelle 4: Übersicht des Treibhausgaspotentials für die Bewehrung [1]

| Bewehrungsstahl | Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -äq./ t] | | | Gesamt THG-Potential Bewehrung | Quelle/Jahr |
|------------------|--|-----|----|--------------------------------|--|
| | A1-A3 | A4 | A5 | | |
| Bewehrung | 683 | 10* | ** | 693 | ÖKOBAUDAT: Bewehrungsstahl IZB 2018 |

*Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,06444 kg CO₂-äq./tkm) und eine Transportentfernung von 150 km.

** Die Aufwendung für den Einbau des Stahls sind über die allgemeinen THG-Lasten der Baustelle abgedeckt.

Tabelle 5: Beispielhafte Bestimmung des gewichteten, mittleren THGs für den Beton einer Bauteilkategorie, hier Baubehelf und Verbau (Basishaltestelle)

| Bauteil ¹⁾ | Festigkeitsklasse | Expositionsklassen | Menge | THG/m ³ | THG |
|---|-------------------|--------------------|-------------------|--|------------------------|
| | | | [m ³] | kg CO ₂ -äq. / m ³ (A1-A5, B1) | t CO ₂ -äq. |
| Schlitzwand (zusammengefasst) | C30/37 | XC4, XF1, XA1 | 30.600 | 215 | 6.579 |
| Leitwände Schlitzwand | C20/25 | - | 765 | 173 | 132 |
| Unterwasserbetonsohle | C30/37 | XF1, XA1 | 1.200 | 215 | 258 |
| Spritzbeton (zusammengefasst) | C20/25 | X0 | 645 | 192 | 124 |
| Bohrpfähle | C35/45 | XC4, XF1, XA1 | 65 | 244 | 16 |
| Gurtung / Steifen | C35/45 | XC4, XF1, XA1 | 640 | 244 | 156 |
| Kopfbalken | C35/45 | XC4, XF1, XA1 | 605 | 244 | 148 |
| Abfangbalken | C35/45 | XC4, XF1, XA1 | 155 | 244 | 38 |
| Summe Baubehelf / Verbau | | | 34.675 | - | 7.451 |
| Gewichtetes, mittleres THG/m³ [kg CO₂-äq. / m³] | | | 214 | | |

¹⁾ Die dargestellten Mengen und Bauteilpunkte bestehen zum Teil aus mehreren Bauteilpositionen mit jedoch gleichen Bauteileigenschaften, so dass diese zur besseren Übersichtlichkeit an dieser Stelle mengenmäßig zusammengefasst wurden.

Tabelle 6: Bilanzierungsübersicht der Stahlbetonbauweise im Gesamtprojekt U5, Baseline-Szenario

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitt | | Gesamt | THG | |
|---|----------------------|----------------|------------------|------------------|--|------------------------------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | | spez. [kg-CO ₂ -äq. /Einh.] | Gesamt [t-CO ₂ -äq.] |
| Unbewehrter Beton | | | | | | |
| Bauehelfe | m ³ | 284.550 | 1.343.390 | 1.627.940 | 214 | 348.379 |
| Dauerbauwerk | m ³ | 230.000 | 1.163.600 | 1.393.600 | 234 | 326.102 |
| Tunnelbeton | m ³ | 77.500 | 329.860 | 407.360 | 294 | 119.764 |
| Gesamt | m³ | 592.050 | 2.836.850 | 3.428.900 | | 794.245 |
| anzusetzender, unbewehrter Beton reduziert um Bewehrungsanteil, ca. 1,283 Vol.-% | | | | 3.359.754 | | 784.055 |
| Bewehrung | t | 45.800 | 296.890 | 342.690 | 693 | 237.635 |
| Gesamtlast | | | | | | 1.021.690 |

Zielszenario auf Basis optimierter Materialeigenschaften:

Für die Herleitung des Zielszenarios wurden die in Abschnitt 3.2 dargestellten Reduktionsmaßnahmen angewendet. Die reduzierten Materialmengen aus Tabelle 2 dienen hier als Grundlage für die Berechnung. Die weitere Berechnung erfolgte analog zum Vorgehen im Baseline-Szenario.

Um im Rahmen der Optimierung auch die Reduktionsmaßnahmen durch Materialanpassungen zu berücksichtigen, wurde folgende Schritte angepasst:

- Reduzierung der spez. THG-Emissionen je m³-unbew. Beton unter Verwendung heute umsetzbarer Ökobetone⁵ (Schritt 1.c)
- Neuberechnung von gewichteten mittleren THG-Lasten für die Bauwerkskategorien (Schritt 1)
- Übertragung der neuen gewichteten Mittelwerte in Tabelle 7 (Schritt 2.a)
- Analoge Berechnung und Auswertung nach vorgenanntem Ablauf

Somit ergibt sich zunächst eine reduzierte Gesamtlast von 812.087 t CO₂-äq. Aus den Tabellenwerten kann außerdem eine mittlere THG-Last je m³ unbewehrtem Beton von ca. 190 kg CO₂-äq. / m³ ermittelt werden.

⁵ Basis für die Optimierung war eine Parameterstudie zur Berechnung der THG-Potentiale von zementklinkerreduzierten Betonen (Ökobetonen), die einerseits die erforderlichen Bauteileigenschaften sicherstellen, ausreichend handhabbar für die Ausführung sind und mit einem CO₂-armen Zement auskommen. Die Basis für diese Arbeit resultiert aus Erfahrungswerten für Betonzusammensetzungen aus früheren, ähnlichen Bauprojekten und dem Know-How der LPI Ingenieurgesellschaft in der Entwicklung und dem Entwurf von Ökobetonen. Die Erreichbarkeit der ermittelten THG-Lasten wurden in einem Industriaustausch durch Industriepartner bestätigt. Da die Berechnungen der ermittelten Daten sehr umfangreich sind und unter anderem projektspezifische, vertrauliche Daten enthalten, wurde auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle 7: Bilanzierungsübersicht zum Zielszenario der Stahl- und Stahlbetonbauweise im Gesamtprojekt U5

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitt | | Gesamt | THG | |
|---|----------------------|----------------|------------------|------------------|--|------------------------------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | | Spez. [kg-CO ₂ -äq. /Einh.] | Gesamt [t-CO ₂ -äq.] |
| Unbewehrter Beton | | | | | | |
| Bauehelfe | m ³ | 284.550 | 1.209.050 | 1.493.600 | 160 | 238.976 |
| Dauerbauwerk | m ³ | 230.000 | 1.047.240 | 1.277.240 | 188 | 240.121 |
| Tunnelbeton | m ³ | 77.500 | 362.850 | 440.350 | 297 | 130.784 |
| Gesamt | m³ | 592.050 | 2.619.140 | 3.211.190 | | 609.881 |
| anzusetzender, unbewehrter Beton reduziert um Bewehrungsanteil, ca. 1,212 Vol.-% | | | | 3.175.230 | | 602.489 |
| Bewehrung | t | 45.800 | 256.650 | 302.450 | 693 | 209.598 |
| Gesamtlast | | | | | | 812.087 |

Im weiteren Projektverlauf wird prognostiziert, dass sowohl im Rahmen der Zementherstellung als auch im Rahmen der Bewehrungsstahlherstellung weitere Reduktionspotentiale durch technische Entwicklung in der Industrie über die Projektlaufzeit entstehen. Diese Annahmen fußen auf einem Industrieaustausch mit mehreren Branchen- und Verbandsvertretern der Zement-, Beton- und Stahlindustrie, in dem insbesondere folgende Punkte herausgearbeitet wurden:

- Weitere Intensivierung der Verwendung von klinkerreduzierten Zementen
- Verwendung Wasserstoff als Energieträger
- Abscheidung, Speicherung und ggf. Weiterverwendung von prozessbedingt verursachtem CO₂

Auf Basis der vorgenannten Annahmen wurde der zeitliche Verlauf der spez. THG-Emissionen für einen Kubikmeter unbewehrtem Beton und einer Tonne Bewehrungsstahl mit verschiedenen Entwicklungsschritten über die Projektlaufzeit beschrieben, vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11.

Um diese Werte in der Bilanzierung zu berücksichtigen, wurden die erwarteten Betonmengen unter Berücksichtigung des derzeitigen Vorhabenplans auf die Projektlaufzeit bis Ende der 30er Jahre verteilt. Berücksichtigt man nun für die jeweils jährlich anfallenden Betonmengen die zugehörigen projektzeitabhängigen THG-Potentiale aus der Abbildung 10 und Abbildung 11 ergibt sich eine Gesamtlast des THG-Potentials von 440.080 t CO₂-äq. für den Stahlbetonbau im Zielszenario.

