

DB Netz AG
Regionalbereich Mitte
Großprojekte
(I.NG-MI-L)
Hahnstraße 49
60528 Frankfurt am Main

Vorstatik, Untersuchung der flachliegenden Rohrschirmen ohne Gewölbe-Wirkung zur Ab- fangung großer Last / Vorpressen Tunnelblock, Machbarkeitsstudie

Knoten Frankfurt; Fernbahntunnel inkl. Station unterhalb des Hbf. Frankfurt/Main

Ersteller(in):	DB Netz AG / Ingenieurgemeinschaft Fernbahntunnel Frankfurt am Main
Verantwortliche(r):	Rainer Lehmann Großprojekte RB Mitte (I.NG-MI-L), DB Netz AG
Version:	0.1, 04.12.2020

Revisionsdokumentation

Version	Datum	Bearbeiter	Beschreibung
0.1	04.12.2020	Mesay Mammo / Nabil Youala	erste Ausgabe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Vorbemerkungen	4
1.2	flachliegende Rohrschirme ohne Gewölbe-Wirkung	5
1.3	Baustoffkennwerte	7
1.4	Unterlagen, Literatur und Programme	7
1.4.1	Technische Vorschriften	7
1.4.2	Literatur und Tabellenwerke	8
1.4.3	Allgemeine Programmbeschreibungen	8
1.4.4	Abweichungen von Regelwerken	8
1.4.5	Verwendete Unterlagen	8
2	Baugrund	9
2.1	Schichtung und Baugrundwerte	9
2.2	Ansatz der Bettung	10
3	Einwirkungen	11
3.1	Eigengewicht der Rohrschirme	11
3.2	Bodenauflast	11
3.3	Gewicht des Continental-Hotels	12
3.4	Verkehrslasten	12
3.5	Grundwasser	12
4	Berechnungsgrundlagen und das statische System	13
4.1	Rohrschirm, Tunnelfirste	13
4.2	Rohrschirm, Tunnelsohle	16
5	Berechnungsergebnisse	18
5.1	Rohrschirm, Tunnelfirste	18
5.2	Rohrschirm, Tunnelsohle	22
5.3	Nachweis Erdwiderstand zur Aufnahme der Pressenkräfte	26
6	Zusammenfassung	30

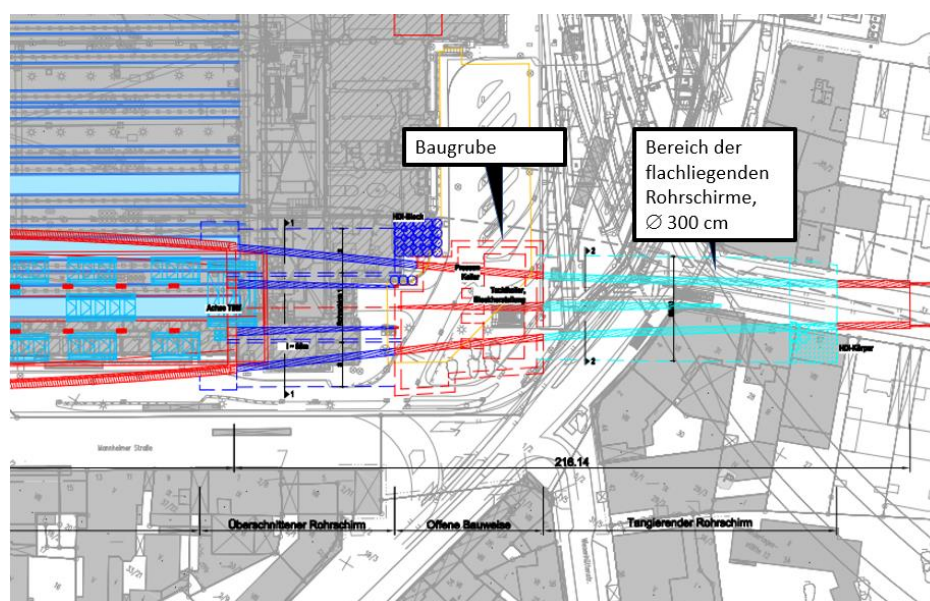
1 Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

Im letzten Abschnitt des Verzweigungsbauwerks der Station (unter die südlich an die U-Bahnstation anschließenden bestehenden Tunnelabzweigungen) werden die Tunnelblöcke im Schutze eines flachen tangierenden Rohrschirm hergestellt. Diese Tunnelblöcke werden vorab in der Offenen Baugrube hergestellt und anschließend eingepresst.

Die folgende Vorstatik befasst sich mit der Untersuchung des letzten Abschnitts der flachliegenden Rohrschirmen ohne Gewölbe-Wirkung zur Abfangung großer Auflasten. Die flachliegende Rohrschirme (Durchmesser ca. 3 m) werden an den beiden Enden auf Schlitzwände aufgelagert und tragen Lasten in Tunnellängsrichtung.

In dieser Vorstatik wird die Standsicherheit der Rohrschirme untersucht. Für die Herstellung der Tunnelblöcke in der offenen Baugrube wird zusätzlich geprüft, ob ein ausreichender Erdwiderstand zur Aufnahme der erforderlichen Pressenkräfte vorhanden ist. Stellvertretend für den Abschnitt flacher Rohrschirme aller Trassenvarianten wird hier Trassenvariante Typ A_S1-O-T1-1_SK_Y untersucht.



**Grundriss, flachliegende Rohrschirme,
Ausschnitt aus Plan Trassenvariante S1-O-T1-1_SK_Y**



Für die Standsicherheitsuntersuchung werden die Abmessungen in dem folgenden Bauwerksquerschnitt berücksichtigt.



Die flachliegende Rohrschirme werden an den beiden Enden auf Schlitzwände aufgelagert und tragen Lasten in Tunnellängsrichtung. Der Tunnelquerschnitt besitzt eine Breite von ca. 33 m und eine Höhe von ca. 22 m einschließlich die Rohrschirme.

Der Tunnelvortrieb wird mit Abschlaglängen von ca. 4 m gefolgt von der Herstellung der Tunnelblöcke in Taktschiebeverfahren durchgeführt. Die Spalte zwischen den Rohrschirme und den Tunnelblöcke wird mit Bentonit geschmiert. Das Schmiermittel soll das Verschieben der Tunnelblöcke ermöglichen. Statt Bentonitschmierung können auch Verschubbahnen zum Einsatz kommen, um die Reibung zwischen den Tunnelblöcke und den Rohrschirme zu reduzieren und eine Auflagerung der Rohrschirme auf den Tunnelblöcke gewährleisten zu können.

Der Tunnel liegt in den Frankfurter Ton. Der Frankfurter Ton ist mit ca. 9 m Quartäre Sande und Kies Schicht überlagert. Die mittlere Überlagerungshöhe des Tunnels beträgt ca. 15 m. Der bauzeitliche Grundwasserstand liegt bei ca. 94 mNN. Der Grundwasserzutritt zwischen den tangierenden Rohren wird durch Vereisung verhindert.

