

Bachelorarbeit

U-Bahn-Ausbau Wien – umweltfreundlich oder umweltfeindlich?

Manuel Florian Ribul

Matr.Nr.: 01425921

Datum: 24.10.2021

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde die Erweiterung des Wiener U-Bahn-Netzes aus ökologischer Sicht genauer betrachtet. Es wurden die zwei zentralen Fragen: „Wieviel CO₂ Emissionen bringt der Ausbau des Wiener U-Bahn-Netzes mit sich?“ und „Innerhalb welches Zeitraumes amortisiert sich der Ausbau aus ökologischer Sicht?“ beantwortet. Zusätzlich wurde als Variante zum Ausbau des U-Bahn-Netzes eine Erweiterung des Straßenbahnnetzes in Betracht gezogen. Es wurden die Amortisationszeiträume beider Projekte berechnet, wodurch festgestellt werden konnte, dass der Bau des U-Bahn-Projektes nach 37,9 Jahren erstmals eine positive Klimabilanz aufweist. Dahingegen amortisiert sich das Alternativprojekt, die Erweiterung des Straßenbahnnetzes, schon nach 4,3 Jahren.

1 Einleitung

Seit es die Erde gibt, gibt es auch Klimaschwankungen auf der Erde. Es gab immer schon Perioden, in denen sich das Klima erwärmte und wieder solche wo es sich abkühlte. Der Wechsel dieser Perioden war bis vor „relativ“ kurzer Zeit auf natürliche Ursachen zurückzuführen. Spricht man heute von Klimawandel, dann versteht man darunter den menschengemachten Klimawandel. Seit ungefähr 200 Jahren, mit Beginn des Zeitalters der Industrialisierung, erwärmt sich unser Planet schneller als er es tun sollte. Im 20. Jahrhundert ist die durchschnittliche Temperatur auf der Erde um 0,74 Grad Celsius angestiegen. Ab einer Erwärmung von zwei Grad Celsius werden katastrophale Auswirkungen befürchtet [1]. Verschiedenste Klimaschutzprogramme müssen nun schleunigst umgesetzt werden um die globale Erwärmung zu stoppen und den bescheidenen Spielraum von 1,26 Grad Celsius möglichst nicht auszureizen.

Wien, 2020 von der kanadischen Agentur Resonance als grünste Stadt der Welt gekürt, will auch in Zukunft ihrem Namen gerecht werden und voll und ganz auf Klimaschutz setzen [2]. Das größte Klimaschutzprojekt der Stadt Wien der nächsten Jahre soll die Erweiterung und der Ausbau des bestehenden U-Bahn-Netzes sein. Man versucht so viele Menschen wie möglich dazu zu bewegen vom eigenen PKW auf den öffentlichen Verkehr zu wechseln und somit den Ausstoß des Treibhausgases CO₂ zu senken. Laut Wiener Linien können durch den Ausbau zukünftig bis zu 75.000

Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart werden [3]. Allerdings ist ein U-Bahn-Bau auch ein sehr großer Eingriff in die Natur und mit sehr vielen Treibhausgasemissionen verbunden - vor allem durch den Einsatz von Beton und Stahl. Das in Beton enthaltene Bindemittel Zement ist verantwortlich für bis zu acht Prozent des jährlichen, globalen CO₂ Ausstoßes [4].

Im Zuge dieser Arbeit soll ermittelt werden, in welchem Zeitraum sich dieses großangelegte Projekt der Wiener Linien und der Stadt Wien aus ökologischer Sicht amortisiert. Um den Amortisationszeitraum herauszufinden, soll das Verhältnis von Klimanutzen und Klimabelastung berechnet werden. Hierfür sind einerseits eine genaue Ermittlung der beim Bau anfallenden CO₂ Emissionen und andererseits die zukünftig vermeidbaren CO₂ Emissionen durch die Verlegung von Verkehrswegen von der Straße auf die Gleise erforderlich. Zusätzlich soll untersucht werden, ob eine Erweiterung des Straßenbahnnetzes eine sinnvolle Alternative wäre.

1.1 Forschungsfragen

Im Zuge dieser Bachelorarbeit werden folgende Forschungsfragen behandelt:
Wieviel CO₂ Emissionen bringt der Ausbau des Wiener U-Bahn-Netzes mit sich?
Innerhalb welches Zeitraumes amortisiert sich der Ausbau aus ökologischer Sicht?

1.2 Vorgehensweise

Um die Forschungsfragen beantworten zu können, wurden zunächst anhand der Anwendungssoftware „U2xU5 in 3D“ der Wiener Linien GmbH mit Hilfe von 3D Renderings die Abmessungen der U-Bahn-Stationen sowie der Tunnelröhren so genau wie möglich ermittelt. In einem zweiten Schritt wurden die größten Faktoren bezüglich Abgas-Emissionen der beim Bau angewendeten Materialien und Verfahren ermittelt und deren emittierten Mengen mit Hilfe einschlägiger Literatur möglichst genau abgeschätzt. Für den Klimanutzen wurden Fahrgastzahl-Prognosen erstellt und der zukünftig vermiedene Kohlendioxidausstoß von neugewonnenen ÖV-Fahrgästen berechnet. Dieser wurde schlussendlich mit den Emissionen der Bauphase ins Verhältnis gesetzt und dadurch der ökologische Amortisationszeitraum des U-Bahn-Projektes ermittelt. Zum Vergleich wurde mit gleicher Vorgehensweise eine Klimabilanz des Alternativprojektes, einer Straßenbahnlinie vom Matzleinsdorfer Platz bis zum Frankhplatz, erstellt.



Abb. 1: Streckenverlauf U2 und U5
Quelle: Wiener Linien GmbH & Co KG

2 Das Projekt

Bereits im Jahr 2000 wurden von der Magistratsabteilung für Stadtentwicklung und Stadtplanung der Stadt Wien (MA18) zusammen mit den Wiener Linien grobe Pläne für eine neue U-Bahn-Linie geschmiedet. Um den bestmöglichen Verlauf der neuen Linie zu finden und deren Nutzung und Auslastung so effizient wie möglich zu realisieren, wurden jahrelang Untersuchungen und Datenauswertungen hinsichtlich Stadtentwicklung, Nutzen, Kosten u.a. gemacht. Am Ende ergaben sich zwei potentielle Lösungen: Entweder die neue U5 als Tangente, halbkreisförmig verlaufend von Hernals im Westen nach Favoriten im Süden der Stadt auszuführen, oder ein Linienkreuz mit der

bestehenden U2 zu bilden. Im Gesamtvergleich beider Varianten entschied man sich schließlich aus verkehrstechnischen Vorteilen für das Linienkreuz U2xU5.

Der Ausbau des Wiener U-Bahn-Netzes erfolgt in zwei Baustufen. Während man mit den Bauarbeiten der ersten Baustufe bereits im Herbst 2018 bei den Stationen Pilgramgasse und Matzleinsdorferplatz begonnen hat, befindet sich die zweite Baustufe zurzeit (Stand Mai 2021) noch in der Planungsphase.

Die erste Baustufe beinhaltet neben dem Neubau der vollautomatischen U5 auch die Verlängerung der bestehenden U2-Linie. Die neue U5 wird die bestehende Trasse der U2 vom Karlsplatz über die Stationen Museumsquartier und Volkstheater bis zur Station Rathaus übernehmen und von dort über einen neuen Abschnitt bis zur zukünftigen Station Frankhplatz weitergeführt.

Die Linie U2 bekommt einen neuen Süd-Ast. Dieser wird im ersten Baulos von der Station Rathaus über die Haltestellen Neubaugasse, Pilgramgasse, Reinprechtsdorfer Straße bis hin zum Matzleinsdorfer Platz reichen [5].

Diese Bachelorarbeit befasst sich aufgrund fehlender Datengrundlage der zweiten Baustufe nur mit diesem ersten Baulos.

3 Tunnelbaumethoden

Beim Bau der Linie U5 und der Erweiterung der Linie U2 kommen je nach geologischen Bodenbeschaffenheiten, baulichen Rahmenbedingungen, Streckenlänge, geplanter Bauzeit, wirtschaftlichen Bedingungen und weiteren Faktoren drei unterschiedliche Tunnelbaumethoden zum Einsatz. [6]



Abb. 2: Tunnelbaumethoden
Quelle: Wiener Linien GmbH & Co KG

3.1 NÖT- neue österreichische Tunnelbau-Methode

Die neue österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) ist eine Bergmännische Tunnelbaumethode und wird vor allem bei wechselnden Bodenbeschaffenheiten und geforderter zeitlicher und bautechnischer Flexibilität angewendet. Die NÖT erfordert eine nötige Eigenstabilität des Untergrunds. Um dies zu gewährleisten, werden vorab Probebohrungen durchgeführt. Bei vorhandenem Grundwasser, werden diese Bereiche mittels Brunnen entwässert und durch Stahldielen verstärkt bevor mit den Grabungen begonnen werden kann. Im Unterschied zur Tunnelbaumethode mit Tunnelbohrmaschine, erfolgt bei der NÖT der Vortrieb durch Bagger, Spreng- oder mittels Teilschnittmaschine. Nach Freilegung neuer Räume, werden diese sofort mit Spritzbeton versiegelt. Als zweite Schicht folgt Bewehrungsbeton. [7]



Abb. 3: Bauarbeiten - NÖT
Quelle: ÖBB

„Der Grundgedanke der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) besteht darin, den Hohlraumrand unter weitgehender Nutzung der Tragfähigkeit des Gebirges mit Hilfe von Spritzbeton und sonstigen Ausbauelementen sowie unter Einsatz messtechnischer Beobachtung auf möglichst wirtschaftliche und sichere Art zu stabilisieren“ [8]

3.2 Tunnelbaumethode mittels Tunnelbohrmaschine (TBM)

Die Tunnelbaumethode mittels Tunnelbohrmaschine (auch Maulwurf genannt) wird häufig eingesetzt, wenn lange, gerade Abschnitte mit gleichmäßigen Bodenbeschaffenheiten zu bewerkstelligen sind. Bei dieser Bauart frisst sich die Tunnelbohrmaschine mit ihrem Bohrkopf, bestückt mit Schälmessern und Schneidrollen in das Bodenmaterial. Das abgebaute Material wird mittels Schneckenförderer auf ein Förderband geladen und gelangt dann schließlich auf einer zentralen Stelle aus dem Tunnel heraus. In Wien wird das der Matzleinsdorfer Platz sein. Durch diesen zentralen Abbau-Schacht am Matzleinsdorfer Platz können die Lärm- und Staubentwicklung in der Stadt sowie viele LKW-Kilometer vermieden werden. Im hinteren Teil der Maschine befinden sich neben den Transporteinrichtungen für das Ausbruchmaterial auch Einrichtungen für den Ausbau von Stütz- und Ausbaumaßnahmen. Moderne TBM können bei reibungslosem Betrieb durchschnittlich bis zu 12 Meter Vortrieb in 24 Stunden zurücklegen. [6]

3.3 Offene Tunnelbauweise

Die offene Tunnelbauweise, auch Deckelbauweise genannt, ist die kostengünstigste Tunnelbaumethode. Sie findet vor allem dort Anwendung, wo es Geologie und innerstädtische Verkehrsverhältnisse zulassen. Weil im innerstädtischen Bereich der Platz aber sehr begrenzt ist wird diese Baumethode fast ausschließlich nur dort verwendet, wo Bahnhöfe oder Notausstiege aus dem Tunnel entstehen sollen. Bei dieser Bauweise wird eine, meist rechteckige, durch Bohrpfahlwände gestützte Baugrube ausgehoben. Zuletzt wird der Graben durch eine Betondecke, der sogenannten Überdeckung, welche allen über dem Tunnel anfallenden Belastungen standhält, verschlossen. [7]

4 Bedenkliche Baumaterialien-und Maschineneinsatz

Der Ausbau des U-Bahn-Netzes soll in erster Linie Wiens Straßen entlasten und dafür sorgen, dass die Stadt bestmöglich mit den diversen öffentlichen Verkehrsmitteln erschlossen ist. Wiens Stadtregierung möchte so viele Menschen wie möglich dazu bewegen, vom eigenen PKW auf öffentliche Verkehrsmittel umsteigen. Der Gedanke dahinter ist nämlich der Umweltschutz. Die Stadt Wien ist bestrebt, diesbezüglich eine Vorzeigestadt zu sein und zukünftig auch zu bleiben. Mit bestmöglichen öffentlichen Anbindungen sollen PKW-Fahrten vermieden werden und die dadurch entstehenden Freiflächen für zusätzliche Stadtbegrünung Platz schaffen.

Leider ist aber die Bauphase eines derartig aufwendigen Tiefbauprojektes alles andere als umweltfreundlich. Die Baustoffe Beton und Stahl, sowie der exorbitante, über Jahre andauernde Einsatz an unzähligen Baumaschinen verpassen dem Projekt aus umwelttechnischer Sicht einen negativen Beigeschmack.

4.1 Beton

Mittlerweile gibt es so gut wie kein Bauprojekt wo Beton nicht zum Einsatz kommt. Der Baustoff bringt neben seinen vielen Vorteilen (wie hohe Belastbarkeit, gute Wärmedämmung, kurze Bauzeiten auch einen entscheidenden Nachteil mit sich. Obwohl Beton sehr häufig als klimafreundlicher, regional produzierbarer und recyclebarer Baustoff betitelt wird, ist er ein echter Klimakiller. Das Gemisch aus Zement, Kies, Sand und Wasser verursacht jährlich mehr als 4% der gesamten, globalen Treibhausgasemissionen. Schuld daran ist das im Beton enthaltene Bindemittel Zement.

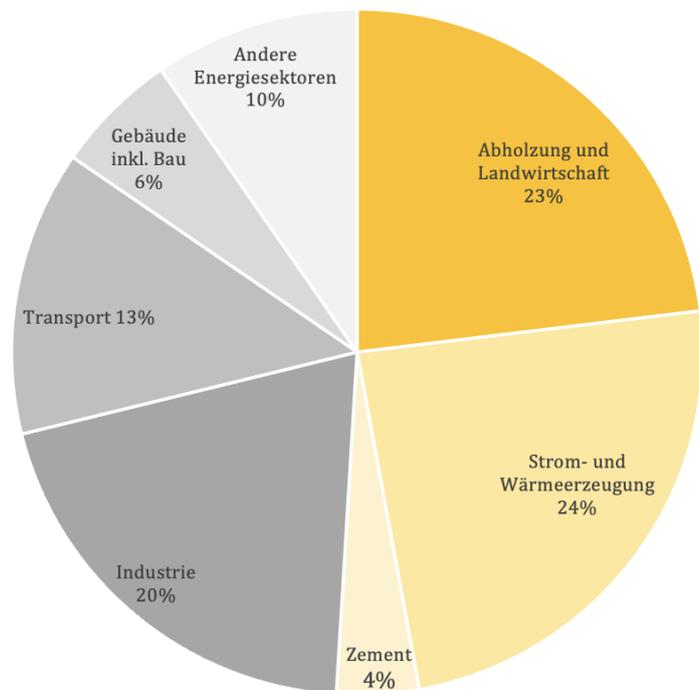


Abb. 4: Globale Treibhausgasemissionen
Quelle: eigene Darstellung

4.1.1 Zement

Die Zementproduktion ist jährlich für ca. 8% des globalen CO₂ Ausstoßes, gemessen nach Wirtschaftssektoren verantwortlich [9]. Das entspricht ungefähr den dreifachen Treibhausgasemissionen des gesamten Luftverkehrs.

4.1.2 Zementproduktion

Die natürlich vorkommenden Rohstoffe Kalkstein und Ton bilden die Basis von Zement. Unter Hinzugabe von eisenoxidhaltigen Stoffen und Quarzsand wird das Gemisch fein vermahlen und in den Drehrohröfen bei ca. 1450°C zu den kugelig geformten Klinkern gebrannt. Anschließend werden die Klinkergranalien zusammen mit Flugasche, Hüttensand, Gips und Kalkstein in Walzen zum fertigen Zement vermischt.

Neben den Abgasen der Abbaumaschinen zur Rohstoffgewinnung spielt aus umwelttechnischer Sicht die Brennung der Zementklinker im Drehrohröfen eine bedeutende Rolle. In der Zementproduktion unterscheidet man zwischen brennstoffbedingten und prozessbedingten Emissionen. Einerseits muss extrem viel Energie aufgebracht werden um die Öfen auf die erforderliche Betriebstemperatur von 1450°C zu bringen, man spricht in dem Kontext von brennstoffbedingten Emissionen. Abhängig vom Einsatz des verwendeten Brennstoffs und den Verbrennungsbedingungen können bei diesem Prozess die Emissionen stark variieren. So ist ein durch grünen Strom beheizter Drehrohröfen im Vergleich zu einem mit Kohle oder Gas betriebenen Ofen um 100 Prozent emissionsärmer. Prozessbedingte Luftemissionen andererseits sind Emissionen, die beim chemischen Prozess, der Entsäuerung des Kalksteins auftreten. Beim sogenannten Prozess der Calcinierung werden in etwa 525 kg CO₂/t freigesetzt. Der Wert von 525kg freigesetztem CO₂ pro Tonne Zement ist weltweit einmalig und wird nur von der österreichischen Zementindustrie erreicht. Gründe dafür sind der stetige Wandel hin zu neuen Technologien und der kontinuierliche Verzicht fossiler Brennstoffe bei der Befuerung der Öfen. Zudem ist es der österreichischen Zementindustrie gelungen, den Klinkeranteil im Zement um 70% zu reduzieren. [10]

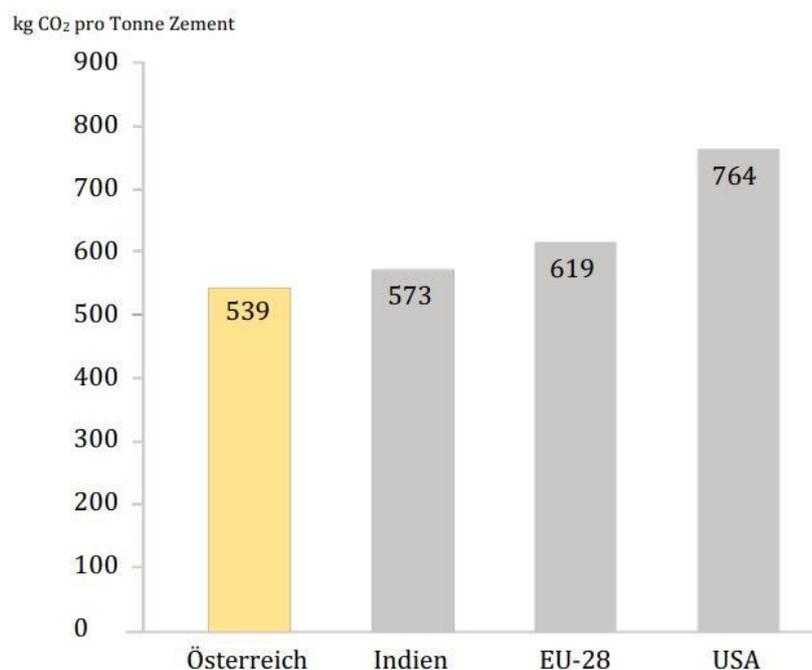


Abb.5: Globale Zementproduktion
Quelle: in Anlehnung an GCCA

4.2 Stahl

Die Stahlindustrie ist für 10% der globalen CO₂ Emissionen verantwortlich. Prozessbedingt ist die Erzeugung von Stahl mit einem sehr hohen Energieverbrauch verbunden. Um die Legierung aus Eisen und Kohlenstoff herzustellen, muss der Hochofen auf eine erforderliche Betriebstemperatur von bis zu 2000° Celsius erhitzt werden. In technologisch fortschrittlichen Ländern ist es möglich, den Stahl unter dem Wert von 2t CO₂ pro Tonne Stahl zu erzeugen. Beispielsweise fallen bei der österreichischen Stahlerzeugung durchschnittlich 1,7t CO₂ pro Tonne Stahl an. Dennoch ist Österreichs Stahlindustrie für 15% der gesamten Emissionen verantwortlich. [11]

4.3 Stahlbeton

Unter Stahlbeton versteht man einen Verbundwerkstoff aus den beiden Komponenten Beton und Stahl. Der Bewehrungsstahl, wie er in dem Zusammenhang genannt wird, wird in die Schalung in Form von profilierten Rundstahl eingebaut und anschließend einbetoniert. Der Stahl verbindet sich durch sein geripptes Profil formschlüssig und durch das enthaltene Bindemittel Zement haftschlüssig mit dem Beton und gibt dem Verbundwerkstoff dadurch die ausreichende Zug- und Druckfestigkeit. Unbewehrter Beton hingegen ist sehr spröde und würde unter relativ geringen Zug- oder Druckbeanspruchungen schlagartig versagen.

4.4 Baumaschinen

Seit Baubeginn im Herbst 2018 bei den Stationen Matzleinsdorferplatz und Pilgramgasse bis zum geplanten Bauende der Linie U5 im Jahr 2026 und der Linie U2 im Jahr 2028 [12] gibt es innerhalb dieser zehn Jahre so gut wie keinen Arbeitstag, wo auf Maschineneinsatz verzichtet wird. Daher ist es unumgänglich, die Abgasemissionen der Baumaschinen in der folgenden Emissions-Abschätzung miteinzubeziehen.

Moderne Baumaschinen werden bedauernswerterweise immer noch mit Dieselmotoren betrieben. So verbrennt ein relativ kleiner, 14 Tonnen schwerer, dieselbetriebener Bagger an einem Arbeitstag durchschnittlich 120 Liter Treibstoff [13]. Aufgerechnet auf 249 Arbeitstage im Jahr ergibt das einen Wert von 29.880 Liter. Die Verbrennung von 29.880 Liter Diesel hat einen CO₂ Ausstoß von fast 80 Tonnen zur Folge.