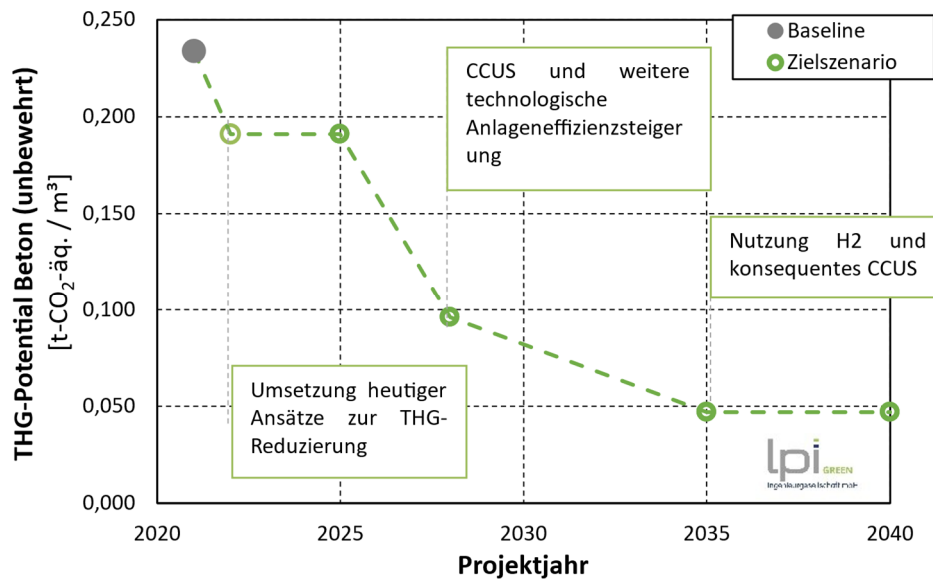


Abbildung 10: prognostizierte Entwicklung des THG-Potentials für unbewehrten Beton (Durchschnittswert) infolge Industriegesprächen und zu erwartender techn. Entwicklung (graph. Darstellung)

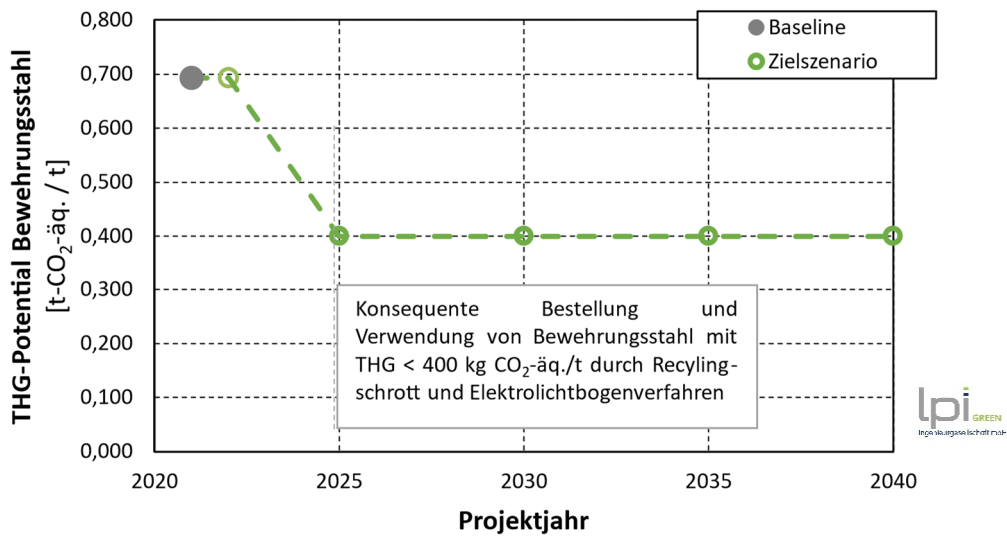


Abbildung 11: prognostizierte Entwicklung des THG-Potentials von Bewehrungsstahl (Durchschnittswert) infolge Industriegesprächen und zu erwartender techn. Entwicklung (graph. Darstellung)

A.2 Teil 2: Stahlbauweise

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 3.3 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. A.0) wird nachfolgend die Bilanzierung der Stahlbauweise zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Aus den durch die HOCHBAHN zur Verfügung gestellten Mengenermittlungen und Ausschreibungsunterlagen wurden die verbauten Mengen analysiert und kategorisiert. Die Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der erwarteten Stahlmengen je Bauabschnitt. Insgesamt wird im Baseline-Szenario von einer Gesamtstahlmenge von ca. 198.185 t ausgegangen. Die angegebenen Massen umfassen insbesondere Walz- und Profilstähle, die für den temporären Baugrubenverbau und, in einem kleineren Anteil, für Betriebseinrichtungen und Brücken verwendet werden. Der auffällige Mengenunterschied zwischen dem Abschnitt U5-Ost und dem Bereich U5-Mitte ist damit erklärt, dass im Abschnitt U5-Ost ein großer Anteil der aussteifenden Verbauelemente oder Ein- und Ausfahrtkonstruktionen für die Tunnelbohrmaschinen (z. B. Dichtblöcke) in (Stahl-)Betonbauweise ausgeführt werden. Im Bereich der U5-Mitte werden diese in Stahlbauweise hergestellt.

Tabelle 8: Mengenübersicht der enthaltenen konstruktiven Stahlmengen im Baseline-Szenario

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|-----------------|---------|---------------|----------|----------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Baseline | t | 1.090 | 197.095 | 198.185 |

Im Rahmen einer ersten Optimierung der erforderlichen Materialmengen im Bereich der U5-Mitte, fand auch eine Anpassung der Stahlmengen statt [5]. Entgegen den anderen Bereichen (z. B. Stahlbeton), erhöhen sich die verbauten Stahlmengen im Zielszenario. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bisher in einer anderen Bauweise geplanten Arbeiten nun in materialreduzierter Form in Stahlbauweise hergestellt werden sollen. Entsprechend erhöht sich zwar der Stahlanteil gleichzeitig können Material- und emissionsintensivere Arbeiten (z. B. Spezialtiefbauarbeiten) deutlich reduziert werden. Eine Übersicht der Stahlmenge im Zielszenario zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Mengenübersicht der enthaltenen konstruktiven Stahlmengen im Zielszenario

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|---------------------|---------|---------------|----------|----------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Zielszenario | t | 1.090 | 206.960 | 208.050 |

Wirkbilanz:

Im Rahmen der Sachbilanz wurden die verwendeten Stähle als Walz- und Profilstähle definiert. Hieraus ergibt sich gemäß Ökobaudat ein anwendbares spezifisches THG-Profil nach Tabelle 10.

Tabelle 10: Übersicht des Treibhausgaspotentials für die angesetzten Baustähle [1]

| Bewehrungsstahl | Module der Bilanzierung | | | | | Gesamt THG-Potential Stahl kg CO ₂ -äq. / t | Quelle/Jahr |
|------------------|-------------------------|------|----|-------|--------|---|---|
| | A1-A3 | A4 | A5 | C | D | | |
| Baustähle | 1125 | 6,4* | ** | 1,844 | -413,4 | 720 | ÖKOBAUDAT: Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche Bauforumstahl e.V., 2018 |

*Für den Fahrtweg wird angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,06444 kg CO₂-äq./tkm) und eine Transportentfernung von 100 km.

** Die Aufwendung für den Einbau des Stahls sind über die allgemeinen THG-Lasten der Baustelle abgedeckt.

Baseline-Szenario auf Basis allgemein zugänglicher Daten:

Auf Grundlage der ermittelten Stahlmengen und des spez. THG-Potentials des Baustahls ergibt sich ein Gesamt-THG-Potential im Baseline-Szenario von ca. 142.700 t-CO₂-äq.

Bilanzierungsübersicht des THG-Potentials für den konstruktiven Stahlbau (gerundet), Baseline

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt | THG | |
|-----------------|---------|---------------|----------|----------------|--|------------------------------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | | Spez. [kg CO ₂ -äq. /Einh.] | Gesamt [t-CO ₂ -äq.] |
| Baseline | t | 1.090 | 197.095 | 198.185 | 720 | 142.695 |

Zielszenario auf Basis optimierter Materialeigenschaften:

Unter Berücksichtigung der angepassten Materialmengen ergibt sich im Zielszenario eine Erhöhung der THG-Last in der Stahlbauweise auf ca. 149.800 t-CO₂-äq.

