

Bilanzierung



Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim (Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) THG-Bilanzierung und Variantenvergleich

Dokument Nr.

BR2311108 - 2

Auftraggeber

Stadtbahn Entwicklung und Verkehrs-Infrastrukturprojekte Frankfurt GmbH
Mainzer Landstraße 191,
60327 Frankfurt am Main

Datum

23.08.2024

Ausfertigung: 1

Verfasser

LPI Ingenieurgesellschaft mbH

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

Autor:innen: Christoph Begemann, Celina Platz, Laura Lehmann, Daniela Eckert,
Kathrin Janssen

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung, Strategie und Aufgabenstellung.....	3
2	Kurzbeschreibung der bewerteten Trassierungsvarianten	4
3	Untersuchungsrahmen	6
3.1	Grundlagen Ökobilanz und angewandte Normen.....	6
3.2	Systemgrenzen	6
3.3	Funktion und funktionelle Einheit	8
4	Darstellung der Bilanzierungsergebnisse.....	9
4.1	Stahlbetonbauweise.....	9
4.2	Stahlbauweise	9
4.3	Bodenmanagement.....	10
4.4	Maschinellem Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM).....	10
4.5	Schienensystem.....	11
4.6	Verkehrsflächen.....	11
4.7	Ergebnisübersicht der Bilanzierung.....	12
A	Anhang Bilanzierungsdaten	15
A.1	Bilanzierungsergebnisse	16
A.1.0	Stahlbetonbauweise.....	16
A.1.1	Stahlbauweise	19
A.1.2	Bodenmanagement.....	21
A.1.3	Maschinellem Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM).....	23
A.1.4	Schienensystem.....	24
A.1.5	Verkehrsflächen.....	26
A.2	Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse	28
A.3	Literaturverzeichnis.....	29

1 Zielsetzung, Strategie und Aufgabenstellung

Die Stadtbahn Entwicklung und Verkehrs-Infrastrukturprojekte Frankfurt GmbH (kurz: SBEV) steuert und koordiniert im Auftrag der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (kurz: VGF) die Planung der Verlängerung der U-Bahnlinie U4. Der ergänzende Streckenabschnitt verläuft zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Ginnheim. Im Rahmen einer Variantenuntersuchung werden drei unterschiedliche Trassenverläufe mit verschiedenen Linienführungen und Bauarten untersucht und bewertet.

Der Umbau des innerstädtischen Verkehrsnetzes und die Stärkung des ÖPNVs, mit dem Ziel den notwendigen Bedarf an kosteneffizientem ÖPNV zur Realisierung der Verkehrswende, ist seit langem ein politischer Wunsch. Hinzu kommt zusätzlich, dass diese Umgestaltung und die damit notwendige bauliche Infrastruktur möglichst nachhaltig realisiert wird. Die Stadt Frankfurt hat sich daher zum Ziel gesetzt das Projekt der U4 Verlängerung auch im Sinne der Nachhaltigkeit umzusetzen und dieses Ziel ebenfalls in den Auftrag der SBEV integriert. Neben einer allgemeinen Strategie zur Bewertung und Steigerung der Nachhaltigkeit des Projektes erfolgt daher auch der Variantenentscheid unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit. Zu diesem Zweck wurde eine Nachhaltigkeitsbewertung für die Varianten durchgeführt, die aufbauend auf den drei Hauptsäulen der Nachhaltigkeit „ökologische Qualität“, „ökonomische Qualität“ und „Soziokulturelle Qualität“, sowie städtebaulicher Aspekte projektspezifische Anforderungen an die Nachhaltigkeit beschreibt. Damit wird eine ganzheitliche, vergleichende Bewertung der Varianten im Sinne der Nachhaltigkeit vorgenommen. Als ein Teil der ökologischen Qualität fließen in diese Bewertung auch die klimatischen Auswirkungen des Projektes ein, welche durch die THG-Emissionen als Indikator beschrieben werden. Zu diesem Zweck wird auf Basis des aktuellen frühen Projektstandes und dem damit verbundenen bisherigen Planungsstand eine vergleichende Bilanzierung der THG-Emissionen vorgenommen. Wichtig ist es, hierbei zu betonen, dass die Bilanz damit keine absolute Aussage zu den erwartbaren THG-Emissionen der Varianten gibt, da hierfür der aktuelle Planungsstand derzeit noch nicht ausreicht und wesentliche Detailentscheidungen, die zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der Planung getroffen werden, noch fehlen. Dennoch ist es möglich auf Grundlage einer Abschätzung der Hauptemissionen, die bei Infrastrukturvorhaben insbesondere die Arbeiten für den erweiterten Rohbau ausmachen eine erste, vergleichende Bewertung vorzunehmen, sodass die im raumstehenden Varianten zueinander bewertet und platziert werden können.

Die LPI Ingenieurgesellschaft mbH berät die SBEV mit ihrer Abteilung für nachhaltiges Planen und Bauen einerseits zur projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertung für den Variantenentscheid, andererseits bei der Entwicklung einer Nachhaltigkeitsstrategie für das Projekt. In diesem Zuge wird u.a. das Ergebnis der hier vorliegenden THG-Bilanz in die Nachhaltigkeitsbewertung integriert.

Der vorliegende Kurzbericht beschreibt die Ergebnisse und den vorgenommenen Vergleich der drei Trassierungsvarianten in der frühen Projektphase. Dazu werden zu Beginn zunächst die ausgehend von einer Beschreibung der drei Varianten, die Grundlagen, Systemgrenzen und Vorgehensweise der Bilanzierung erläutert. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse, die im Detail im Anhang dieses Berichtes enthalten sind, zusammengefasst und ein erster Vergleich der Ergebnisse vorgenommen.

2 Kurzbeschreibung der bewerteten Trassierungsvarianten

Zur vergleichenden Bewertung der zu erwartenden THG-Emissionen im Variantenentscheid werden nachfolgend die drei zur Bewertung stehenden Varianten zusammenfassend beschrieben. Die jeweiligen Trassierungsverläufe der drei Varianten 1a, 1d und 3i für die Verlängerung der U4 sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Verlauf der drei Untervarianten im Verlauf der U4

Die Trasse der **Variante 1a** verläuft entlang der Zeppelinallee, weiter entlang der Miquelallee und des Botanischen Gartens, kreuzt die Autobahn A66 sowie die Miquelanlage und führt dann entlang der Rosa-Luxemburg-Straße an der Bundesbank vorbei nach Ginnheim. Für diese Variante sind vier neue Haltestellen vorgesehen: Botanischer Garten, Bundesbank, Platensiedlung und Ginnheim. Dabei sind bei den Haltestellen Botanischer Garten und Bundesbank Brückenbauwerke vorgesehen. Zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Botanischer Garten ist der Bau eines Tunnels in offener Bauweise vorgesehen.