5 Ressourcenberechnung

5.1 Vorgehensweise

Um die Ressourcen-Berechnungen so genau wie möglich zu gestalten, wurden alle betreffenden U-Bahn-Stationen mit Hilfe einer 3D Applikation der Wiener Linien „U2xU5 in 3D“ abfotografiert und anschließend anhand des Computerprogramms „ImageXDistance“ vermessen. Die Abmessungen der Tunnelröhren wurden mit detailreichen Querschnittszeichnungen und der Software „Google Earth“ bestimmt. Die dadurch gewonnenen Maße waren die Grundlage für die folgenden Ressourcen- und Emissionsberechnungen.

5.2 Mengenermittlung des Ausbruchmaterials

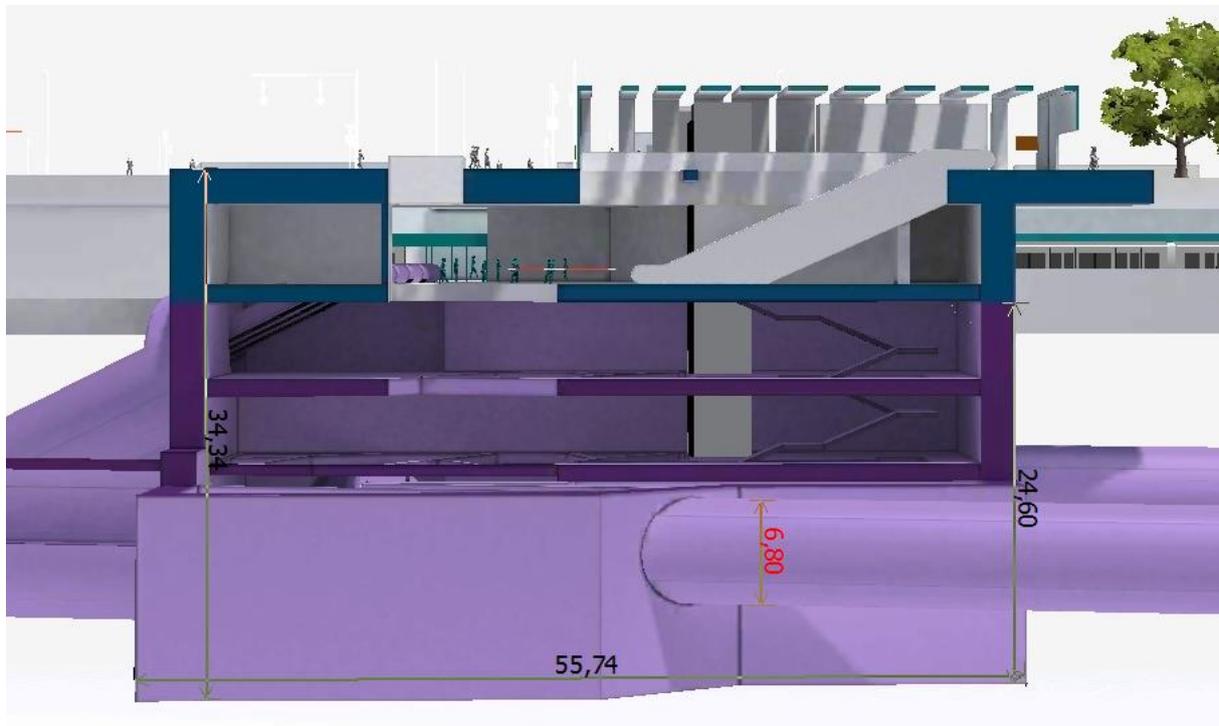


Abb. 6: Rendering aus der Anwendungssoftware „U2xU5 in 3D“
Quelle: Wiener Linien & Co KG

Die Ermittlung des Ausbruchmaterials dient als Grundlage der in Kapitel 6.2 und 6.4 folgenden Abgasberechnungen, welche durch den Abbau und Abtransport des Erdreiches verursacht werden.

Bei der Mengenermittlung des abzubauenen Materials wurde angenommen, dass das Abbaumaterial Erdreich mit einer mittleren Dichte von $\rho = 1,5 \text{ t/m}^3$ ist[14]. Der Ermittlung des Aushubmaterials, der Baugruben für Stationen und Trassen, liegt eine einfache Volumens-Berechnung zugrunde.

Mit den vorab ermittelten Abmessungen der Geometrien wurden das Volumen und das Gewicht des anfallenden Ausbruchmaterials bestimmt.

Berechnungsformel für Volumens-Berechnung von rechteckigen Objekten (Stationen):

$$V = L * B * H \quad (1)$$

Berechnungsformel für Volumens-Berechnung von runden Objekten (Tunnelröhren):

$$V = \left(\frac{d^2 * \pi}{4} \right) * L \quad (2)$$

Berechnungsformel für die Gewichts-Berechnung:

$$m = V * \rho \quad (3)$$

| Berechnung des Aushubmaterials U2xU5 | | |
|---|---------------------------|-----------------------|
| Station | Volumen [m ³] | mittleres Gewicht [t] |
| Frankhplatz | 157 171 | 235 757 |
| Rathaus | 182 020 | 273 030 |
| Neubaugasse | 113 054 | 169 581 |
| Pilgramgasse | 178 081 | 267 122 |
| Reinprechtsdorfer Str. | 121 168 | 181 753 |
| Matzleinsdorfer Pl. | 228 086 | 342 129 |
| 2769 m NÖT | 103 541 | 155 311 |
| 4164 m TVM | 133 956 | 200 933 |
| Summe | 1 217 077 | 1 825 616 |

Tab. 1: Menge des Aushubmaterials U2xU5
Quelle: eigene Darstellung

5.3 Ermittlung des Stahlbetonbedarfs

5.3.1 Berechnungs-Annahmen

Bei der Stahlbeton-Mengenberechnung der U-Bahn-Stationen wurde eine, für Tiefbau-Projekte im innerstädtischen Gebiet realistische, einheitliche mittlere Wandstärke von 50cm angenommen. Ebenso wurde für die gesamte Stahlbeton-Mengenberechnung mit einer Werkstoff-Zusammensetzung von 8 Volumenprozent Stahl und 92 Volumenprozent Beton gerechnet (Eigene Abschätzung und Gespräche mit Baustellenarbeitern vom Projekt U2xU5).

5.3.2 Stahlbetonbedarf Tunnel mittels TVM gebaut

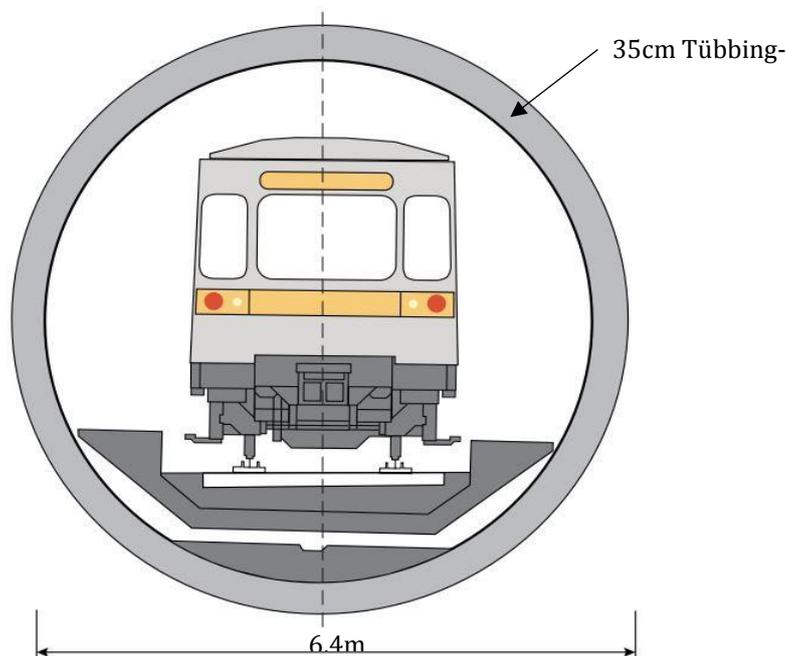


Abb. 7: Regelquerschnitt Tunnelvortriebsmaschine
Quelle: In Anlehnung an Wiener U-Bahn Tagung

Tunnelröhren, gebaut mittels Tunnelvortriebsmaschinen, kurz TVM, werden um der Konstruktion die nötige Stabilität zu geben, mit vorgefertigten Stahlbeton-Segmenten ausgekleidet. Die vorgefertigten, 35cm starken Stahlbeton-Segmente, in der Fachsprache auch Tübbings genannt, werden von der Tunnelvortriebsmaschine vollautomatisch verbaut. Die Fläche bestehend aus Unterboden und Tübbing-Ring ergibt einen Wert von $8,847\text{m}^2$.

Für einen Kilometer Tunnel mittels TVM bedarf es somit 8847m^3 Stahlbeton:

$$V = A * L = 8,847\text{m}^2 * 1000\text{m} = 8847\text{m}^3 \quad (4)$$

5.3.3 Stahlbetonbedarf Tunnel NÖT

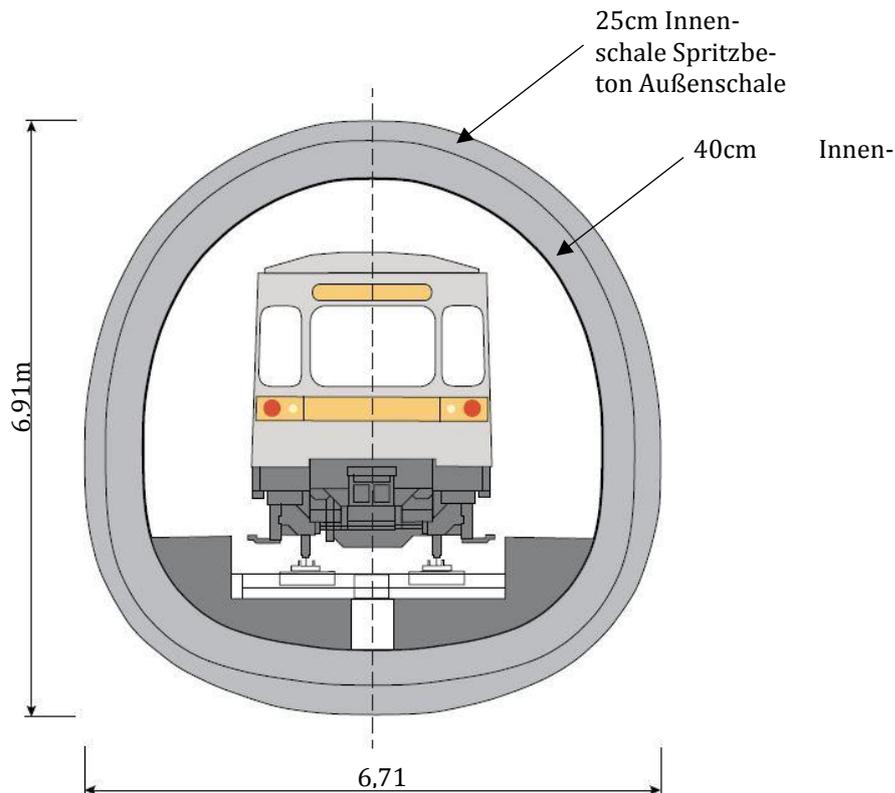


Abb. 8: Regelquerschnitt NÖT
Quelle: In Anlehnung an Wiener U-Bahn Tagung

Mit einer ellipsenförmigen Querschnittsfläche von $14,705\text{m}^2$ erfordern die Tunnelröhren der NÖT fast doppelt so viel Beton als ein durch Vortriebsmaschine gebauter Tunnel.

Um das Gesamtvolumen und somit auch die Gesamtmenge an Stahlbeton zu errechnen wird die Gesamtfläche, bestehend aus einer 25cm starken Spritzbeton Außenschale, einer 40cm starken, bewehrten Innenschale und einem der Zeichnung entnommenen, maßstabgetreuen Unterbau mit der Gesamtlänge der einzelnen NÖT-Abschnitte multipliziert.

Für einen Kilometer NÖT-Tunnel bedarf es somit 14075 m^3 Stahlbeton:

$$V = A * L = 14,705\text{m}^2 * 1000\text{m} = 14075\text{m}^3 \quad (5)$$

| Stahlbetonbedarf Tunnelröhren U2xU5 | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Tunnelbaumethode | Stahlbetonmenge [m^3] | CO ₂ Emissionen [t] |
| NÖT | 44 115 | 53 207 |
| TVM | 35 388 | 42 681 |
| Summe | 79 503 | 95 889 |

Tab. 2: Menge Stahlbeton und Emissionen der Tunnelröhren
Quelle: eigene Darstellung

5.3.4 Stahlbetonbedarf U-Bahn-Stationen

Um den Stahlbeton-Bedarf der drei neu zu bauenden U-Bahn-Stationen Frankhplatz, Matzleinsdorfer Platz und Reinprechtsdorfer Straße, und der auszubauenden Stationen Pilgramgasse, Rathaus und Neubaugasse bestimmen zu können, mussten vorab 2D-Ableitungen aus den 3D-Modellen erstellt und anschließend bemessen werden.

Bei der Stahlbeton-Mengenermittlung der U-Bahn-Stationen wurden neben den eigentlichen, auf den Plänen ersichtlichen Konstruktionen, auch die in der Bauphase zur Baugrubensicherung notwendigen Bohrpfehlwände in die Berechnung inkludiert. Die Bohrpfehlwände wurden mit einem einheitlichen Durchmesser von 70cm einberechnet.

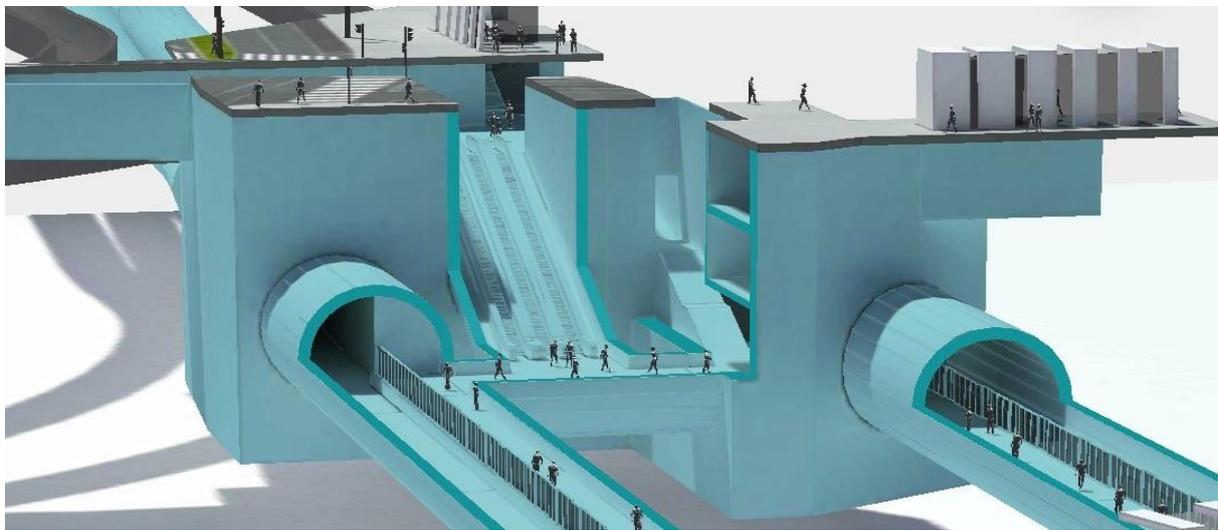


Abb.9: Rendering aus „U2xU5 in 3D“
Quelle: Wiener Linien & Co KG

| Stahlbetonbedarf Stationen U2xU5 | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Station | Stahlbetonmenge [m ³] | CO ₂ Emission [t] |
| Neubaugasse | 24 917 | 30 053 |
| Rathaus | 31 349 | 37 810 |
| Pilgramgasse | 26 155 | 31 545 |
| Reinprechtsdorfer Straße | 23 141 | 27 911 |
| Matzleinsdorfer Platz | 29 548 | 35 638 |
| Frankhplatz | 24 480 | 29 525 |
| Summe | 159 590 | 192 481 |

Tab. 3: Menge Stahlbeton und Emissionen der Stationen
Quelle: eigene Darstellung

6 Emissionsberechnung

6.1 Vorgehensweise

Um eine CO₂-Emissions-Abschätzung des Projektes vornehmen zu können, mussten vorab die beim Bau eingesetzten Mittel- und Ressourcen ermittelt und deren CO₂ Ausstoß pro Verbauungseinheit identifiziert werden.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Konstruktionen aus Beton und Stahl gelegt. Beide Baumaterialien sind beim Bau von U-Bahn-Projekten unumgänglich.

Der zweite große Punkt war eine realistische Abschätzung der Abgasemissionen, welche durch unzählige LKW-Kilometer und jahrelangen Baumaschinen-Einsatz während der Bauphase, zu machen.

6.2 Abgas-Emissionen verursacht durch Abtransport des Aushubmaterials

Das mittels Tunnelvortriebsmaschine TVM abgebaute Erdreich gelangt zur Gänze am Matzleinsdorfer Platz aus dem Tunnelsystem heraus und wird von dort mit LKWs weiter aus der Stadt raus transportiert. (Stand 01.07.2021 war noch unklar wohin das Abbruchmaterial gebracht wird.) Das Abbauschacht am Matzleinsdorfer Platz soll den innerstädtischen Verkehr während der Bauphase entlasten und 20.000 LKW Fahrten durch die Stadt vermeiden (20.000 LKW Fahrten entsprechen 75t CO₂). [6]

Der Rest des abgebauten Erdreichs muss mit LKWs von den jeweiligen innerstädtischen Baustellen abtransportiert werden. Das entspricht einem Volumen von 1.091.760 m³, 66.167 mittleren LKW Ladungen und einem einhergehenden CO₂ Ausstoß von 1.323 Tonnen.

| CO ₂ Emissionen durch Abtransport des Aushubmaterials | | | | | | |
|--|------------|-------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| LKW Ladungen | Hinfahrten | Rückfahrten | LKW Fahrten gesamt | Entfernung [km] | Tonnenkilometer Leerfahrt [t km] | Tonnenkilometer mit Ladung [t km] |
| 66 167 | 66 167 | 66 167 | 132 334 | 10 | 9 263 412 | 23 820 203 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [kg] | 741 073 | 1 905 616 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [t] | 741 | 1 906 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] | 2 647 | |

Tab. 4: Emissionen durch Abtransport des Aushubmaterials
Quelle: eigene Darstellung

6.3 Abgas-Emissionen verursacht durch Fahrmischer

Bis auf die fertigen Tübbings, welche durch die Tunnelvortriebsmaschine verbaut werden, gelangt der ganze restliche Beton als Transportbeton mittels Fahrmischern zu den Baustellen. Um die notwendigen Fahrmischer-Ladungen zu ermitteln, wurde die gesamt anfallende Menge an Beton durch die durchschnittliche Ladekapazität von $8,7\text{m}^3$ moderner Fahrmischern dividiert. Um den Beton zu den Baustellen zu bringen, sind 26.903 Fahrmischer-Ladungen notwendig.

| CO ₂ Emissionen durch Fahrmischer | | | | | | |
|--|-------------|--------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| LKW Ladungen | Hin-fahrten | Rück-fahrten | LKW Fahrten gesamt | Entfernung [km] | Tonnenkilometer Leerfahrt [t km] | Tonnenkilometer mit Ladung [t km] |
| 26 903 | 26 903 | 26 903 | 53 806 | 10 | 3 766 420 | 9 685 080 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [kg] | 301 314 | 774 806 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [t] | 301 | 775 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] | 1 076 | |

Tab. 5: Emissionen durch Fahrmischer
Quelle: eigene Darstellung

6.4 Abgas-Emissionen verursacht durch Baumaschinen

Die Anzahl und Einsatzdauer der verschiedenen Baumaschinen ist wegen der Unterschiedlichkeit der Baustellen ein sehr schwer zu bestimmender Faktor. Deshalb wurde in der folgenden Berechnung folgendem Gedankengang nachgegangen: Die Emissionen der Baumaschinen, welche für den Aushub der Tunnel und Stationen sorgen, wurden den Emissionen der Erdreich-Abtransport-LKWs gleichgesetzt. Der Schadstoff-Ausstoß der restlichen Baumaschinen wurde mit einem Zuschlag von 20% berücksichtigt.

| CO ₂ Emissionen durch Baumaschinen U-Bahn | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|
| Erdreich [m ³] | CO ₂ Ausstoß [kg] | CO ₂ Ausstoß [t] |
| 1 083 122 | 2 625 749 | 2 626 |

Tab. 6: Emissionen durch Baumaschinen
Quelle: eigene Darstellung

6.4.1 CO₂ Ermittlung für ein Kubikmeter Stahlbeton Österreich

Die Anteilsmäßige Zusammensetzung von Stahl und Beton im sogenannten Stahlbeton ist sehr stark von den äußeren, auf die Konstruktion wirkenden Belastungen abhängig. Anhand baustatischer Berechnungen kann man den Anteil an Bewehrungsstahl im Stahlbeton für jede Anwendung genau ermitteln. Bei der folgenden Berechnung wurde ein Mischungsverhältnis von 92Vol.-% Beton und 8Vol.-% Stahl angenommen.

Zusammensetzung und Emissionen eines Kubikmeters Stahlbeton:
Berechnungsannahmen:

- 1t Stahl emittiert 1700kg CO₂ [15]
- 1t in Österreich produzierter Zement emittiert 525kg CO₂
- Dichte Betonstahl 7850kg/m³ [16]
- Dichte Zement 3000kg/m³ [17]
- 1m³ WU-Beton (wasserundurchlässiger Beton) enthält mindestens 280kg Zement. [18]

1m³ Stahlbeton setzt sich aus 0,92m³ Beton und 0,08m³ Stahl zusammen:

92Vol.-% Beton → 0,92m³ Beton

In 0,92m³ wasserundurchlässigem Beton sind 257,6kg Zement enthalten:

$$\frac{1\text{m}^3}{280\text{kg}} = \frac{0,92\text{m}^3}{x} \rightarrow x = \frac{280\text{kg} * 0,92\text{m}^3}{1\text{m}^3} = 257,6\text{kg} \quad (6)$$

8Vol.-% Stahl → 0,08m³ Stahl

0,08m³ Stahl wiegt 628kg:

$$\frac{1\text{m}^3}{7850\text{kg}} = \frac{0,08\text{m}^3}{x} \rightarrow x = \frac{7850\text{kg} * 0,08\text{m}^3}{1\text{m}^3} = 628\text{kg} \quad (7)$$

1t Stahl hat ein Volumen von: 0,127m³

1t Zement hat ein Volumen von: 0,333m³

1m³ Stahlbeton enthält somit 257,6kg Zement und 628kg Stahl.