Bilanzierungsübersicht des THG-Potentials für den konstruktiven Stahlbau (gerundet), Zielszenario

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt | THG | |
|---------------------|---------|---------------|----------|----------------|---|---|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | | Spez. [kg-CO ₂ - Äquiv. /Einh.] | Gesamt [t-CO ₂ - Äquiv.] |
| Zielszenario | t | 1.090 | 206.960 | 208.050 | 720 | 149.800 |

Analog zu den industriellen Entwicklungen für die Zement- und Bewehrungsstahlindustrie wird ebenfalls für die Stahlindustrie eine industrielle Entwicklung hin zu einer THG-reduzierten Herstellung erwartet. Die dafür zugrunde gelegten Annahmen werden bereits in Abschnitt 3 der Bilanzierungszusammenfassung dargelegt worden. Die angenommenen Entwicklungsschritte wurden aus einem

Industrieaustausch erarbeitet. Die in Abbildung 12 prognostizierten, THG-Reduktionsschritte wurden in den Industriegesprächen als derzeitige, industrielle Entwicklungsziele bestätigt.

Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungsschritte und einer zeitlichen Mengenvverteilung des Stahls auf Grundlage des Vorhabenablaufplans über die Projektlaufzeit, ergibt sich eine Reduzierung des THG-Potentials der Stahlbauweise auf 66.200 t CO₂-äq.

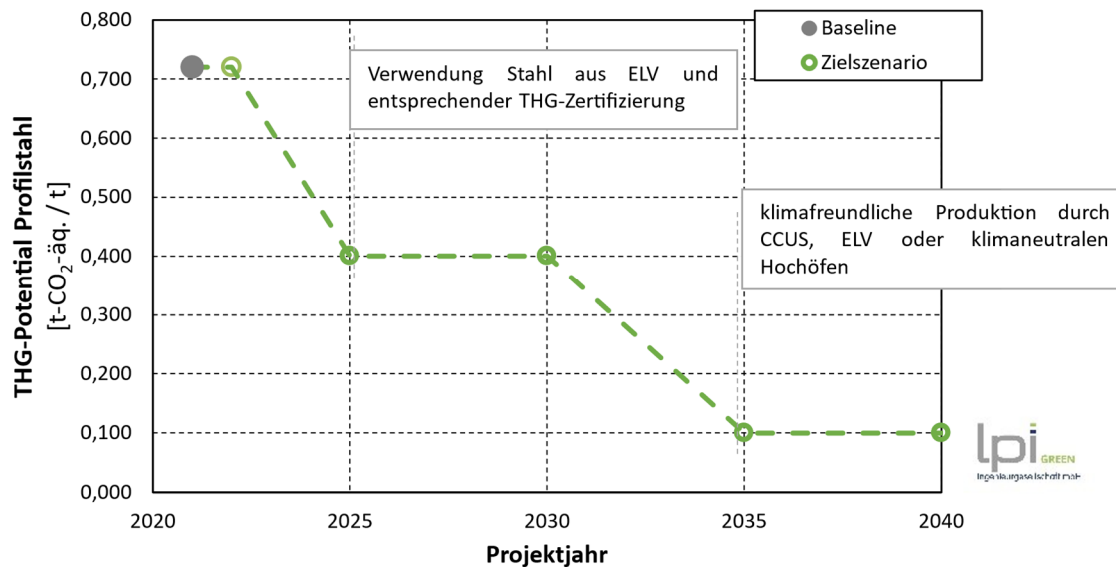


Abbildung 12: prognostizierte Entwicklung des THG-Potentials für Profilstahl (Durchschnittswert) infolge Industriegesprächen und zu erwartender techn. Entwicklung (graph. Darstellung)

A.3 Teil 3: Bodenmanagement

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 3.4 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. A.0) wird nachfolgend die Bilanzierung des Bodenmanagements zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Aus den durch die HOCHBAHN zur Verfügung gestellten Mengenermittlungen und Ausschreibungsunterlagen wurden die verbauten Mengen analysiert und kategorisiert. Die Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der anfallenden Bodenmengen, die ausgebaut und einer weiteren Verwertung zugeführt werden müssen. Insgesamt fallen ca. 12 Mio. t Material an.

Tabelle 11: Eingangsdaten für das Bodenmanagement (Quelle: Planungsdaten HOCHBAHN)

| | Masse [t] | | |
|--|------------------|------------------|-------------------|
| | U5 Ost | U5 Mitte | Gesamt |
| gesamte Bodenmenge zur Entsorgung / Verwertungsort: | 3.000.000 | 9.000.000 | 12.000.000 |

Das THG-Potential des Bodenmanagements resultiert aus den erforderlichen Bauprozessen und dem Transport des Bodenmaterials. Daher wurde ein Bauprozess entworfen, der im Anschluss bilanziert wird. Grundsätzlich liegt in der Optimierung des Prozesses auch eine Reduktionsmöglichkeit für das resultierende THG-Potential. Für das Baseline-Szenario wurde zunächst ein übliches Verarbeitungs- und Transportszenario angenommen. Dieses gliedert sich in:

- Ausbau / Aushub per Bagger,
- Transport per LKW-Zug zu einer Deklarationsfläche im Hamburger Hafen,
- Umschlag
- weiterer Transportweg (ebenfalls LKW-Zug zu einem Verwertungsort, ca. 75 km Entfernung),
- Entladungs- / Einbauprozess sich anschließt.

Für die Rückfahrt vom Verwertungsort zur Baustelle wurde zusätzliche Leerfahrt (75 km) angesetzt. Das Baseline-Szenario wird in Tabelle 12 beschrieben.

Tabelle 12: Zusammenfassung des angesetzten Transportszenarios im Baseline Szenario

| Szenarien | | Aushub | Transport (kurz): Deklarationsfläche | | Umschlag | Transport (lang): Verwertungsort | | Einbau |
|--|----------------------|---------|---|--------|----------|-------------------------------------|--------|---------|
| Ort | Haupttransportmittel | [t] | Strecke | Mittel | [t] | Strecke | Mittel | [t] |
| | | | [km] | | | [km] | [-] | |
| Baseline: Deponie ca. 75 km von HH | | 12 Mio. | 20 | LKW | 12 Mio. | 150 | LKW | 12 Mio. |

Für die Entwicklung des Zielszenarios wird für das Bodenmanagement ein deutliches Reduktionspotential gesehen. Das Reduktionspotential ergibt sich insbesondere aus der Optimierung der Prozesskette. Daher fand eine Untersuchung unterschiedlicher Entsorgungswege statt. Dabei wurden folgende Projekttrandbedingungen berücksichtigt:

- Anfallende Bodenmenge und deren zeitliche Verteilung
- Unterschiedliche zur Verfügung stehender Verwertungsstandorte (unter besonderer Berücksichtigung von: Kapazität und Verkehrsanbindung)
- Unterschiedliche Transportmittel (LKW, Binnenschiff, Zug)
- Vermeidung von Leerfahrten durch Einbindung in Transportkreisläufe

Für das Zielszenario ergab sich ein optimiertes Szenario, in dem weiterhin primär LKW-Fahrten für den Transport genutzt werden. Der voraussichtliche Verwertungsort ist ca. 70 km von den Deklarationsflächen entfernt. Allerdings binden die Transportprozesse in einen Transportkreislauf ein. In diesem entfallen die Leerfahrten auf dem Rückweg, da andere Transporte durchgeführt werden. Somit reduziert sich die Transportstrecke auf der langen Transportstrecke auf ca. 70 km.

Tabelle 13: Zusammenfassung des angesetzten Transportszenarios im Zielszenario

| Szenarien | | Aushub [t] | Transport (kurz): Deklarationsfläche | | Umschlag [t] | Transport (lang): Verwertungsort | |
|---|----------------------|---------------|---|--------|-----------------|-------------------------------------|---------------|
| Ort | Haupttransportmittel | | Strecke [km] | Mittel | | Strecke [km] | Mittel [-] |
| Zielszenario: Verwertungsort Norddeutschland | | 12 Mio. | 20 | LKW | 12 Mio. | 70 | LKW |

Wirkbilanz:

Um die zuvor beschriebenen Bauprozesse für das Bodenmanagement adäquat in der Wirkbilanz abzubilden, wurden den Prozessschritten spez. THG-Lasten für die jeweiligen Teilprozesse (Aushub, Transporte, etc.) zugeordnet. Die entsprechenden THG-Potentiale können Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Eingangsdaten als Umweltkenngößen Prozessschritte (Quelle: ÖKOBAUDAT [1])

| Prozessschritt | Einheit | GWP | Quelle / Jahr |
|-------------------------|--|---------|--|
| Aushub | kg CO ₂ -äq /m ³ | 1,29 | ÖKOBAUDAT: Bagger IZB 2018 |
| Transporte | | | |
| LKW-Zug | kg CO ₂ -äq /tkm | 0,06444 | ÖKOBAUDAT: LKW-Zug IZB 2018 |
| Verladung ¹⁾ | kg CO ₂ -äq /m ³ | 1,29 | ÖKOBAUDAT: Bagger 100 kW Aushub IZB 2018 |

1) Für die Verladung und den Umschlag sind entsprechende Prozessenergien aus Radladern, Förderbändern oder Baggern zu bewerten. Die entsprechenden Prozesse können erst nach Festlegung durch den ausführenden Unternehmer genau beschrieben werden. Da derzeit noch kein genaues Prozessszenario beschrieben werden kann, wurden vereinfachend Emissionen aus einem Umschlag per Bagger angesetzt. Dies ist im weiteren Projektverlauf zu verifizieren.

