

Gutachten zur Bettungsermittlung

BV: Techowbrücke (Tek km 22.040) in Berlin Tempelhof

Auftraggeber: Wasserstraßen-Neubauamt Berlin
Mehringdamm 129
10965 Berlin

**Gutachten
Beratung
Planung
Bauüberwachung**

Bearbeiter: Dr.techn. B. Schädlich
Dr.-Ing. I.-K. Fontara
Dr.-Ing. J. Mittag

Geschäftsführer und Prokuristen
Dr.-Ing. Silke Appel
Dr. rer. nat. Götz Hirschberg
Dr.-Ing. Fabian Kirsch¹
Dr.-Ing. Jens Mittag¹
Dipl.-Ing. Univ. Nikolaus Schneider
Dipl.-Ing. Kerstin Deterding (ppa.)⁴
Dipl.-Ing. Hilmar Leonhardt (ppa.)

Senior-Partner
Prof. Dr.-Ing. Kurt-M. Borchert²
Dipl.-Ing. Hans L. Hebener
Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter³
em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis

¹ Anerkannter Prüfsachverständiger für
den Erd- und Grundbau.

² von der IHK Berlin öffentlich bestellter und
vereidigter Sachverständiger für Baugruben,
Injektionen und Bauwerksabdichtungen im
Untergrund.

³ von der IHK Berlin öffentlich bestellter und
vereidigter Sachverständiger für Gründungen,
Wasserhaltungen, Erschütterungen im
Baugrund.

⁴ EBA-Gutachter für Geotechnik bei Bau-
maßnahmen im Eisenbahnbau.

Berlin, den 29.11.2021

Berichtsnummer: G 107-15/15_Rev.00

Dieser Bericht umfasst 40 Seiten und 5 Anlagen.

K:\8Brücken_G107.15\G107-15.15_Techow_FE\04_Bericht\211129_G107-
15.15_Rev.00_Techowbrücke.Fo.BeS.docx

Revisionsblatt für Bericht G 107-15/15_Rev.00

Revision	Datum	Bemerkung	erstellt	geprüft / freigegeben
00	29.11.2021	Ersterstellung	Fo	BeS/Mi

INHALTSVERZEICHNIS

0	ZUSAMMENFASSUNG	4
1	UNTERLAGENVERZEICHNIS	5
1.1	Baugrund (Geotechnische Bericht)	5
1.2	Bestandsbauwerke, Nachbarbebauung (Techowbrücke, Kanal, Uferwand)	5
1.3	Neubau Techowbrücke	6
1.4	Normen und Regelwerke	6
1.5	Sonstige Unterlagen	7
2	BESCHREIBUNG DES BAUVORHABENS	8
2.1	Allgemeines	8
2.2	Bauwerkslasten	12
2.3	Bodenschichtung und Kennwerte	12
2.4	Baugrundverbesserung	14
3	BERECHNUNGSMODELL	15
3.1	Modellgeometrie und Baugrundsichtung	15
3.2	Bestands-Uferwand und Rückverankerung	19
3.3	Bestandsfundamente der vorhandenen Brücke	20
3.4	Baugrube	21
3.5	Grundwasser	22
3.6	Materialmodell und Materialparameter für den Boden	22
3.7	Widerlager des Neubaus und Brückenlasten	25
3.8	Baugrundverbesserungsmaßnahmen	26
3.9	Berechnungsphasen	27
4	ERGEBNISSE	28
4.1	Verformung der Widerlager	28
4.2	Bettung der Widerlager	30
4.3	Bettung der Spundwände	34
4.4	Überprüfung der Grenztiefe	36
5	BANDBREITE DER BETTUNGSSTEIFIGKEITEN FÜR DIE TRAGWERKS-BERECHNUNG	38
6	UNTERSCHRIFTEN	39
	ANLAGENVERZEICHNIS	40

0 ZUSAMMENFASSUNG

Die bestehende Techowbrücke über den Teltowkanal bei km 22,040 soll durch einen Neubau (Bogenbrücke) an gleicher Stelle ersetzt werden. Für das südliche Widerlager ist eine Ertüchtigung des Bodens mittels Düsenstrahlverfahrens vorgesehen, um die Setzungen des Brückenfundamentes zu reduzieren. Für das nördliche Widerlager sind keine Baugrundverbesserungsmaßnahmen geplant.

Für das Berechnungsmodell des Tragwerksplaners zur Schnittkraftermittlung und statischen Bemessung der Techowbrücke ist es erforderlich, Bettungswerte für die Widerlager mit einem geotechnischen Berechnungsmodell zu ermitteln. Der vorliegende Bericht beschreibt den Aufbau und die Auswertung der geotechnischen Berechnungsmodelle sowie die Ableitung der Bettungsmoduli für die beiden Widerlager der neuen Brücke.

Für die Ermittlung der Bettungen wurden die Brückenwiderlager mit dem angrenzenden Boden in einem 3D-FE-Modell abgebildet, wobei die Baugrundsichtung, der Rückbau der Bestandsbrücke sowie der Bauablauf des Neubaus berücksichtigt wurden. Die Bettungen wurden für den Lastfall ($G + 0,3 \cdot Q$) ermittelt. Die mittleren Bettungswerte für die Widerlager und die rückseitigen Spundwände sind in Kap. 4.2 und in Kap. 4.3 dargestellt. Zur Überprüfung und Aktualisierung des Berechnungsmodells des Tragwerksplaners sind zudem die Verformungen der Widerlager unter charakteristischen Lasten ($G + Q$) in Kap. 4.1 dargestellt. In Kap. 5 werden Vorgaben zur anzusetzenden Bandbreite der Bettungen in der Tragwerksplanung gegeben.