Ein Kilogramm Stahl emittiert:

$$\frac{1700\text{kg CO}_2}{1\text{t Stahl}} = \frac{1,7\text{kg CO}_2}{1\text{kg Stahl}} \quad (8)$$

Ein Kilogramm Zement emittiert:

$$\frac{525\text{kg CO}_2}{1\text{t Zement}} = \frac{0,525\text{kg CO}_2}{1\text{kg Zement}} \quad (9)$$

Ein Kubikmeter Stahlbeton emittiert folglich 1202,8kg Kohlenstoffdioxid CO₂:

$$257,6\text{kg Zement} * 0,525\text{kg CO}_2 = 135,24\text{kg CO}_2 \quad (10)$$

$$628\text{kg Stahl} * 1,7\text{kg CO}_2 = 1067,6\text{kg CO}_2 \quad (11)$$

$$135,24\text{kg CO}_2 + 1067,6\text{kg CO}_2 = 1202,8\text{kg CO}_2 \quad (12)$$

| Anfallende CO₂ Emissionen bei der Erweiterung des U-Bahn-Netzes | |
|---|---------|
| CO ₂ Emissionen zufolge Abtransport Material [t] | 2 626 |
| CO ₂ Emissionen zufolge Fahrmischer [t] | 1 076 |
| CO ₂ Emissionen zufolge Baumaschinen [t] | 2 626 |
| 20% Zuschlag auf Maschinen [t] | 1 266 |
| CO ₂ Emissionen zufolge Stahlbeton [t] | 285 288 |
| 5% Zuschlag auf Stahlbeton [t]* | 14 264 |
| CO ₂ Emissionen zufolge Schienen [t] | 3 716 |
| pauschaler Zuschlag auf Bauarbeiten [t]** | 15 395 |
| Summe [t] | 326 256 |

Tab. 7: gesamte Emissionen U2xU5

Quelle: eigene Darstellung

- * Der fünfprozentige Zuschlag auf Stahlbeton bezieht sich auf Hilfskonstruktionen und andere Baumaßnahmen, deren Notwendigkeiten gewöhnlich erst während der Bauphase ersichtlich werden.
- ** Der Zuschlag auf Bauarbeiten ergibt sich aus den Aufwendungen für Baustelleneinrichtungen, An- und Abtransport von Arbeitskräften und Arbeitsgeräten, Energie, provisorischer Straßenführung, Wasserhaltung und den Abbruch und Neubau von Leitungen.

6.4.2 Interpretation der Ergebnisse aus Tabelle 7

In Tabelle 7 kann man erkennen, dass der größte Teil der Emissionen durch den Einsatz von Stahlbeton verursacht wird. Genau genommen ist Stahlbeton für über 90% der gesamten Emissionen der Bauphase verantwortlich. Aus dem Gesamtergebnis lässt sich ableiten, dass ein durchschnittlicher, neugebauter Kilometer U-Bahn-Linie samt teilweise schon bestehenden Notausstiegen und U-Bahn-Stationen einen Emissionsausstoß von 31.986 Tonnen CO₂ verursacht.

Vergleicht man die Ergebnisse aus Tabelle 7 mit der Studie: „Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen“ [19] vom Jahr 2020 ist zu erkennen, dass in der genannten Studie der Bau eines durchschnittlichen Kilometers U-Bahn-Linie Emissionen von 99.000 Tonnen CO₂ zur Folge hat. Das entspricht mehr als das Dreifache des in Tabelle 7 errechneten Gesamtergebnisses. Grund dafür ist zum einen, dass in der Berliner Studie mit Emissionen von 1,837 Tonnen CO₂ pro Kubikmeter Stahlbeton gerechnet wurde. Zur Erinnerung: ein in Österreich produzierter Kubikmeter Stahlbeton emittiert 1,203 Tonnen CO₂. Das entspricht einem prozentuellen Unterschied von 53 Prozent. Zum anderen wurde bei der Emissionsberechnung dieser Bachelorarbeit, um das Ergebnis nicht zu verfälschen und nachvollziehbarer zu gestalten, auf pauschale Emissions-Abschätzungen kleinerer Bau-Tätigkeiten verzichtet und nur die größten Faktoren (in Tab. 7 aufgelistet) bezüglich Umweltbelastung untersucht. In der Berliner Studie wurde neben den großen Emissionsfaktoren wie Beton, Stahl, Transport und Baggerarbeiten auch auf kleinere Emissions-Herde eingegangen, welche schlussendlich aber über 10% des Gesamtergebnisses ausmachten. Zudem muss beim Vergleich beider Gesamtergebnisse berücksichtigt werden, dass in der Berliner Studie von einem Neubau ohne jeglichen bestehenden Infrastrukturen ausgegangen wurde.

6.4.3 Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse

Aufgrund guter Datengrundlage durch die Anwendungssoftware „U2xU5 in 3D“ und der anschließend genauen Bemessung der Tunnels und U-Bahn-Stationen kann man behaupten, dass das Ergebnis der Volumens-Berechnung zur Ermittlung der Stahlbetonmenge möglichst genau ist. Laut eigenen Einschätzungen kann nur ein Mehrverbrauch an Stahlbeton und somit ein Anstieg der CO₂ Emissionen realistisch sein. Ein Mehrverbrauch an Stahlbeton wird vor allem durch Hilfskonstruktionen, welche im Laufe der Bauarbeiten errichtet werden, vermutet. In Abbildung 10 wurde der CO₂ Ausstoß aufgrund von Stahlbeton grafisch dargestellt. Sollte es zu einem Mehrverbrauch an Stahlbeton kommen, wird davon ausgegangen, dass sich die Emissionen im unteren Bereich des in hellrot gekennzeichneten Abschnittes (Bereich in dem das Ergebnis bei einem Mehrverbrauch von Stahlbeton erwartet wird) befinden werden. Laut eigenen Einschätzungen dürfte dieser Bereich nicht größer als maximal 25 Prozent des ursprünglich berechneten Wertes sein.

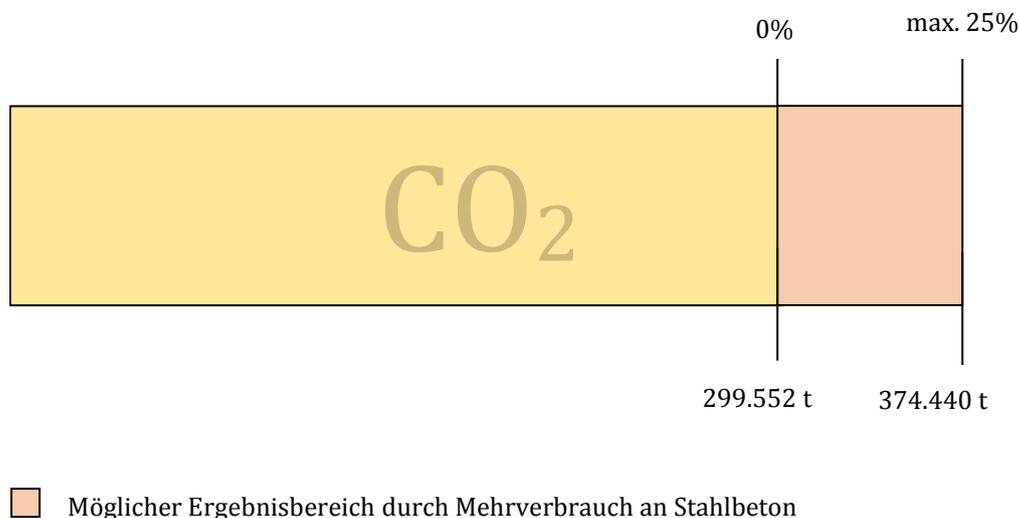


Abb.10: CO₂ Emissionen durch Stahlbeton
Quelle: eigene Darstellung

7 Straßenbahntrasse als Alternative

Es gibt zwei verschiedene Bauformen für Straßenbahn-Trassen. Zum einen gibt es Fahrbahnen mit Schotter-oder Rasen Oberbau und zum anderen Fahrbahnen mit festem, betonierten Oberbau. Fahrbahnen mit Schotter-oder Rasen Oberbau finden vor allem dort Anwendung wo unbebaute Freiflächen zur Verfügung stehen, welche ausschließlich für die Straßenbahn genutzt werden.

Würde als Alternative zum Linienkreuz U2xU5 eine Straßenbahntrasse realisiert werden, würde diese allerdings durch dicht bebautes Stadtgebiet führen. Deshalb müsste wegen fehlender Freiflächen, die Trasse flächenbündig mit festem Oberbau in das schon bestehende Straßennetz integriert und daher auch für den Straßenverkehr befahrbar realisiert werden. Dafür müsste zunächst die Straße über die gesamte Länge der Trasse geöffnet werden. Um beide Fahrspuren auf möglichst platzsparender Weise im bestehenden Straßennetz unterzubringen, ist eine minimale Öffnung der Straße mit einer Breite von 5,70m und eine Tiefe von ca. 0,5m erforderlich (eigene Vermessung am Dr. Karl Renner Ring am 07.05.2021). Anschließend müsste in die Straßenöffnung eine unbewehrte Sauberkeitsschicht betoniert werden, auf welcher dann die Gleise aufgestellt und anschließend mit unbewehrten Beton unterfangen werden. Um die Gleise endgültig zu fixieren und gegen Verschiebung zu sichern werden sie mit vorgefertigten Stahlbetonsegmenten, wie in den folgenden Bildern ersichtlich, eingefasst.



Abb. 11: Straßenbahn - Gleisarbeiten in Wien
Quelle: eigene Darstellung

| Anfallende CO ₂ Emissionen beim Straßenbahntrassen-Bau vom Matzleinsdorfer Platz bis zum Frankhplatz | | | | |
|---|-------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Dimen- sion | Einheit [m] | Abzutragendes Material [m ³] | Unbewehrter Beton [m ³] | Bewehrter Beton [m ³] |
| Länge | 4 655,0 | 13 266,8 | 9 552,1 | 3 714,7 |
| Breite | 5,7 | | | |
| Tiefe | 0,5 | | | |
| CO ₂ Emissionen zufolge Abtransport Material [t] | | 32,2 | | |
| CO ₂ Emissionen zufolge Fahrmischer [t] | | 61,0 | | |
| CO ₂ Emissionen zufolge Baumaschinen [t] | | 38,6 | | |
| CO ₂ Emissionen zufolge Betoneinsatz [t] | | 5 963,1 | | |
| CO ₂ Emissionen zufolge Schienen [t] | | 3 489,5 | | |
| 10% Zuschlag auf gesamte Bauphase [t] | | 958,4 | | |
| Summe [t] | | 10 542,8 | | |

Tab. 8: Emissionen beim Straßenbahnbau
Quelle: eigene Darstellung

8 Amortisationszeitraum des U-Bahn- und Straßenbahn-Projektes

In folgenden zwei Tabellen wurde der Amortisationszeitraum, sprich jene Zeit in der sich der Ausbau des U-Bahn-Netzes bzw. Neubau der Straßenbahntrasse aus ökologischer Sicht lohnt, berechnet. Der Amortisationszeitraum ist das Verhältnis von klimanegativen zu klimapositiven Effekten der beiden Bauvorhaben. Als klimanegativ flossen alle vorherig-berechneten CO₂ Emissionen wie CO₂ Emissionen durch Baumaschinen, CO₂ Emissionen durch Stahlbeton, CO₂ Emissionen durch Stahl, CO₂ Emissionen durch Fahrmischer, welche in der Bauphase entstanden sind, in die Berechnung ein. Zu den klimapositiven Effekten zählen all jene Auswirkungen, die zur Verbesserung des Klimas beitragen. Für den Klimanutzen wurden Fahrgastzahlen vom Jahr 2019 ausgewertet und daraus zukünftig mögliche Fahrgastzahlprognosen für die zwei Projekte U2xU5 und der Alternative einer Straßenbahntrasse davon abgeleitet. Zudem wurde angenommen, dass 20% der zusätzlichen ÖV-Nutzer Umsteiger vom PKW sind. Daraus wurde der täglich vermiedene CO₂ Ausstoß, welcher durch den Verzicht auf den eigenen PKW verhindert werden kann, ermittelt.

Schlussendlich wurde das Verhältnis von klimanegativen zu klimapositiven Effekten berechnet und festgestellt, dass beim Bau des U-Bahn-Projektes U2xU5 eine Zeitspanne von 37,9 Jahren und beim Bau der Straßenbahntrasse 4,3 Jahre vergehen, bis sich die Emissionen der beiden Bauvorhaben amortisiert haben und ein positiver Klimaeffekt ersichtlich wird.

Für die Berechnung der beiden Amortisationszeiträume gelten folgende Grundlagen und Annahmen:

- Jährliche Fahrgastzahl der Wiener U-Bahn im Jahr 2019: 495,8 Mio. [20]
- Jährliche Fahrgastzahl der Wiener Straßenbahn im Jahr 2019: 304,8 Mio. [20]
- 170.000 derzeitige tägliche Fahrgäste der U2 [21]
- 120.000 Fahrgäste nutzen die U5 pro Tag [22]
- 120.000 zusätzliche tägliche Fahrgäste durch U2xU5
- 8,83% zusätzliche jährliche Fahrgäste des U-Bahn Projektes
- Linienlänge des Straßenbahnnetzes: 225,4km [20]
- 1.352.262,6 Straßenbahn-Fahrgäste pro Linienkilometer im Jahr 2019
- 12.576.042,5 zusätzliche jährliche Straßenbahn-Fahrgäste
- 4,127% zusätzliche jährliche Straßenbahn-Fahrgäste
- Durchschnittliche Fahrdistanz der Wiener Autolenker beträgt 9 Kilometer [23]
- Durchschnittlicher Besetzungsgrad pro PKW beträgt 1,3 Personen [24]
- Fahrleistung von PKW: Werktage 100%, Samstage 90%, Sonn- und Feiertage 70% [19]

| Jahre bis zur Amortisation beim Bau des U-Bahn-Projektes U2xU5 | | | | | | | |
|--|---|--|--|---------------------------------------|---|--|------------------------|
| Jährliche Fahrgastzahl 2019 [Mio.] | U2xU5: zusätzliche jährliche Fahrgäste [Mio.] | U2xU5: zusätzliche tägliche Fahrgäste [Tsd.] | 20% davon Umsteiger vom PKW pro Tag [Tsd.] | täglich vermiedene Autofahrten [Tsd.] | täglich Vermiedenes CO ₂ der PKW [t] | jährlich Vermiedenes CO ₂ der PKW [t] | Jahre zur Amortisation |
| 495,8 | 43,8 | 120,0 | 24,0 | 18,4 | 26,1 | 8618,9 | 37,9 |

Tab. 9: Amortisationszeitraum U2xU5

Quelle: eigene Darstellung

| Jahre bis zur Amortisation beim Bau einer Straßenbahntrasse | | | | | | | |
|---|---|--|--|---------------------------------------|---|--|------------------------|
| Jährliche Fahrgastzahl 2019 [Mio.] | Straßenbahn: zusätzliche jährliche Fahrgäste [Mio.] | Straßenbahn: zusätzliche tägliche Fahrgäste [Tsd.] | 20% davon Umsteiger vom PKW pro Tag [Tsd.] | täglich vermiedene Autofahrten [Tsd.] | täglich Vermiedenes CO ₂ der PKW [t] | jährlich Vermiedenes CO ₂ der PKW [t] | Jahre zur Amortisation |
| 304,8 | 12,6 | 34,5 | 6,9 | 5,3 | 7,5 | 2479,4 | 4,3 |

Tab. 10: Amortisationszeitraum Straßenbahntrasse

Quelle: eigene Darstellung

9 Gegenüberstellung von U-Bahn-Projekt und Straßenbahn-Projekt

| Gegenüberstellung von U-Bahn-Projekt und Straßenbahntrasse | | | | |
|--|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| | Länge [km] | Betonmenge [m ³] | CO ₂ Emissionen [t] | Amortisationszeitraum [Jahre] |
| U-Bahn-Projekt | 10,2 | 237147 | 326256 | 37,9 |
| Straßenbahntrasse | 9,3 | 13267 | 10064 | 4,3 |

Tab. 11: Gegenüberstellung U-Bahn und Straßenbahn
Quelle: eigene Darstellung

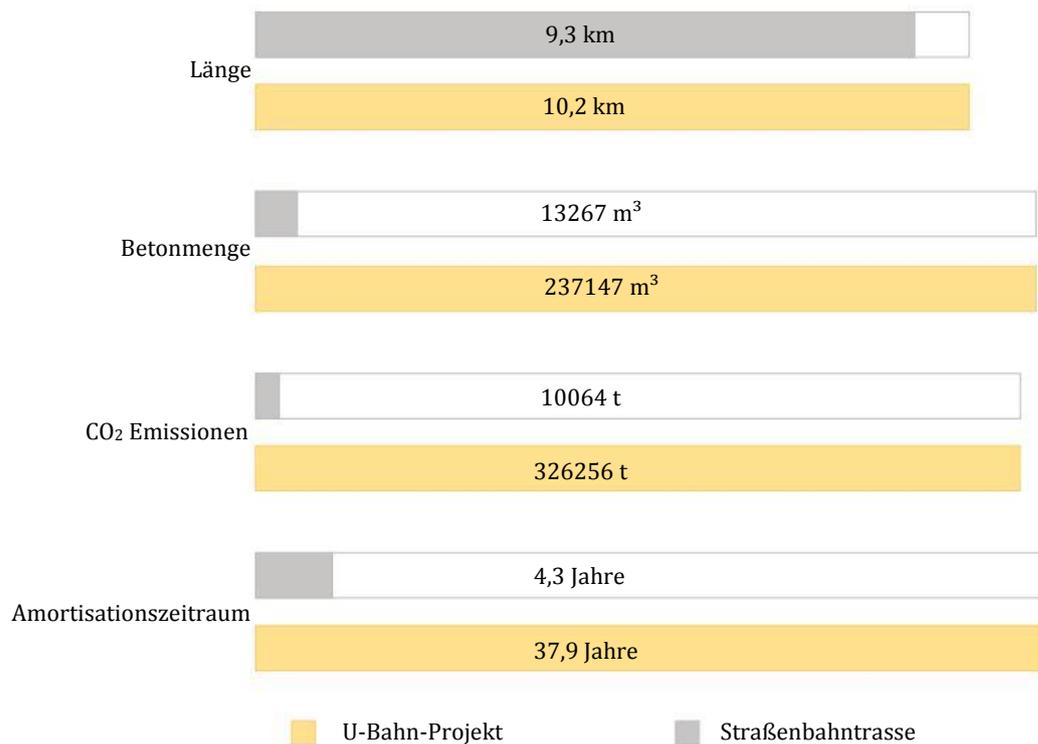


Abb.12: Gegenüberstellung U-Bahn und Straßenbahn
Quelle: eigene Darstellung

10 Fazit

Vergleicht man die Endergebnisse der Emissions- Abschätzungen vom U-Bahnprojekt U2xU5 und vom Straßenbahnprojekt fällt sofort auf, dass das Straßenbahnprojekt hinsichtlich der Umweltverträglichkeit als klarer Sieger hervorgeht.

Obwohl die Gesamtlängen beider Projekte nicht viel voneinander abweichen, sind die Unterschiede der Material-und Ressourcenaufwendungen und folglich auch der ökologische Schaden der Bauphase enorm. Zum Vergleich: Ein U-Bahn-Kilometer samt Notausstiegen und Stationen emittiert durchschnittlich ca. 31.986 Tonnen des Treibhausgases CO₂. Im Gegensatz dazu emittiert ein Straßenbahnkilometer samt Haltestellen durchschnittlich ca. 1.082 Tonnen Kohlenstoffdioxid - was nahezu 30 Mal weniger entspricht. Der Hauptgrund dafür ist, dass der Bau von einem Kilometer U-Bahn Trasse die 17,8-fache Menge an Stahlbeton bedarf, als die Straßenbahnalternative.

Betrachtet man die einzelnen Emissionsherde des U-Bahn-Projektes, kann man sehen, dass über 90% davon durch den Einsatz von Stahlbeton entstehen. Obwohl in Österreich der klimafreundlichste Beton weltweit produziert wird, stellt dieser im Tiefbau unersetzbarer Baustoff, eine große Umweltbelastung dar und rückt somit – auch zukünftig umweltschonende Bauvorhaben in ein schlechtes Licht.

Dieser Bachelorarbeit ist zu entnehmen, dass der Bau des Linienkreuzes U2xU5 einen großen Eingriff in die Natur bedeutet und sich aus ökologischer Sicht nach obigen Berechnungen erst nach 37,9 Jahren auszahlen wird. Demgegenüber amortisieren sich die Emissionen des Alternativprojektes laut Berechnungen schon nach 4,3 Jahren. Klarerweise sind die errechneten Ergebnisse teilweise durch Abschätzungen entstanden und können abhängig von verschiedenen Faktoren während der gesamten Bauphase variieren. Weil in diesen Emissions-Berechnungen nur die größten Umweltfaktoren berücksichtigt wurden, ist davon auszugehen, dass die real auftretenden CO₂ Emissionen nur höhere Werte als die berechneten annehmen können.

Stellt man einen Vergleich zur Studie: „Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen“ her, kann man große Abweichungen der Ergebnisse erkennen. Um ein Beispiel zu nennen: Ein neugebauter U-Bahn-Kilometer emittiert laut Berliner Studie fast drei Mal mehr Kohlenstoffdioxid als in obigen Berechnungen erzielt wurde. Grund dafür sind große Abweichungen beim Materialeinsatz, vor allem durch den in Österreich produzierten Stahlbeton. Ausgehend von den Emissionsabweichungen sind auch große Unterschiede der Amortisationszeiträume zu erkennen.