Baseline-Szenario auf Basis allgemein zugänglicher Daten:

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 12 abgebildeten Prozessdaten und den in Tabelle 14 enthaltenen spez. THG-Potentialen für die Prozessschritte ergeben sich die in Tabelle 15 dargestellten THG-Potentiale für die Prozessschritte.

Tabelle 15: überschlägige THG-Bilanz des Bodenmanagements mittels LKW-Transport (Entfernung der Verwertungsstelle 2 x 75 km) – Baseline

| Haupttransportart | Bauabschnitt | Prozessschritte | | | | | Gesamt |
|-------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| | | Aushub | Transporte (kurz) | Umschlag – Deklaration | Transporte (lang) | Verwertungsort | |
| | | | LKW | | LKW | | |
| | | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | |
| LKW | U5-Ost | 1.935 | 3.865 | 1.935 | 29.000 | 1.935 | 38.670 |
| | U5-Mitte | 5.805 | 11.600 | 5.805 | 86.995 | 5.805 | 116.010 |
| | Gesamt | 7.740 | 15.465 | 7740 | 115.995 | 7740 | 154.680 |

Um entsprechende Unsicherheiten in dem beschriebenen Prozess abzubilden wird ein Unwägbarkeitszuschlag von 10 % berücksichtigt. Es ergibt sich ein Gesamt-THG-Potential von ca. 170.150 t CO₂-äq.

Zielszenario auf Basis optimierter Transportketten:

Tabelle 16: überschlägige THG-Bilanz des Bodenmanagements mittels LKW-Transport (Entfernung der Verwertungsstelle 1 x 70 km) – Zielszenario

| Haupttransportart | Bauabschnitt | Prozessschritte | | | | | Gesamt |
|-------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| | | Aushub | Transporte (kurz) | Umschlag – Deklaration | Transporte (lang) | Verwertungsort | |
| | | | LKW | | LKW | | |
| | | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | [t CO ₂ -äq.] | |
| LKW | U5-Ost | 1.935 | 3.870 | 1.935 | 13.535 | 1.935 | 23.210 |
| | U5-Mitte | 5.805 | 11.600 | 5.805 | 40.595 | 5.805 | 69.610 |
| | Gesamt. | 7.740 | 15.470 | 7.740 | 54.130 | 7.740 | 92.820 |

Im Zielszenario ergibt sich im analogen Bilanzierungsvorgehen zum Baseline-Szenario und unter Berücksichtigung der reduzierten Prozessaufwände bei den Transporten ein reduziertes THG-Potential von ca. 92.820 t CO₂-äq. Unter Berücksichtigung des angesetzten Zuschlags für Unsicherheiten ergibt sich im Zielszenario ein Gesamt-THG-Potential von 102.100 t CO₂-äq.

A.4 Teil 4: Maschineller Tunnelvortrieb mittels TBM

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 3.6 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. A.0) wird nachfolgend die Bilanzierung des maschinellen Tunnelvortriebs zusammenfassend dargestellt. Entsprechende Materialaufwände, wie z. B. für die Tübbingherstellung, den Ringspaltmörtel oder den Transport des Bodenaushubs sind in den vorangegangenen Abschnitten enthalten. In diesem Abschnitt werden daher die THG-Emissionen infolge des Tunnelbohrmaschinenbetriebs inkl. aller Nebenprozesse (Separationsanlagen, BE-Einrichtung der TBM, Förder- und Transportbänder bilanziell erfasst.

Sachbilanz:

Die entsprechenden Energiemengen für den Betrieb der TBM entstammen der notwendigen elektrischen Energie. Daher wurde, wie in Kapitel 3.6 bereits beschrieben der Tunnelbauprozess mittels der TBM auf Grundlage von Erfahrungswerten analysiert und prozessmäßig durch die HOCHBAHN abgebildet [6]. Hieraus ergaben sich für den Betrieb der TBM die in Tabelle 17 dargestellten Stromverbräuche.

Tabelle 17: prognostizierte Stromverbräuche je Bauabschnitt durch TBM [6]

| Abschnitt | Stromverbrauch TBM [MWh] |
|---------------|-----------------------------|
| U5-Ost | 70.000 |
| U5-Mitte | 350.000 |
| Gesamt | 420.000 |

Wirkbilanz:

Zur Bestimmung der resultierenden Emissionen wurde im Baseline-Szenario von der Verwendung des deutschlandweiten Strom-Mixes ausgegangen. Für diesen stehen in der Ökobaudat über die Projektlaufzeit bis Ende der 30er Jahre zwei verschiedene THG-Potentiale zur Verfügung, vgl. Tabelle 18.

Tabelle 18: angesetzt spezifische THG-Potentiale für den Stromverbrauch, gem. Datensätze der Ökobaudat [1]

| Prozessschritt | Einheit | GWP | Datensatz n. ÖKOBAUDAT |
|-------------------------|-----------------------------|---------|---|
| Strom-Mix-Szenario 2020 | kg CO ₂ -äq /kWh | 0,5894 | ÖKOBAUDAT: Strom-Mix-Szenario 2020; <1kV IZB 2018 |
| Strom-Mix-Szenario 2030 | kg CO ₂ -äq /kWh | 0,5028 | ÖKOBAUDAT: Strom-Mix-Szenario 2030; <1kV IZB 2018 |
| Strom aus Windkraft | kg CO ₂ -äq /kWh | 0,01048 | ÖKOBAUDAT: Strom aus Windkraft IZB 2018 |

Baseline-Szenario auf Basis allgemein zugänglicher Daten:

Den ermittelten Stromverbräuchen in den Bereich der U5-Ost und U5-Mitte werden die spez. THG-Potentiale nach Tabelle 18 zugeordnet, vgl. Tabelle 19. Wie dargestellt, wird in der Zuordnung berücksichtigt, dass der Bereich der U5-Mitte erst ab ca. 2030 hergestellt wird, so dass hier das angepasste THG-Potential auf Basis der Prognosewerte für 2030 angenommen werden.

Es ergibt sich ein Gesamt-THG-Potential für den maschinellen Tunnelvortrieb von ca. 217.240 t CO₂-äq.

Tabelle 19: Berechnung des THG-Potentials für den Stromverbrauch der TBM (gerundet), Baseline

| Abschnitt | Stromverbrauch TBM | GWP/kWh | GWP |
|---------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | [MWh] | [kg CO ₂ -äq / kWh] | t- CO ₂ -äq. |
| U5-Ost | 70.000 | 0,5894 | 41.260 |
| U5-Mitte | 350.000 | 0,5028 | 175.980 |
| Gesamt | 420.000 | Variabel | 217.240 |

Zielszenario auf Basis der Verwendung von Ökostrom:

Entgegen der obigen Annahme des deutschlandweiten Strom-Mixes im Baseline-Szenario beabsichtigt die HOCHBAHN für die Versorgung der Baustellen Ökostrom z. B. aus Windkraft, beizustellen. Daher reduziert sich das spez. THG-Potential für 1 kWh Strom auf den in Tabelle 18 angegebenen Wert für Strom aus Windenergie. Die Neuberechnung des THG-Potentials für den maschinellen Tunnelvortrieb unter Verwendung von Ökostrom kann Tabelle 20 entnommen werden. Es ergibt sich ein reduziertes Gesamt-THG-Potential von ca. 4.405 t-CO₂-äq.