1 UNTERLAGENVERZEICHNIS

1.1 Baugrund (Geotechnische Bericht)

- [S 1] Geotechnischer Bericht (Hauptuntersuchung) zum Bauvorhaben Techowbrücke - Ersatzneubau der Straßenbrücke über dem Teltowkanal (km 22,040) in 12105 Berlin, verfasst von GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Bericht Nr. G107-8/15, Revision 0, 22.12.2016
- [S 2] Ergänzung zum Geotechnischen Bericht Bauvorhaben Techowbrücke - Ersatzneubau der Straßenbrücke über den Teltowkanal (km 22,040) in 12105 Berlin, verfasst von GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Bericht Nr. G 107-12/15, Revision 0, 09.09.2020
- [S 3] Vergleich der Ergebnisse der Untersuchung Teubertbrücke mit den Ergebnissen der Techowbrücke (Bettungswerte), verfasst von GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Stellungnahme vom 18.11.2020

1.2 Bestandsbauwerke, Nachbarbebauung (Techowbrücke, Kanal, Uferwand)

- [L 1] Zeichnungs-Nr. Tk 18-10 zur Uferbefestigung unter der Techowbrücke mittels verankerter Bohrpfahlwand, Senat für Stadtentwicklung und Umweltschutz, IVcA, Berlin, den 15.04.1985
- [L 2] Statische Berechnung der Uferwand unter der Techowbrücke zur Abschätzung der Verformung der Widerlager für das BV „Ausbau des Teltowkanals“, Ingenieurbüro für Grundbau und Bodenmechanik Elmiger und Karstedt GmbH, 14.11.1984
- [L 3] Abschnitt zur Ufereinfassung „1985-09-19 BB Ufereinfassung Techow-Teubert an KuK“
- [L 4] Uferbefestigung unter der Techowbrücke, Bohrpfahlwand Techowbrücke, Draufsicht, Ansicht, Schnitt u. Details vom 12.07.88, Zeichn-Nr. 85376/103, per E-Mail erhalten von KuK (Hr. Franke)
- [L 5] Bericht über die Eignungsprüfung an den Ankern Nr. A2, A5 und A9, System Stump-Duplex, Ingenieurbüro für Grundbau und Bodenmechanik Elmiger und Karstedt GmbH, 05.11.1986
- [L 6] Bericht über die Eignungsprüfung an den Ankern Nr. A19, A24 und A33, System Stump-Duplex, Ingenieurbüro für Grundbau und Bodenmechanik Elmiger und Karstedt GmbH, 02.09.1987

1.3 Neubau Techowbrücke

- [D 1] Fundamentskizze des Ersatzneubaus der Techowbrücke, Skizze Nr. 01 vom 09.10.2020
- [D 2] Regelquerschnitt des Ersatzneubaus der Techowbrücke, Skizze Nr. 02 vom 27.01.2021
- [D 3] Ansicht, Längsschnitt, Draufsicht des Ersatzneubaus der Techowbrücke, Plannummer 5_02, Arbeitsstand vom 09.10.2020, per E-Mail erhalten am 29.03.2021 von KuK (Hr. Franke)
- [D 4] Baugrubenplan, Ansicht, Längsschnitt und Draufsicht des Ersatzneubaus der Techowbrücke, Plan Nummer 5_05, Arbeitsstand vom 09.10.2020, per E-Mail erhalten am 29.03.2021 von KuK (Hr. Franke)
- [D 5] Bauwerkslasten des Ersatzneubaus der Techowbrücke, „210504_SG_Bogen_Stuetze.pdf“, per E-Mail erhalten am 04.05.2021 von KuK (Hr. Franke)
- [D 6] E-Mail von KuK (Hr. Franke) an GuD (Fr. Fontara) am 29.04.2021 mit dem Betreff: Ersatzneubau der Techowbrücke TeK (km 22,040) – Spundwandverbauten.
- [D 7] E-Mail von KuK (Hr. Franke) an GuD (Fr. Fontara) am 04.05.2021 mit dem Betreff: Ersatzneubau der Techowbrücke TeK (km 22,040) - Fundamentgeometrie/Bauwerkslasten
- [D 8] Bauwerkslasten des Ersatzneubaus der Techowbrücke nach Iteration 1, „211008_SG_Bogen_Stuetze.pdf“, E-Mail von KuK (Hr. Franke) an GuD (Fr. Fontara) am 08.10.2021.

1.4 Normen und Regelwerke

- [R 1] DIN 4019:2015-05 Baugrund – Setzungsberechnungen
- [R 2] Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ernst & Sohn Verlag, 2. Auflage
- [R 3] Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ernst & Sohn Verlag, 2014
- [R 4] DIN EN 1997-1:2009-09 Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1 Allgemeine Regeln einschließlich
DIN EN 1997-1/NA:2010-12 Nationaler Anhang

und

DIN 1054:2010-12 Baugrund – Sicherheitsnachweis im Erd- und Grundbau -
Ergänzende Regeln zu DIN EN 1997-1

und

Änderung 1:2012-02 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
- Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1:2010

- [R 5] Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von
Ingenieurbauten RE – ING, Teil 2 Brücken, Abschnitt 5 Integrale Bauwerke,
herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur,
Stand 01.2021

1.5 Sonstige Unterlagen

- [U 1] Plaxis Reference Manual, Plaxis 3D Connect 2021

2 BESCHREIBUNG DES BAUVORHABENS

2.1 Allgemeines

Die Techowbrücke überführt die im Berliner Stadtbezirk Tempelhof-Schöneberg gelegene Gersdorfstraße über den Teltowkanal bei Kilometer 22,040 (siehe Bild 2-1). Die bestehende und in den Jahren 1955/1956 aus Stahl gebauten Balkenbrücke soll durch einen vollständigen Neubau (Bogenbrücke) an gleicher Stelle ersetzt werden. Eine Übersicht der Bestandsbrücke inkl. des Kanals und der Rückverankerung der Kanalwand ist in Bild 2-2 dargestellt. Der Brückenneubau ist in Bild 2-3 im Längsschnitt dargestellt.