Jedoch darf man nicht nur die Bauphase betrachten, sondern man muss sich die ganzheitliche Wiener Stadtentwicklung vor Augen halten. Durch das Linienkreuz U2xU5 werden wichtige – bisher durch den ÖV weniger gut angebundene Stadtteile miteinander verbunden. Dies macht es möglich noch mehr Menschen für den öffentlichen Verkehr zu begeistern. Die dadurch entstehende Verlagerung von Autos auf öffentliche Verkehrsmittel bedeutet mehr Platz für Grünflächen auf der Oberfläche. Abschließend lässt sich also zusammenfassen, dass der Ausbau des Wiener U-Bahnnetzes hinsichtlich steigender Einwohnerzahlen, sich trotz anfänglich hohen Emissionen in ferner Zukunft aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht lohnen wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Haase J.: Erwärmt sich die Erde wirklich?. Greenpeace, Hamburg. URL: <https://www.greenpeace.de/themen/klimawandel/erwaermt-sich-die-erde-wirklich> (Stand: 30.08.2021)
- [2] Fair C.: The world's greenest cities are our future. Resonance, Canada, 2020. URL: <https://www.bestcities.org/news/2020/04/22/the-worlds-greenest-cities/> (Stand: 30.08.2021)
- [3] Wiener Linien GmbH & Co KG: Der Mehrwert für Wien. Wien, 2020. URL: <https://www.wienerlinien.at/web/wiener-linien/der-mehrwert> (Stand: 21.10.2021)
- [4] Nagiller, J.: Wo die meisten Treibhausgase entstehen. ORF, Wien, 2019. URL: <https://science.orf.at/v2/stories/2988476/> (Stand: 30.08.2021)
- [5] Madreiter, T.: Bauen für die Zukunft. Stadt Wien, Wien. URL: <https://u2u5.wien.gv.at/bauprojekt/> (Stand: 30.08.2021)
- [6] Wiener Linien GmbH & Co KG: Die Bauweise: minimal invasiv mit der Tunnelvortriebsmaschine. Wien, 2020. URL: <https://www.wienerlinien.at/web/wiener-linien/so-bauen-wir> (Stand: 30.08.2020)
- [7] Stadt Wien: Tunnelbaumethoden. Stadt Wien, Wien, 2020. URL: <https://u2u5.wien.gv.at/projekt/offene-bauweise/> (Stand: 01.05.2021)
- [8] Vavrovsky G.-M.: Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode im Spannungsfeld zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. H. G. JODL und W. AMON, Salzburg, 1995.
- [9] Bellmann E.: Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. WWF Deutschland, Berlin, 2019.
- [10] Malina U., Teschner S.: Zementerzeugung in Österreich. Friedrich Druck & Medien GmbH, Linz, 2017.
- [11] Zeisel H.: NEOStahl – Neue Energieoptimierungsverfahren und –Modelle in der Prozessautomation zur CO₂-Reduktion in der Stahlindustrie. Klima- und Energiefonds. Wien. URL: <https://energieforschung.at/projekt/neostahl-neue-energie-optimierungsverfahren-und-modelle-in-der-prozessautomation-zur-co2-reduktion-in-der-stahlindustrie/>
- [12] Stadt Wien: Bauen für die Zukunft. Magistratsabteilung 53, Wien. URL: <https://u2u5.wien.gv.at/bauprojekt/> (Stand: 22.10.2021)
- [13] Klamert L.: So viel CO₂ lässt sich mit E-Baumaschinen einsparen. WEKA Industrie Medien GmbH, Wien, 2019. URL: <https://traktuell.at/a/so-viel-co2-laesst-sich-mit-e-baumaschinen-einsparen> (Stand: 30.08.2021)

- [14] Plantopedia: Gewicht nasser Erde: Tabelle zum umrechnen. Advanco GmbH, Zwickau. URL: <https://www.plantopedia.de/gewicht-nasse-erde/> (Stand: 30.08.2021)
- [15] Energieforschung: Neostahl: neue Energieoptimierungsverfahren und Modelle in der Prozessautomation zur CO₂ Reduktion in der Stahlindustrie. Energieforschung.at, Wien. URL: <https://energieforschung.at/projekt/neostahl-neue-energieoptimierungsverfahren-und-modelle-in-der-prozessautomation-zur-co2-reduktion-in-der-stahlindustrie/#:~:text=Die%20Stahlindustrie%20ist%20weltweit%20f%C3%BCr%2010%25%20der%20CO2%20Emissionen%20verantwortlich.&text=Bei%20europ%C3%A4ischen%20Stahlherstellern%20fallen%20fast,mehr%20als%201%20C3%20Mrd> (Stand: 01.07.2021)
- [16] DIN 488-2 (2009): Betonstahl – Betonstabstahl. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [17] Bosold D., Pickhardt R.: Zemente und ihre Herstellung. Informationszentrum Beton GmbH, Erkrath, 2017. URL: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkb1%c3%a4tter/B1.pdf> (Stand: 30.08.2021)
- [18] HeidelbergCement AG: Betontechnische Daten. Leimen, 2017.
- [19] Dittmer M., Geraets F., Schwipps A.: Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen. Hypertext.berlin, Berlin, 2020.
- [20] Wiener Linien GmbH & Co KG: Betriebsangaben 2019. Wien, 2019. URL: https://www.wienerlinien.at/media/files/2020/wl_betriebsangaben_2019_deutsch_358274.pdf
- [21] Stadt Wien: Mit der U2 von der Seestadt bis zum Wienerberg. Magistratsabteilung 53, Wien. URL: <https://u2u5.wien.gv.at/bauprojekt/die-neue-u2/> (Stand: 30.08.2021)
- [22] Stadt Wien: Mit der U5 vom Karlsplatz bis Hernals. Magistratsabteilung 53, Wien. URL: <https://u2u5.wien.gv.at/bauprojekt/die-neue-u5/> (Stand: 22.10.2021)
- [23] Wolf-Eberl S., Posch P.: Arbeitswege und Arbeitszeit – Zeit für mein Leben?. Kammer für Arbeiter und Angestellte, Wien, 2018. URL: https://www.arbeiterkammer.at/interessenvertretung/umweltundverkehr/verkehr/arbeitswegependler/Arbeitswege_und_Arbeitszeit.pdf (Stand: 30.08.2021)
- [24] OTS: ÖAMTC Fordert mehr Anreize für Fahrgemeinschaften – Infos für Nutzer. OTS.at, Wien, 2019. URL: https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20191024_OTS0017/oeamtc-fordert-mehr-anreize-fuer-fahrgemeinschaften-infos-fuer-nutzer (Stand: 30.08.2021)

Abbildungsverzeichnis

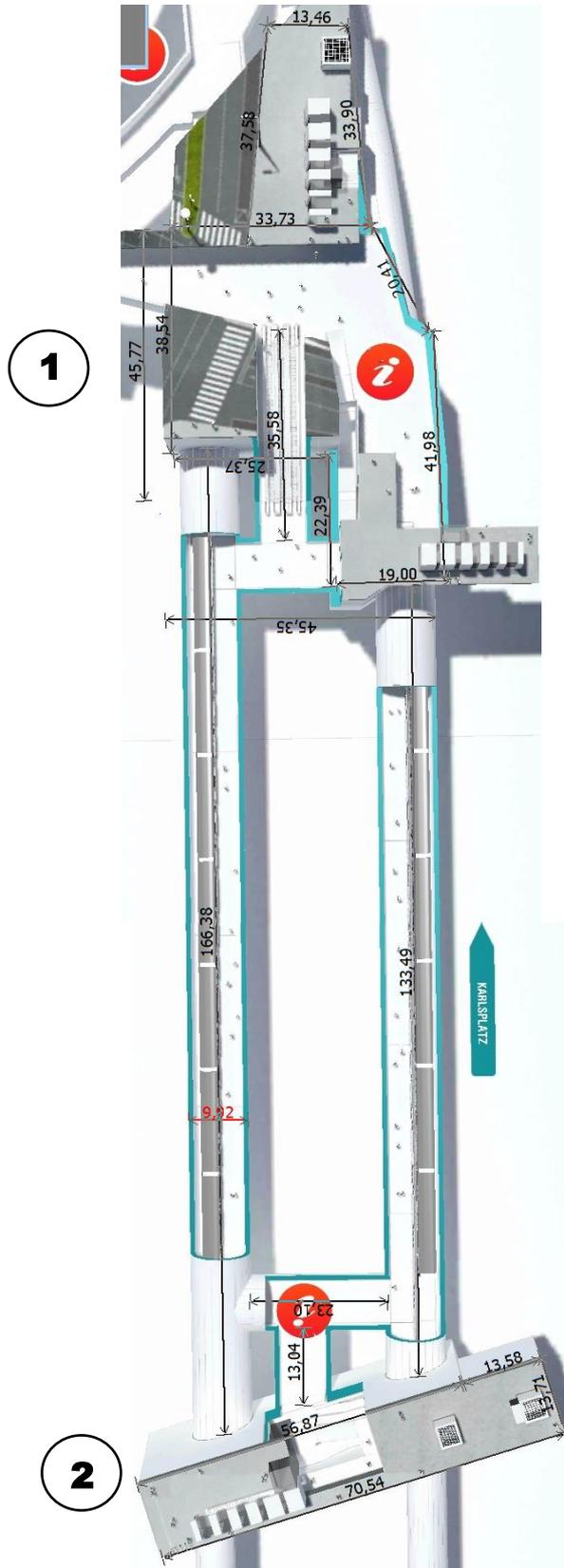
| | |
|--|----|
| Abb. 1: Streckenverlauf U2 und U5, (Quelle: Stadt Wien)..... | 3 |
| Abb. 2: Tunnelbaumethode, (Quelle: Wiener Linien)..... | 4 |
| Abb. 3: Bauarbeiten – NÖT, (Quelle: ÖBB)..... | 5 |
| Abb. 4: Globale Treibhausgasemissionen, (eigene Darstellung) | 6 |
| Abb. 5: Globale Zementproduktion, (in Anlehnung an GCCA 2017) | 7 |
| Abb. 6: Rendering aus der Anwendungssoftware „U2xU5 in 3D“, (Quelle: Wiener Linien)..... | 9 |
| Abb. 7: Regelquerschnitt Tunnelvortriebsmaschine, (Anl. W. U-Bahn Tagung 2014)..... | 11 |
| Abb. 8: Regelquerschnitt NÖT, (Anl. W. U-Bahn Tagung 2014)..... | 12 |
| Abb. 9: Rendering aus „U2xU5 in 3D“, (Quelle: Wiener Linien)..... | 13 |
| Abb. 10: CO ₂ Emissionen durch Stahlbeton, (eigene Aufnahme)..... | 18 |
| Abb. 11: Straßenbahn - Gleisarbeiten in Wien, (eigene Aufnahme)..... | 19 |
| Abb. 12: Gegenüberstellung U-Bahn und Straßenbahn, (eigene Darstellung)..... | 22 |

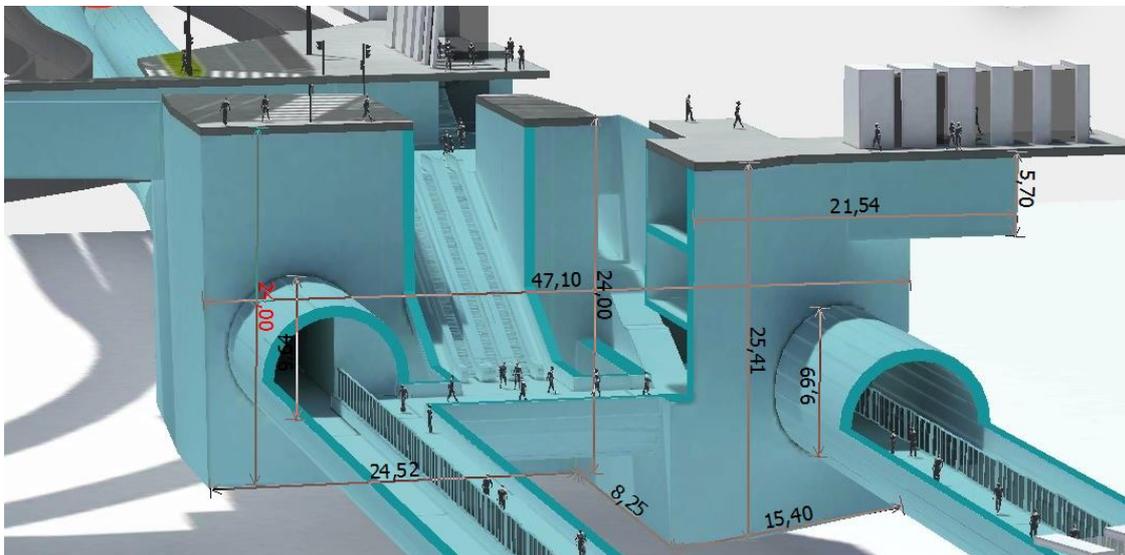
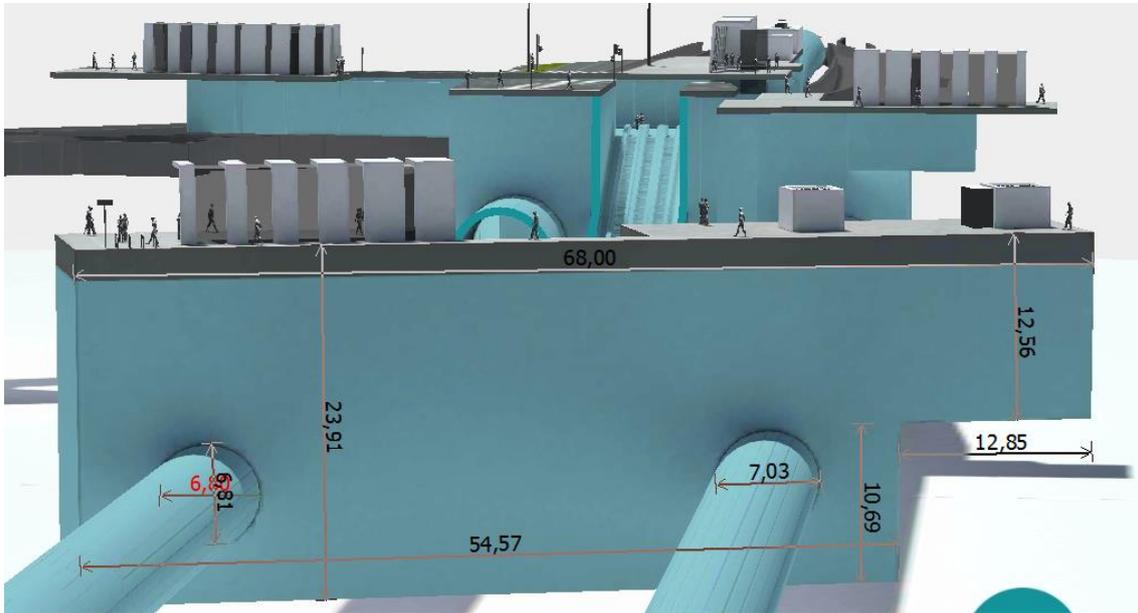
Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Menge des Aushubmaterials U2xU5..... | 10 |
| Tab. 2: Menge Stahlbeton und Emissionen der Tunnelröhren..... | 12 |
| Tab. 3: Menge Stahlbeton und Emissionen der Stationen..... | 13 |
| Tab. 4: Emissionen durch Abtransport des Aushubmaterials..... | 14 |
| Tab. 5: Emissionen durch Fahrmischer | 15 |
| Tab. 6: Emissionen durch Baumaschinen..... | 15 |
| Tab. 7: gesamte Emissionen U2xU5..... | 17 |
| Tab. 8: Emissionen beim Straßenbahnbau..... | 20 |
| Tab. 9: Amortisationszeitraum U2xU5..... | 21 |
| Tab. 10: Amortisationszeitraum Straßenbahntrasse..... | 21 |
| Tab. 11: Gegenüberstellung U-Bahn und Straßenbahn..... | 22 |

Anhang

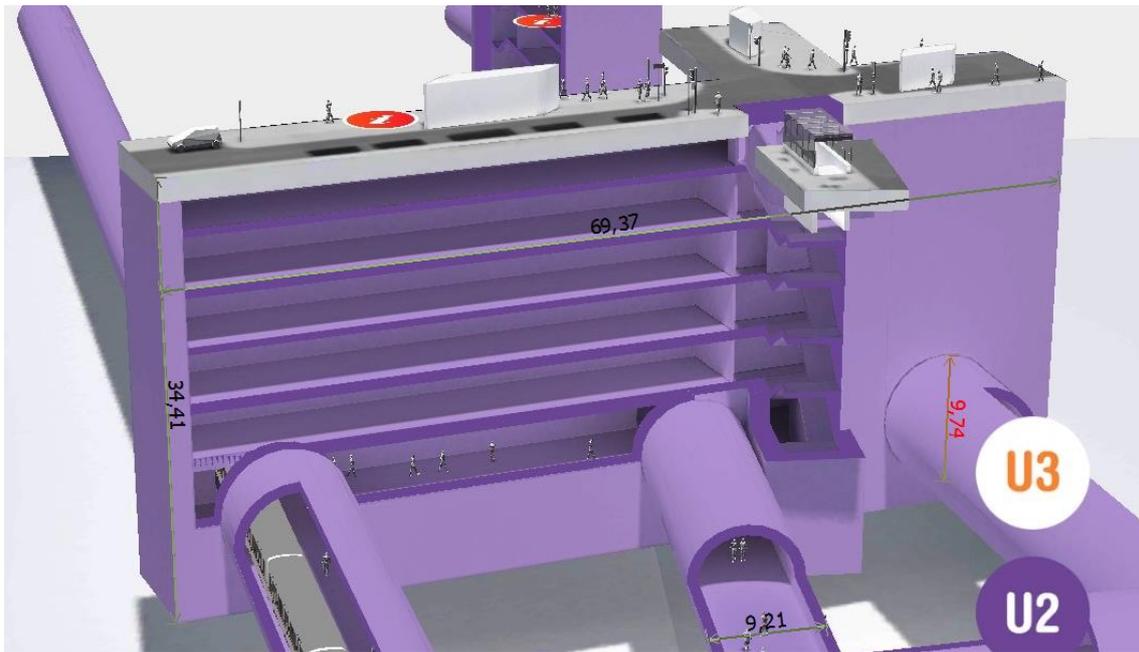
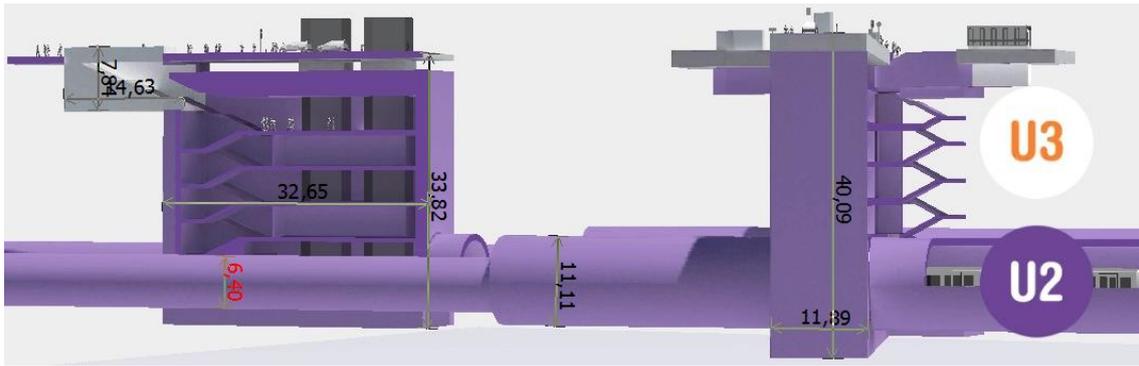
Frankhplatz