Tabelle 20: Berechnung des THG-Potentials für den Stromverbrauch der TBM – Ökostrom (gerundet), Zielszenario

| Abschnitt | Stromverbrauch TBM | GWP/kWh | GWP |
|---------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | [MWh] | [kg CO ₂ -äq / kWh] | t- CO ₂ -äq. |
| U5-Ost | 70.000 | 0,01048 | 735 |
| U5-Mitte | 350.000 | 0,01048 | 3.670 |
| Gesamt | 420.000 | 0,01048 | 4.405 |

A.5 Teil 5: Spezialtiefbauarbeiten

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 3.5 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. A.0) wird nachfolgend die Bilanzierung der Spezialtiefbauarbeiten zusammenfassend dargestellt. Die Spezialtiefbauarbeiten sind maßgeblich zur Herstellung der Baugruben und Auftriebssicherung von Bauwerksteilen erforderlich. Sie gliedern sich in die Herstellung der Schlitzwände, die jedoch bereits im Bereich des Stahlbetonbaus mitbilanziert wurden. Des Weiteren sind verschiedenen Verpressanker für die Rückverankerung und Auftriebssicherung von Bauteilen erforderlich. Außerdem werden Injektionskörper zur Abdichtung und Aussteifung von Baugruben im Düsenstrahlverfahren hergestellt. Für die Herstellung der Anker werden Ankerlöcher hergestellt und diese mit einem Tragglied aus Stahl versehen. Im Anschluss wird der verbleibende Spalt zwischen dem Tragglied und dem Boden verpresst. Das Verpressgut besteht im Wesentlichen aus einem Zementleim. Die Injektionskörper werden u. a. zur Herstellung einer horizontalen Abdichtung oder die horizontale Aussteifung z. B. von Schlitzwänden im Untergrund eingesetzt. Hierbei wird ebenfalls Zementleim über eine definierte Höhe in tieferliegende Bodenschichten eingebracht. Die erforderlichen Arbeiten und deren damit verbundener Material- und Energieaufwand für die Herstellung hängen von verschiedenen Randbedingungen (z. B. Baugrundbeschaffenheit, geforderte Eigenschaften, Verfahrensparameter) ab.

Sachbilanz:

Für die Herstellung der U5 sind gemäß Mengenermittlung im Baseline-Szenario ca. 604.000 m Verpress- und Mikropfähle herzustellen, vgl. Tabelle 21. Für diverse Dichtkörper, Horizontalaussteifung und Abdichtung sind darüber hinaus im Baseline-Szenario ca. 485.320 m³ DSV-Körper zu produzieren, vgl. Tabelle 22.

Tabelle 21: Mengenübersicht der herzustellenden Mikropfahllängen (Baseline-Szenario)

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|-----------|---------|---------------|----------|---------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Baseline | M | 107.000 | 497.000 | 604.000 |

Tabelle 22: Mengenübersicht der herzustellenden DSV-Körper (Baseline-Szenario)

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|-----------|----------------|---------------|----------|---------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Baseline | m ³ | 8.550 | 476.775 | 485.325 |

Im Rahmen einer ersten Material- und Mengenoptimierung analog zu dem Bereich der Stahlbetonarbeiten fand eine Anpassung der erforderlichen Materialmengen, z. B. durch Umplanung von Aussteifungsarbeiten, statt. Infolgedessen können die erforderlichen Verpress- und Mikropfähle für das Zielszenario nach derzeitigem Stand auf ca. 412.000 m reduziert werden, vgl. Tabelle 23. Die Menge der DSV-Körper reduziert sich auf ca. 287.130 m³, vgl. Tabelle 24.

Tabelle 23: Mengenübersicht der herzustellenden Mikropfahllängen (Zielszenario)

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|--------------|---------|---------------|----------|----------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Zielszenario | m | 107.000 | 305.000 | 412.000 |

Tabelle 24: Mengenübersicht der herzustellenden DSV-Körper (Zielszenario)

| Kategorie | Einheit | Bauabschnitte | | Gesamt |
|--------------|----------------|---------------|----------|----------------|
| | | U5-Ost | U5-Mitte | |
| Zielszenario | m ³ | 8.550 | 278.585 | 287.135 |

Wirkbilanz:

Entgegen dem bisherigen Vorgehen für die vorher beschriebenen Bauweisen können für die hier beschriebene Herstellung der Mikroverpresspfähle und die Herstellung der DSV-Körper keine allgemeinen spez. THG-Potentiale anhand freizugänglicher Datenbanken angegeben werden. Die erforderlichen Materialmengen und Materialeigenschaften des Verpressgutes und die erforderlichen Prozessaufwände, aus denen sich die resultierenden spez. THG-Potentiale ableiten, sind von verschiedenen Randbedingungen aus dem Bauvorhaben (z. B. Baugrundverhältnisse) und Verfahrensparametern abhängig. Entsprechend kann das spez. THG-Potential von Fall zu Fall variieren. Daher fand anhand projektspezifischer Parameter eine Parameterstudie für die zu erwartenden Material- und Prozesseigenschaften statt. Dieses Vorgehen erfordert entsprechendes Erfahrungswissen und verfahrensbezogenes Spezialwissen. In Folge der Analyse konnten für den Anwendungsfall spez. THG-Potentiale für die hier betrachteten Spezialtiefbauarbeiten abgeschätzt werden, vgl. Tabelle 25. Generell ist die Auswahl der verwendeten Zemente für die Durchführung der Spezialtiefbauarbeiten nicht beschränkt, so dass auch klinkerreiche Zemente (hohe THG-Last) eingesetzt werden können. Hieraus ergibt sich sowohl für die Herstellung der Mikroverpresspfähle als auch für die DSV-Körper ein signifikantes THG-Potential. Durch die zu fordernde Verwendung von klinkerreduzierten Zementen (z. B. CEM III/A) können die spez. THG-Potentiale deutlich reduziert werden. Entsprechend werden diese spez. Werte für das Zielszenario angesetzt. Weitere Reduktionspotentiale, die z. B. in dem Herstellverfahren stecken (z. B. Wiederverwendung von Vorlauf-suspensionen), wurden bisher nicht berücksichtigt, sollen aber in nächsten Optimierungsschritten untersucht werden.

Tabelle 25: angesetzt THG-Potentiale für die betrachteten Bauweisen der Spezialtiefbauarbeiten

| Bauweise | Einheit | THG-Potential je Einheit | |
|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | Verwendung CEM I | Verwendung CEM III |
| | | [kg CO ₂ -äq / Einh.] | [kg CO ₂ -äq / Einh.] |
| Mikroverpresspfahl ¹⁾ | m | 250 | 85 |
| DSV-Körper ²⁾ | m ³ | 1710 | 810 |

¹⁾ ohne Tragglied

²⁾ angegebene Werte enthalten neben dem reinen Materialbedarf für die Herstellung des Körpers auch entsprechende Mehrmengen für die Herstellung des Pfahls. Die zugrunde gelegten Materialzusammensetzungen sind auf Basis von Erfahrungswerten und entsprechenden Verfahrenswissen geschätzt worden. Für Unwägbarkeiten ist ein Zuschlag von 10-% in den Einheitswerten enthalten.

Baseline-Szenario

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Mengen im Baseline Szenario, vgl. Tabelle 21 und dem ermittelten spez. THG-Potential für die Herstellung der Verpress- und Mikropfähle ergibt sich ein Gesamt-THG Potential von ca. 151.000 t-CO₂-äq, vgl. Tabelle 26.

Tabelle 26: abgeschätztes THG-Potential für die Herstellung der Mikroverpresspfähle (gerundet), Baseline-Szenario

| Abschnitt | Länge | spez. THG-Potential | Gesamt THG-Potential |
|---------------|----------------|------------------------------|-------------------------|
| | [m] | [kg CO ₂ -äq / m] | t- CO ₂ -äq. |
| U5-Ost | 107.000 | 250 | 26.750 |
| U5-Mitte | 497.000 | 250 | 124.250 |
| Gesamt | 604.000 | 250 | 151.000 |

Tabelle 27: abgeschätztes THG-Potential für die Herstellung der DSV-Körper (gerundet), Baseline-Szenario

| Abschnitt | Volumen | spez. THG-Potential | Gesamt THG-Potential |
|---------------|-------------------|--|---------------------------|
| | [m ³] | [kg CO ₂ -äq / m ³] | [t- CO ₂ -äq.] |
| U5-Ost | 8.550 | 1.710 | 14.620 |
| U5-Mitte | 476.775 | 1.710 | 815.285 |
| Gesamt | 485.325 | 1.710 | 829.905 |

Die analoge Berechnung des THG-Potentials der DSV-Körper zeigt Tabelle 27. Es ergibt sich ein Gesamt-THG-Potential von ca. 829.900 t CO₂-äq.

Insgesamt entstehen im Baseline-Szenario für die Spezialtiefbauarbeiten ein THG-Potential von 980.900 t CO₂-äq.