Im Gegensatz zur Variante 1a verläuft die Trasse der **Variante 1d** zwischen Bockenheimer Warte und Botanischem Garten nicht entlang der Zeppelinallee, sondern unterquert den Palmengarten. Auch hier sind vier neue Haltestellen vorgesehen: Botanischer Garten, Bundesbank, Platensiedlung und Ginnheim. Analog zur Variante 1a sind bei den Haltestellen Botanischer Garten und Bundesbank Brückenbauwerke vorgesehen. Zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Botanischer Garten ist ein Tunnel in weitgehend geschlossener Bauweise geplant.

Im Gegensatz zu den Varianten 1a und 1d verläuft die Trasse der **Variante 3i** nicht entlang der Miquelallee. Stattdessen quert sie den Palmengarten, den Botanischen Garten und den Grüneburgpark und führt durch den Campus Westend der Goethe-Universität und das Gelände der Philipp-Holzmann-Schule. Nach der Querung der Autobahn A66 verläuft sie entlang der Miquelanlage bis zur Rosa-Luxemburg-

Straße. Diese Variante sieht vier neue Stationen vor: Campus Westend, Bundesbank, Platensiedlung und Ginnheim. Dabei ist lediglich für die Haltestelle Bundesbank ein Brückenbauwerk vorgesehen. Zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Bundesbank ist ein Tunnel in überwiegend geschlossener Bauweise vorgesehen.

3 Untersuchungsrahmen

3.1 Grundlagen Ökobilanz und angewandte Normen

Das gewählte Bilanzierungsvorgehen ist angelehnt an die DIN EN ISO 14040 [1] in vier Schritten sowie an die bekannten Normen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, wie beispielsweise die DIN EN 15978 [2]. Eine Gegenüberstellung der wesentlichen Elemente und der Grundsystematik der Bilanzierungsnorm für Ingenieurbauwerke DIN EN 17472 [3] ist in Abbildung 2 dargestellt. Nach der Festlegung des Untersuchungsrahmens und der Zieldefinition erfolgt für die jeweiligen bilanzierten Bauweisen und Bauprozesse eine Sachbilanz, in der alle relevanten Mengen und Prozessschritte berücksichtigt werden. Im Anschluss werden den verbauten Materialien in der Wirkbilanz die spezifischen THG-Emissionen zugeordnet. Abschließend werden diese Emissionen zusammenfassend dargestellt und entsprechend der Zieldefinition ausgewertet.

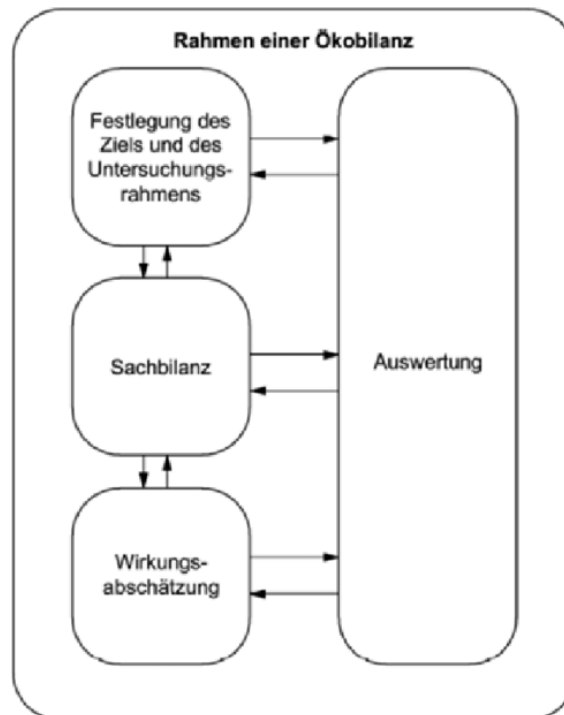


Abbildung 2: Ablauf einer Bilanzierung in Anlehnung an ISO 14040 [1]

3.2 Systemgrenzen

Für Infrastrukturbauwerke gilt, dass insbesondere die Herstellphase des Bauwerkes einen wesentlichen Anteil der THG-Emissionen ausmacht. Die Auslegung der Anlage für den erweiterten Rohbau erfolgt in der Regel auf den kompletten Lebenszyklus des Bauwerkes, so dass planmäßige Instandsetzung nicht zur Erreichung des erwarteten Lebensendes erforderlich sind. Die ggf. anfallenden Instandsetzungsarbeiten zielen in der Regel darauf ab, die konkrete Lebensdauer des Bauwerkes über das anvisierte Ziel zu verlängern, weshalb die dafür erforderlichen Arbeiten nicht auf den hier betrachteten ersten Lebenszyklus des Bauwerkes entfallen. Eine weitere Besonderheit von Infrastrukturanlagen, z. B. ggü dem Hochbau ist, dass sie in der Regel nicht zurückgebaut werden (z. B. Tunnelanlagen), sondern vielmehr anderen Nutzungszwecken zugeführt werden. Die für den Betrieb anfallenden Emissionen können nur

in begrenzter Form Einzelabschnitten zugeordnet werden und werden auch zu einem größeren Teil durch den Betrieb der Gesamtstrecke beeinflusst. Im Rahmen der drei Varianten wird der dabei entstehende Anteil an im Betrieb anfallenden Emissionen voraussichtlich zwischen den drei Varianten vergleichbar sein. Der Fokus der vorliegenden THG-Bilanzierung liegt daher auf der Herstellungsphase des erweiterten Rohbaus bis zur Fertigstellung (Lebenszyklusphasen A1-A5 gemäß DIN EN 15978 [2]). Eine bildliche Darstellung der üblichen Lebenszyklusphasen und die für die Bilanz gesetzte Fokussierung zeigt Abbildung 3.

Die Herstellungsphase der Baumaterialien beschreibt die Phasen A1-A3. In dieser Phase resultiert die THG-Last aus der Rohstoffbereitstellung, dem Transport und der Baustoffherstellung bis zum zu verarbeitenden Endprodukt.

Die Phasen A4-A5 beschreiben die Errichtungsphase des Bauwerkes. Hierzu gehört der Transport vom Werk zu der Baustelle sowie der Einbau und die Verarbeitung vor Ort. Finden Ausbau- und Entsorgungsarbeiten im Rahmen des Herstellungsprozesses statt, werden diese ebenfalls den Phasen A4-A5 zugeordnet. Diese treten z.B. im Zuge der Erdarbeiten (Bodenaushub und Entsorgung) auf.

Zudem wurde bei Betonen die Karbonatisierung in der Nutzungsphase (Lebenszyklusphase B1) inkludiert.

Die Phasen C3 und D (Entsorgungs- und Recyclingphase) werden bei den Profilstählen, welche die Aussteifung des temporären Baugrubenverbau bilden, mitbetrachtet. Damit beinhalten die Entsorgungs- und Recyclingphase einen Teil der Herstellungsemissionen des Bauwerkes.