Der Ersatzneubau der Techowbrücke soll Bogenbrücke mit flach gegründeten Widerlagern errichtet werden. Unterhalb der geplanten Gründungssohle des südlichen Widerlagers sind nach den Baugrundaufschlüssen in [S 1] nicht ausreichend tragfähige Bodenschichten vorhanden, für die eine Bodenverbesserung vorgesehen ist (siehe Kap. 2.4).

Für die weiteren Betrachtungen werden die nachfolgenden Ordinaten des Bauvorhabens zu Grunde gelegt:

Tabelle 2-1 Wesentliche Ordinaten

Bezeichnung	Ordinate
UK Widerlager (Bestand)	ca. +29,50 m NHN*
UK Widerlager (Neubau)	+33,20 m NHN*
OK Uferwand	+33,00 m NHN*
Kanalsohle	+30,00 m NHN
Grundwasserspiegel	+32,30 m NHN

* gemäß [S 1] und [S 2]

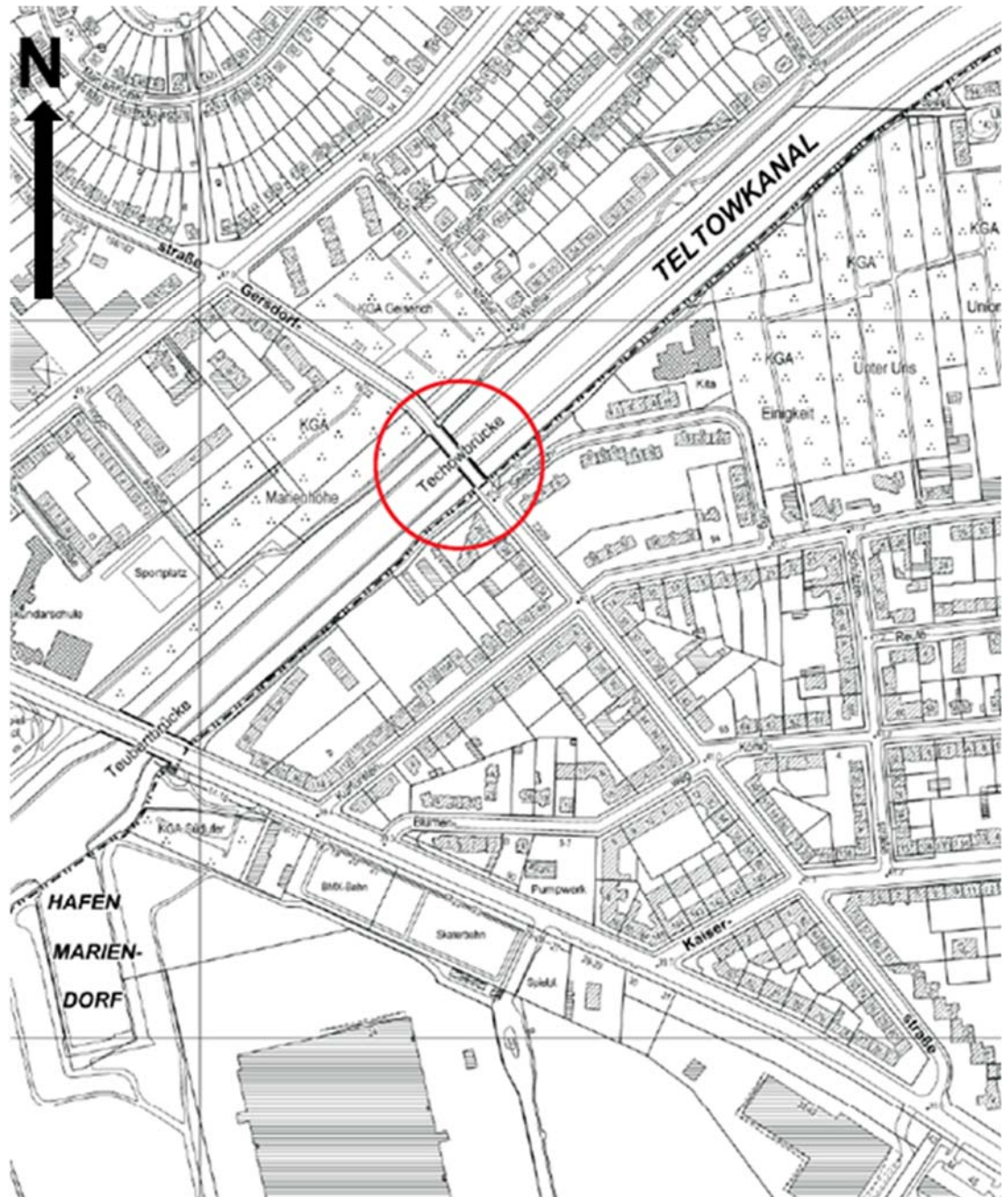


Bild 2-1 Lageskizze mit Darstellung der Techowbrücke (Quelle: K5 RD / DVD 122, Stand: Januar 2012, Bezirksämter von Berlin und Senatsverwaltung für Stadtentwicklung III)