Im Bereich der flachliegenden Rohrschirme befinden sich die folgenden Bauwerke:

- Continental Hotel
- Straßen und Gleise

Geländeoberfläche = ~100,7 mNN

Tunnelfirste = ~85,5 mNN

Tunnelsohle = ~64,3 mNN

Angenommene Fundamentunterkante des Continental-Hotels = ~93,7 mNN

1.3 Baustoffkennwerte

Rohrschirme: Stahlröhre S-235, \varnothing 3 m, Wandstärke = 2 cm
(die Stahlröhre könnten mit Beton verfüllt werden, für die Vorstatik
wird die Verfüllung vernachlässigt)

1.4 Unterlagen, Literatur und Programme

1.4.1 Technische Vorschriften

DIN EN 1990: 2010-12, Grundlagen der Tragwerksplanung

DIN EN 1991-2: 2010-12, Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2

DIN EN 1991-2/NA: 2012-08, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter

DIN EN 1997-1: 2014-03, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik

DIN EN 1997-1/NA: 2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter

DIN 1054:2010, Baugrund- Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau

1.4.2 Literatur und Tabellenwerke

[1] Bentonit Handbuch, Ringspaltschmierung für den Rohrvortrieb, Steffen Praetorius und Britta Schößer.

1.4.3 Allgemeine Programmbeschreibungen

Infocad V 19.10	FE-Berechnungen, InfoGraph GmbH
Microsoft Word V. 2013	Allgemeines Textverarbeitungsprogramm
Microsoft Excel V. 2013	Allgemeines Tabellenkalkulationsprogramm

1.4.4 Abweichungen von Regelwerken

Für die statische Berechnung werden weder Abweichungen noch ergänzende oder zusätzliche Regelungen zu den Vorschriften in Abschnitt 1.4 getroffen.

1.4.5 Verwendete Unterlagen

Zur Bearbeitung der Entwurfsstatik stehen folgende Unterlagen zur Verfügung

- [U1] Knoten Frankfurt, Fernbahntunnel inkl. Station unterhalb des HBF Frankfurt/Main, Machbarkeitsstudie, Bericht Nr. IK2024/01, Grundlagenermittlung: Beschreibung der Bau- grund- und Grundwasserverhältnisse für den geplanten Fernbahntunnel, IK, KATZEN- BACH INGENIEURE, 08.06.2020.
- [U2] Knoten Frankfurt, Fernbahntunnel inkl. Station unterhalb des HBF Frankfurt/Main, Machbarkeitsstudie, Pläne, Bearbeitungszustand 11.2020, DB Netz AG / Ingenieurgemein- schaft Fernbahntunnel Frankfurt am Main.

2 Baugrund

2.1 Schichtung und Baugrundwerte

Der Schichtaufbau des Baugrundes sowie die Baugrundkennwerte werden gemäß [U1] angesetzt.

- Frankfurter Ton (Wechselagerung, Gebirgsparameter)			
Wichte des feuchten Bodens:	γ	=	18 - 19 kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'	=	8 - 9 kN/m ³
Endscherfestigkeit:			
• Reibungswinkel:	φ'	=	20°
• Kohäsion:	c'	=	20 kN/m ²
Anfangsscherfestigkeit:			
• Reibungswinkel:	φ_u	=	0°
• Kohäsion:	c_u	=	≥ 100 kN/m ² (vgl. Bild 4)
Steifemodul:			
• Erstbelastung:	$E_{s,E}$	=	$7 \cdot (1 + 0,35 \cdot z)$ [MN/m ²] (z in m ab OK Tertiär)
• Wiederbelastung:	$E_{s,W}$	=	$3 \cdot E_{s,E}$

Charakteristische Bodenkennwerte, Frankfurter Ton [U1]

In dem geotechnischen Bericht sind für die Quartäre Sande und Kiese keine Kennwerte vorgegeben. Ein Reibungswinkel von $\varphi=30^\circ$ ohne Kohäsion wird angenommen.

2.2 Ansatz der Bettung

Die Bettung der Rohrschirme hinter der Ortsbrust wird wie folgt angesetzt:

$$\Rightarrow \text{Frankfurter Ton, Steifemodul (Es)} = 7 \cdot (1 + 0,35 \cdot z) = 7 \cdot (1 + 0,35 \cdot (92 - 85,5)) = 24 \text{ MN/m}^2$$

$$\Rightarrow \text{Bettung, } k = E_s / D \text{ mit } D = 3 \text{ m (entspricht der Durchmesser der Rohrschirme)}$$

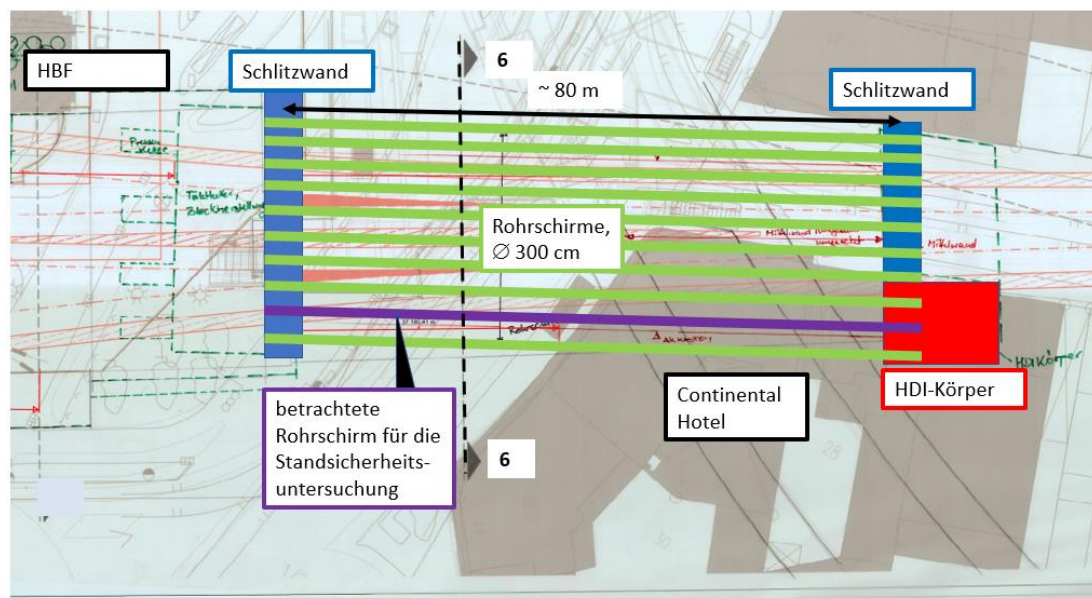
$$\Rightarrow k = 24 \text{ MN/m}^2 / 3 \text{ m} = 8 \text{ MN/m}^3$$

Die Spalte zwischen den Rohrschirmen und den Tunnelblöcken wird mit Bentonit geschmiert. Das Schmiermittel soll das Vorpressen der Tunnelblöcke ermöglichen. Statt der Bentonitschmierung können auch Verschubbahnen zum Einsatz kommen, um die Reibung zwischen den Tunnelblöcken und den Rohrschirmen zu reduzieren und eine Auflagerung der Rohrschirme auf die Tunnelblöcke gewährleisten zu können. Für die statische Berechnung wird die Bettung der Rohrschirme oberhalb der Tunnelblöcke genau so groß wie die Bettung hinter der Ortsbrust angenommen.