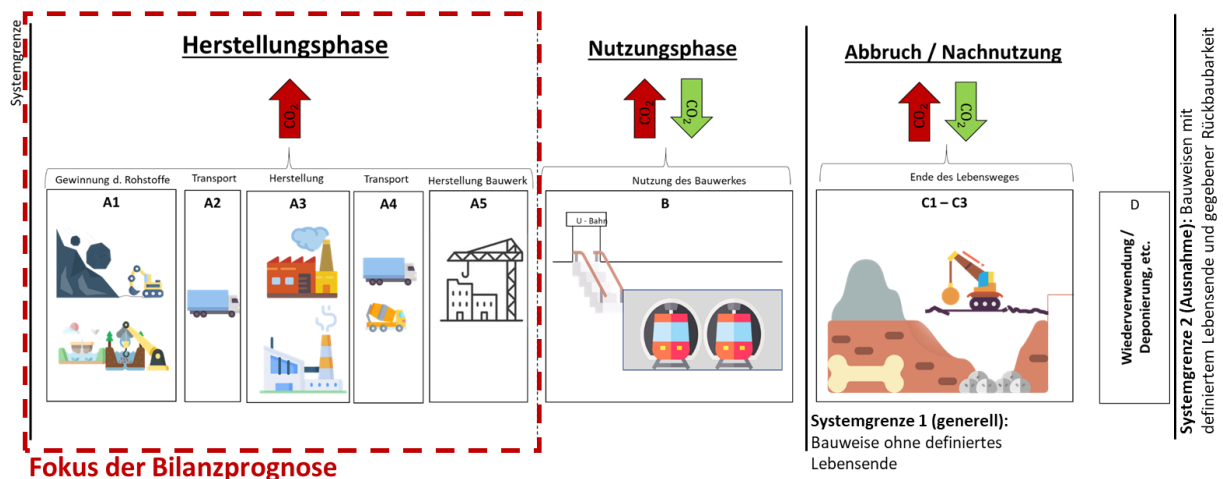


Abbildung 3: Darstellung der Lebenszyklusphasen und betrachteten Systemgrenzen für die Bilanzprognose

3.3 Funktion und funktionelle Einheit

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist die Bilanzierung von drei verschiedenen Trassenvarianten der U4 zwischen den Stadtteilen Bockenheim und Ginnheim. Die Varianten unterscheiden sich sowohl in der Linienführung als auch in der Art der Trassierung. Im Folgenden werden ausgewählte Grunddaten der einzelnen Varianten stichpunktartig vorgestellt:

Variante 1a:

- Gesamtstreckenlänge: 2.952 m
- Gesamtlänge oberirdischer Streckenabschnitt: 1.835 m
- Gesamtlänge Tunnelabschnitt: 1.090 m
 - Davon 1.090 m in offener Bauweise

Variante 1d:

- Gesamtstreckenlänge: 2.870 m
- Gesamtlänge oberirdischer Streckenabschnitt: 1.870 m
- Gesamtlänge Tunnelabschnitt: 1.000 m
 - Davon 400 m in offener Bauweise
 - Davon 600 m in geschlossener Bauweise

Variante 3i:

- Gesamtstreckenlänge: 3.860 m
- Gesamtlänge oberirdischer Streckenabschnitt: 1.355 m
- Gesamtlänge Tunnelabschnitt: 2.505 m
 - Davon 135 m in offener Bauweise
 - Davon 2.370 m in geschlossener Bauweise

4 Darstellung der Bilanzierungsergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt die detaillierte Darstellung der THG-Bilanzergebnisse. Die Basis der Sachbilanz bilden die durch die SBEV zur Verfügung gestellten Mengenermittlungen [4] und Planunterlagen [5] aus dem bisherigen Planungsprozess. Die Hintergrunddaten (Sachbilanz) sowie weitere Bilanzierungs- und Prozessdetails können dem Anhang A.1 entnommen werden. In der Bilanzierung wurden folgende Bereiche genauer betrachtet, die die Hauptarbeiten des erweiterten Rohbaus beschreiben und auf Grundlage des aktuellen Planungsstandes bewertet werden können:

- Stahlbetonbauweise
- Stahlbauweise
- Bodenmanagement
- Maschinelles Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine
- Schienensystem
- Verkehrsflächen

4.1 Stahlbetonbauweise

Im Rahmen der Bilanzierung wurden die herstellungsbedingten Emissionen der Materialien für die Stahlbetonbauweise der drei Varianten betrachtet. Die Details zur Bilanzierungsmethode und den zugrunde gelegten Daten sind dem Anhang A.1.0 zu entnehmen. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Bilanzierung dargestellt für die Lebenszyklusphase der Bauwerksherstellung dargestellt. Hinzukommt, dass Beton im Rahmen seines Lebenszyklusses CO₂ durch Karbonatisierung binden kann. Die dabei entstehende Menge hängt von unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ab und kann daher stark variieren. Da jedoch in allen drei Varianten von ähnlichen Randbedingungen auszugehen ist und der Fokus der Bilanzierung auf einer vergleichenden Bewertung der drei Varianten liegt, werden für eine erste Abschätzung Durchschnittswerte der Umweltproduktdeklarationen für Betone angenommen. Eine detaillierte Erfassung unter Berücksichtigung der individuellen Bauteile und Bauwerksabschnitte kann zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, wenn diese klarer definiert werden können.

Tabelle 1: Übersicht THG-Bilanz der Stahlbetonbauweise

<i>Stahlbetonbauweise</i>				
<i>Varianten</i>	<i>THG-Emissionen [t CO₂-Äq.]</i>			
	<i>A1-A3</i>	<i>A4-A5</i>	<i>B1</i>	<i>Gesamt je Variante</i>
Variante 1a	26.310	1.049	-1.040	26.319
Variante 1d	15.464	697	-561	15.599
Variante 3i	28.892	1.277	-987	29.182

4.2 Stahlbauweise

Die mit der Stahlbauweise verbundenen Arbeiten sind materialintensiv und führen auf Grund des spez. THG-Potentials von Stahlprodukten zu einer hohen THG-Last. Der wesentliche Anteil der Stahlbauteile entfällt auf die Herstellung der Aussteifungselemente im Baugrubenverbau. Da dieser bereits im Herstellungsprozess mit fortschreitender Herstellung des Bauwerkes wieder zurückgebaut wird, kann an dieser der Ausbau und die weitere Verwertung des Stahls in anderen Anwendungen in Abzug gebracht

werden. Details zur Bilanzierungsmethode und den zugrunde gelegten Daten sind dem Anhang A.1.1 zu entnehmen. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Bilanzierung dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht THG-Bilanz der Stahlbauweise

<i>Stahlbauweise</i>					
<i>Varianten</i>	THG-Emissionen [t CO₂-Äq.]				
	A1-A3	A4	C3	D	Gesamt je Variante
Variante 1a	6.013	64	6	-2.637	3.446
Variante 1d	2.361	25	2	-1.035	1.354
Variante 3i	761	8	1	-334	436