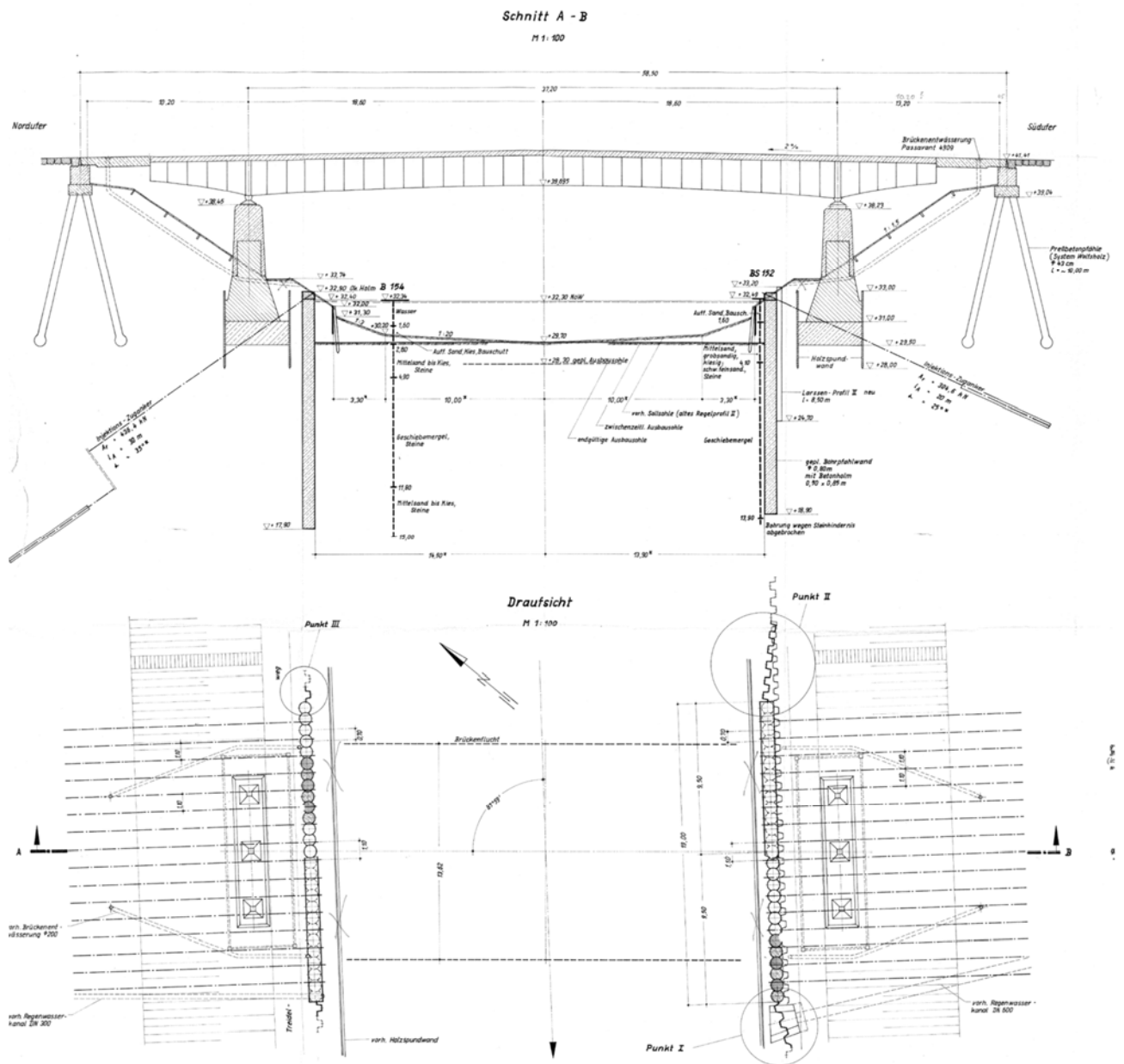


Bild 2-2 Techowbrücke (Bestand) und Uferbefestigung unter der Brücke [L 1]