3 Einwirkungen

Für das statische System werden nur einzelne Rohrschirme betrachtet, da die Rohrschirme an den beiden Enden auf Schlitzwände aufgelagert werden und Lasten hauptsächlich in Tunnel längsrichtung tragen.

Nachfolgend werden die Einwirkungen auf zwei Rohrschirme aus den Bereichen der Tunnelfirste und Tunnelsohle ermittelt. Die gewählten Rohrschirme befinden sich im Bereich des Continental-Hotels.



betrachtete Rohrschirme

3.1 Eigengewicht der Rohrschirme

Das Eigengewicht der Rohrschirme wird vom Programm intern ermittelt.

3.2 Bodenauflast

neben des Continental-Hotels:

$$(100,7-95) \text{ m} \cdot 20 \text{ kN/m}^3 + (95-92) \text{ m} \cdot 10 \text{ kN/m}^3 + (92-85,5) \text{ m} \cdot 9 \text{ kN/m}^3 = 203 \text{ kN/m}^2$$

unterhalb des Continental-Hotels (Fundamentunterkante wird bei ca. 93,7 mNN angenommen):

$$(93,7-92) \text{ m} \cdot 10 \text{ kN/m}^3 + (92-85,5) \text{ m} \cdot 9 \text{ kN/m}^3 = 76 \text{ kN/m}^2$$

3.3 Gewicht des Continental-Hotels

(~9 Stock einschließlich Untergeschosse) $\approx 9 \cdot 20 \text{ kN/m}^2 = 180 \text{ kN/m}^2$

Die Ausbreitung der Lasten unterhalb des Fundaments wird auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.

3.4 Verkehrslasten

vereinfacht wird LM1 auf Hinterfüllung berücksichtigt:

$$p_v = 2 \times 300 \text{ kN} / (3 \text{ m} \times 5 \text{ m}) + 12 \text{ kN/m}^2 = 52 \text{ kN/m}^2$$

3.5 Grundwasser

Gemäß Baugrundgutachten [U1] ist den Grundwasserstand wie folgt zu berücksichtigen.

Für den Entwurf der geplanten, 4-gleisigen unterirdischen Station im Hauptbahnhof haben wir den Bemessungsgrundwasserstand wie folgt spezifiziert:

- Bemessungsgrundwasserstand Baugrube (bauzeitlich): $\text{GW}_{\text{Bau}} = 94,0 \text{ mNN}$
- Bemessungsgrundwasserstand Bauwerk (Betrieb Bauwerk): $\text{GW}_{\text{End}} = 95,0 \text{ mNN}$

Grundwasser [U1]

Wasserdruck auf der Rohrschirme an der Tunnelfirste $= (95 - 85,5) \cdot 10 \text{ kN/m}^3 = 95 \text{ kN/m}^2$

Wasserdruck auf der Rohrschirme an der Tunnelsohle $= (95 - 64,3) \cdot 10 \text{ kN/m}^3 = 310 \text{ kN/m}^2$

4 Berechnungsgrundlagen und das statische System

Die Bemessung der Rohrschirme wird mit dem FE-Programm von InfoCAD durchgeführt.

Die Rohrschirme werden an den beiden Enden auf Schlitzwände aufgelagert und tragen Lasten hauptsächlich in Tunnellängsrichtung.

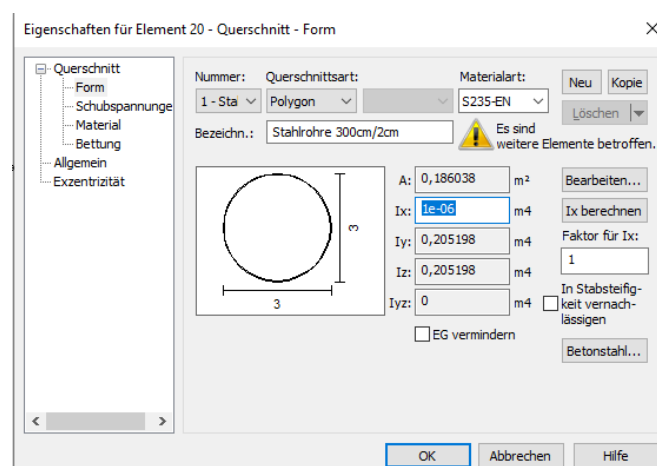
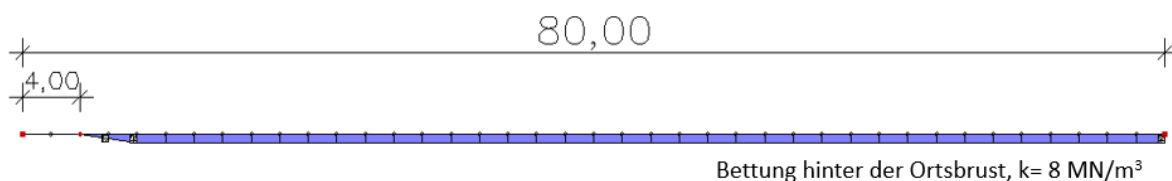
Hinter der Ortsbrust und oberhalb der Tunnelblöcke wird eine Bettung von $k = 8 \text{ N/m}^3$ angenommen.

Die ermittelten Lasten werden zur Berücksichtigung der Primärsetzung des Bodens nur im Bereich des offenen Tunnelabschlags aufgebracht.