4.3 Bodenmanagement

Das Bodenmanagement umfasst umfangreiche Erd- und Transportarbeiten, weshalb in diesem Bereich die Prozesse auf der Baustelle (Aushub) sowie die Transporte einer detaillierten Betrachtung und Bilanzierung unterzogen werden. Details zur Bilanzierungsmethode und den zugrunde gelegten Daten sind dem Anhang A.1.2 zu entnehmen. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Bilanzierung dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht THG-Bilanz des Bodenmanagements

<i>Bodenmanagement</i>			
<i>Varianten</i>	THG-Emissionen [t CO₂-Äq.]		
	A4	A5	Gesamt je Variante
Variante 1a	6.624	208	6.833
Variante 1d	5.571	175	5.747
Variante 3i	9.616	302	9.918

4.4 Maschinelles Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM)

Die Erstellung der Tunnelabschnitte in geschlossener Bauweise erfolgt mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine (TBM) im maschinellen Tunnelvortrieb. Die dabei entstehenden Emissionen hängen von verschiedenen lokalen Bedingungen des Baugrundes und der damit verbundenen Art der TBM und der darin verbauten Anlagentechnik ab. Für den Betrieb der Maschine fällt ein erheblicher Energiebedarf in Form von elektrischer Energie an. Der Gesamtenergiebedarf für den Betrieb der TBM wird auf Grundlage der zu erzielenden Tunnelabmessungen und Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten der SBEV auf die in Tabelle 4 dargestellten Emissionen geschätzt, wobei diese Menge durch elektrische Energie gedeckt werden soll. Da im Rahmen der Variante 1a keine Tunnelvortrieb in geschlossener Bauweise vorgesehen ist, besitzt diese Variante keinen Emissionen aus diesen Arbeiten. Stattdessen erfolgt die Herstellung des Tunnelabschnittes in offener Bauweise.

Tabelle 4: Übersicht THG-Bilanz des maschinellen Tunnelvortriebs

Maschinelles Tunnelvortrieb	
Varianten	THG-Emissionen [t CO₂-Äq.]
	A5
Variante 1a	-
Variante 1d	721
Variante 3i	2.850

4.5 Schienensystem

Für die Herstellung des Schienensystems wurden die Mengen für die Materialien (Bahngleise, Schotter, Betonschwelle, Fahrleitung) erfasst und bilanziert. Zudem wurden auch die Transporte und der Einbau betrachtet. Details zur Bilanzierungsmethode und den zugrunde gelegten Daten sind dem Anhang A.1.3 zu entnehmen. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Bilanzierung dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht THG-Bilanz des Schienensystems

Schienensystem			
Varianten	THG-Emissionen [t CO₂-Äq.]		
	A1-A3	A4	Gesamt je Variante
Variante 1a	2.004	163	2.167
Variante 1d	1.966	160	2.126
Variante 3i	2.638	214	2.852

4.6 Verkehrsflächen

Die Bilanzierung der Verkehrsflächen umfasst die Herstellung von Asphaltstraßen inkl. provisorischer Baustraßen. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Bilanzierung dargestellt. Details zur Bilanzierungsmethode und den zugrunde gelegten Daten sind dem Anhang A.1.5 zu entnehmen.

Tabelle 6: Übersicht der THG-Bilanz der Verkehrsflächen

Verkehrsflächen			
Varianten	THG-Emissionen [t CO₂-Äq.]		
	A1-A3	A4-A5	Gesamt je Variante
Variante 1a	882	55	937
Variante 1d	353	22	375
Variante 3i	-	-	-

4.7 Ergebnisübersicht der Bilanzierung

Aufbauend auf den vorangegangenen Abschnitten werden im vorliegenden Kapitel die Ergebnisse der THG-Bilanzierung der einzelnen Varianten zusammengefasst und gegenübergestellt. Dabei steht, wie eingangs beschrieben, der relative Vergleich der Varianten durch eine erste Abschätzung der THG-Emissionen im Rahmen des ressourcen- und energieintensiven erweiterten Rohbaus auf Stand einer frühen Projektphase (Leistungsphase 2) im Fokus.

In Abbildung 4 sind die THG-Bilanzprognosen für die verschiedenen Varianten als gestapelte Säulen vergleichend gegenübergestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Streckenlängen werden in Abbildung 5 zusätzlich die ermittelten THG-Potentiale auf einen laufenden Streckenkilometer bezogen. Dadurch lässt sich zusätzlich ein Parameter der THG-Effizienz in der Herstellung der Bauwerkskubatur beschreiben.

Im derzeitigen Verlauf ergibt sich für die **Variante 1a** ein gesamtes THG-Potential für den erweiterten Rohbau von ca. 39.701 t CO₂-Äq. Die **Variante 1d** unterschreitet diesen Wert mit einem Gesamt-THG-Potenzial im erweiterten Rohbau von ca. 25.921 t CO₂-Äq. Da beide Varianten eine vergleichbare Streckenlänge aufweisen, stellt die Variante 1d auf Grund einer THG-effizienteren Bauweise die THG-ärmere Variante dar. Im Absolutvergleich der THG-Emissionen weist die **Variante 3i** mit einem erwarteten THG-Gesamtpotenzial im erweiterten Rohbau von etwa 45.238 t CO₂-Äq die größten THG-Emissionen auf. Dies kann insbesondere auf die längere Strecke und einen größeren Tunnelanteil zurückgeführt werden. Im Vergleich der THG-effizienten Herstellung schneidet die Variante 3i jedoch besser als die Variante 1a ab. Gegenüber der Variante 1d unterliegt sie jedoch, da der Anteil der Tunnelstrecke in Variante 1d geringer ist.

Neben den Gesamtergebnissen wird anhand der Betrachtung der einzelnen Anteile deutlich, dass den höchsten Anteil der Gesamtemissionen durch die Stahlbetonbauweise gefolgt vom Bodenmanagement verursacht wird. Daher kann geschlussfolgert werden, dass nach Herausarbeitung der Vorzugsvariante hier ein Hauptfokus hinsichtlich einer Optimierung der THG-Emissionen liegen sollte, da entsprechende spezifischen Anpassungen in diesem Bereich auf Grund der Menge große Auswirkungen haben können. Dennoch lassen sich auch in den weiteren Bereichen Einsparpotentiale, wie z. B. bei dem Betrieb der TBM mittels Ökostrom ebenfalls Potentiale heben, die sich ebenfalls verbessernd auf die THG-Effizienz je Streckenkilometer bei den Varianten mit Tunnelvortrieb in geschlossener Bauweise auswirken können.