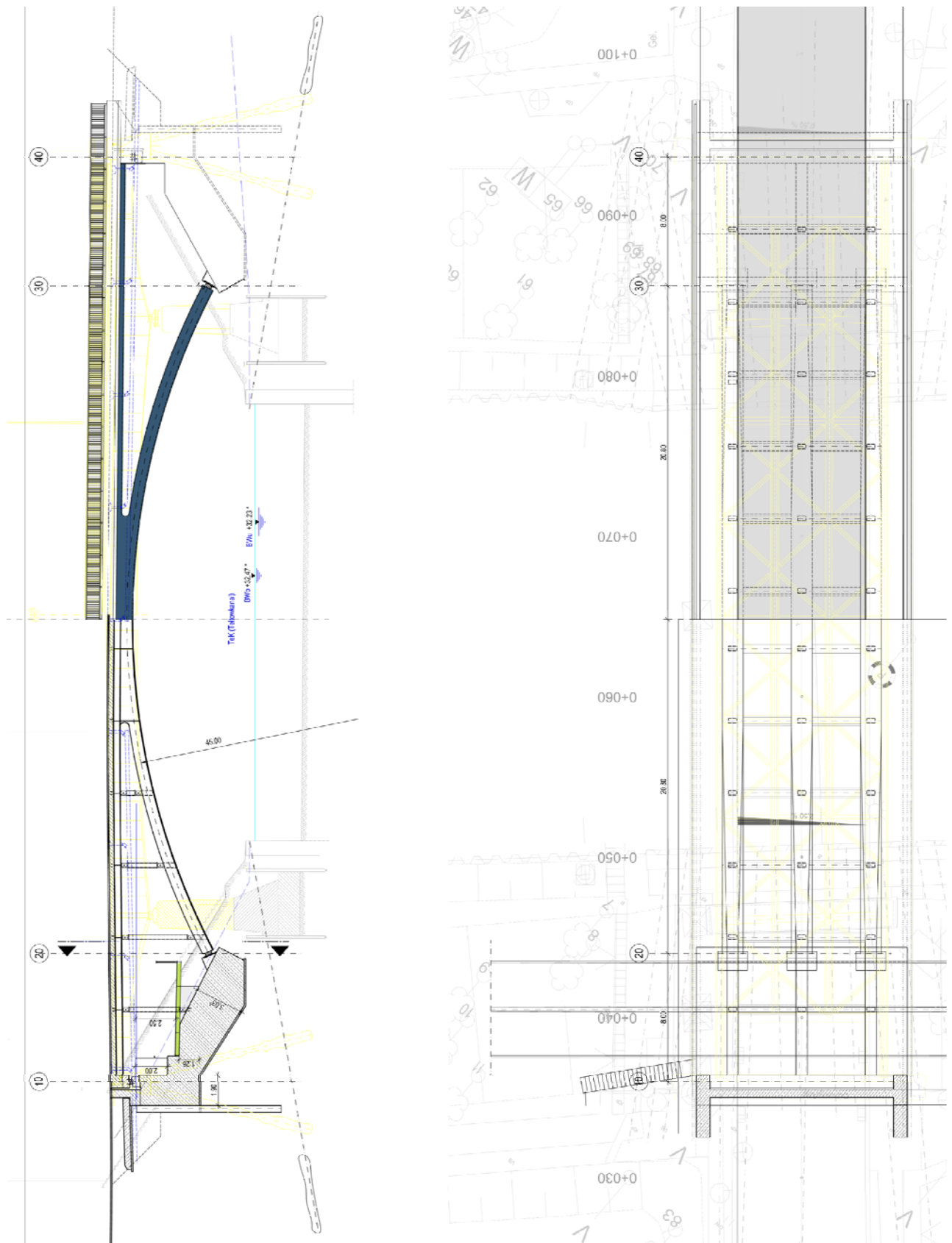


Bild 2-3 Längsschnitt und Grundriss des Ersatzneubaus der Techowbrücke aus [D 1]

2.2 Bauwerkslasten

Die Lasten des neuen Brückenüberbaus werden über die Bogenfußpunkte, die Zwischenstützen und die Endauflager in die Brückenwiderlager eingeleitet. In Brückenquerrichtung sind je Widerlager 3 Bogenfüße, 3 Zwischenstützen und 3 Endauflagerpunkte vorgesehen.

Die Auflagerkräfte des Neubaus aus dem Modell des Tragwerkplaners wurden mit der Unterlage [D 8] übergeben und werden der Berechnung der Bettungswerte zugrunde gelegt. Die Schnittkräfte werden in [D 8] für folgende Lastfälle angegeben:

- LF1 o. FB+ST: Bogentragwerk ohne Fahrbahnplatte und ohne Stütze
- LF1: Bogentragwerk mit Fahrbahnplatte und mit Stütze
- EK1: wie LF1 und zusätzlich mit ständigen Ausbaulasten
- EK204: wie EK1 und zusätzlich mit veränderlichen Ausbaulasten und Verkehrslasten

Für die Ermittlung der Bettungen wird der Gebrauchslastfall „ $1,0 \cdot G + 0,3 \cdot Q$ “ mit G: ständige Lasten (EK1) und Q: Verkehrslasten (EK1 - EK204) angesetzt. Die Schnittlasten für den Lastfall ($1,0 \cdot G + 0,3 \cdot Q$) für die Kräfte N , V_y und V_z jeweils für die Bögen, Stützen und Auflager sind in Anlage 1 (obere Tabelle) zusammengestellt.

Die vertikalen Auflagerlasten der bestehenden Brücke auf dem Pfeiler der Bestandbrücke betragen nach [L 2], S. 9:

Brückeneigengewicht: $G = 3920 \text{ kN}$

Verkehrslast: $Q = 1810 \text{ kN}$

2.3 Bodenschichtung und Kennwerte

Zur Baugrundsichtung liegen der Geotechnische Bericht [S 1] und der Ergänzungsbericht [S 2] vor. Nach [S 1] sind folgende Bodenschichten im Bereich der Widerlager zu erwarten:

- Schicht 2a / 2b (Aufschüttung/Hinterfüllung)
- Schicht 3 (Geschiebelehm steif)
- Schicht 4a / 4b (obere Sande [a: locker und b: mitteldicht gelagert])
- Schicht 5 (Mg steif)
- Schicht 6 (untere Sande [dicht gelagert]).

Die zusätzlich im Böschungsbereich der vorhandenen Brückenwiderlager durchgeführten Baugrundaufschlüsse in [S 2] zeigen hinsichtlich des Schichtenaufbaus bis auf den in unterschiedlicher Mächtigkeit aufgeschlossenen Geschiebemergel eine relativ homogene Schichtung in Form von enggestuften Fein-/Mittelsanden. Die Sande sind bezüglich ihrer Lagerungsdichte differenziert zu bewerten. So ist am Widerlager Süd von GOK bis ca. Höhe +32,0 m NHN in den Auffüllungen und den gewachsenen Sanden von einer sehr lockeren Lagerungsdichte auszugehen. Am Widerlager Nord weisen die gewachsenen Sande ab ca. +37,0 m NHN bis ca. +32,5 m NHN eine mitteldichte Lagerung auf. In Tabelle 2-2 ist die Bodenschichtung für beide Widerlager gegenübergestellt.

Für die Bodenschichten können gemäß [S 1] die Bodenkennwerte nach Tabelle 2-3 angesetzt werden.

Tabelle 2-2 Baugrundsichtung am Widerlager Süd und Nord nach [S 1] und [S 2]

	OK Schicht [m NHN]	
	Widerlager Süd	Widerlager Nord
Schicht 2a/2b (Auffüllung)	41,5	41,5
Schicht 3 (Geschiebelehm)	39,0	39,0
Schicht 4a (Sand locker)	35,0	-
Schicht 4b (Sande mitteldicht)	32,0	37,0
Schicht 5 (Mergel steif)	28,0	28,0
Schicht 6 (Sand dicht)	17,0	22,0

Tabelle 2-3 Charakteristische Bodenkennwerte aus [S 1]