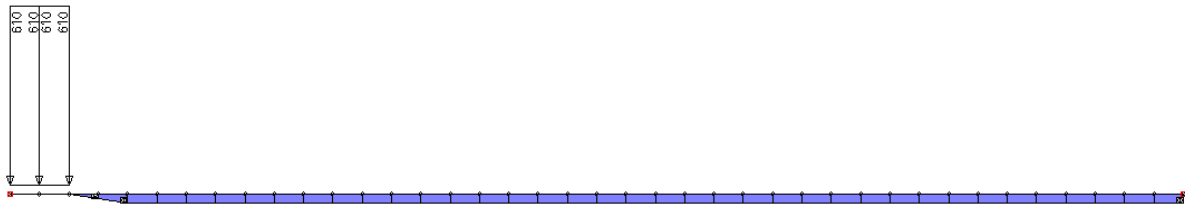
4.1 Rohrschirm, Tunnelfirste

Statische System und Belastungen:

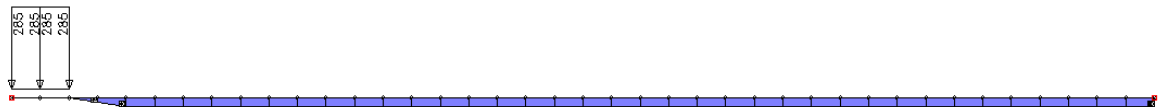
Fall a): Erste Aushubphase (4 m Abschlag):



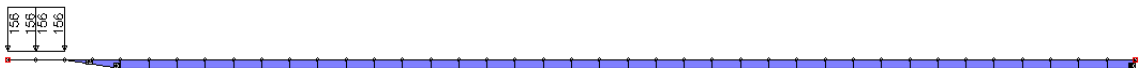
Statisches System und angenommene Querschnitt des Stahlrohrs



$$\text{Auflast} = 3 \text{ m} * 203 \text{ kN/m}^2 = 610 \text{ kN/m}$$

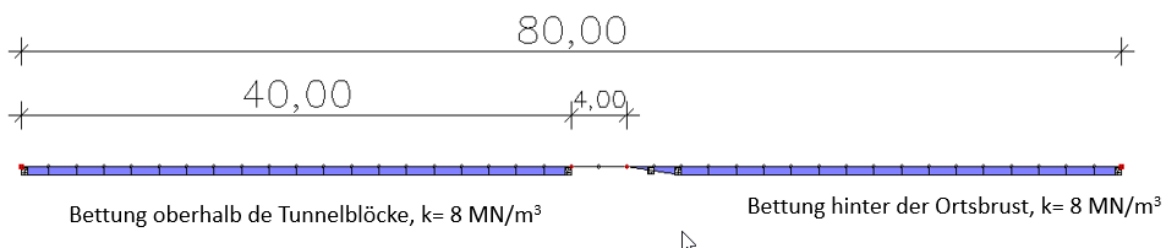


$$\text{Wasserdruck} = 3 \text{ m} * 95 \text{ kN/m}^2 = 285 \text{ kN/m}$$

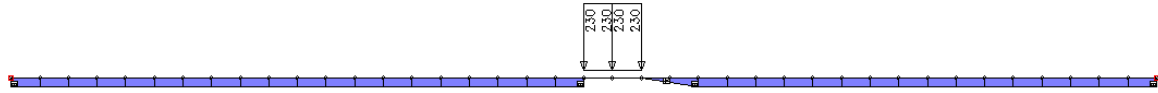


$$\text{Verkehrslast} = 3 \text{ m} * 52 \text{ kN/m}^2 = 156 \text{ kN/m}$$

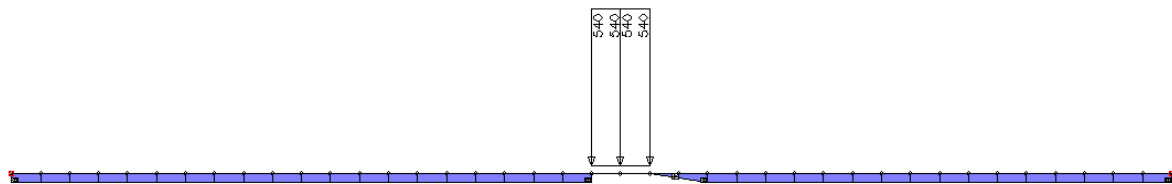
Fall b) 4 m Abschlag (Tunnelmitte), ca. 40 m vom Portal



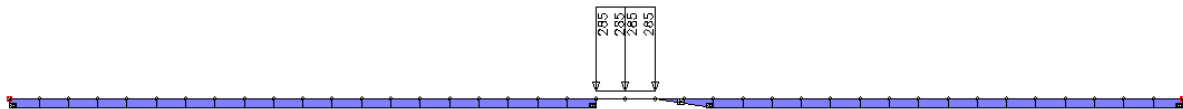
Statisches System



$$\text{Auflast} = 3 \text{ m} \cdot 76 \text{ kN/m}^2 = 230 \text{ kN/m}$$



$$\text{Gewicht des Continental-Hotels} = 3 \text{ m} \cdot 180 \text{ kN/m}^2 = 540 \text{ kN/m}$$



$$\text{Wasserdruck} = 3 \text{ m} \cdot 95 \text{ kN/m}^2 = 285 \text{ kN/m}$$

Fall c) 4 m Abschlag (Tunnelende), ca. 76 m vom Portal

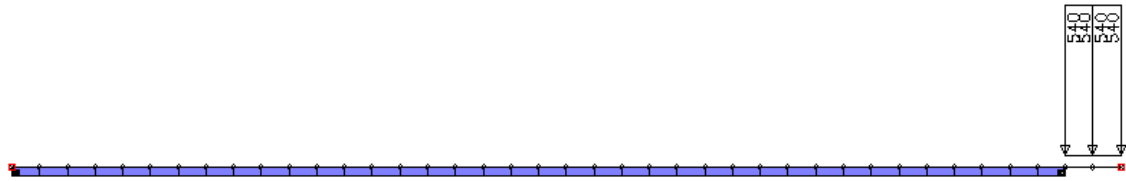


Bettung oberhalb de Tunnelblöcke, $k = 8 \text{ MN/m}^3$

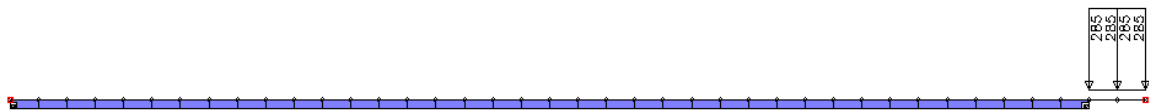
Statisches System



$$\text{Auflast} = 3 \text{ m} \cdot 203 \text{ kN/m}^2 = 610 \text{ kN/m} \text{ bzw. } 3 \text{ m} \cdot 76 \text{ kN/m}^2 = 230 \text{ kN/m}$$



$$\text{Gewicht des Continental Hotels} = 3 \text{ m} * 180 \text{ kN/m}^2 = 540 \text{ kN/m}$$