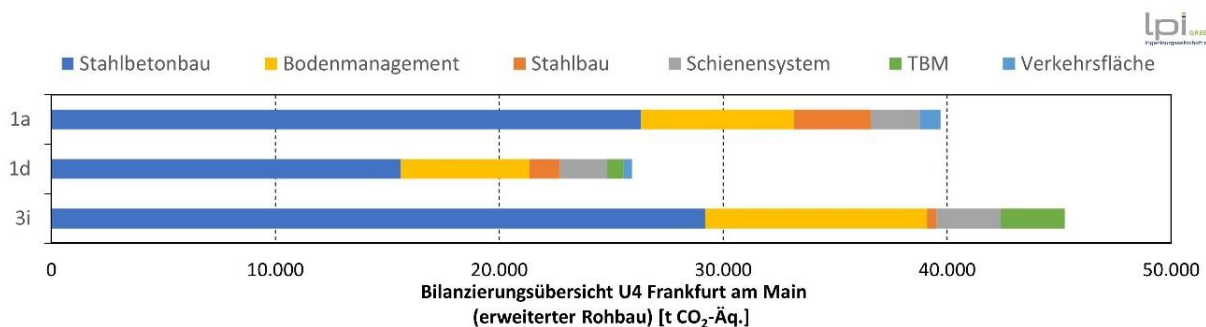


Abbildung 4: Bilanzübersicht des THG-Potentials für den erweiterten Rohbau

Auf die Einheit von einen Kilometer Streckenlänge bezogen, ergibt sich die in Abbildung 5 dargestellte Übersicht der THG-Potentiale.

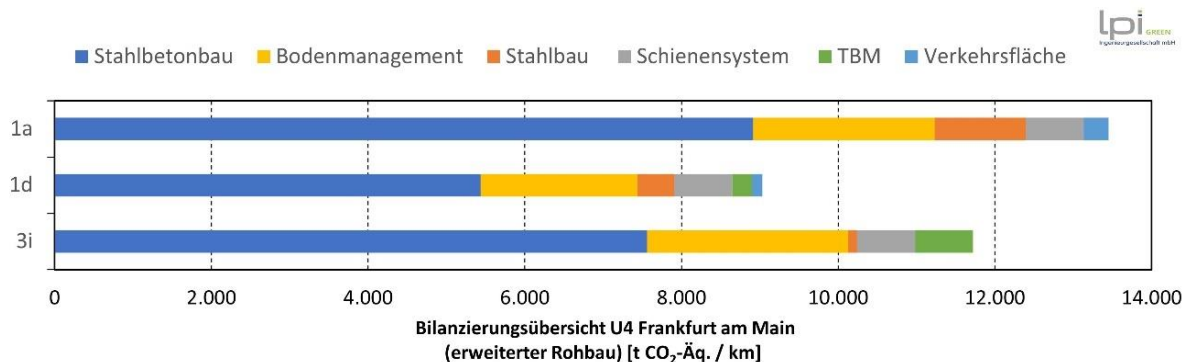


Abbildung 5: Übersicht der Bilanzübersicht des THG-Potentials pro km Streckenlänge

Die **Variante 1a** ist im Vergleich mit einem erwarteten THG-Gesamtpotenzial von etwa 13.449 t CO₂-Äq./km die THG-intensivste Variante. (vgl. Abbildung 5).

Für die **Variante 1d** mit einem Gesamt-THG-Potenzial im erweiterten Rohbau von 9.032 t CO₂-Äq./km sind im Vergleich zu den Varianten 1a und 3i die geringsten THG-Emissionen zu erwarten.

Die **Variante 3i** liegt mit einem erwarteten THG-Gesamtpotenzial von 11.720 t CO₂-Äq./km im Vergleich zwischen den Varianten 1a und 1d.

gez. die Autoren:

Dipl.-Ing. Christoph Begemann

Projektleiter und Leitung Nachhaltiges Planen und Bauen

Celina Platz, B. Sc.

Projektingenieurin Nachhaltiges Planen und Bauen

Laura Lehmann, B. Sc.

Projektingenieurin Nachhaltiges Planen und Bauen

Dipl.-Ing. Daniela Eckert

Projektingenieurin Nachhaltiges Planen und Bauen

Kathrin Janssen, B. Sc.

Projektingenieurin Nachhaltiges Planen und Bauen

A Anhang Bilanzierungsdaten

Überblick:

A.1 Bilanzierungsergebnisse

A.1.0 Stahlbetonbauweise

A.1.1 Stahlbauweise

A.1.2 Bodenmanagement

A.1.3 Maschinelles Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine

A.1.4 Schienensystem

A.1.5 Verkehrsflächen

A.2: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

A.3: Literaturverzeichnis

A.1 Bilanzierungsergebnisse

A.1.0 Stahlbetonbauweise

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 3.1 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. Kapitel 3) wird nachfolgend die Bilanzierung der Stahlbetonbauweise zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Aus den zur Verfügung gestellten Unterlagen (vgl. [4], [5]) wurden die zu verbauenden Mengen analysiert und kategorisiert. In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die Mengen an unbewehrtem Beton und Bewehrungsstahl für die verschiedenen Varianten aufgeführt.

Tabelle 7: Mengenübersicht der zu verbauenden Beton- und Bewehrungsstahlmengen¹

Material	Variante 1a		Variante 1d		Variante 3i	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit	Menge	Einheit
C12/15	42	[m ³]	42	[m ³]	42	[m ³]
C20/25	698	[m ³]	952	[m ³]	2.836	[m ³]
C30/37	42.792	[m ³]	13.388	[m ³]	19.569	[m ³]
C35/45	357	[m ³]	357	[m ³]	357	[m ³]
C45/55	35.488	[m ³]	29.627	[m ³]	55.691	[m ³]
Ringspaltmörtel	0	[m ³]	3.987	[m ³]	15.747	[m ³]
Bewehrungsstahl	13.066	[t]	6.517	[t]	11.893	[t]

Wirkbilanz:

Auf Basis der beschriebenen Mengen fand die Berechnung der THG-Emissionen statt. Diese Berechnung setzt sich hierbei im Wesentlichen aus den folgenden Schritten zusammen.

1. Ermittlung der Gesamten THG-Last für den unbewehrten Beton
 - a. Sortierung der Betonmengen
 - b. Zusammentragen der erforderlichen THG-Potentiale für die verwendeten Betone auf Basis der anerkannten und freizugänglichen Datensätze Informationszentrums Beton [6] (vgl. Tabelle 8)
 - c. Berechnung der THG-Last für jede Betongüte (Tabelle 9)
2. Ermittlung der Gesamten THG-Last der Bewehrung
 - a. Erfassung des THG-Potentials für die Bewehrung auf Basis der anerkannten und freizugänglichen Datensätze der Ökobaudat (Tabelle 9)
 - b. Zuordnung der spez. THG-Emissionen je t Bewehrungsstahl
 - c. Berechnung des THG-Potentials infolge der Bewehrung
3. Ermittlung des Gesamt-THG-Potentials für die Stahlbetonbauweise

¹ Die dargestellten Mengenübersichten inklusive der verschiedenen Festigkeitsklassen stellen unter Berücksichtigung des aktuellen Planungsstandes bereits einen hohen Detaillierungsgrad dar. Damit wird eine detailhafte Bilanzierung für die aktuelle Planungstiefe ermöglicht. Wie auch bei den weiteren Angaben und Mengen der Sachbilanz ist damit zu rechnen, dass im Rahmen der weiteren Planungsphasen Anpassungen stattfinden werden.