Bodenart	Bodenkennwerte					
	Wichte erdfeucht γ_k [kN/m ³]	Wichte Auftrieb γ'_k [kN/m ³]	Reibungswink el φ'_k [°]	Kohäsion c'_k [kN/m ²]	Kohäsion, undrännert $c_{u,k}$ [kN/m ²]	Steifemodul E_s / E_{sw} [MN/m ²]
Auffüllung A	18	10	27,5	--	--	--
Geschiebelehm SU*/ST	21	11	27,5	2	50	$2,5\sqrt{t} / 7,5\sqrt{t}$
obere Sande [mitteldicht gelagert] SE	17,5	9,5	32,5	-	-	$22,5\sqrt{t} / 67,5\sqrt{t}$
untere Sande [dicht gelagert] SE	18	11	35	-	-	$40\sqrt{t} / 120\sqrt{t}$
Geschiebemergel ST	21,5	11,5	28	5	100	$7,5\sqrt{t} / 37,5\sqrt{t}$

t = Tiefe unter Geländeoberkante (GOK~ +41,5 m NHN) in m

E_s / E_{sw} = Steifemodul Erstbelastung / Wiederbelastung

2.4 Baugrundverbesserung

Das Ergänzungsgutachten zur Techowbrücke [S 2] empfiehlt für das nördliche Widerlager, die vorhandene Auffüllung mit der unterlagernden Geschiebelehmsschicht im Gründungsbereich des Widerlagers bis auf den anstehenden gewachsenen Sandboden (d.h. bis ca. Höhe +37,0 m NHN) zu entfernen. Mit den Gründungshöhen des nördlichen Widerlagers nach [D 1] von mindestens +35,9 m NHN ist dies voraussichtlich ohne weitere Zusatzmaßnahmen gegeben. Eventuell bei der Bauausführung tiefer angetroffene, nicht tragfähige Bodenschichten unterhalb der Gründungssohle müssen durch ein tragfähiges Gründungspolster ersetzt werden.

Für das südliche Widerlager wird in [S 2] eine Ertüchtigung der locker bis sehr locker gelagerten Sande unterhalb der Gründungssohle mittels Düsenstrahlverfahren (DSV) oder mit dem Verfahren der tiefen Bodenvermörtelung (TBV) auszuführen. Der Empfehlung einer Bodenverbesserung mittels DSV wird im Rahmen der hier vorgestellten Berechnungen gefolgt. In den Berechnungen wird eine Bodenverbesserung unter dem Widerlager bis zur Unterkante der locker gelagerten Sande (d.h. bis +32,0 m NHN) angesetzt.

3 BERECHNUNGSMODELL

3.1 Modellgeometrie und Baugrundsichtung

Die beiden Widerlager werden in 2 getrennten FE-Modellen (Programmsystem Plaxis 3D Connect V21, siehe [U 1]) untersucht. Die Geometrie der Berechnungsmodelle wurde aus den Zeichnungen für den Bestand [L 1], [L 4] und den Neubau [D 1], [D 2] abgeleitet. Die angesetzte Geometrie des Neubaus für die Berechnungsmodelle ist in Bild 3-1 für das nördliche Widerlager und in Bild 3-2 für das südliche Widerlager zusammengefasst. Die beiden Widerlagermodelle unterscheiden sich nur hinsichtlich der Baugrundsichtung und Bodenverbesserung, die Widerlagergeometrie und die angesetzten Lasten des Überbaus sind gleich. In Bild 3-3 bis Bild 3-6 sind die Berechnungsmodelle für die beiden Widerlager dargestellt.

Die Modelle bilden die Geometrie jeweils bis zur Mitte des Kanals ab. In die anderen Richtungen erstrecken sich die Modelle bis zu einem Abstand von ca. 50 m zu den Widerlageraußenkanten. Mit den gewählten Modellabmessungen ist sichergestellt, dass die Beeinflussung der Ergebnisse durch die Modellränder vernachlässigbar ist.

Die Geländeoberfläche wird in Höhe +41,50 m NHN angesetzt. Die Baugrundsichtung wird entsprechend Tabelle 2-2 mit horizontalen Schichtgrenzen angesetzt. Die Böschungsgeometrie wird gemäß [L 1] und [D 4] abgebildet (siehe Bild 3-3 und Bild 3-5).

Die Modellunterkante liegt bei +10,0 m NHN (ca. 31,5 m unter GOK) und wurde analog zur Grenztiefe für Setzungsberechnungen nach DIN 4019 [R 1] festgelegt (Grenztiefe = Tiefe bei $\leq 20\%$ Zusatzspannung aus Brückenlasten). Die Überprüfung dieses Kriteriums erfolgt in 4.4.

Die Berechnungsmodelle werden mit ca. 130 000 tetraederförmigen Finiten Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion (3 Knoten je Elementkante) diskretisiert. Die Diskretisierung wurde dabei im Bereich der Widerlager und des umliegenden Bodens verfeinert.