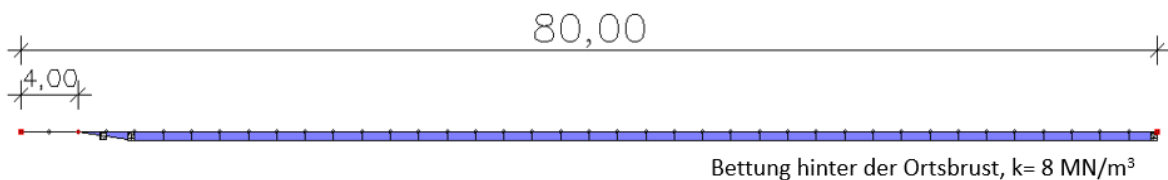


$$\text{Wasserdruck} = 3 \text{ m} * 95 \text{ kN/m}^2 = 285 \text{ kN/m}$$

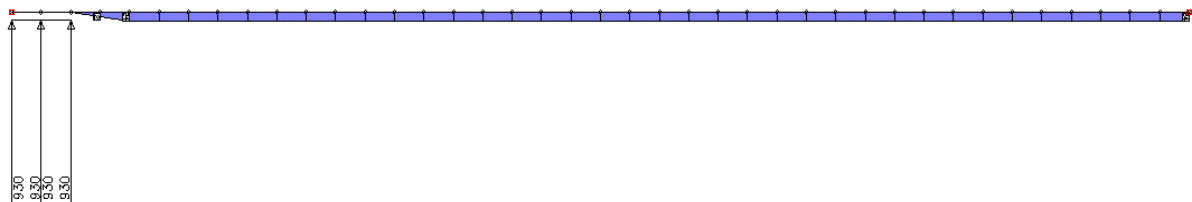
4.2 Rohrschirm, Tunnelsohle

Statische System und Belastungen:

Fall a): erste Aushubphase (4 m Abschlag):

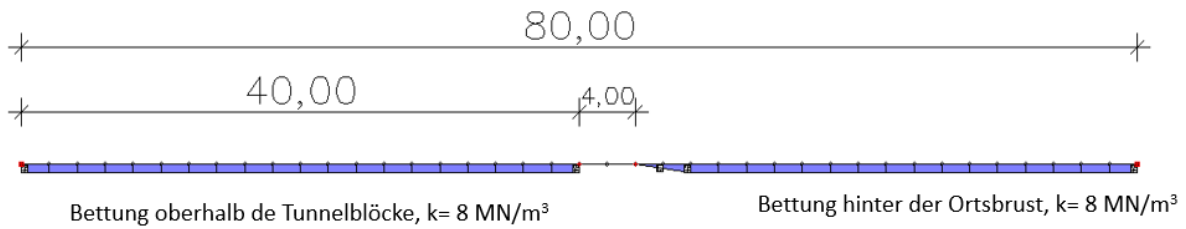


Statisches System

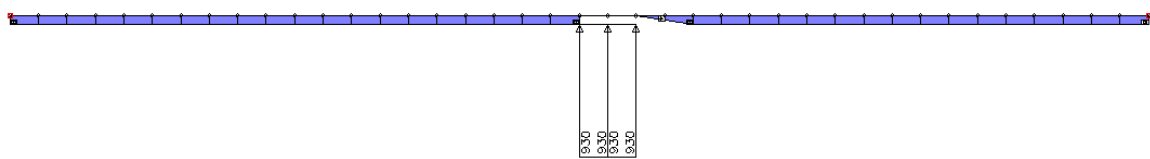


$$\text{Wasserdruck} = 3 \text{ m} * 310 \text{ kN/m}^2 = 930 \text{ kN/m}$$

Fall b) 4 m Abschlag (Tunnelmitte), ca. 40 m vom Portal

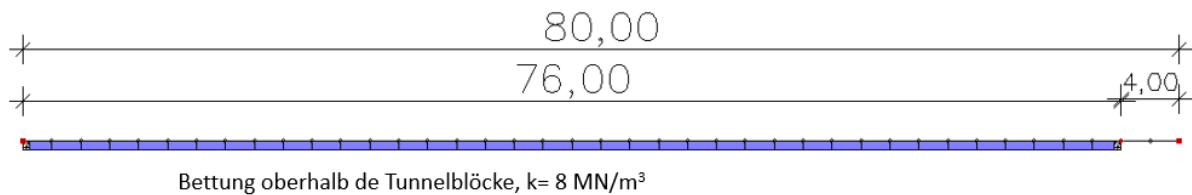


Statisches System

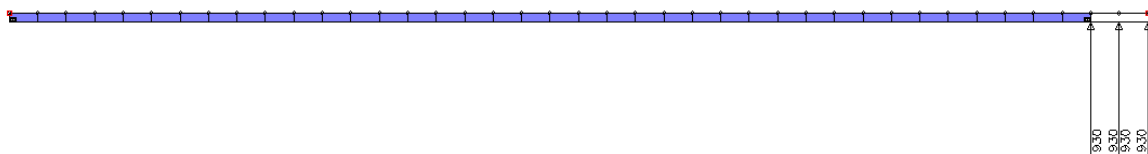


$$\text{Wasserdruck} = 3 \text{ m} \cdot 310 \text{ kN/m}^2 = 930 \text{ kN/m}$$

Fall c) 4 m Abschlag (Tunnelende), ca. 76 m vom Portal



Statisches System



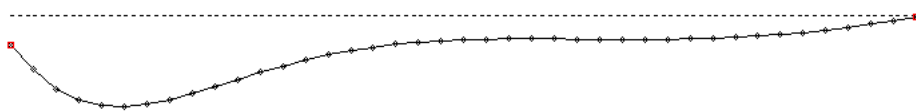
$$\text{Wasserdruck} = 3 \text{ m} \cdot 310 \text{ kN/m}^2 = 930 \text{ kN/m}$$

5 Berechnungsergebnisse

5.1 Rohrschirm, Tunnelfirste

Fall a): Erste Aushubphase (4 m Abschlag):

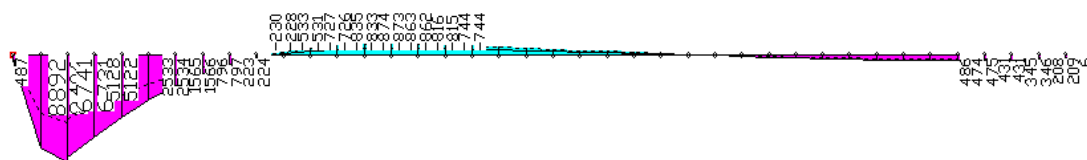
Verformungen:



LFK EN1993.C.1: 1. Seltene (charakteristische) Situation, DIN EN 1993-1-1
Deformationen u (max uz) [mm], Faktor = 1159,9
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,90 [mm]

Schnittgrößen:

My;



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max My. 4133,37 [kNm] = ————
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -874,19/8891,63 [kNm]

Qz



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max Qz. 1656,32 [kN] = ————
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -832,76/3563,04 [kN]

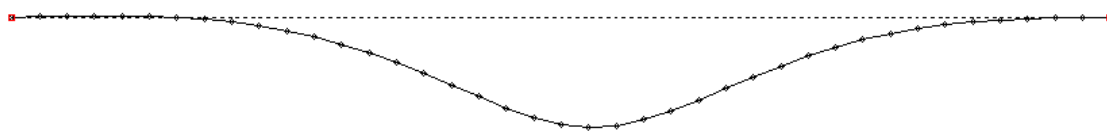
Bemessung des Stahlrohrs:



Ausnutzung nach DIN EN 1993-1-1, 0,13 [-] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/0,29 [-]