Tabelle 8: Übersicht des Treibhausgaspotentials für die Stahlbetonbauweise

Betonfestigkeitsklasse	Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -Äq. / Einheit]			Quelle/Jahr
	A1-A3	A4-A5	B1	
C12/15	129	4,7	-14	IZB: Beton der Druckfestigkeitsklasse C12 /15, 2023
C20/25	157	4,7	-14	IZB: Beton der Druckfestigkeitsklasse C20 /25, 2023
C30/37	196	5,2	-14	IZB: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37, 2023
C35/45	220	9,2	-12	IZB: Beton der Druckfestigkeitsklasse C35 /45, 2023
C45/55	273	17,7	-12	IZB: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 45/55, 2023
Ringspaltmörtel	127,3		-	LPI: eigene Berechnung, 2023
Bewehrungsstahl	615,4	12,2 ⁽¹⁾	-	Ökobaudat: Bewehrungsstahl, 2022

Hinweis zu Tabelle 8: Die Daten enthalten sowohl materialimmanente Emissionen für deren Herstellung (A1-A3) als auch für den Transport (A4) zur 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. Weitere Faktoren aus der Betonzusammensetzung und den Umgebungsbedingungen haben hier ebenfalls einen Einfluss. Eine genauere Betrachtung wird mit Fortschreibung der Studie angestrebt.

⁽¹⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 180 km.

Auf Grundlage der ermittelten Mengen und der spez. THG-Potentiale (vgl. Tabelle 8) ergeben sich für die Stahlbetonbauweise die unten aufgeführten Gesamt-THG-Potentiale (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Berechnetes THG-Potential für die Stahlbetonbauweise

Variante	Betongüte	Menge	Einheit	THG-Potential [t CO ₂ -Äq.]		
				A1-A3	A4-A5	B1
Variante 1a	C12/15	42	[m ³]	5	0	-1
	C20/25	698	[m ³]	110	4	-10
	C30/37	42.574	[m ³]	8.387	224	-599
	C35/45	357	[m ³]	79	3	-4
	C45/55	35.488	[m ³]	9.688	627	-426
	Bewehrungsstahl	13.066	[t]	8.041	191	-
Gesamt Variante 1a				26.319		
Variante 1d	C12/15	42	[m ³]	5	0	-1
	C20/25	952	[m ³]	149	4	-13
	C30/37	13.170	[m ³]	2.624	70	-187
	C35/45	357	[m ³]	79	3	-4
	C45/55	29.627	[m ³]	8.088	524	-356
	Ringspaltmörtel	3.987	[m ³]	508		0
	Bewehrungsstahl	6.517	[t]	4.011	95	-
Gesamt Variante 1d				15.599		
Variante 3i	C12/15	42	[m ³]	5	0	-1
	C20/25	2.836	[m ³]	445	13	-40

Variante	Betongüte	Menge	Einheit	THG-Potential [t CO ₂ -Äq.]		
				A1-A3	A4-A5	B1
Variante 3i	C30/37	19.569	[m ³]	3.835	102	-274
	C35/45	357	[m ³]	79	3	-4
	C45/55	55.691	[m ³]	15.204	984	-668
	Ringspaltmörtel	15.747	[m ³]	2.005		0
	Bewehrungsstahl	11.893	[t]	7.319	174	
Gesamt Variante 3i				29.182		

A.1.1 Stahlbauweise

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 0 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. Kapitel 3) wird nachfolgend die Bilanzierung der Stahlbauweise zusammenfassend dargestellt. Die Stahlbauarbeiten beziehen sich maßgeblich auf die Profilstähle für Gurtungen, Aussteifungen und Kopfplatten.

Sachbilanz:

Aus der zur Verfügung gestellten Unterlagen (vgl. [4], [5]) wurden die zu verbauenden Mengen analysiert und kategorisiert. In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die Bewehrungsstahlmengen aufgeführt.

Tabelle 10: Mengenübersicht der Stahlbauweise

Material	Variante 1a		Variante 1d		Variante 3i	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Offene Profilstähle	1.642	[t]	659	[t]	209	[t]
Geschlossene Profilstähle	1.483	[t]	578	[t]	187	[t]
Bleche	220	[t]	85	[t]	28	[t]

Wirkbilanz:

Die zugrunde gelegten Wirkbilanzdaten im Zuge der Stahlbauarbeiten sind nachfolgend dargestellt:

Tabelle 11: Übersicht des Treibhausgaspotentials für die Stahlbauweise

Stahlbauteile	Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -Äq. / t]				Quelle/Jahr
	A1-A3	A4	C3	D	
Offene Profilstähle	1.125,0	19,1 ⁽¹⁾	1,8	-413,4	Ökobaudat: Offene Walzprofile, 2018
Geschlossene Profilstähle	2.270,0	19,1 ⁽¹⁾	1,8	-1.320,0	Arcelor Mittal: Hohlprofile, 2020
Bleche	3.623,0	19,1 ⁽¹⁾	-	-	Ökobaudat: Edelstahlblech, 2022

⁽¹⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 235 km.

Auf Grundlage der ermittelten Mengen und der spez. THG-Potentiale (vgl. Tabelle 11) ergeben sich für die Stahlbauweise die unten aufgeführten Gesamt-THG-Potentiale (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Berechnetes THG-Potential für die Stahlbauweise

Variante	Kategorie	Menge	Einheit	THG-Potential [t CO ₂ -Äq.]			
				A1-A3	A4	C3	D
Variante 1a	Offene Profilstähle	1.642	[t]	1.848	31	3	-679
	Geschlossene Profilstähle	1.483	[t]	3.367	28	3	-1.958
	Bleche	220	[t]	798	4	-	-
Gesamt Variante 1a				3.446			
Variante 1d	Offene Profilstähle	659	[t]	741	13	1	-272
	Geschlossene Profilstähle	578	[t]	1.311	11	1	-763
	Bleche	85	[t]	309	2	-	-
Gesamt Variante 1d				1.354			
Variante 3i	Offene Profilstähle	209	[t]	235	4	0	-86
	Geschlossene Profilstähle	187	[t]	425	4	0	-247
	Bleche	28	[t]	100	1	-	-
Gesamt Variante 3i				436			

A.1.2 Bodenmanagement

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 4.3 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. Kapitel 3) wird nachfolgend die Bilanzierung des Bodenmanagements zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Das Bodenmanagement umfasst die Prozesse des Aushubs und Transports. Aus den zur Verfügung gestellten Unterlagen (vgl. [4], [5]) wurden die Mengen analysiert und kategorisiert. Die Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der anfallenden Mengen je Variante.