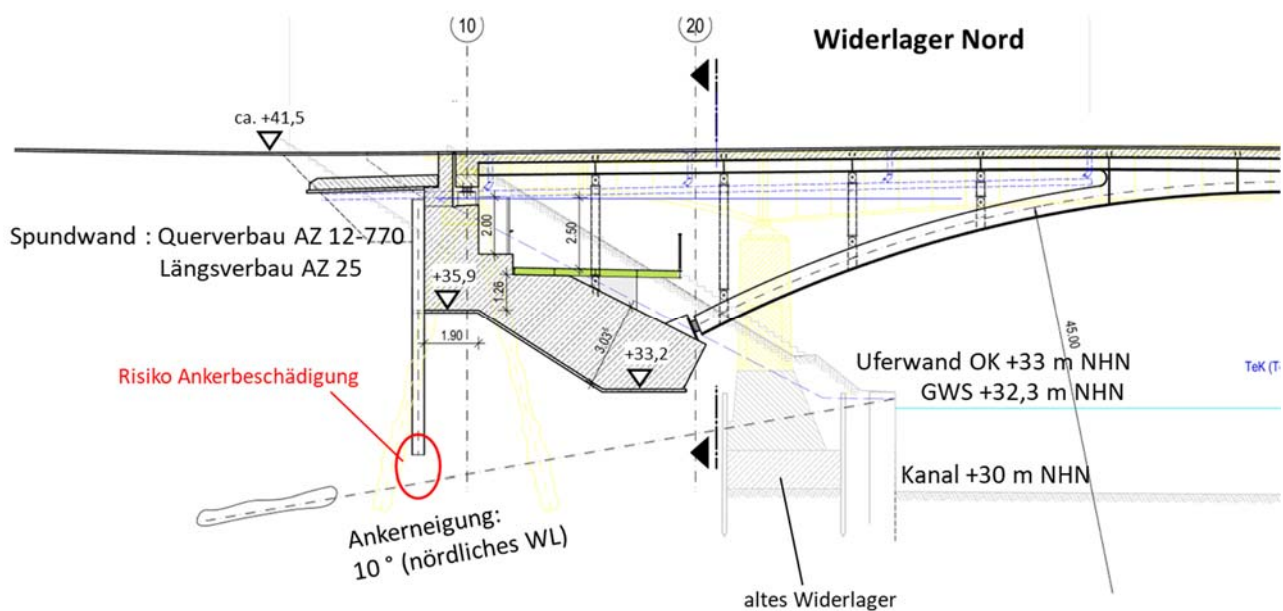


Bild 3-1 Längsschnitt des nördlichen Widerlagers der Techowbrücke (Bestand und Neubau), überarbeitet aus [D 1]

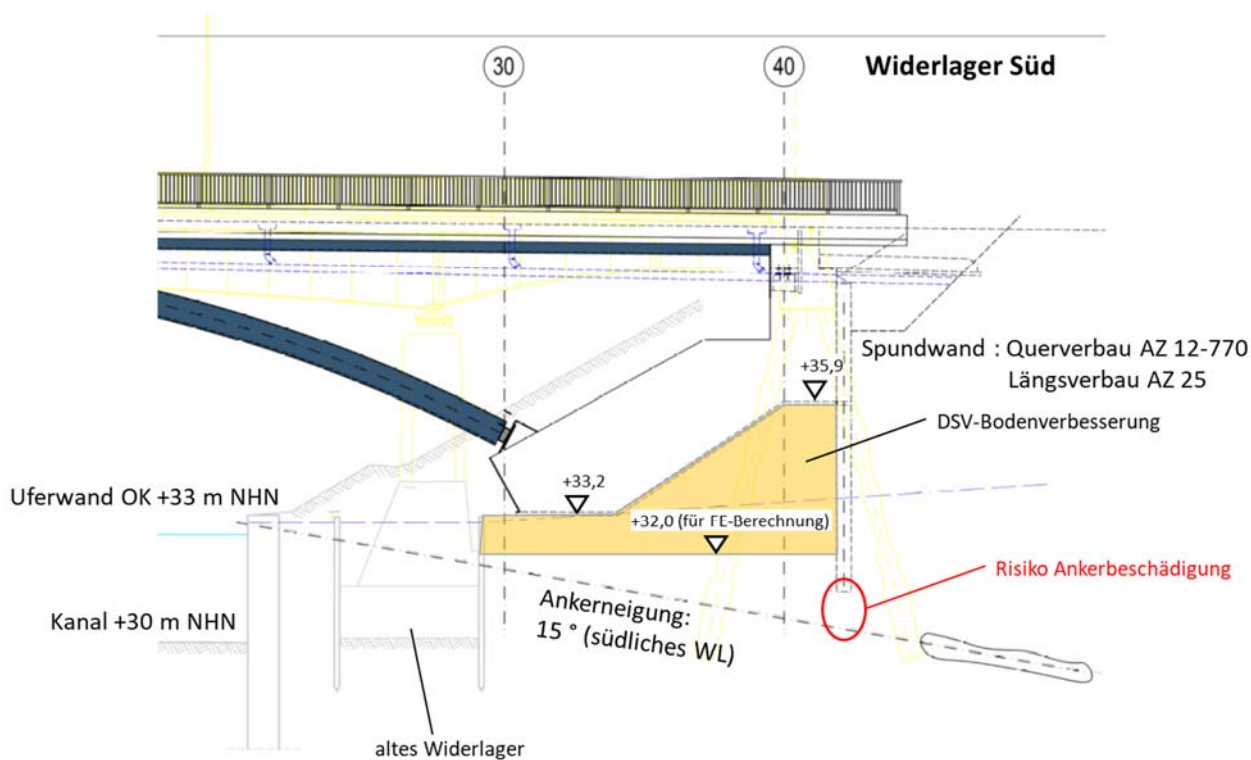


Bild 3-2 Längsschnitt des südlichen Widerlagers der Techowbrücke (Bestand, Neubau und Baugrundverbesserung mittels DSV), überarbeitet aus [D 1]