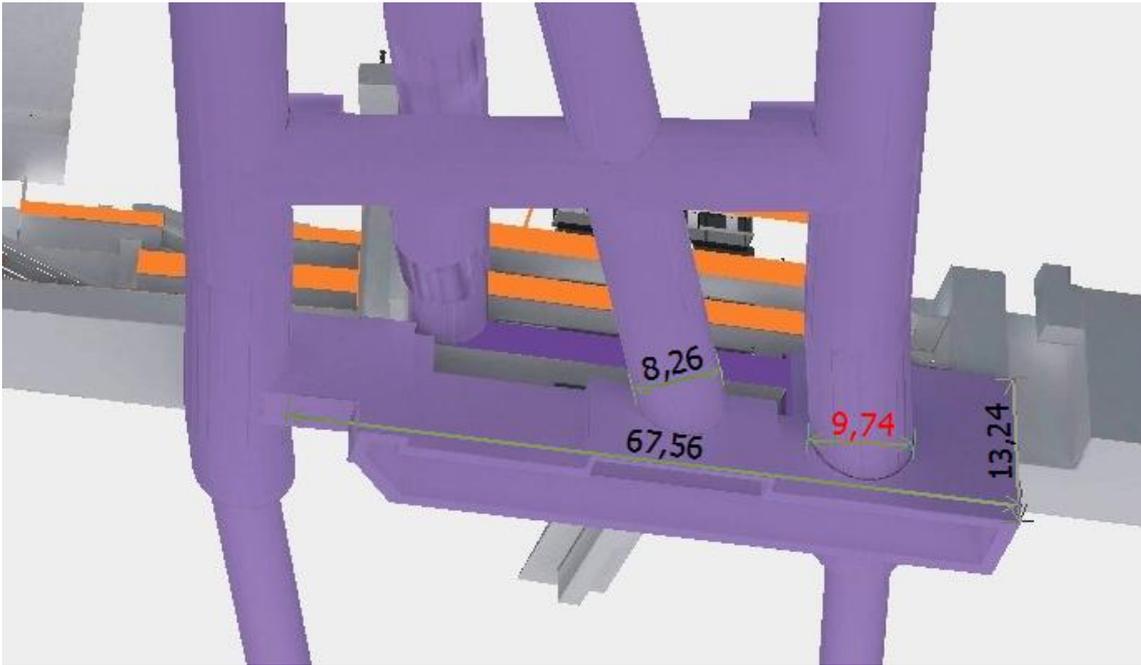


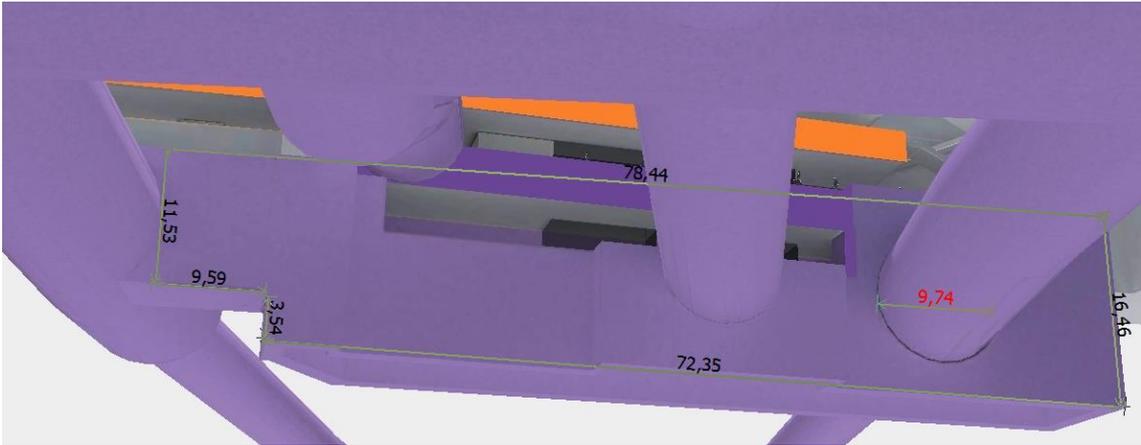


Neubaugasse

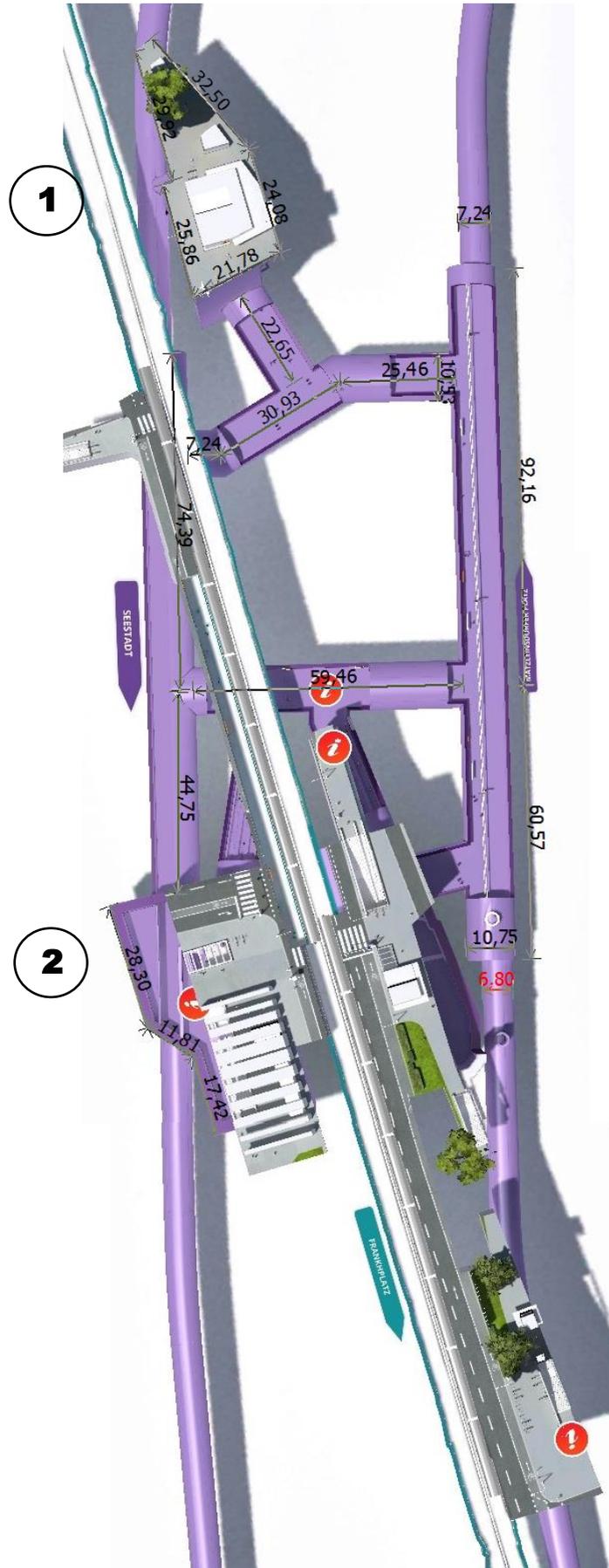


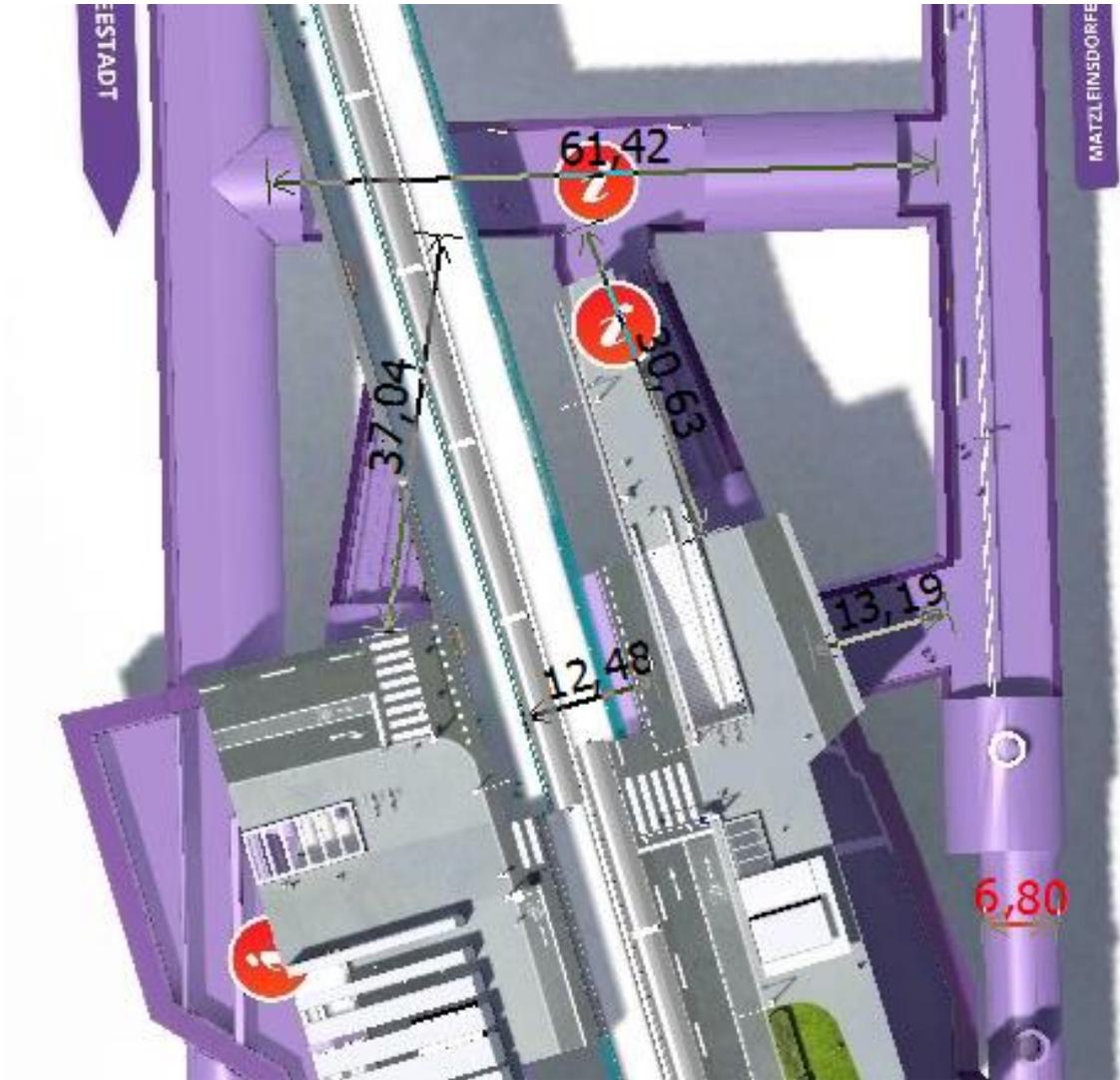


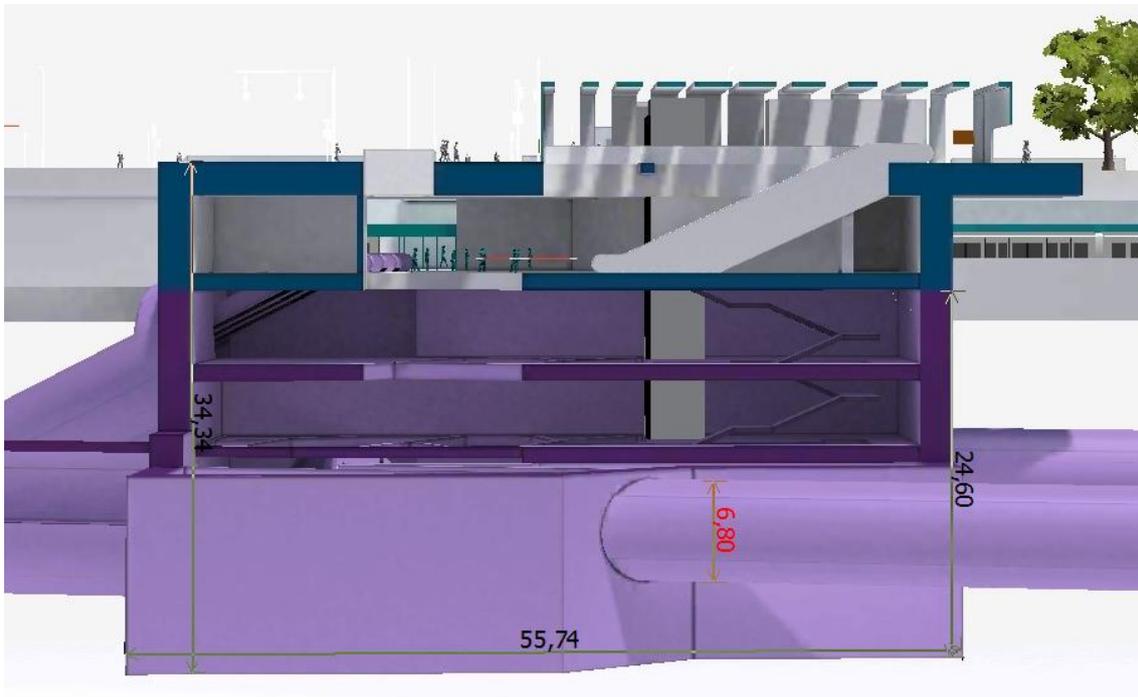
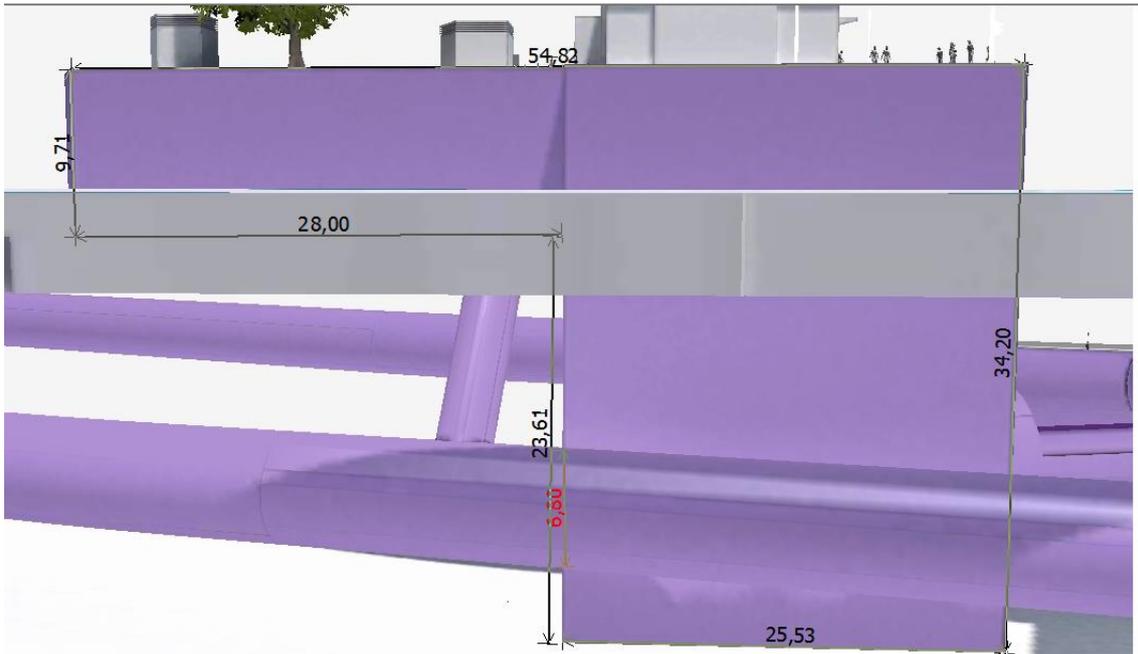


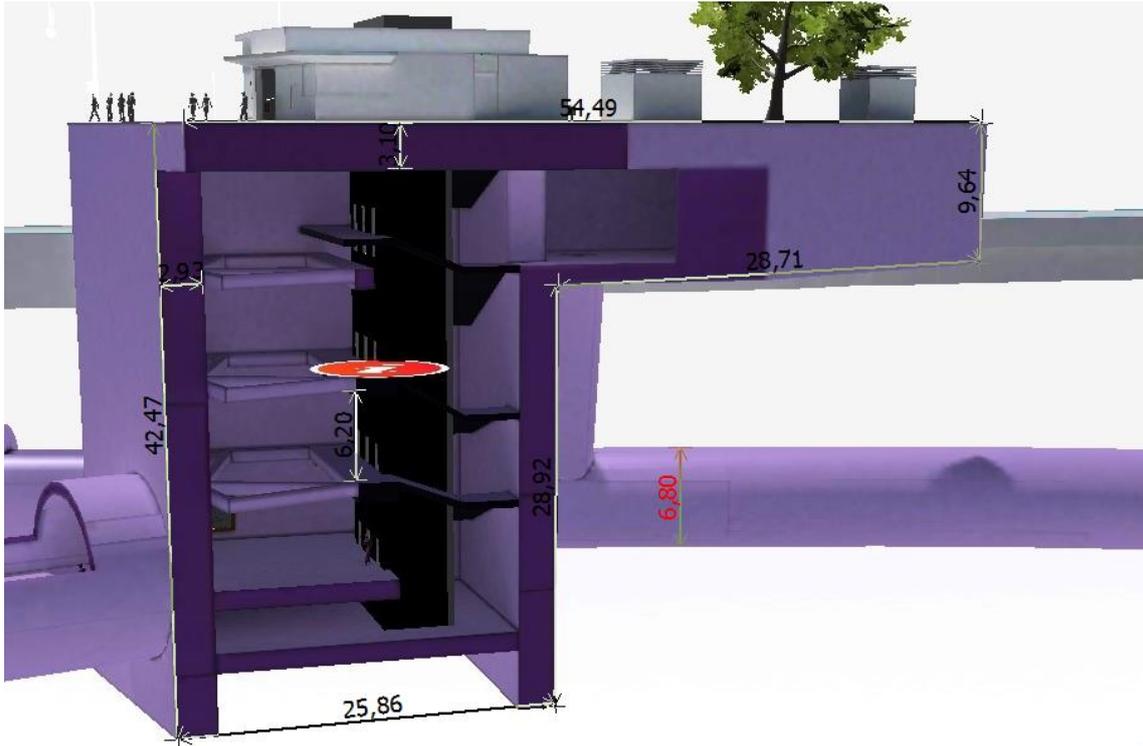


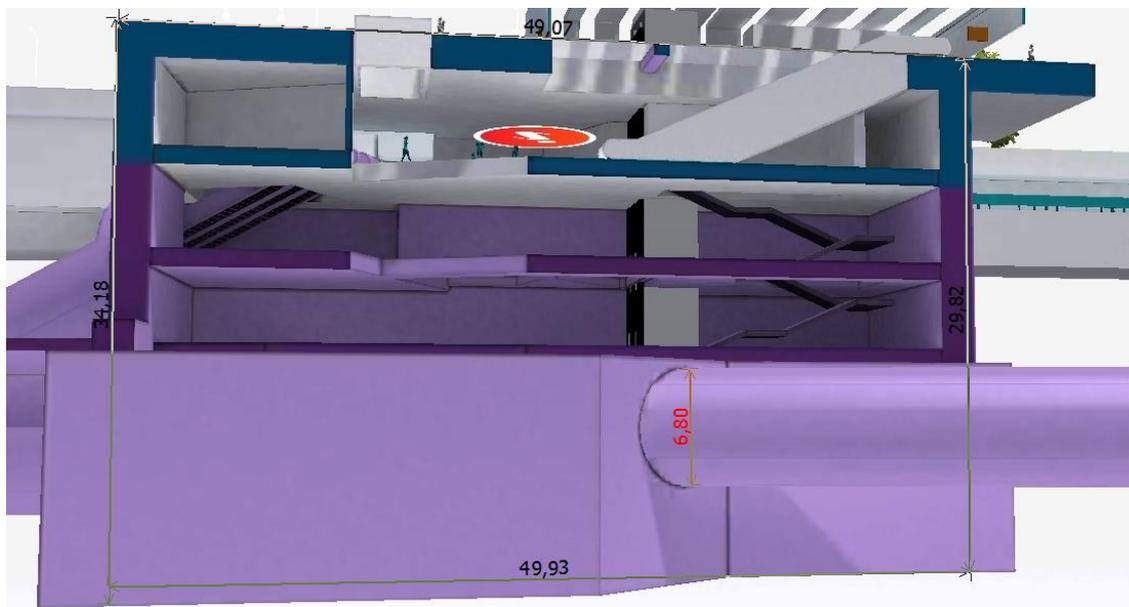
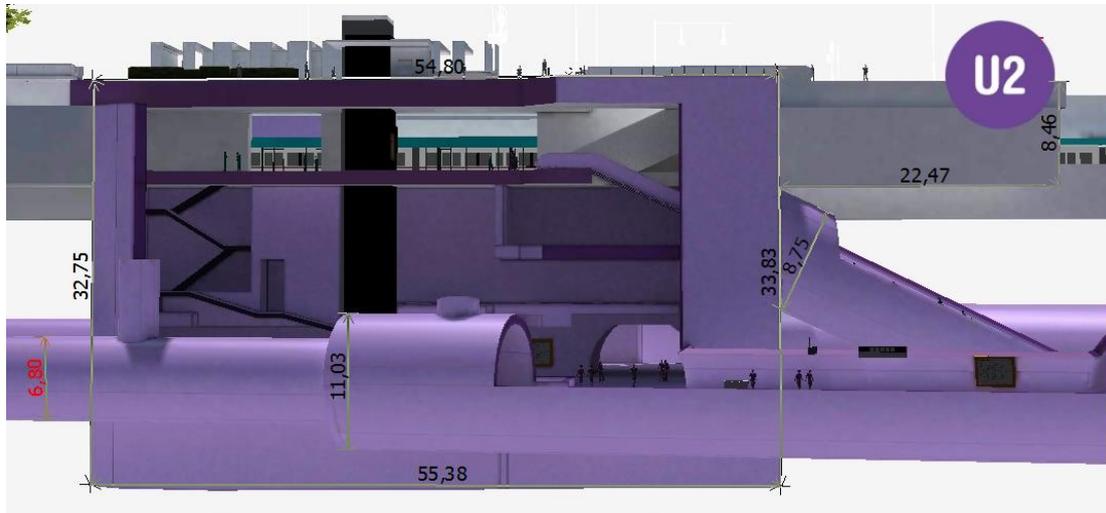
Rathaus