Zielszenario auf Basis optimierter Materialeigenschaften:

Unter Berücksichtigung der reduzierten Materialmengen nach Tabelle 23 und des reduzierten, spez. THG-Potentials nach Tabelle 25, insbesondere durch die geforderte Verwendung von klinkerreduzierten Zementen, reduziert sich im Zielszenario das Gesamt-THG-Potential der Herstellung der Mikropfähle auf ca. 35.020 t CO₂-äq.

Tabelle 28: abgeschätztes THG-Potential für die Herstellung der Mikroverpresspfähle (gerundet), Zielszenario

| Abschnitt | Länge | spez. THG-Potential | Gesamt THG-Potential |
|---------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|
| | [m] | [kg CO ₂ -äq. / m] | t- CO ₂ -äq. |
| U5-Ost | 107.000 | 85 | 9.095 |
| U5-Mitte | 305.000 | 85 | 25.925 |
| Gesamt | 412.000 | 85 | 35.020 |

Analog dazu kann für die DSV-Körper unter Ansatz der reduzierten Mengen, vgl. Tabelle 24, und des Ansatzes eines reduzierten, spez. THG-Potentials für die Herstellung der DSV-Körper (Tabelle 25) das Gesamt-THG-Potential auf ca. 232.580 t-CO₂-äq. reduziert werden, vgl. Tabelle 29.

Tabelle 29: abgeschätztes THG-Potential für die Herstellung der DSV-Körper (gerundet), Zielszenario

| Abschnitt | Volumen | spez. THG-Potential | Gesamt THG-Potential |
|------------------|-------------------|--|------------------------------|
| | [m ³] | [kg CO ₂ -Äquiv. / m ³] | [t- CO ₂ -Äquiv.] |
| U5-Ost | 8.545 | 810 | 6.921 |
| U5-Mitte | 278.585 | 810 | 225.654 |
| Gesamt | 287.135 | 810 | 232.575 |

Es ergibt sich damit ohne Ansatz weiterer Reduzierungen infolge industrieller Entwicklung ein Gesamt-THG-Potential von ca. 267.600 t-CO₂-äq.

Berücksichtigung zukünftiger industrieller Entwicklungen im Zielszenario

Analog zu der Stahlbetonbauweise wird für die Herstellung der hier untersuchten Spezialtiefbauelemente ebenfalls davon ausgegangen, dass infolge der weiteren industriellen Entwicklung in der Zementherstellung, Zemente mit reduziertem THG-Potential zur Verfügung stehen. Die in Abbildung 10 beschriebenen industriellen Entwicklungsschritte für die Zementproduktion werden daher ebenfalls in eine schrittweise Reduzierung der spez. THG-Potentiale für die Herstellung der Verpress- und Mikropfähle und die Herstellung der DSV-Körper übersetzt. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Verteilung der Herstellung für die Verpress- und Mikropfähle und der DSV-Körper reduziert sich das Gesamt-THG-Potential der Spezialtiefbauarbeiten auf ca. 117.000 t-CO₂-äq. Hierdurch wird auch die signifikante Abhängigkeit der Arbeiten von dem enthaltenen Bindemittel Zement deutlich.

A.6 Teil 6: Schienensystem

Für die Herstellung des Schienensystems werden nach derzeitiger Planung zwei unterschiedliche Regelaufbauten:

- Schiene im Schotterbett
- Schiene auf fester Betonfahrbahn

je nach Erfordernissen der Strecke verwendet.

Sachbilanz:

Auf Grundlage der derzeitigen Planungen werden für die beiden Regelsysteme die in Tabelle 30 dargestellten Streckenlängen ermittelt.

Tabelle 30: Übersicht der herzustellenden Streckenlänge je Fahrbahnaufbau

| Abschnitt | Systemaufbau | Länge |
|---------------|----------------|-----------|
| | [-] | [km] |
| U5-Ost | geschottert | 12,4 |
| U5-Mitte | feste Fahrbahn | 24,3 |
| | geschottert | 24,3 |
| Gesamt | | 61 |

Wirkbilanz:

Für die Beschreibung des spez. THG-Potential der beiden Schienensysteme wurde der Regelquerschnitt getrennt voneinander anhand der verbauten Materialien und der darin enthaltenen Bauprozesse bilanziell beschrieben. Der Regelaufbau für die geschotterte Trasse ergibt sich aus dem Schotterbett, der Stahlbetonschwelle, den beiden Schienen und der Stromschiene inkl. Halterung. Für diesen Regelaufbau wurde ein spez. THG-Potential von ca. 218 kg CO₂-äq. /m ermittelt. Der Regelaufbau der festen Fahrbahn umfasst die beiden Schienenstränge und die Stromschiene. Der erforderliche Betonkörper ist bereits im Bereich der Stahlbetonarbeiten bilanziell miterfasst worden. Entsprechend ergibt sich für das zusätzliche spez. THG-Potential für die feste Fahrbahn zu 85 kg CO₂-äq. /m.

Unter Berücksichtigung der entsprechenden Streckenlängen für die geschotterte und feste Trasse ergibt sich ein Gesamt-THG-Potential von ca. 10.070 t CO₂-äq, vgl. Tabelle 31.

Tabelle 31: Übersicht zum ermittelten THG-Potential des verbauten Schienensystems (gerundet)

| Abschnitt | Aufbau | Länge | spez. THG-Potential | Gesamt THG-Potential |
|---------------|-------------|-----------|------------------------------|--------------------------|
| | | [km] | /m | |
| | | | [kg CO ₂ -äq. /m] | [t CO ₂ -äq.] |
| U5-Ost | Geschottert | 12,4 | 218 | 2.705 |
| U5-Mitte | Fest | 24,3 | 218 | 5.300 |
| | Fest | 24,3 | 85 | 2.065 |
| Gesamt | - | 61 | variabel | 10.070 |

A.7 Teil 7: Mauerwerksarbeiten

Die Mauerwerksarbeiten umfassen die Herstellung verschiedener Wandbauteile im Bereich der Haltestellen. Es sind Kalksandsteinwände vorgesehen, die in unterschiedlicher Dicke und als verputzte oder unverputzte Varianten auszuführen sind. Während für den Abschnitt der U5-Ost bereits Details für die herzustellenden Mengen und Eigenschaften vorhanden sind, existieren für die U5-Mitte noch keine genaueren Angaben, so dass analog zu den bisherigen Abschnitten Durchschnittswerte für die je Haltestelle herzustellenden Wandmengen und anteiligen Ausführungsvarianten an Hand der bisherigen Planung der U5-Ost ermittelt wurden.

Sachbilanz:

Im Bereich der U5-Ost konnte eine mittlere Wandfläche je Haltestelle von ca. 315 m² ermittelt werden. Durch Übertragung dieses Mittelwertes auf den Abschnitt U5-Mitte ergibt sich eine Gesamtfläche von ca. 7.245 m², vgl. Tabelle 32.

Tabelle 32: Mengenübersicht für die herzustellen Mauerwerkswände (geputzt und ungeputzt)

| Abschnitt | Gemittelte Wandfläche je Hst. ¹⁾²⁾ | Anzahl Hst. | Gesamtbedarf |
|---------------|---|-------------|-------------------|
| | [m ²] | [-] | [m ²] |
| U5-Ost | 756 | 5 | 3.780 |
| U5-Mitte | 756 | 18 | 13.608 |
| Gesamt | - | | 17.388 |

¹⁾ Hst. = Haltestellen

²⁾ Die gemittelte Wandfläche je Hst. Erfolgte auf Basis der bisherigen Ausschreibungsunterlagen für den Bereich der U5-Ost [2], [3]. Hier werden entsprechende Mengen für 5 Hst. Beschreiben Die Einzelwerte variieren zwischen 75 und 1.000 m² je Hst. Die Systemaufbauten variieren zwischen ungeputzten Wänden und geputzten Wänden. Insgesamt werden 4 unterschiedliche Wandaufbauten im Bereich der U5-Ost unterschieden. Im Bereich der U5-Mitte wird davon ausgegangen, dass je Hst von einer ähnlichen gemittelten Wandfläche mit einem ähnlichen Verhältnis der Aufbauarten ausgegangen werden kann.

Wirkbilanz:

Um das Gesamt-THG-Potential zu ermitteln wurden für die unterschiedlichen Wandsysteme in den Haltestellen der U5-Ost spez. THG-Potentiale für einen Quadratmeter Wandfläche ermittelt. Anhand Mengemäßigen Verteilung der unterschiedlichen Wandsysteme konnte ein gewichtetes, mittlere THG-Potential ermittelt werden. Als Grundlage wurden verschiedene THG-Potentiale der verwendeten Materialien auf Grundlage der Datensätze der Ökobaudat herangezogen, vgl. Tabelle 33.