Fall b) 4 m Abschlag (Tunnelmitte), ca. 40 m vom Portal

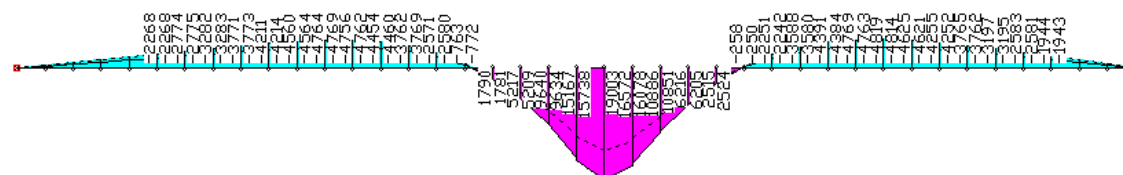
Verformungen:



LFK EN1993.C.1: 1. Seltene (charakteristische) Situation, DIN EN 1993-1-1
Deformationen u (min uz) [mm], Faktor = 284,4
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/28,13 [mm]

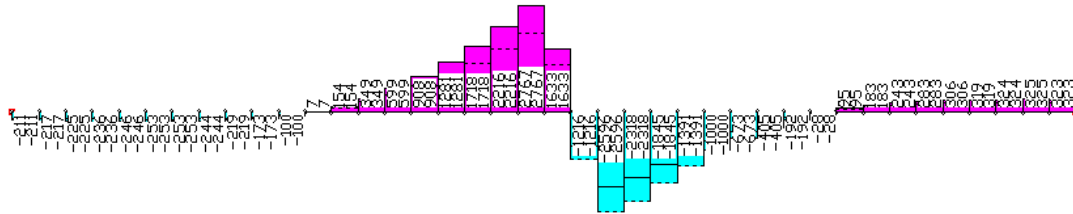
Schnittgrößen:

My;



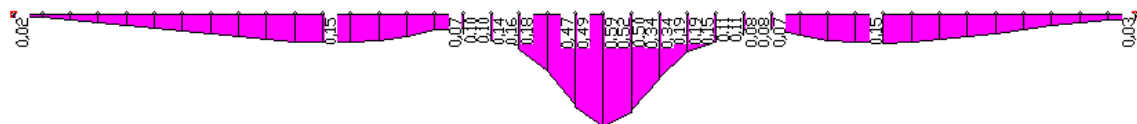
LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max My, 8833,92 [kNm] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -4819,07/19003,37 [kNm]

Qz



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max Qz. 1286,09 [kN] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -2596,08/2766,62 [kN]

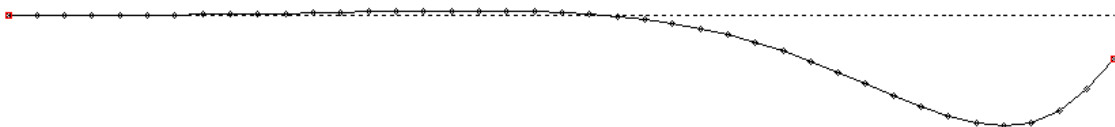
Bemessung des Stahlrohrs:



Ausnutzung nach DIN EN 1993-1-1, 0,27 [-] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,02/0,59 [-]

Fall c) 4 m Abschalp (Tunnelende), ca. 76 m vom Portal

Verformungen:



LFK EN1993.C.1: 1. Seltene (charakteristische) Situation, DIN EN 1993-1-1
Deformationen u (max uz) [mm], Faktor = 1466,6
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/5,45 [mm]

5.2 Rohrschirm, Tunnelsohle

Fall a): erste Aushubphase (4 m Abschlag):

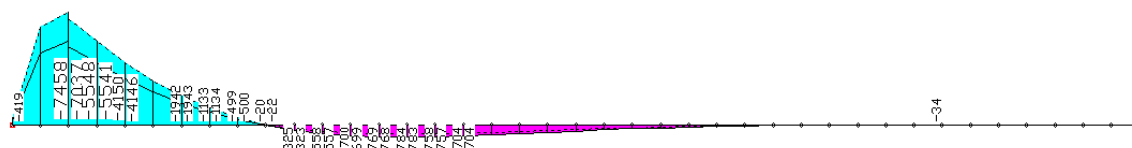
Verformungen:



LFK EN1993.C.1: 1. Seltene (charakteristische) Situation, DIN EN 1993-1-1
Deformationen u (max uz) [mm], Faktor = 1694,0
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/4,72 [mm]

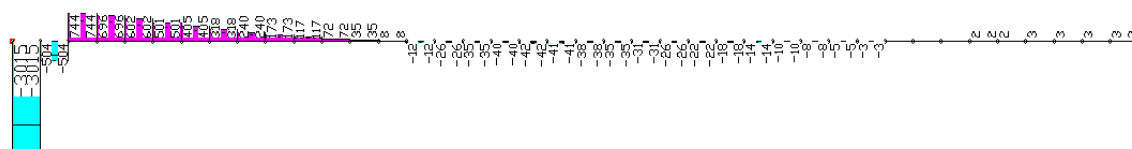
Schnittgrößen:

My;



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max My, 2680,41 [kNm] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -7458,34/783,69 [kNm]

Qz



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max Qz, 1083,71 [kN] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -3015,46/744,28 [kN]

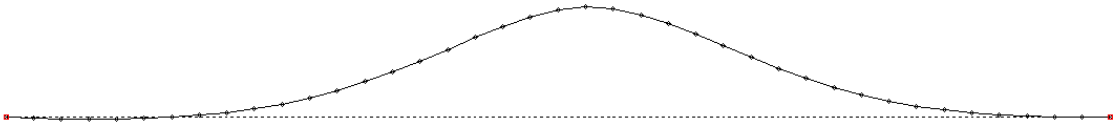
Bemessung des Stahlrohrs:



Ausnutzung nach DIN EN 1993-1-1, 0,09 [-] = ———
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/0,24 [-]

Fall b) 4 m Abschlag (Tunnelmitte), ca. 40 m vom Portal

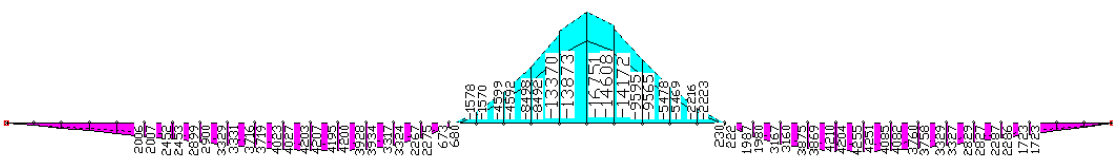
Verformungen:



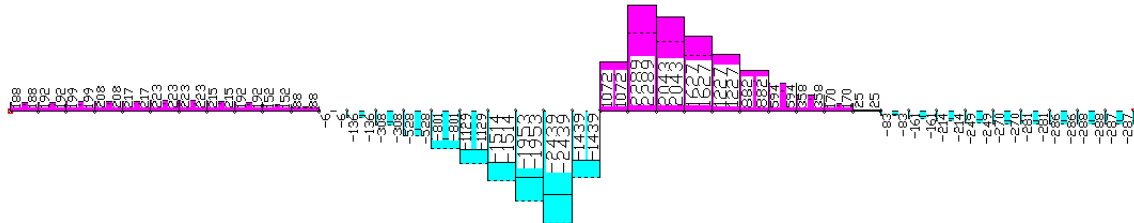
LFK EN1993.C.1: 1. Seltene (charakteristische) Situation, DIN EN 1993-1-1
Deformationen u (min uz) [mm], Faktor = 322,6
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/24,80 [mm]

Schnittgrößen:

My;

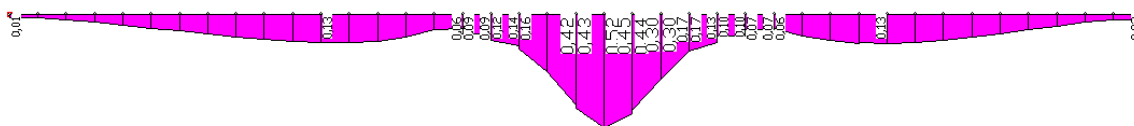


Qz



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max Qz: 876,44 [kN] = 1
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -2438,74/2288,61 [kN]

Bemessung des Stahlrohrs:



Ausnutzung nach DIN EN 1993-1-1, 0,19 [-] = 1
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,01/0,52 [-]

Fall c) 4 m Abschlag (Tunnelende), ca. 76 m vom Portal

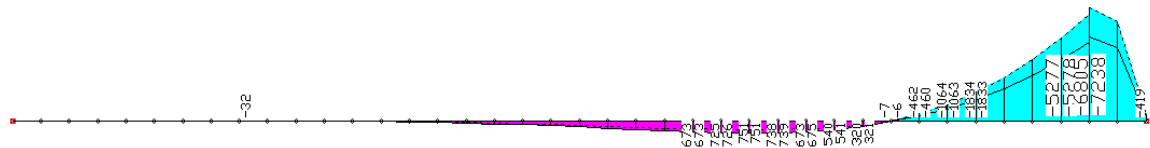
Verformungen:



LFK EN1993.C.1: 1. Seltene (charakteristische) Situation, DIN EN 1993-1-1
Deformationen u (max uz) [mm], Faktor = 1764,9
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/4,53 [mm]

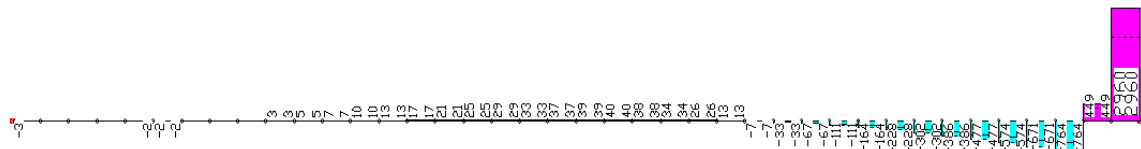
Schnittgrößen:

My;



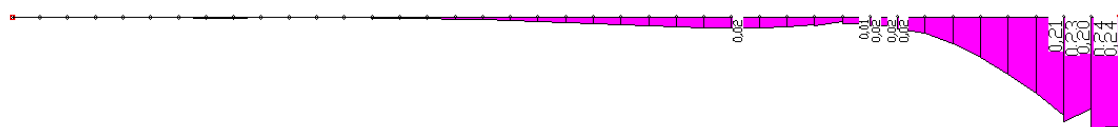
LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max My: 2601,25 [kNm] = ---
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -7238,05/751,48 [kNm]

Qz



LFK EN1993.SV.1: 1. Ständige und vorübergehende Situation, DIN EN 1993-1-1
Schnittgrößen min,max Qz: 1063,92 [kN] = ---
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -763,67/2960,39 [kN]

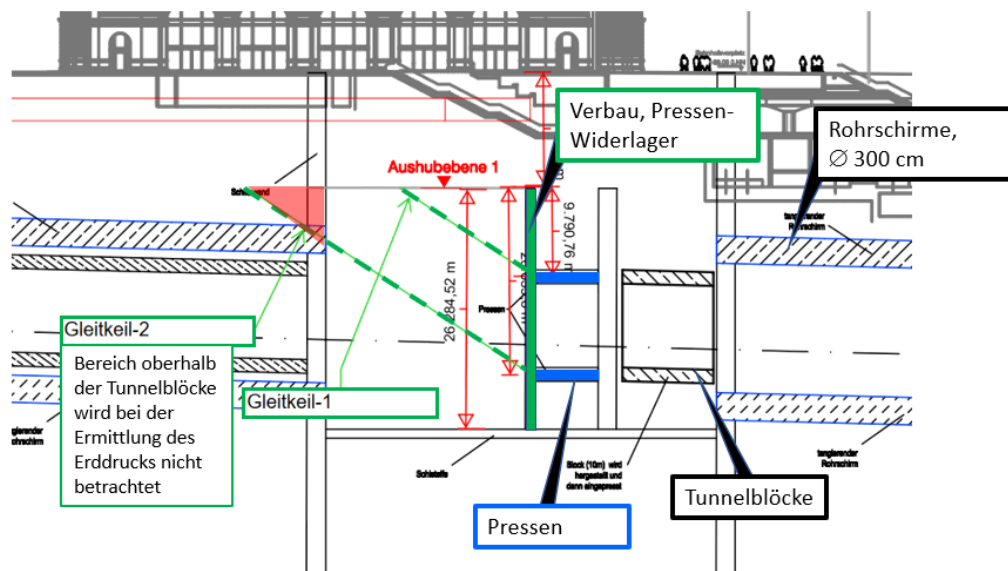
Bemessung des Stahlrohrs:



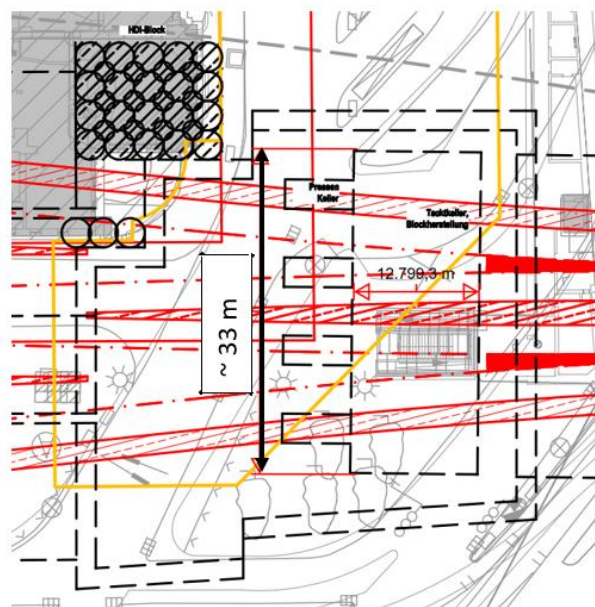
Ausnutzung nach DIN EN 1993-1-1, 0,09 [-] = ---
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/0,24 [-]

5.3 Nachweis Erdwiderstand zur Aufnahme der Pressenkräfte

Die Tunnelblöcke werden aus der Baugrube mit Hilfe von Pressen in ihrer Lage verschoben. Nachfolgend wird ein vereinfachter Nachweis durchgeführt, um zu prüfen, ob der vorhandene Erdwiderstand zur Aufnahme der Pressenkräfte ausreicht (vgl. folgende Abbildung).