Tabelle 13: Mengenübersicht des Bodenmanagements

Varianten	Kategorie	Menge	Einheit
Variante 1a	Aushub	156.790	[m ³]
Variante 1d	Aushub	131.868	[m ³]
Variante 3i	Aushub	227.592	[m ³]

Der Aushub wird mittels Bagger durchgeführt und der Transport zum Verwertungsort erfolgt mittels LKW. Die Entfernung zu dem Verwertungsort wurde zu 130 km angenommen. Für die Rückfahrt vom Verwertungsort zur Baustelle wurde eine zusätzliche Leerfahrt (130 km) angesetzt (Fahrstrecke: 2 x 130 km, inkl. Leerfahrt).

Wirkbilanz:

Um die zuvor beschriebenen Bauprozesse für die Erdarbeiten adäquat in der Wirkbilanz abzubilden, wurden den Prozessschritten spez. THG-Lasten zugeordnet (vgl. Tabelle 14). Treibstoffverbräuche werden im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt, so dass der Aushub mittels Bagger und der Transport mittels LKW bilanziell erfasst wurde.

Auf Grundlage der ermittelten Mengen und der spez. THG-Potentiale (vgl. Tabelle 15) ergeben sich für das Bodenmanagement die unten aufgeführten Gesamt-THG-Potentiale (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 14: Eingangsdaten als Umweltkenngößen Prozessschritte (Quelle: Ökobaudat [7])

Prozessschritt	Einheit	GWP	Quelle / Jahr
Transport per LKW-Zug	kg CO ₂ -Äq. / tkm	0,08125	Ökobaudat: LKW-Zug 2022
Bagger	kg CO ₂ -Äq. / m ³	1,328	Ökobaudat: Bagger 2022

Tabelle 15: Übersicht des Treibhausgaspotentials für das Bodenmanagement

Material	Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -Äq. / Einheit]		Quelle/Jahr
	A4	A5	
Aushub	42,3 ⁽¹⁾	1,3	Ökobaudat: Bagger 2022

⁽¹⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 260 km.

Tabelle 16: Berechnetes THG-Potential des Bodenmanagements

Varianten	Kategorie	Menge	Einheit	THG-Potential [t CO ₂ -Äq.]		
				A4	A5	Gesamt je Variante
Variante 1a	Aushub	156.790	[m ³]	6.624	208	6.833
Variante 1d	Aushub	131.868	[m ³]	5.571	175	5.747
Variante 3i	Aushub	227.592	[m ³]	9.616	302	9.918

A.1.3 Maschineller Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM)

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 0 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. Kapitel 3) wird nachfolgend die Bilanzierung für den Maschinellen Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Der Gesamtenergiebedarf für den Betrieb der TBM wird auf Grundlage der zu erzielenden Tunnelabmessungen und den Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten der SBEV ermittelt. Hieraus ergeben sich für den Betrieb der TBM die in Tabelle 17 dargestellten Stromverbräuche.

Tabelle 17: prognostizierte Stromverbräuche durch die TBM

Variante	Kategorie	Streckenlänge [m]	Stromverbrauch [MWh]
Variante 1a	Baustrom TBM	0	0
Variante 1d	Baustrom TBM	1.200	1.224
Variante 3i	Baustrom TBM	4.740	4.835

Wirkbilanz:

Zur Bestimmung der resultierenden Emissionen wurde von der Verwendung des deutschlandweiten Strom-Mixes ausgegangen.

Tabelle 18: Übersicht des spez. Treibhausgaspotentials für den Stromverbrauch

Kategorie	Einheit	Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -Äq. / Einheit]	Quelle/Jahr
Baustrom	[kWh]	0,5894	Ökobaudat: Strom-Mix 2022

Auf Grundlage der ermittelten Mengen und der spez. THG-Lasten (vgl. Tabelle 18) ergeben sich für die Stromverbräuche die unten aufgeführten Gesamt-THG-Potentiale (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Berechnetes THG-Potential des Stromverbrauchs der TBM

Variante	Kategorie	Menge	Einheit	THG-Potential (A5) [t CO ₂ -Äq.]
Variante 1a	Baustrom TBM	0	[MWh]	0
Variante 1d	Baustrom TBM	1.224	[MWh]	721
Variante 3i	Baustrom TBM	4.835	[MWh]	2.850

A.1.4 Schienensystem

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 0 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. Kapitel 3) wird nachfolgend die Bilanzierung für das Schienensystem zusammenfassend dargestellt.

Sachbilanz:

Das Schienensystem setzt sich aus den Schienen, Schwellen und dem Unterbau aus Schotter zusammen. Aus der zur Verfügung gestellten Unterlagen (vgl. [4], [5]) wurden die Mengen analysiert und kategorisiert. Die Tabelle 20 zeigt die anfallenden Mengen im Bereich der Gleisanlagen.

Tabelle 20 : Mengenübersicht des herzustellenden Schienensystems

Material	Variante 1a		Variante 1d		Variante 3i	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Unterbau: Schotter	5.850	m	5.740	m	7.700	m
Schiene	11.700	m	11.480	m	15.400	m
Stromschiene	5.850	m	5.740	m	7.700	m
Betonschwelle	5.850	m	5.740	m	7.700	m

Wirkbilanz:

Für die Beschreibung des spez. THG-Potential des Schienensystems wurde der Regelquerschnitt anhand der verbauten Materialien und der darin enthaltenen Bauprozessen bilanziell beschrieben. Der Regelaufbau für die geschotterte Trasse ergibt sich aus den Schienen, Schwellen und dem Unterbau aus Schotter. Für diesen Regelaufbau wurden spez. THG-Potentiale entsprechend Tabelle 21 ermittelt.

Tabelle 21: Übersicht des Treibhausgaspotentials für das Schienensystem

Material	Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -Äq. / Einheit]			Quelle/Jahr
	A1-A3	A4	A5	
Schotter 16/32	34,3	1,9 ⁽¹⁾	7,8	Ökobaudat: Schotter 2022
Stromschiene	11,8	16,3 ⁽²⁾	-	LPI, Stromschiene 2018
Spannbeton-Weichschwellen	43,6	8,1 ⁽³⁾	-	Voestalpine: Spannbeton-Weichenschwellen, 2021
Fahrschiene	126,4	0,8 ⁽⁴⁾	-	Arcelor Mittal, Fahrschiene 2019 ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 23 km

⁽²⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 200 km

⁽³⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 100 km

⁽⁴⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 200 km

⁽⁵⁾ Umrechnung des Datensatzes: 49,39 kg Fahrschiene pro m Fahrschiene

Auf Grundlage der ermittelten Mengen und der spez. THG-Potentiale (vgl. Tabelle 21) ergeben sich für das Schienensystem die unten aufgeführten Gesamt-THG-Potentiale (vgl. Tabelle 22)