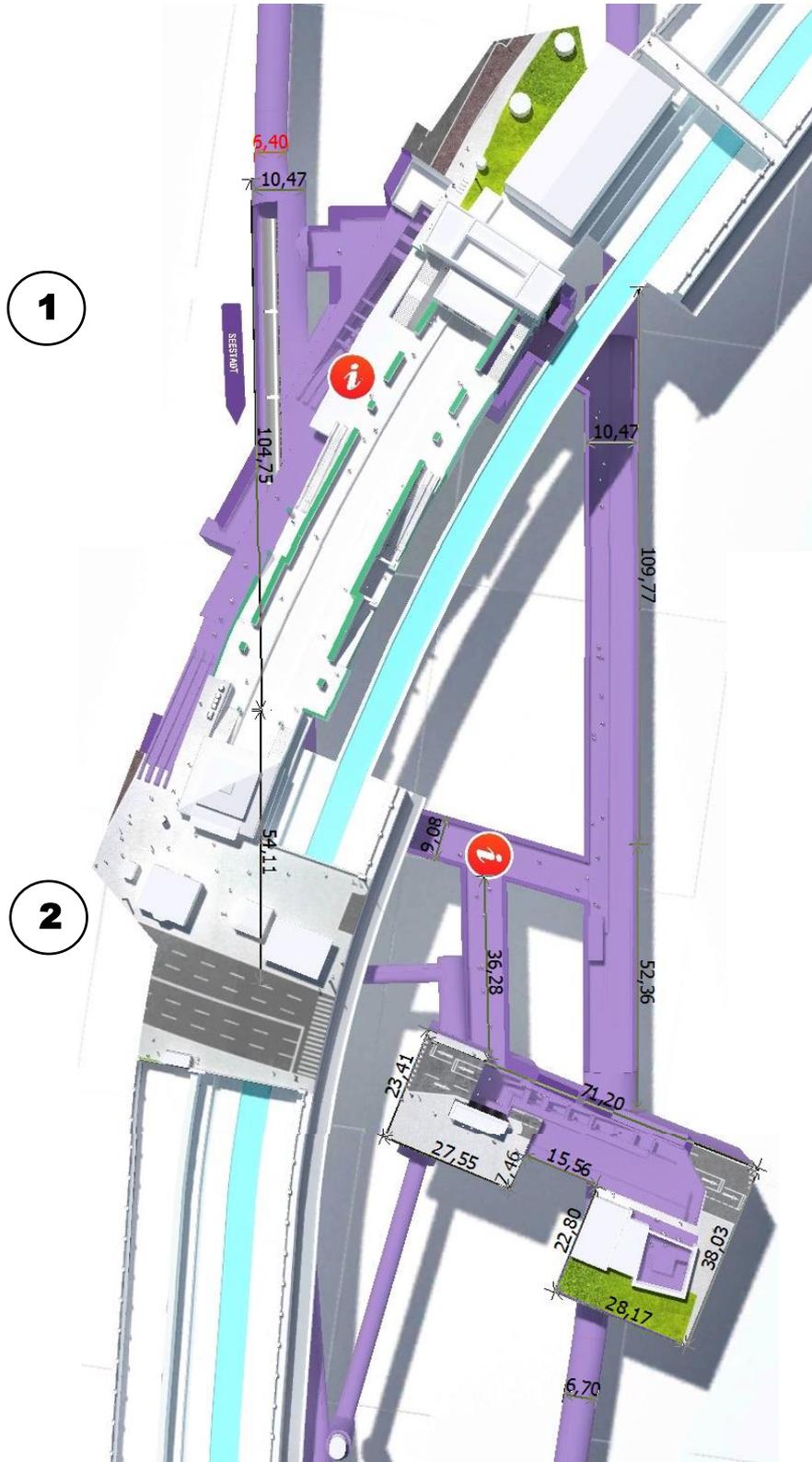


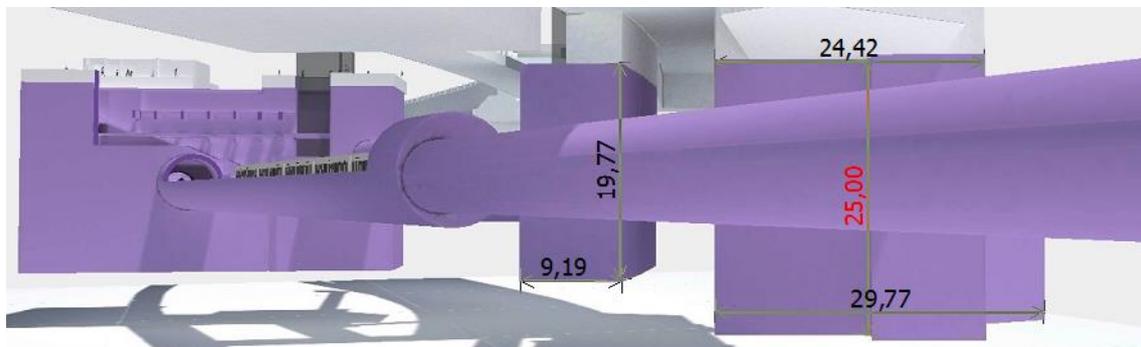
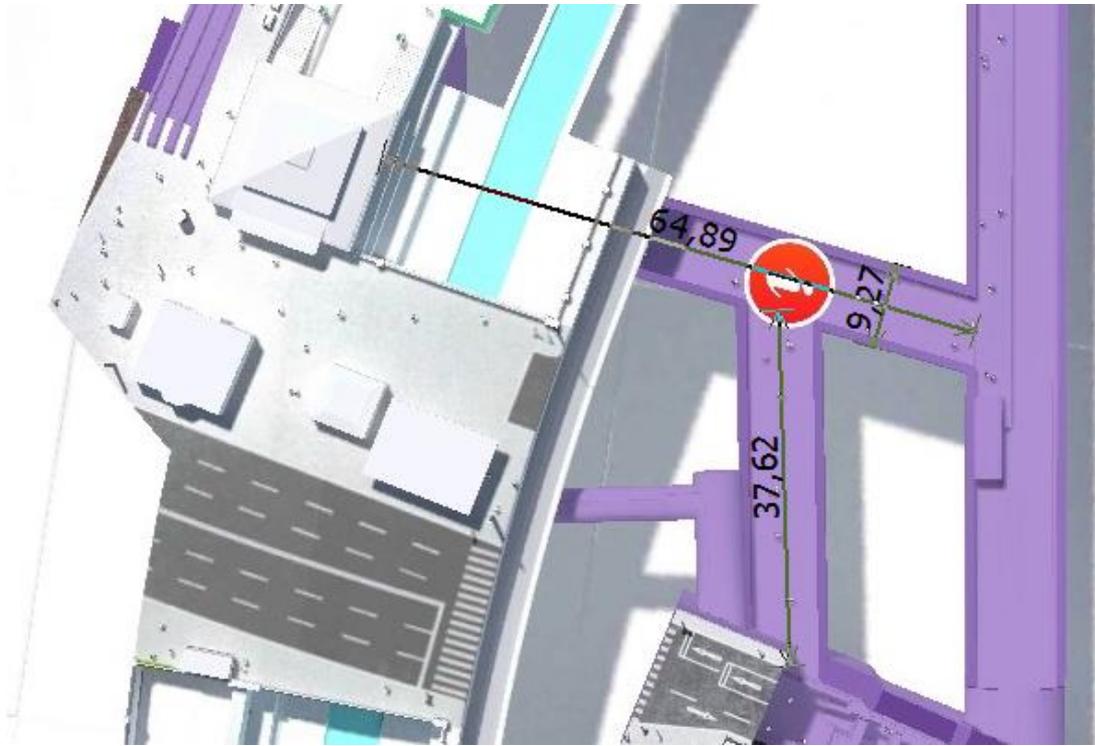


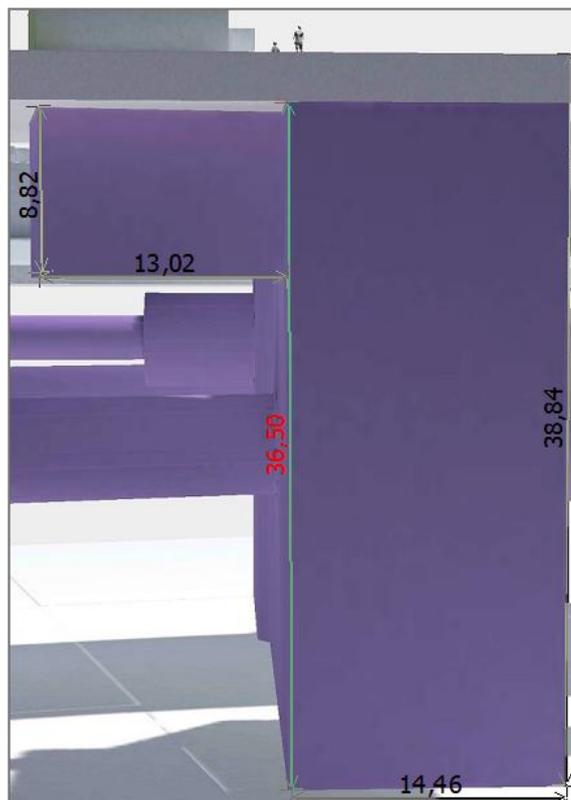
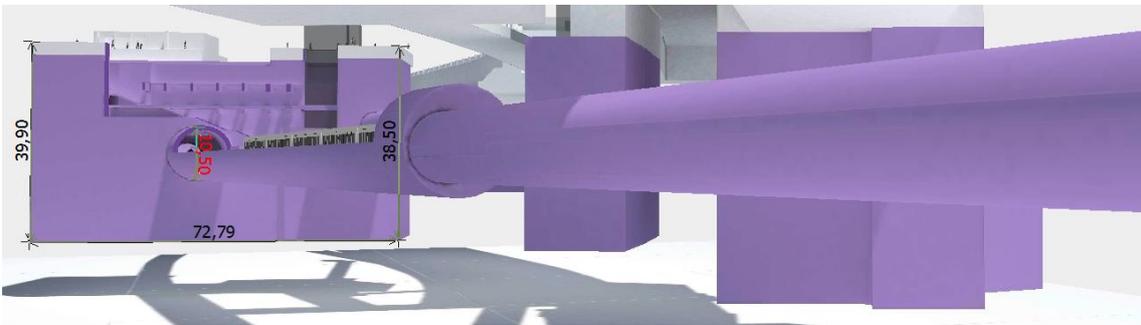
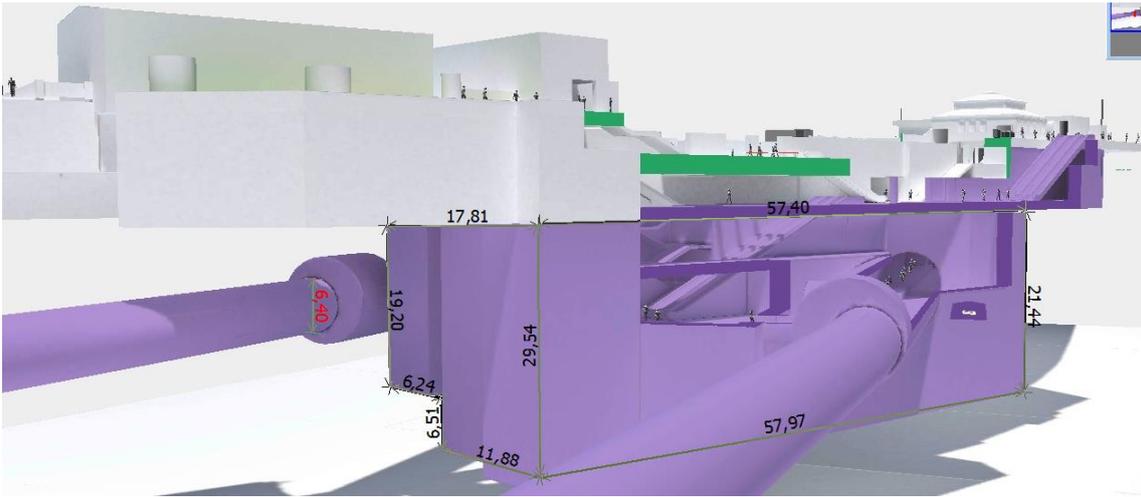


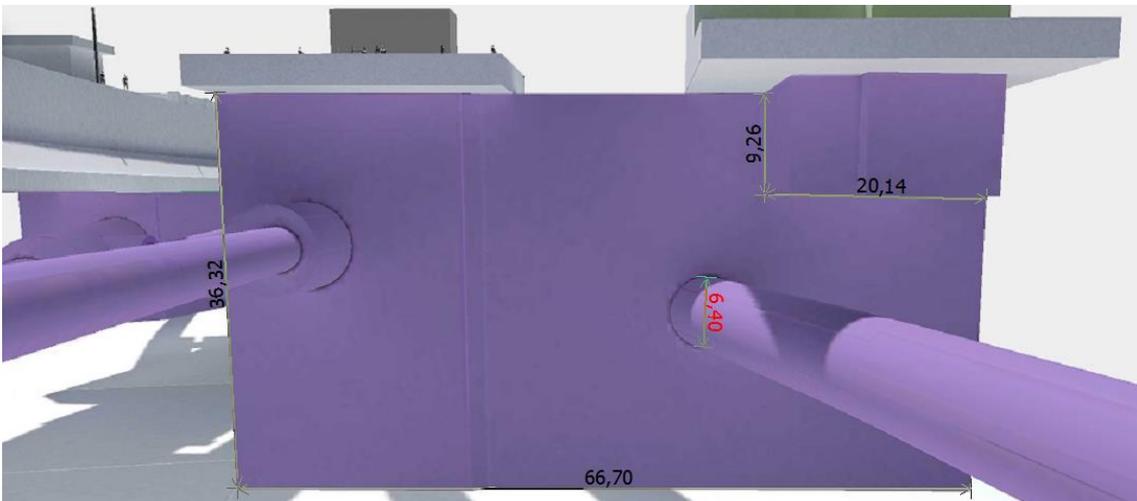
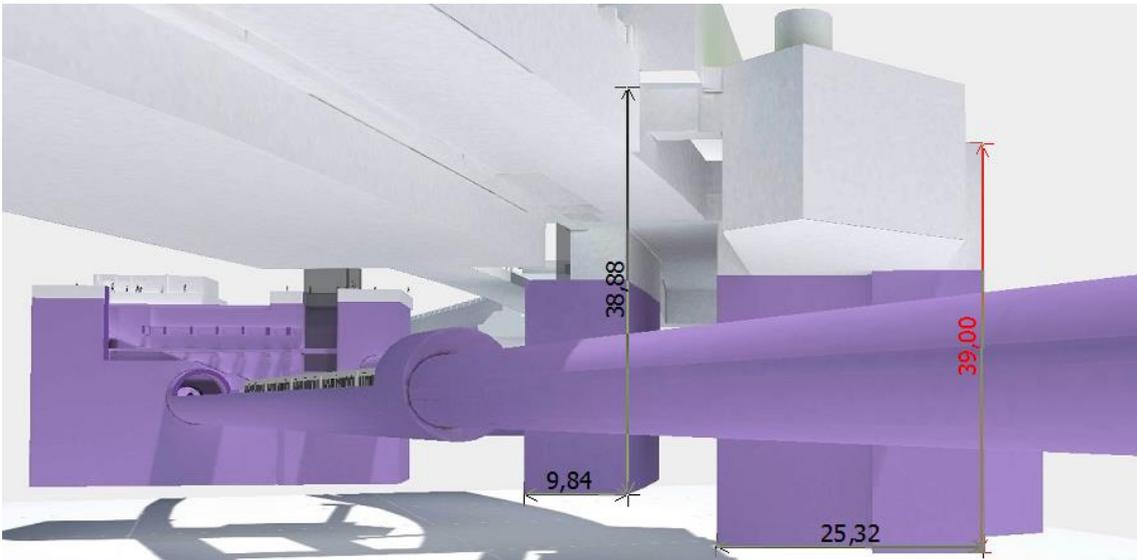
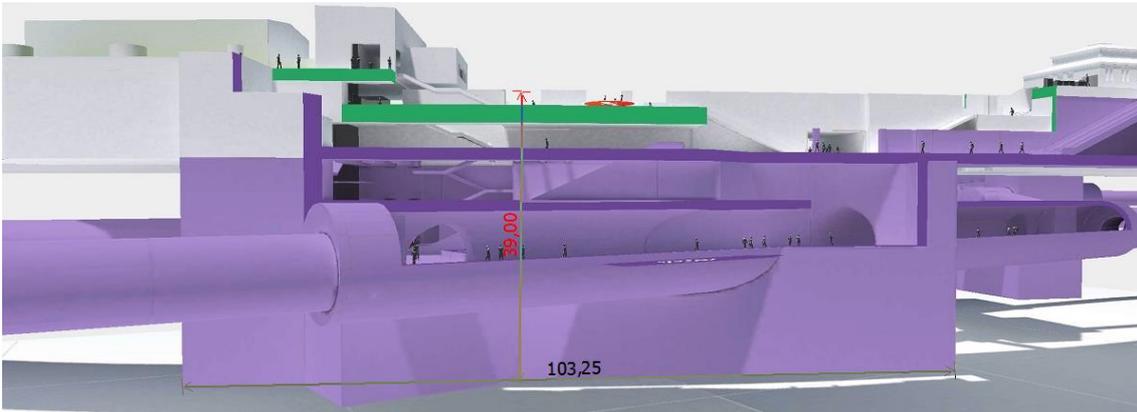


Pilgramgasse

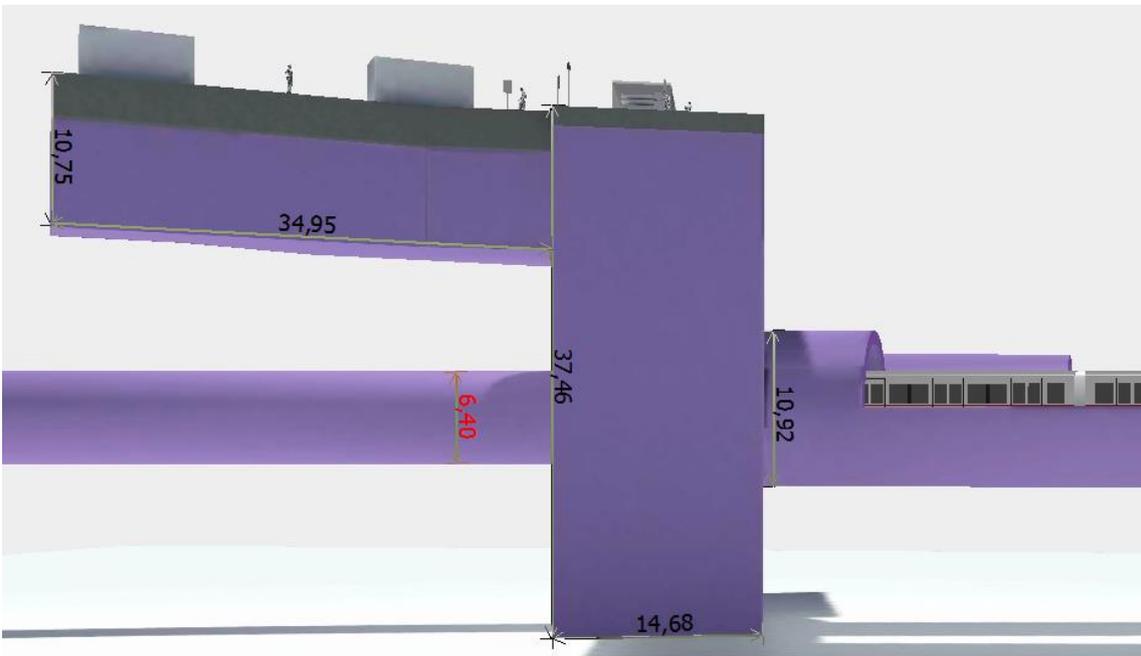
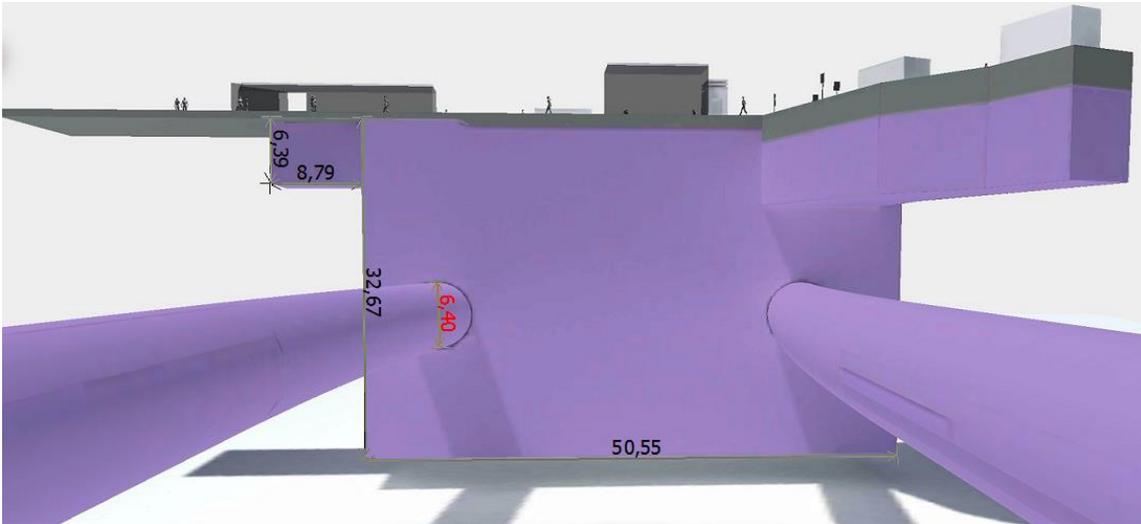