Anordnung der Pressen und betrachtete Gleitkeile



Ausrichtung der Pressen

Ermittlung des Erdwiderstands für Gleitkeil 1:

Gleitkeil 1

φ	20 °
c	20 kPa
$\alpha=\beta=$	0 °
δ	0
k_{pgh}	2,3473
k_{pch}	3,7017
h1	9,7 m
γ	19 kN/m ³
γ'	9 kN/m ³
$\sigma_h=\gamma' \cdot h$	87,3 kN/m ²
$e_{ph}=k_{pgh} \cdot \sigma_h + k_{pch} \cdot c$	279 kN/m ²
$E_{aph}=0,5 \cdot e_{ph} \cdot h$	1353 kN/m
Wandlänge=l	33 m
Gesamtwiderstand	45 MN
Gleitwinkel= $45-\varphi/2$	35 °

Ermittlung des Erdwiderstands für Gleitkeil 2:

Gleitkeil 2

φ	20 °
c	20 kPa
$\alpha=\beta=$	0 °
δ	0
k_{pgh}	2,3473
k_{pch}	3,7017
h2	20 m
γ	19 kN/m ³
γ'	9 kN/m ³
$\sigma_h=\gamma' \cdot h$	180 kN/m ²
$e_{ph}=k_{pgh} \cdot \sigma_h + k_{pch} \cdot c$	497 kN/m ²
$E_{aph}=0,5 \cdot e_{ph} \cdot h$	4965 kN/m
Wandlänge=l	33 m
Gesamtwiderstand (nur 75 % der Erddruck betrachtet)	123 MN
Gleitwinkel= $45-\varphi/2$	35 °

Einschätzung der erforderlichen Pressenkräfte anhand Erfahrungswerte aus Rohrvortrieb:

Die folgende Tabelle stellt Erfahrungswerte der Mantelreibungen aus Rohrvortriebe mit Hilfe von Bentonitschmierung dar. Um Einpressen der Tunnelblöcke zu ermöglichen, soll die Mantelreibung einen Wert von ca. $7,5 \text{ kN/m}^2$ nicht übersteigen.

Spezifische Mantelreibung [kN/m^2]	Bewertung
0,50–0,75	extrem gut (selten)
0,75–1,25	sehr gut
1,25–1,75	gut
1,75–2,75	akzeptabel
2,75–4,00	schlecht
4,00–7,50	sehr schlecht
7,50–10,0	kurz vor Feststecken
10,0–12,5	partiell oder komplettes Feststecken

Bewertung der spezifischen Mantelreibung nach Erfahrungswerten aus Rohrvortriebe [1].

Die erforderliche Pressenkräfte werden für eine Mantelreibungswert von $7,5 \text{ kN/m}^2$ wie folgt ermittelt.

Tunnelumfang [u] 100 m
Mantelreibung (τ) $7,5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Blöcklängen, L	erforderliche Pressenkraft = $U * \tau * L$
[m]	[MN]
10	7,5
20	15
30	22,5
40	30

Einschätzung der erforderlichen Pressenkräfte anhand Reibungsbeiwerte:

Mittelwert der Belastung auf der Rohrschirme aus Vorstatik $[\sigma] = 76+180+95=$	350	kN/m^2
Tunnelumfang $[u]$	100	m
Reibung Stahl-Beton (μ_1)	0,2	
Reibung Stahl-Beton, mit Bentonitschmierung (μ_2)	0,05	(entspricht eine Mantelreibungswert von ca. 16 kN/m^2)

Blöcklängen, L	Kraft, $F = \sigma \cdot u \cdot L$	erforderliche Pressenkraft, ohne Schmierung = $F \cdot \mu_1$	erforderliche Pressenkraft, mit Schmierung = $F \cdot \mu_2$
[m]	[MN]	[MN]	[MN]
10	350	70	18
20	700	140	35
30	1050	210	53
40	1400	280	70

Die überschlägigen Berechnungen zeigen, dass die erforderliche Pressenkräfte deutlich unterhalb der ermittelten Erdwiderstände liegen, gegebenenfalls können Zwischenpressstationen angeordnet werden.

6 Zusammenfassung

Zusammenstellung der Ergebnisse:

Tangierende Rohrschirme:

Durchmesser:	300 cm
Länge	~80-85 m
Material	Stahlröhre S-235, Wanddicke 2 cm (könnten mit Beton verfüllt werden)
Tunnel Abschlaglänge:	ca. 4 m

Die Spalte zwischen den Rohrschirme und den Tunnelblöcke ist mit Bentonit zu schmieren.

Die Berechnungen zeigen, dass das vorgeschlagene Bauverfahren mit Hilfe von flachliegenden Rohrschirme machbar ist. Voraussetzung dafür ist, dass die Bentonitschmierung bzw. die Verschiebbahn zwischen die Rohrschirme und die Tunnelblöcke das Gleiten der Tunnelblöcke zulässt.

Entscheidend für die Bemessung der Rohrschirme und die Ermittlung der Setzungen des Baugrunds ist der Ansatz der Bettung hinter der Ortsbrust und oberhalb der Tunnelblöcke. Die berechnete Verformungen der Rohrschirme betragen maximal bis zu 2,8 cm und damit sind geringe Oberflächensetzungen zu erwarten.

Für das Vorpressen der Tunnelblöcke in ihrer Lage und die Ermittlung der erforderlichen Presskraft ist die zu erwartende Mantelreibung der Bentonitschmierung von größerer Bedeutung. Die überschlägigen Berechnungen zeigen, dass es einen ausreichenden Erdwiderstand zur Aufnahme der Pressenkräfte zur Verfügung steht, gegebenenfalls sind Zwischenpressstationen anzuordnen.

Das Beschaffenheit des Bentonits und die Anordnung einer Verschiebbahn soll in die Entwurfsplanung untersucht werden. In der Entwurfsplanung soll der Ansatz der Bettungen und die Mantelreibung der Bentonitschmierung mit dem Bodengutachter abgestimmt werden.

Frankfurt am Main den 04.12.2020

aufgestellt: Mesay Tsegaye, Mammo (M.Sc.)

gesehen: Nabil Youala (Dipl. -Ing.)