Tabelle 22: Berechnetes THG-Potential des Schienensystems

Variante	Kategorie	Menge	Einheit	THG-Potential [t CO ₂ -Äq.]	
				A1-A3	A4
Variante 1a	Unterbau: Schotter	5.850	m	200	11
	Schiene	5.850	m	1.479	9
	Stromschiene	5.850	m	69	95
	Betonschwelle	5.850	m	255	48
Gesamt 1a				2.167	
Variante 1d	Unterbau: Schotter	5.740	m	197	11
	Schiene	5.740	m	1.452	9
	Stromschiene	5.740	m	68	93
	Betonschwelle	5.740	m	250	47
Gesamt 1d				2.126	
Variante 3i	Unterbau: Schotter	7.700	m	264	14
	Schiene	7.700	m	1.947	12
	Stromschiene	7.700	m	91	125
	Betonschwelle	7.700	m	336	63
Gesamt 3i				2.852	

A.1.5 Verkehrsflächen

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kapitel 4.6 und dem grundsätzlichen Bilanzierungsvorgehen (s. Kapitel 3) wird nachfolgend die Bilanzierung der Verkehrsanlagen zusammenfassend dargestellt. Dazu gehören die Herstellung von Asphaltstraßen inkl. provisorischer Baustraßen. Der Aufbau der Verkehrsstraßen wurde anhand allgemein zugänglicher Regelquerschnitte für Asphaltstraßen der Belastungskategorie BK 32 abgeschätzt [8].

Sachbilanz:

Aus der zur Verfügung gestellten Unterlagen [4] [5] und allgemein zugänglicher Querschnitte für Verkehrsstraßen der Belastungskategorie 32 [8] wurden die zu verbauenden Mengen analysiert und kategorisiert. In der nachfolgenden Tabelle 23 sind die Mengen für die Verkehrsanlagen aufgeführt.

Tabelle 23: Mengenübersicht der verbauten Verkehrsflächen

Material	Variante 1a		Variante 1d		Variante 3i	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit	Menge	Einheit
Asphaltdeckschicht	3.780.000	[kg]	1.512.000	[kg]	0	[kg]
Asphalttragschicht	7.402.500	[kg]	2.961.000	[kg]	0	[kg]
Frostschuttschicht	14.568.750	[kg]	5.827.500	[kg]	0	[kg]

Wirkbilanz:

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Mengen und spez. THG-Lasten (vgl. Tabelle 24) ergeben sich die Tabelle 25 dargestellten THG-Potentiale.

Tabelle 24: Übersicht des Treibhausgaspotentiale für die Verkehrsanlagen

Kategorie	Module der Bilanzierung [kg CO ₂ -Äq. / Einheit]			Quelle/Jahr
	A1-A3	A4	A5	
Asphalttragschicht	0,073	0,001 ⁽¹⁾	0,001	Ökobaudat: Asphalttragschicht, 2022 ⁽²⁾
Asphaltdeckschicht	0,08	0,001 ⁽²⁾	0,001	Ökobaudat: Asphaltdeckschicht, 2022 ⁽²⁾
Frostschuttschicht	0,0026	0,002 ⁽³⁾	0,0007	Ökobaudat: Kies 2/32, 2022

⁽¹⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 10 km.

⁽²⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 10 km.

⁽³⁾ Für den Fahrtweg wurde angenommen: Transport mittels LKW-Zug (0,08125 kg CO₂-Äq./tkm) und eine Transportentfernung von 23 km.

Tabelle 25: Berechnetes THG-Potential der Verkehrsflächen

Variante	Kategorie	Menge	Einheit	THG-Potential [t CO ₂ -Äq.]		
				A1-A3	A4	A5
Variante 1a	Asphalttrag-schicht	3.780.000	[kg]	302	3	3
	Asphaltdeck-schicht	7.402.500	[kg]	543	6	5
	Frostschutz-schicht	14.568.750	[kg]	38	27	10
Gesamt 1a				937		
Variante 1d	Asphalttrag-schicht	1.512.000	[kg]	121	1	1
	Asphaltdeck-schicht	2.961.000	[kg]	217	2	2
	Frostschutz-schicht	5.827.500	[kg]	15	11	4
Gesamt 1d				375		

A.2 Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle 26 zeigt eine Gesamtübersicht des erwarteten Gesamt-THG-Potentials je Variante.

Tabelle 26: Gesamtübersicht der Bilanzierung

Variante	Kategorie	Gesamt THG-Potential je Variante [t CO ₂ -Äq.]			
		A1-A5	B1	C3	D
Variante 1a	Stahlbetonbauweise	27.358	-1.040	0	0
	Stahlbauweise	6.077	0	6	-2.637
	Bodenmanagement	6.833	0	0	0
	TBM	0	0	0	0
	Schienensystem	2.167	0	0	0
	Verkehrsflächen	937	0	0	0
Gesamt THG-Emission Variante 1a		43.372	-1.040	6	-2.637
		39.701			
Variante 1d	Stahlbetonbauweise	16.160	-561	0	0
	Stahlbauweise	2.386	0	2	-1.035
	Bodenmanagement	5.747	0	0	0
	TBM	721	0	0	0
	Schienensystem	2.126	0	0	0
	Verkehrsflächen	375	0	0	0
Gesamt THG-Emission Variante 1d		27.515	-561	2	-1.035
		25.921			
Variante 3i	Stahlbetonbauweise	30.169	-987	0	0
	Stahlbauweise	769	0	1	-334
	Bodenmanagement	9.918	0	0	0
	TBM	2.850	0	0	0
	Schienensystem	2.852	0	0	0
	Verkehrsflächen	0	0	0	0
Gesamt THG-Emission Variante 3i		46.558	-987	1	-334
		45.238			

A.3 Literaturverzeichnis

- [1] „DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz -Grundsätze und Rahmenbedingungen,“ Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2021.
- [2] „DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode,“ Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2012.
- [3] „DIN EN 17472: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken - Rechenverfahren,“ Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2022.
- [4] Stadtbahn Entwicklung und Verkehrs-Infrastrukturprojekte Frankfurt GmbH , „Mengenzusammenstellung aus "THG-Emissionen Infrastruktur Variantenvergleich U4", Stand: 15.05.2024“.
- [5] Stadtbahn Entwicklung und Verkehrs-Infrastrukturprojekte Frankfurt GmbH, „Ausführungspläne der verschiedenen Varianten, Stand: März 2024“.
- [6] Informationszentrum Beton GmbH, „Umweltproduktdeklarationen (EPD),“ [Online]. Available: <https://www.beton.org/betonbau/planungshilfen/umweltproduktdeklarationen/>. [Zugriff am 10 05 2024].
- [7] ÖKOBAUDAT-Datenbank des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), [Online]. Available: <https://oekobaudat.de/>.
- [8] Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., „Standardisierung des Oberbaues,“ 2022. [Online]. Available: https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/technik/standadisierung_des_oberbaus.pdf. [Zugriff am 19 06 2024].
- [9] DIN EN 15941: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Datenqualität für die Erfassung der Umweltqualität von Produkten und Bauwerken – Auswahl und Anwendung von Daten; Normenentwurf, 2022..