Tabelle 33 vorhandene Materialkennwerte für das THG-Potential zur Beschreibung materialimmanenter Emissionen im Bereich der Mauerwerksarbeiten

| Material | Einheit | spez. THG-Potential A1-A3 |
|---|---------|-----------------------------------|
| | [-] | [kg CO ₂ -äq. / Einh.] |
| KS-Steine Dichte = 1800 kg/m ³ | t | 136 |
| Mauermörtel-Normalmauermörtel (Dichte 1500 kg/m ³) | t | 72,8 |
| Putzmörtel-Normalputz/Edelputz (Dichte 1800 kg/m ³) | t | 208 |

Weitere Zuschläge wurden für den Transport der Materialien zur Baustelle vorgesehen.

Als gewichtetes mittleres THG-Potential der Wandfläche konnte ein Wert von 84 kg CO₂-äq. / m² ermittelt werden. Auf Grundlage der durchgeführten Mengenermittlung und dem gewichteten mittleren THG-Potential konnte wurde das Gesamt THG-Potential für die Mauerwerksarbeiten gem. Tabelle 34 ermittelt. Wie der Darstellung zu entnehmen ist, wurde davon ausgegangen, dass die Mauerwerkswände im Laufe der anvisierten Lebensdauer der U-Bahn einmal erneuert werden müssen. Darüber hinaus wurde ein Unsicherheitszuschlag von 20 % berücksichtigt. Es ergibt sich ein Gesamt-THG-Potential von ca. 3.505 t- CO₂-äq.

Tabelle 34: Darstellung des ermittelten Gesamt-THG-Potentials für die U5 aus den Mauerwerksarbeiten

| Ab-schnitt | Mittlere Wandflä- che je Hst. | Mittl. THG- Potential je m ² | Anz. Erne- erung je Le- bensdauer Bauwerk | Zuschlag | Mittl. THG- Potential je Hst. | Anzahl Hst. | Gesamt THG- Potential |
|---------------|-------------------------------------|--|--|----------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------|
| | [m ²] | [kg CO ₂ - äq. / m ²] | [-] | [M-%] | [t CO ₂ -äq. / Hst] | [-] | [t- CO ₂ -äq.] |
| U5-Ost | 756 | 84 | 2 | 20 | 152,4 | 5 | 760 |
| U5- Mitte | | | | | | 18 | 2.745 |
| Gesamt | | | | | 152,4 | 23 | 3.505 |

A.8 Teil 8: Baustellenbetrieb

Der Baustellenbetrieb untergliedert sich in die Bereiche des allg. Stromverbrauches der Baustellen und das Wassermanagement.

Teil 8a: allg. Stromverbrauch der Baustelle

Die allg. Stromverbrauch umfasst sämtliche Stromverbräuche im Bereich der Baustellen, die nicht einem spezifischen Herstellungsprozess zugeordnet werden können. Hierunter fallen Arbeitsprozesse, wie z. B. die Kranarbeiten, Schweißarbeiten oder der Betrieb und die Unterhaltung der Baustelleneinrichtung (Büros, etc.).

Sachbilanz:

Der erforderliche Strombedarf für eine Großbaustelle wurde auf Grund von Erfahrungswerten auf ca. 480.000 kWh/a geschätzt. Es wird angenommen, dass je Haltestelle und den zugehörigen Streckenabschnitten der Umfang einer Großbaustelle anzusetzen ist, welche jeweils ca. 8 Jahre betrieben werden.

Entsprechend ergeben sich aus dieser Annahme ein Gesamtstrombedarf von ca. 88.320 MWh, vgl. Tabelle 35.

Tabelle 35 Überschlägige Ermittlung der allg. Stromverbräuche der Baustellen

| Abschnitt | Anzahl Haltestellen Hst.) | Bauzeit / Haltestelle | Strombedarf je Hst. und Jahr | Gesamtbedarf |
|---------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|
| | [-] | [a] | [kWh/a] | [MWh] |
| U5-Ost | 5 | 8 | 480.000 | 19.200 |
| U5-Mitte | 18 | | | 69.120 |
| Gesamt | 23 | | | 88.320 |

Wirkbilanz:

Baseline-Szenario auf Basis allgemein zugänglicher Daten:

Das spez. THG-Potential für den Strom kann im Baseline-Szenario durch das spez. THG-Potential des deutschlandweiten Strom-Mix beschrieben werden (Ansatz analog zum maschinellen Tunnelvortrieb). Unter Berücksichtigung einer entsprechenden zukünftigen zeitlichen Entwicklung reduziert sich dieser Wert leicht, vgl. Tabelle 36. Aufbauend auf der ermittelten Strommenge ergibt sich im Baseline-Szenario ein THG-Potential von ca. 46.075 t-CO₂-äq, vgl. Tabelle 36.

Tabelle 36 überschlägige Ermittlung der Treibhausgasemissionen aus dem allg. Stromverbrauch der Baustellen (gerundet), Baseline-Szenario

| Abschnitt | Anzahl Hst. ¹⁾ | Bauzeit / Hst. | Strombedarf je Hst und a | Gesamtbedarf | GWP/kWh | GWP |
|---------------|---------------------------|----------------|--------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|
| | [-] | [a] | [kWh/a] | [MWh] | [kg CO ₂ -äq/kWh] | t- CO ₂ -äq. |
| U5-Ost | 5 | 8 | 480.000 | 19.200 | 0,5894 ²⁾ | 11.320 |
| U5-Mitte | 18 | | | 69.120 | 0,5028 ³⁾ | 34.755 |
| Gesamt | 23 | | | 88.320 | Variabel | 46.075 |

¹⁾ Hst. = Haltestellen, ²⁾ GWP akt. Strom-Mix lt. ÖKOBAUDAT, 2020. ³⁾ GWP progn. Strom-Mix 2030 lt. ÖKOBAUDAT

Zielszenario auf Basis der Verwendung von Ökostrom:

Die HOCHBAHN beabsichtigt Ökostrom z. B. aus Windkraft bereitzustellen, so dass sich im Zielszenario das THG-Potential gem. Tabelle 37 auf ca. 930 t-CO₂-äq reduziert.

Tabelle 37: überschlägige Ermittlung der Treibhausgasemissionen aus dem allg. Stromverbrauch der Baustellen (gerundet), Zielszenario

| Abschnitt | Anzahl Hst. ¹⁾ | Bauzeit / Hast. | Strombedarf je Hst und a | Gesamtbedarf | THG/kWh | THG |
|---------------|---------------------------|-----------------|--------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|
| | [-] | [a] | [kWh/a] | [MWh] | [kg CO ₂ -äq/kWh] | t- CO ₂ -äq. |
| Gesamt | 23 | 8 | 480.000 | 88.320 | 0,01048⁴⁾ | 930 |

¹⁾ Hst. = Haltestellen, ⁴⁾ GWP Wind-Strom lt. ÖKOBAUDAT

Teil 8b: Wassermanagement

Das Wassermanagement untergliedert sich in die Wasserhaltung für die Baugruben und die Wasseraufbereitung für verschiedene Bauprozesse. Das THG-Potential für das Wassermanagement ergibt sich im Wesentlichen aus den erforderlichen Strombedarf für den Betrieb der Anlagen.

Sachbilanz:

Eine Grundlage für die zu erwartenden Mengen und den weiteren Randbedingungen (z. B. Pumphöhe, Betriebsdauer, etc.) des zu fördernden und zu behandelnden Grund- und Bauwassers kann der Planfeststellungsunterlage für den Bereich der U5-Ost entnommen werden. Auf deren Basis können die erforderlichen Pump- und Anlagenleistung für die Wasserhaltung und die Wasseraufbereitung unter Berücksichtigung von typischen Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Für den Bereich der U5-Mitte sind bisher noch keine Planungsdaten vorhanden. Analog zu den vorhergehenden Abschnitten werden daher die ermittelten, erforderlichen Leistungen und Mengen aus dem Bereich der U5-Ost auf den Bereich der U5 Mitte übertragen. Dazu werden gemittelte Anlagenleistungen aus den Systemen im Bereich der U5-Ost ermittelt. Aus der zu erwartenden Anlagenanzahl ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf, vgl. Tabelle 38 und Tabelle 39.