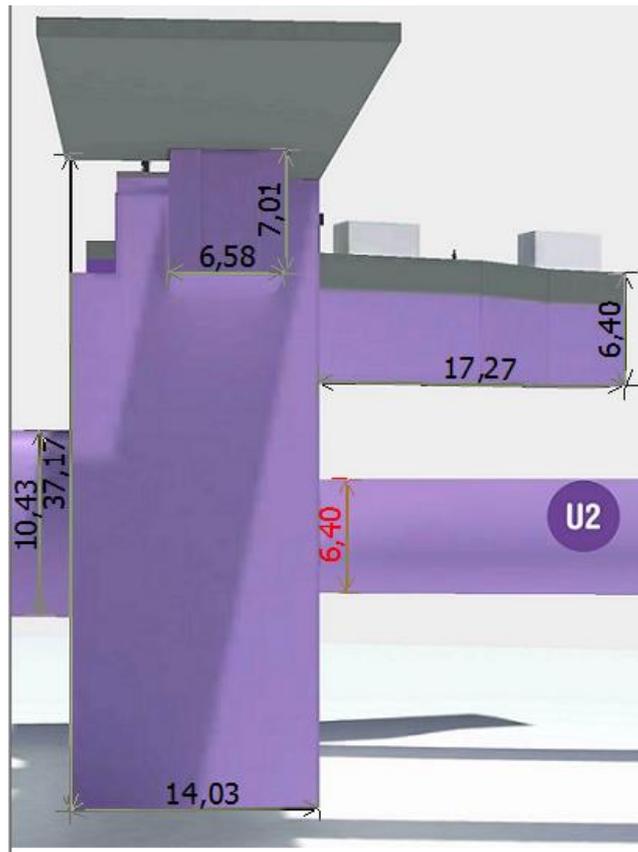


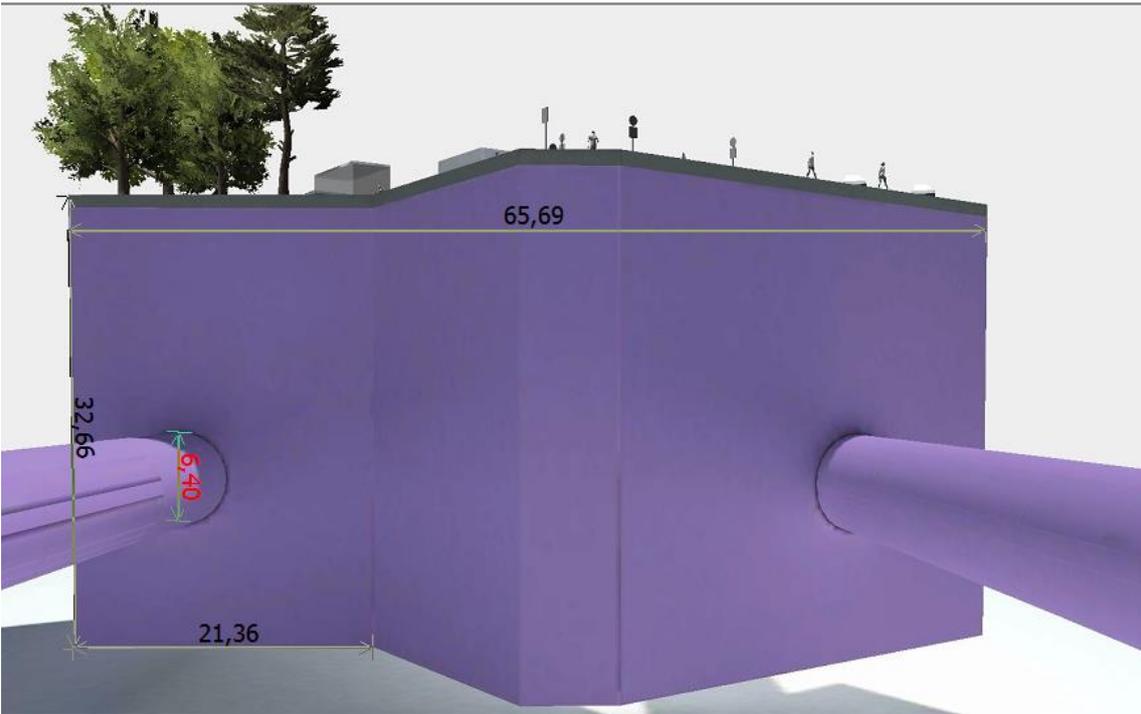
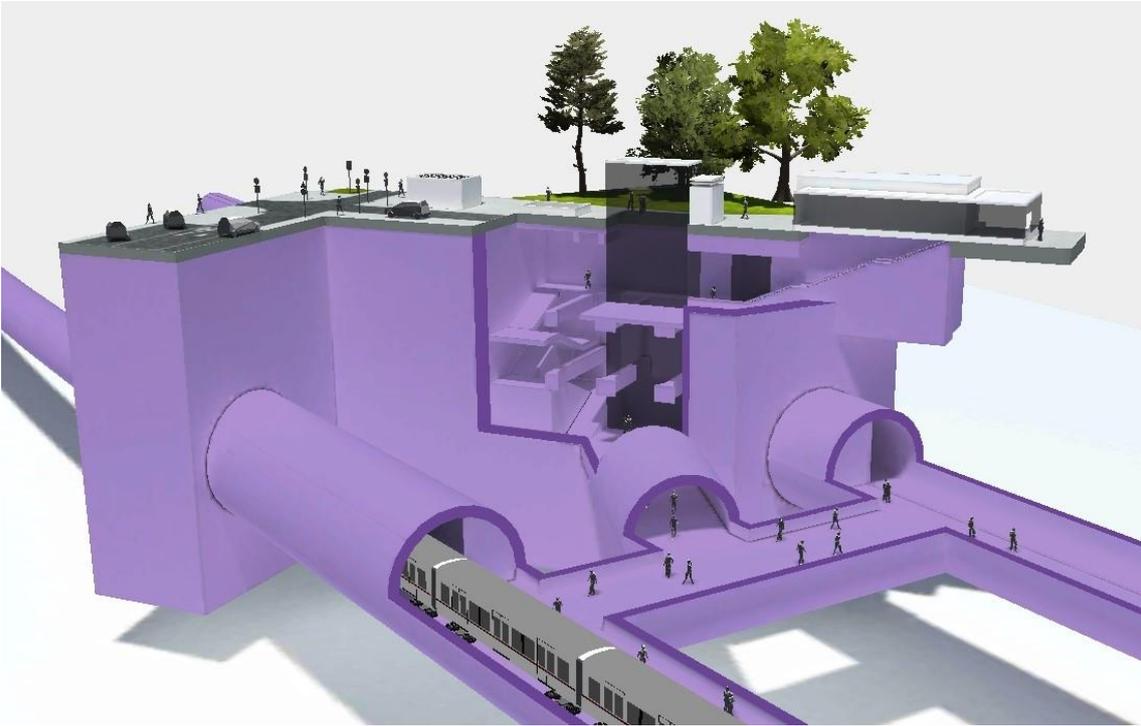




Reinprechtsdorfer Straße

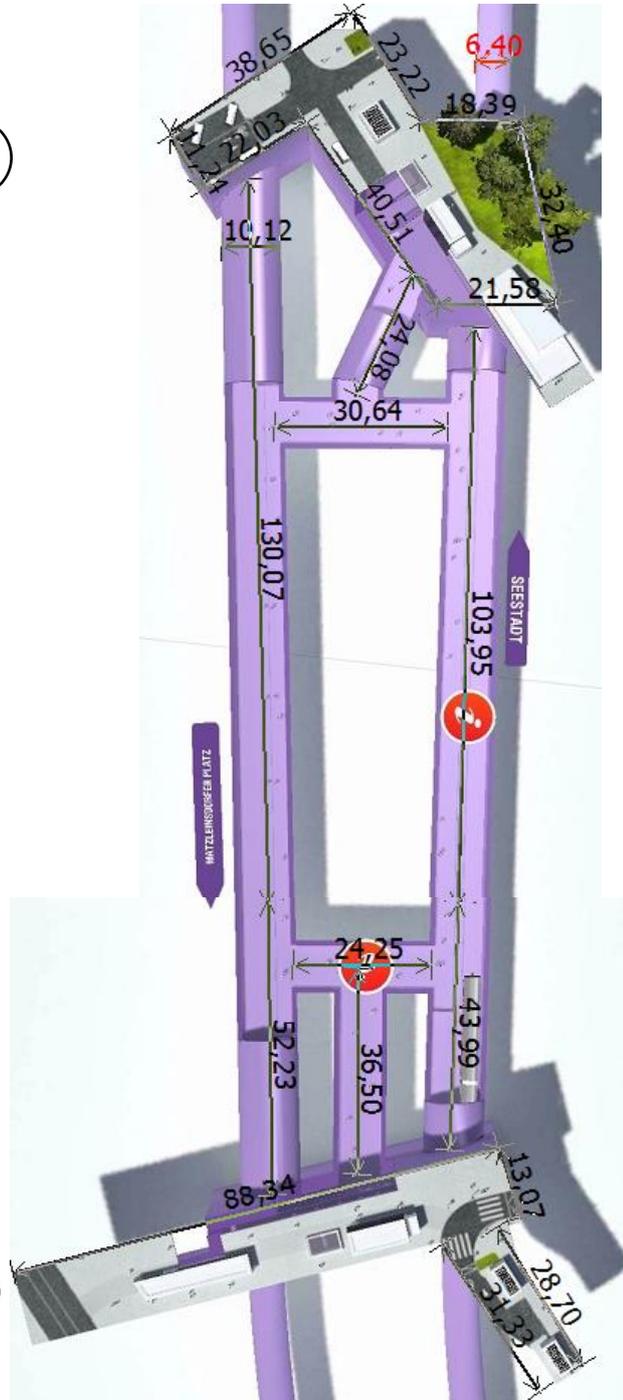




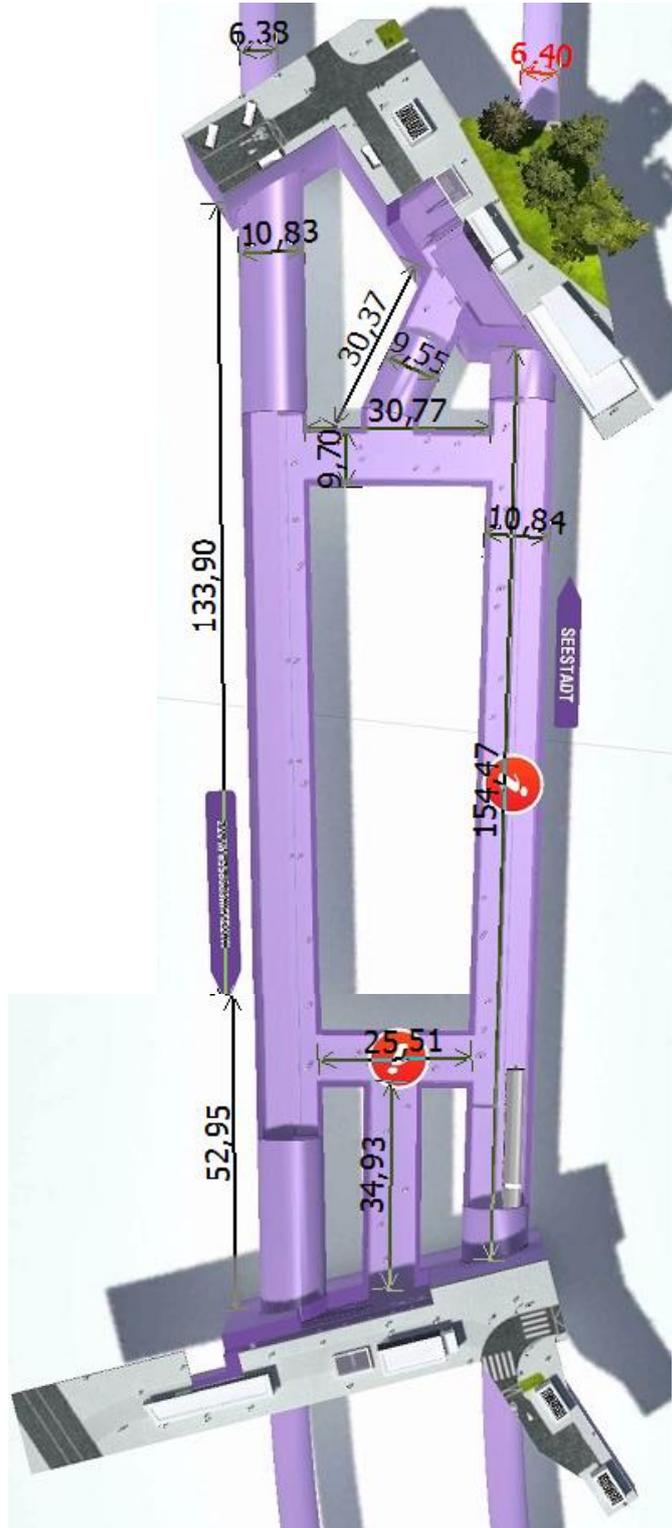




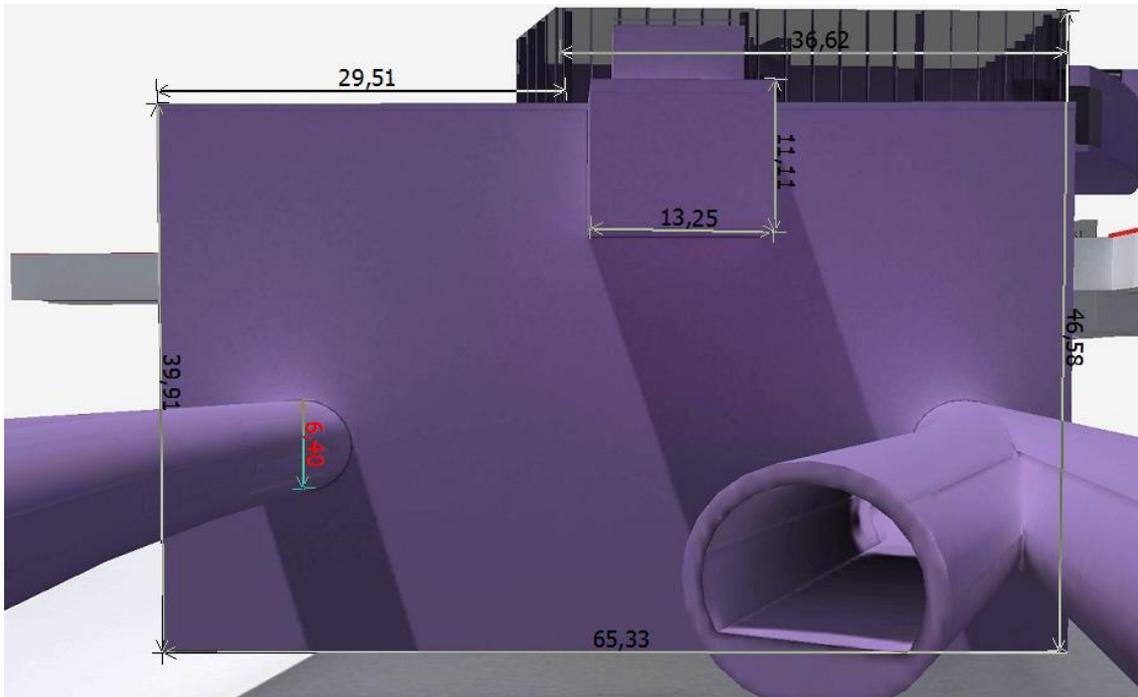
1

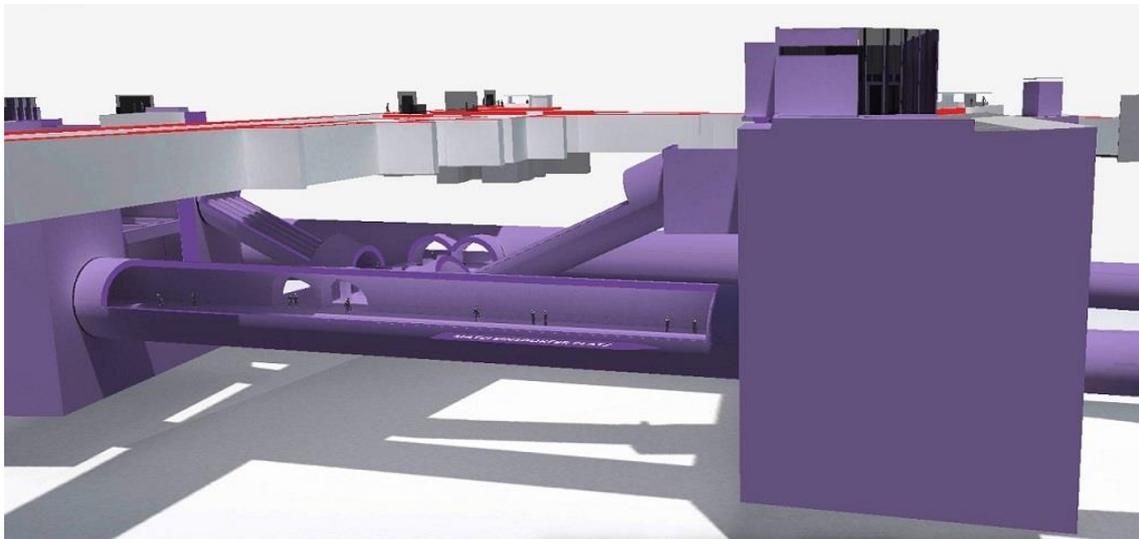
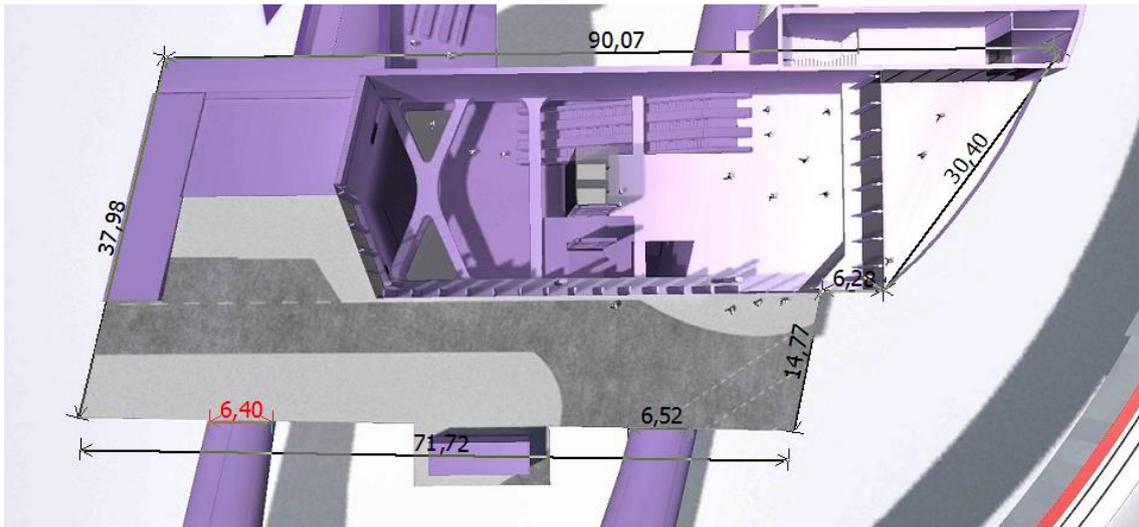


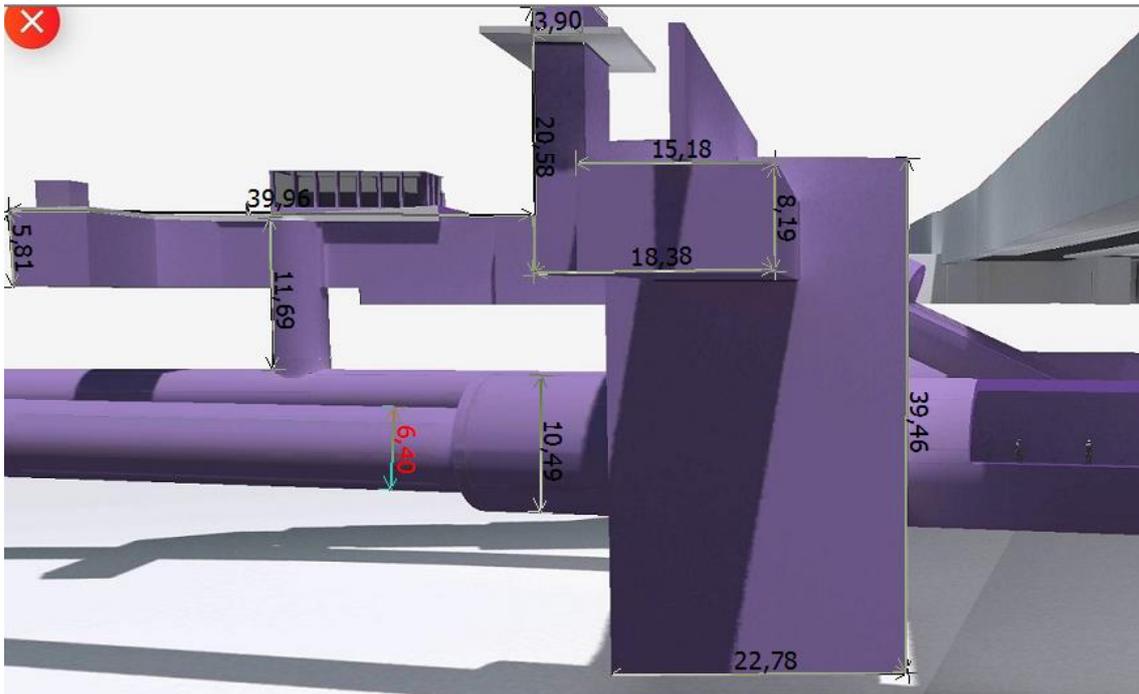
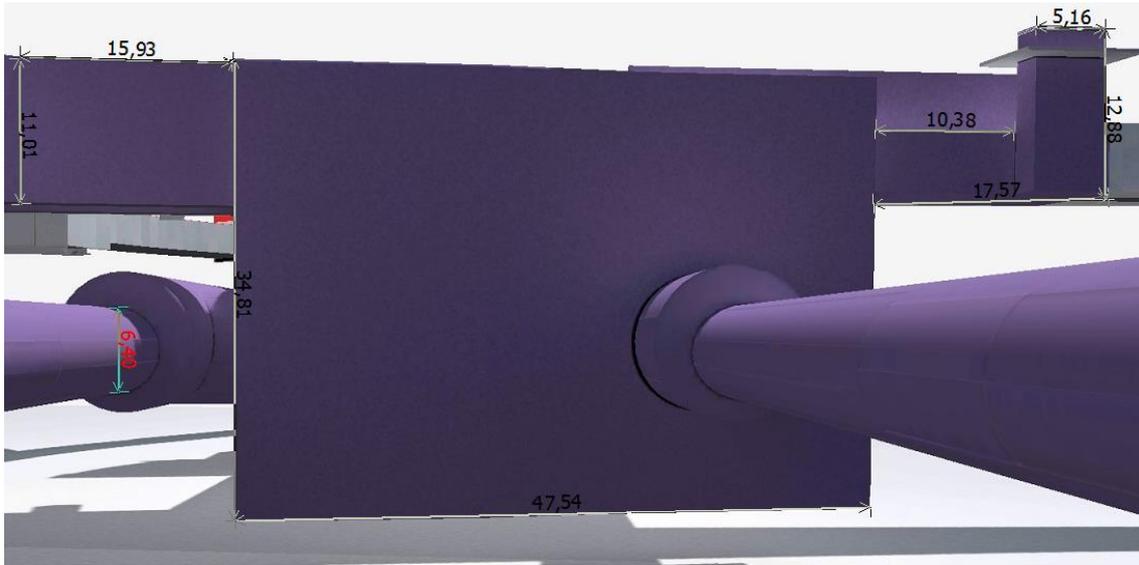
2

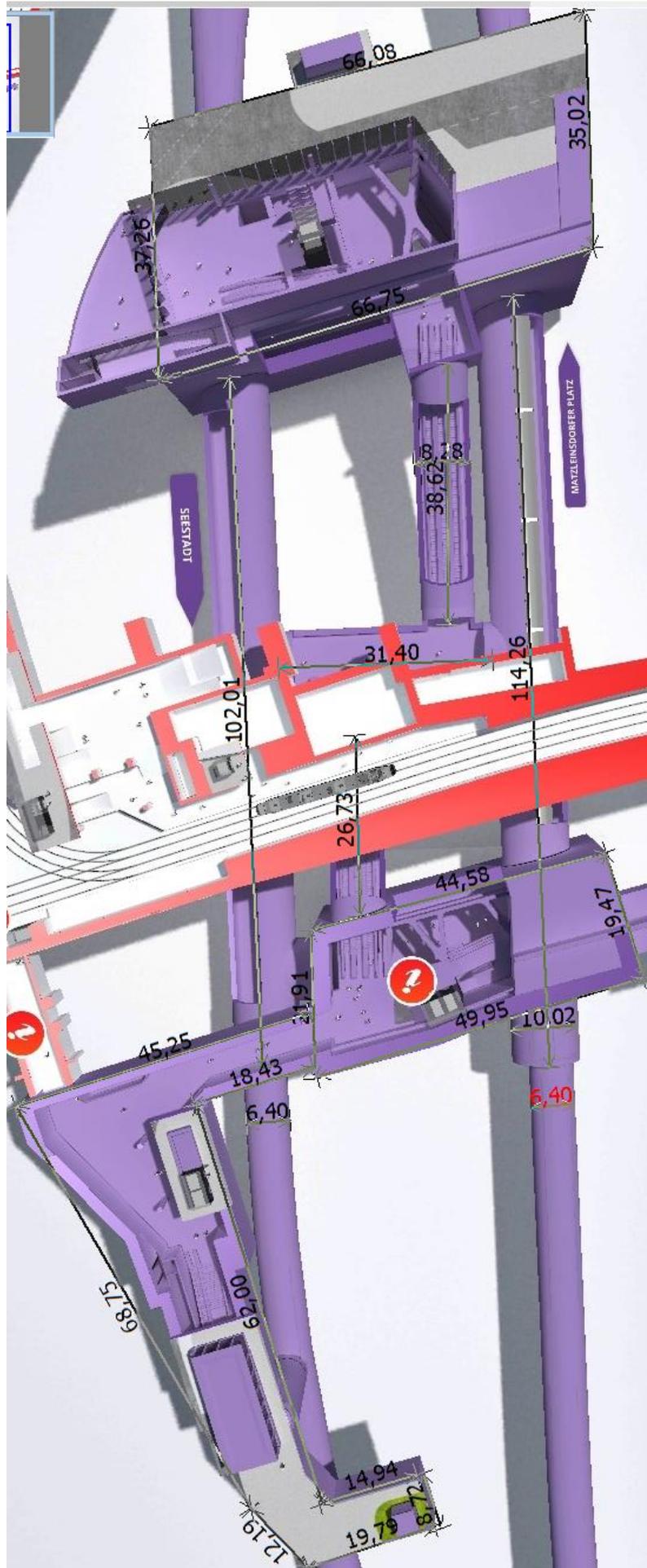


Matzleinsdorfer Platz









| Frankhplatz | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Geometrie | Anmerkung | Länge [m] | Breite [m] | Anzahl [Stk.] | Durchmesser [m] | Fläche [m ²] | Volumen [m ³] | Aushubmaterial [m ³] |
| Block 1 | Wand | 25 | 24 | 1 | | 600 | 300 | |
| | Wand | 24 | 22 | 1 | | 528 | 264 | |
| | Wand | 24 | 19 | 1 | | 456 | 228 | |
| | Wand | 42 | 24 | 1 | | 1 008 | 504 | |
| | Wand | 24 | 20 | 1 | | 480 | 240 | |
| | Wand | 34 | 24 | 1 | | 816 | 408 | |
| | Wand | 38 | 24 | 1 | | 912 | 456 | |
| | Decke | 45 | 45 | 5 | | 10 125 | 5 063 | 81 000 |
| Block 1.1 | Wand | 34 | 20 | 1 | | 680 | 340 | |
| | Wand | 20 | 14 | 1 | | 280 | 140 | |
| | Wand | 38 | 20 | 1 | | 760 | 380 | |
| | Decke | 35 | 16 | 3 | | 1 680 | 840 | 11 200 |
| Block 2 | Decke | 56 | 14 | 3 | | 2 352 | 1 176 | 15 680 |
| | Decke | 70 | 14 | 4 | | 3 920 | 1 960 | 19 600 |
| | Wand | 56 | 24 | 2 | | 2 688 | 1 344 | |
| | Wand | 24 | 14 | 2 | | 672 | 336 | |
| | Wand | 13 | 13 | 3 | | 507 | 254 | |
| Tunnelröhre 1 | | 301 | | | 9,90 | 14,77 | 4 444,41 | 23 170,04 |
| Tunnelröhre 2 | | 92 | | | 9,50 | 14,14 | 1 300,62 | 6 521,16 |
| | | | | | Σ | 28 492,90 | 19 977,03 | 157 171,20 |
| | | | | | CO ₂ Emission [t] | | 24 032,37 | |

| Neubaugasse | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|------------|---------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Geometrie | Anmerkung | Länge [m] | Breite [m] | Anzahl [Stk.] | Durchmesser [m] | Fläche [m ²] | Volumen [m ³] | Aushubmaterial [m ³] |
| Block 1 | Decke | 75 | 10 | 8 | | 6 000 | 3 000 | 37 500 |
| | Wand | 75 | 30 | 2 | | 4 500 | 2 250 | |
| | Wand | 30 | 12 | 2 | | 720 | 360 | |
| Block 2 | Decke | 33 | 14 | 8 | | 3 696 | 1 848 | 18 480 |
| | Wand | 30 | 14 | 2 | | 840 | 420 | |
| | Wand | 33 | 30 | 2 | | 1 980 | 990 | |
| Block 3 | Wand | 70 | 14 | 2 | | 1 960 | 980 | |
| | Wand | 14 | 13 | 2 | | 364 | 182 | |
| | Decke | 70 | 13 | 3 | | 2 730 | 1 365 | 18 200 |
| Tunnelröhre 1 | | 403 | | | 9,74 | 14,51 | 5 849,21 | 30 027,06 |
| Tunnelröhre 2 | | 176 | | | 8,00 | 11,78 | 2 073,45 | 8 846,72 |
| | | | | | Σ | 22 | 19 | |
| | | | | | | 816,30 | 317,66 | 113 053,79 |
| | | | | | CO ₂ Emission [t] | | 23 | 239,14 |

| Rathaus | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|------------|---------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Geometrie | Anmerkung | Länge [m] | Breite [m] | Anzahl [Stk.] | Durchmesser [m] | Fläche [m ²] | Volumen [m ³] | Aushubmaterial [m ³] |
| Block 1 | Decke | 25 | 22 | 6 | | 3 270 | 1 635 | 24 525 |
| | Decke | 17 | 15 | 2 | | 504 | 252 | 5 040 |
| | Wand | 35 | 25 | 2 | | 1 750 | 875 | |
| | Wand | 35 | 22 | 2 | | 1 526 | 763 | |
| | Wand | 28 | 10 | 1 | | 280 | 140 | |
| | Wand | 30 | 10 | 1 | | 300 | 150 | |
| Block 2 & 3 | Decke | 55 | 22 | 14 | | 16 940 | 8 470 | 108 900 |
| | Wand | 55 | 34 | 4 | | 7 480 | 3 740 | |
| | Wand | 34 | 22 | 4 | | 2 992 | 1 496 | |
| Tunnelröhre 1 | | 503 | | | 10,50 | 15,71 | 7 901,11 | 43 554,84 |
| | | | | | Σ | 35 | 25 | |
| | | | | | | 057,71 | 422,11 | 182 019,84 |
| | | | | | CO ₂ Emission [t] | | 30 | 582,79 |

| Pilgramgasse | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Geometrie | Anmerkung | Länge [m] | Breite [m] | Anzahl [Stk.] | Durchmesser [m] | Fläche [m ²] | Volumen [m ³] | Aushubmaterial [m ³] |
| Block 1 | Wand | 55 | 25 | 2 | | 2 750 | 1 375 | |
| | Wand | 25 | 25 | 2 | | 1 250 | 625 | |
| | Decke | 55 | 25 | 4 | | 5 500 | 2 750 | 68 750 |
| Block 1.1 | Decke | 30 | 9 | 4 | | 1 080 | 540 | 13 500 |
| | Wand | 20 | 9 | 2 | | 360 | 180 | |
| | Wand | 30 | 20 | 2 | | 1 200 | 600 | |
| Block 2 | Decke | 70 | 15 | 5 | | 5 250 | 2 625 | 52 500 |
| | Wand | 70 | 38 | 2 | | 5 320 | 2 660 | |
| | Wand | 38 | 15 | 2 | | 1 140 | 570 | |
| Block 2.2 | Decke | 20 | 13 | 3 | | 780 | 390 | 13 000 |
| | | 20 | 9 | 1 | | 180 | 90 | |
| | | 13 | 9 | 2 | | 234 | 117 | |
| Tunnelröhre 1 | | 268 | | | 10,50 | 15,71 | 4 209,73 | 23 206,16 |
| Tunnelröhre 2 | | 112 | | | 9,00 | 13,35 | 1 495,40 | 7 125,13 |
| | | | | | Σ | 25 073,06 | 18 227,13 | 178 081,29 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | CO ₂ Emission [t] | | 21 927,24 | |

| Reinprechtsdorfer Straße | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Geometrie | Anmerkung | Länge [m] | Breite [m] | Anzahl [Stk.] | Durchmesser [m] | Fläche [m ²] | Volumen [m ³] | Aushubmaterial [m ³] |
| Block 1 | Decke | 22 | 11 | 1 | | 242 | 121 | 9 680 |
| | Decke | 51 | 16 | 1 | | 816 | 408 | 32 640 |
| | Decke | 32 | 18 | 1 | | 576 | 288 | 5 760 |
| | Wand | 36 | 33 | 1 | | 1 188 | 594 | |
| | Wand | 33 | 20 | 1 | | 660 | 330 | |
| | Wand | 33 | 24 | 1 | | 792 | 396 | |
| | Wand | 39 | 33 | 1 | | 1 287 | 644 | |
| | Wand | 33 | 11 | 1 | | 363 | 182 | |
| | Wand | 33 | 22 | 1 | | 726 | 363 | |
| | Wand | 40 | 33 | 1 | | 1 320 | 660 | |
| | Wand | 33 | 22 | 1 | | 726 | 363 | |
| Block 2 | Decke | 55 | 15 | 7 | | 5 775 | 2 888 | 33 000 |
| | Wand | 37 | 15 | 2 | | 1 110 | 555 | |
| | Wand | 55 | 37 | 2 | | 4 070 | 2 035 | |
| | Wand | 35 | 10 | 2 | | 700 | 350 | |
| | Wand | 10 | 7 | 1 | | 70 | 35 | |
| | Wand | 35 | 8 | 2 | | 560 | 280 | |
| Tunnelröhre 1 | | 342 | | | 10,80 | 16,18 | 5 533,29 | 31 330,22 |
| Tunnelröhre 2 | | 121 | | | 9,60 | 14,29 | 1 729,60 | 8 758,26 |
| | | | | | Σ | 21 011,47 | 17 753,39 | 121 168,48 |
| | | | | | CO ₂ Emission [t] | | 21 357,33 | |

| Matzleinsdorfer Platz | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|-----------|------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Geometrie | Anmerkung | Länge [m] | Breite [m] | Anzahl [Stk.] | Durchmesser [m] | Fläche [m ²] | Volumen [m ³] | Aushubmaterial [m ³] |
| Block 1 | Decke | 71 | 37 | 4 | | 10 508 | 5 254 | 131 350 |
| | Wand | 42 | 40 | 2 | | 3 360 | 1 680 | |
| | Wand | 71 | 42 | 2 | | 5 964 | 2 982 | |
| Block 2 | Wand | 36 | 25 | 2 | | 1 800 | 900 | |
| | Wand | 50 | 36 | 2 | | 3 600 | 1 800 | |
| | Decke | 50 | 25 | 4 | | 5 000 | 2 500 | 62 500 |
| Block 2.2 | Wand | 18 | 6 | 1 | | 108 | 54 | |
| | Wand | 62 | 6 | 1 | | 372 | 186 | |
| | Wand | 15 | 6 | 1 | | 90 | 45 | |
| | Wand | 9 | 6 | 1 | | 54 | 27 | |
| | Wand | 20 | 6 | 1 | | 120 | 60 | |
| | Wand | 12 | 6 | 1 | | 72 | 36 | |
| | Wand | 68 | 6 | 1 | | 408 | 204 | |
| | Wand | 45 | 6 | 1 | | 270 | 135 | |
| | Decke | 62 | 22 | 2 | | 2 728 | 1 364 | 13 640 |
| Tunnelröhre 1 | | 216 | | | 10,00 | 14,92 | 3 223,27 | 16 964,60 |
| Tunnelröhre 2 | | 64 | | | 8,50 | 12,57 | 804,25 | 3 631,68 |
| | | | | | Σ | 34 481,49 | 21 254,52 | 228 086,28 |
| | | | | | CO ₂ Emission [t] | | 25 569,19 | |

| Vortriebsart | Querschnittsfläche [m ²] | Tunnellänge [m] | Volumen [m ³] | CO ₂ Emission [t] | Aushubmaterial [m ³] |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Tunnelvortriebsmaschine | 8,85 | 4 164,00 | 36 838,91 | 44 317,21 | 133 955,50 |
| NÖT | 14,71 | 2 769,00 | 40 718,15 | 48 983,93 | 103 540,68 |

| Schienenprofil | Material | Dichte [kg/m ³] | Querschnitt [m ²] | Länge [m] | Volumen [m ³] | CO ₂ [t] |
|----------------|----------|--------------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------|
| 49 E1 | Stahl | 7 850,00 | 0,01 | 28 000 | 392 | 5 247,31 |

| Bohrpfahlwände | | | | | | |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|------------------------------|---------------------------------|--|
| Bahnhof | Querschnitt BPW [m] | Tiefe [m] | Länge [m] | Volumen [m ³] | CO ₂ Emission [t] | |
| Neubaugasse | 0,70 | 30 | 200 | 2 309,07 | 2 777,81 | |
| Neubaugasse | 0,70 | 45 | 190 | 3 290,43 | 3 958,38 | |
| Rathaus | 0,70 | 35 | 280 | 3 771,48 | 4 537,09 | |
| Rathaus | 0,70 | 40 | 140 | 2 155,13 | 2 592,62 | |
| Pilgramgasse | 0,70 | 40 | 240 | 3 694,51 | 4 444,50 | |
| Pilgramgasse | 0,70 | 50 | 220 | 4 233,30 | 5 092,66 | |
| Reinprechtsdorfer Str. | 0,70 | 40 | 350 | 5 387,83 | 6 481,56 | |
| Matzleinsdorfer Pl. | 0,70 | 10 | 255 | 981,36 | 1 180,57 | |
| Matzleinsdorfer Pl. | 0,70 | 50 | 380 | 7 312,06 | 8 796,40 | |
| Frankhplatz | 0,70 | 30 | 390 | 4 502,69 | 5 416,73 | |
| | | | Σ | 37 637,85 | 45 278,33 | |

| Berechnung des Aushubmaterials | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Station | Volumen [m ³] | mittleres Gewicht [t] |
| Frankhplatz | 157 171 | 235 757 |
| Rathaus | 182 020 | 273 030 |
| Neubaugasse | 113 054 | 169 581 |
| Pilgramgasse | 178 081 | 267 122 |
| Reinprechtsdorfer Str. | 121 168 | 181 753 |
| Matzleinsdorfer Pl. | 228 086 | 342 129 |
| 2769 m NÖT | 103 541 | 155 311 |
| 4164 m TVM | 133 956 | 200 933 |
| Summe | 1 217 077 | 1 825 616 |

| LKW | | | | |
|---------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------|--|
| Bezeichnung | Füllmenge [m ³] | Leergewicht [t] | Gewicht mit Nutzlast [t] | CO ₂ -Ausstoß [kg/1000t km] |
| 5-Achs-Kipper | 21 | 15 | 40 | 80 |
| 4-Achs-Kipper | 12 | 13 | 32 | 80 |
| Mittelwert | 17 | 14 | 36 | |

| CO₂ Emissionen durch Abtransport des Aushubmaterials U-Bahn | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| LKW Ladungen | Hinfahrten | Rückfahrten | LKW Fahrten gesamt | Entfernung [km] | Tonnenkilometer Leerfahrt [t km] | Tonnenkilometer mit Ladung [t km] |
| 65 643,73 | 65 643,73 | 65 643,73 | 131 287,46 | 10,00 | 9 190 122,39 | 23 631 743,28 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [kg] | 735 209,79 | 1 890 539,46 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [t] | 735,21 | 1 890,54 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] | 2 625,75 | |

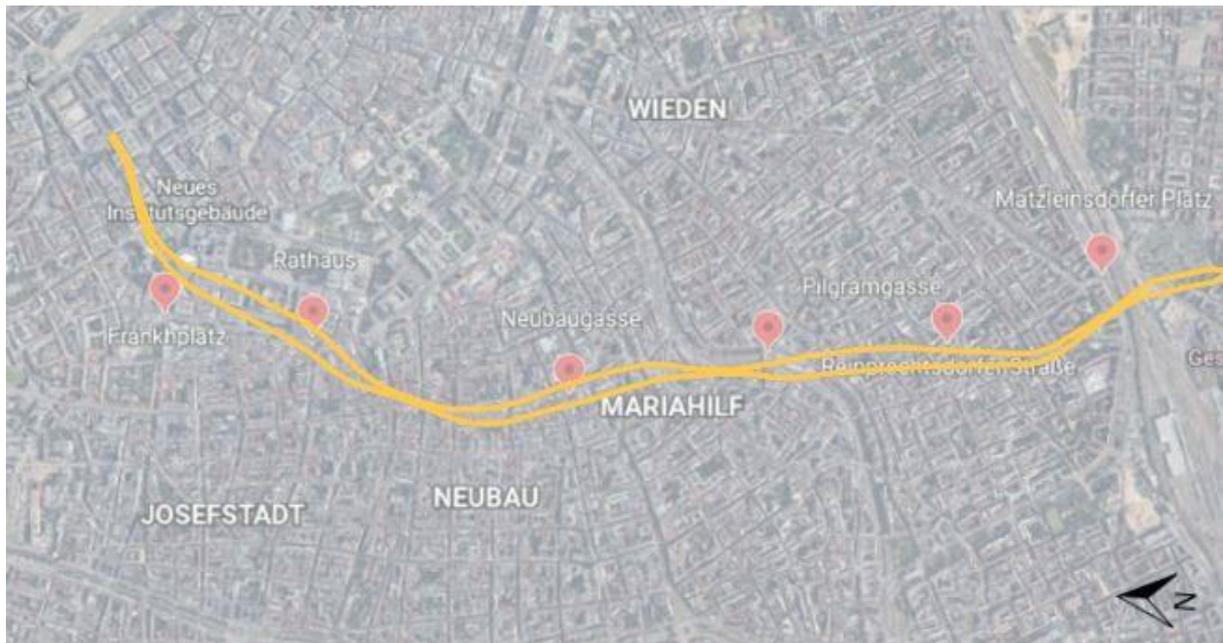
| CO₂ Emissionen durch Fahrmischer | | | | | | |
|--|------------|-------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| LKW Ladungen | Hinfahrten | Rückfahrten | LKW Fahrten gesamt | Entfernung [km] | Tonnenkilometer Leerfahrt [t km] | Tonnenkilometer mit Ladung [t km] |
| 26 903 | 26 903 | 26 903 | 53 806 | 10 | 3 766 420 | 9 685 080 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [kg] | 301 314 | 774 806 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [t] | 301 | 775 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] | 1 076 | |

| CO₂ Emissionen durch Baumaschinen U-Bahn | | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|
| Erdreich [m ³] | CO ₂ Ausstoß [kg] | CO ₂ Ausstoß [t] | 20% Zuschlag [t] | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] |
| 1 083 121,57 | 2 625 749,25 | 2 625,75 | 525,15 | 3 150,90 |

| CO₂ Emissionen durch Abtransport des Aushubmaterials Straßenbahn | | | | | | |
|--|------------|-------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| LKW Ladungen | Hinfahrten | Rückfahrten | LKW Fahrten gesamt | Entfernung [km] | Tonnenkilometer Leerfahrt [t km] | Tonnenkilometer mit Ladung [t km] |
| 804,06 | 804,06 | 804,06 | 1 608,12 | 10,00 | 112 568,48 | 289 461,82 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [kg] | 9 005,48 | 23 156,95 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [t] | 9,01 | 23,16 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] | 32,16 | |

| CO₂ Emissionen durch Fahrmischer Straßenbahn | | | | | | |
|--|------------|-------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| LKW Ladungen | Hinfahrten | Rückfahrten | LKW Fahrten gesamt | Entfernung [km] | Tonnenkilometer Leerfahrt [t km] | Tonnenkilometer mit Ladung [t km] |
| 1 524,94 | 1 525,00 | 1 525,00 | 3 049,89 | 10,00 | 213 500,00 | 549 000,00 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [kg] | 17 080,00 | 43 920,00 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß [t] | 17,08 | 43,92 |
| | | | | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] | 61,00 | |

| CO₂ Emissionen durch Baumaschinen Straßenbahn | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|
| Erdreich [m ³] | CO ₂ Ausstoß [kg] | CO ₂ Ausstoß [t] | 20% Zuschlag [t] | CO ₂ Ausstoß gesamt [t] |
| 13 267,00 | 32 162,42 | 32,16 | 6,43 | 38,59 |



Länge pro Fahrtrichtung: 5,1km



Länge pro Fahrtrichtung: 4,65km

Quelle der Grafiken von Seite 1 bis 25: U2xU5 in 3D der Wiener Linien GmbH & Co KG

Quelle der Grafiken auf Seite 34: Google Earth