Tabelle 38: Übersicht des erforderlichen Strombedarf für den Betrieb der Wasserhaltung (gerundet)

| Abschnitt | Gemittelte Pumpenleistung je System ¹⁾ | Vorhaltdauer je System | Strombedarf je System | Anzahl Systeme | Gesamtbedarf |
|---------------|---|------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| | [kW] | [a] | [kWh] | [-] | [MWh] |
| U5-Ost | 20,8 | 2 | 364.420 | 13 | 4.740 |
| U5-Mitte | 26,6 | | 466.030 | 59 | 27.496 |
| Gesamt | - | | | | |

¹⁾ Die angesetzte Pumpenleistung wurde für den Bereich der U5-Ost aus 13 zu installierenden Systemen ermittelt für deren überschlägige Auslegung entsprechende Eingangskennzahlen (max. Förderleistung pro h; zu fördernde Gesamtmenge, Dauer des Betriebs, Förderhöhe) auf Basis der Planfeststellungsunterlagen vorliegen. Die ermittelten Leistungswerte der Systeme wurden zu dem mit einem Aufschlag von 50 % für Unwägbarkeiten versehen. Im Bereich der U5-Mitte wurde für die Festlegung der Pumpenleistungen der höchste Einzelwert der betrachteten 13 Systeme aus dem Osten angesetzt.

Tabelle 39: Übersicht des erforderlichen Strombedarfs für den Betrieb der Wasseraufbereitung (gerundet)

| Abschnitt | gemittelte Leistung je Anlage ¹⁾ | Vorhaldedauer je System | Strombedarf je Anlage | Anzahl Anlagen | Gesamtbedarf |
|---------------|--|-------------------------|-----------------------|----------------|---------------|
| | [kW] | [a] | [kWh] | [-] | [MWh] |
| U5-Ost | 55,5 | 3,1 | 1.507.160 | 5 | 7.536 |
| U5-Mitte | ca. 5-fache Leistung ggü. U5-Ost ²⁾ | | | | 37.680 |
| Gesamt | | | | | 45.216 |

¹⁾ Die angesetzte Anlagenleistung wurde für den Bereich der U5-Ost aus 5 zu installierenden Anlagen ermittelt, für deren überschlägige Auslegung entsprechende Eingangskennzahlen (max. zu behandelnde Menge pro h; zu fördernde Gesamtmenge, Dauer des Betriebs, etc.) auf Basis der Planfeststellungsunterlagen vorliegen. Die ermittelten Leistungswerte der Systeme wurden zudem mit einem Aufschlag von 30 % für Unwägbarkeiten versehen.

²⁾ Da die 5 Anlagen im Bereich der U5-Ost insgesamt 13 Systeme bedienen wird davon ausgegangen, dass für den Bereich der U5-Mitte die 4,5-fache Menge an Leistung / Anlagen erforderlich ist.

Wirkbilanz:

Baseline-Szenario auf Basis allgemein zugänglicher Daten:

Das resultierende THG-Potential ergibt sich aus der erforderlichen Energiemenge und des dafür erforderliche spez. THG-Potentials für dessen Erzeugung. Analog zu den Bereichen allg. Baustrom und maschineller Tunnelvortrieb wird für den Strombedarf im Baseline-Szenario der deutschlandweite Strom-Mix angesetzt. Damit ergibt sich nach Tabelle 40 ein Gesamt THG-Potential von ca. 40.000 t-CO₂-äq.

Tabelle 40: Gegenüberstellung der ermittelten THG-Potentiale für das Wassermanagement Baseline-Szenario

| Abschnitt | Wasserhaltung | Wasseraufbereitung | Gesamt Wassermanagement | GWP/kWh | GWP |
|---------------|---------------|--------------------|-------------------------|--|-------------------------|
| | [MWh] | [MWh] | [MWh] | [kg CO ₂ -äq/kWh] ¹⁾ | t- CO ₂ -äq. |
| U5-Ost | 4.740 | 7.536 | 12.276 | 0,5894 ²⁾ | 7.235 |
| U5-Mitte | 27.491 | 37.675 | 65.166 | 0,5028 ³⁾ | 32.765 |
| Gesamt | 32.231 | 45.211 | 77.442 | Variabel | 40.000 |

²⁾ GWP akt. Strom-Mix lt. ÖKOBAUDAT, 2020. ³⁾ GWP progn. Strom-Mix 2030 lt. ÖKOBAUDAT, ⁴⁾ GWP Wind-Strom lt. ÖKOBAUDAT

Zielszenario auf Basis der Verwendung von Ökostrom:

Durch die vorgesehene Bereitstellung und Verwendung von Ökostrom im Zielszenario wird das erwartete Gesamt-THG-Potential auf ca. 812 t-CO₂-äq reduziert, vgl. Tabelle 41.

Tabelle 41: Gegenüberstellung der ermittelten THG-Potentiale für das Wassermanagement Zielszenario

| Abschnitt | Wasserhaltung | Wasseraufbereitung | Gesamt Wassermanagement | GWP/kWh | GWP |
|---------------|---------------|--------------------|-------------------------|--|-------------------------|
| | [MWh] | [MWh] | [MWh] | [kg CO ₂ -äq/kWh] ¹⁾ | t- CO ₂ -äq. |
| Gesamt | 32.231 | 45.210 | 77.441 | 0,01048⁴⁾ | 812 |

²⁾ GWP akt. Strom-Mix lt. ÖKOBAUDAT, 2020. ³⁾ GWP progn. Strom-Mix 2030 lt. ÖKOBAUDAT, ⁴⁾ GWP Wind-Strom lt. ÖKOBAUDAT

A.9 Teil 9: sonstige Leistungen

Sachbilanz:

Im Rahmen der Baumaßnahme fallen weitere bisher nicht detailliert erfasste Arbeiten an, die im Rahmen dieser Bilanz vereinfacht über einen pauschalisierten Ansatz erfasst werden. Zu den so abgeschätzten Arbeiten und Prozessen gehören u.a.:

- genereller Fahrzeugverkehr,
- Räumungsarbeiten,
- provisorische Wegeführung,
- sonstige Verbauarbeiten,
- Abdichtungsarbeiten,
- Nebenarbeiten für kleinere Arbeitsschritte,
- Baustellenräumung,
- nicht bilanzielle abgeschätzte Installations- und Montagearbeiten.

Wirkbilanz

Als grober Anhaltswert für die hier durchzuführenden Leistungen, wird ein pauschaler Wert in Höhe von 10% des THG-Potentials aus den Stahl- und Stahlbetonarbeiten im Baseline-Szenario angesetzt. Dies entspricht demnach rd. 102.295 t CO₂-äq.

A.10 Teil 10: tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Gesamtübersicht des erwarteten THG-Potentials im Baseline-Szenario und im Zielszenario.

Tabelle 42: Gesamtübersicht des erwarteten THG-Potentials für das Baseline-Szenario und das Zielszenario

| Bilanzierungsbereiche: | | Baseline-Szenario | Zielszenario |
|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | | THG-Potential | THG-Potential |
| | | Gesamt [t-CO ₂ -äq.] | Gesamt [t-CO ₂ -äq.] |
| Stahlbetonbauweise | | 1.020.000 | 440.000 |
| Stahlbauweise | | 142.700 | 66.200 |
| Bodenmanagement | | 170.150 | 102.100 |
| Maschinelles Tunnelvortrieb | | 217.240 | 4.405 |
| Spezialtiefbauarbeiten | | 980.900 | 117.000 |
| Schienensysteme | | 10.070 | 10.070 |
| Mauerwerksarbeiten | | 3.505 | 3.505 |
| Baustellenbetrieb | All. Stromverbrauch | 46.075 | 930 |
| | Wassermanagement | 40.000 | 812 |
| Sonstige Leistungen | | 102.295 | 102.295 |
| SUMME (BRUTTO) | | 2.732.935 | 847.317 |

A.11 Literatur

- [1] ÖKOBAUDAT-Datenbank des [Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen \(BMWSB\)](https://www.oekobaudat.de/), Weblink: <https://www.oekobaudat.de/>
 - [2] Ausschreibungsfertiges Leistungsverzeichnis der U5-Ost – Los 1, Hamburger Hochbahn AG, Stand: Februar 2022
 - [3] Entwurf des Leistungsverzeichnisses der U5-Ost Los 2, Hamburger Hochbahn AG, übergeben 03/2022,
 - [4] Überschlägige Mengenermittlung der U5-Mitte auf Basis Vorplanung (VP1), Hamburger Hochbahn AG, Stand 2021.
 - [5] Vorabzug der überschlägigen Mengenermittlung der U5-Mitte auf Basis Vorplanung (VP2), Hamburger Hochbahn AG, Stand Mai 2022.
 - [6] Übersicht zur Ermittlung der Energieverbräuche je Tunnelabschnitt für den maschinellen Tunnelvortrieb, Hamburger Hochbahn AG, Stand: September 2021
-
- [N.1] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020, Stand 02/2021
 - [N.2] DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011, Stand 10/2012
 - [N.3] E DIN EN 17472: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken – Rechenverfahren, Normenentwurf, Stand 03/2020