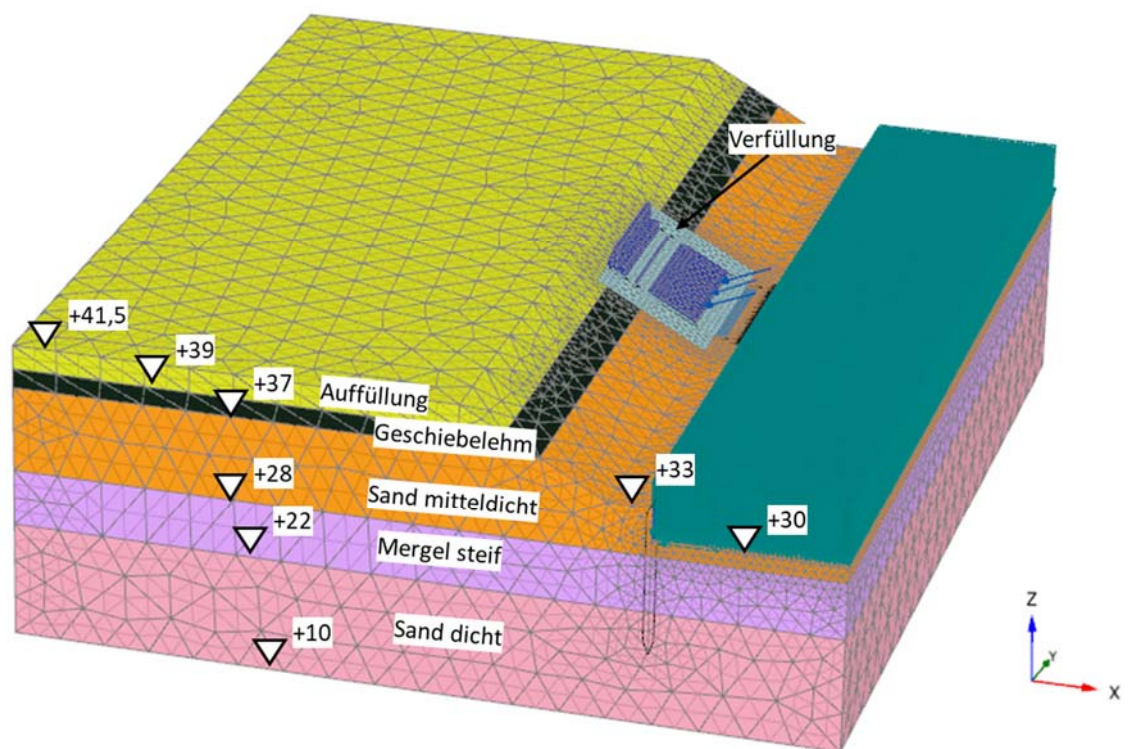


Bild 3-3 Berechnungsmodell des nördlichen Widerlagers, Bodenschichtung und Höhen in m NHN

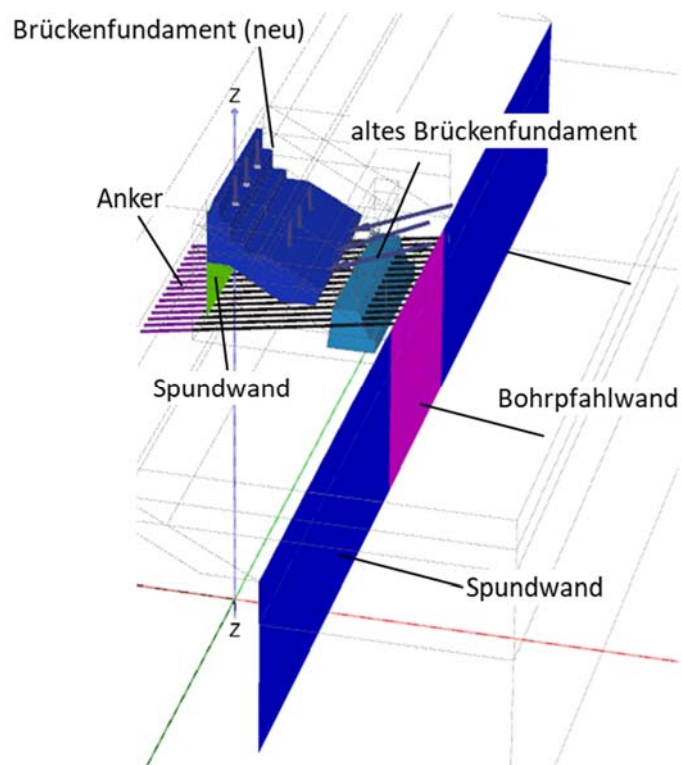


Bild 3-4 Strukturelemente des nördlichen Widerlagers (Boden ausgeblendet)

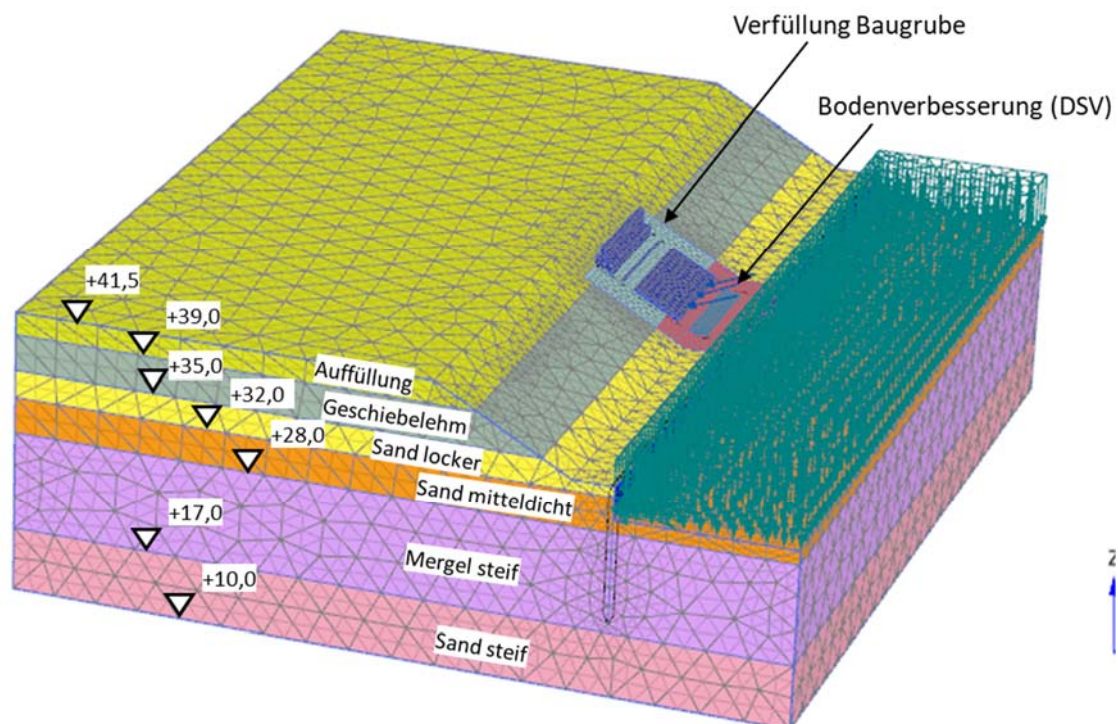


Bild 3-5 Berechnungsmodell des südlichen Widerlagers, Bodenschichtung und Höhen in m NHN

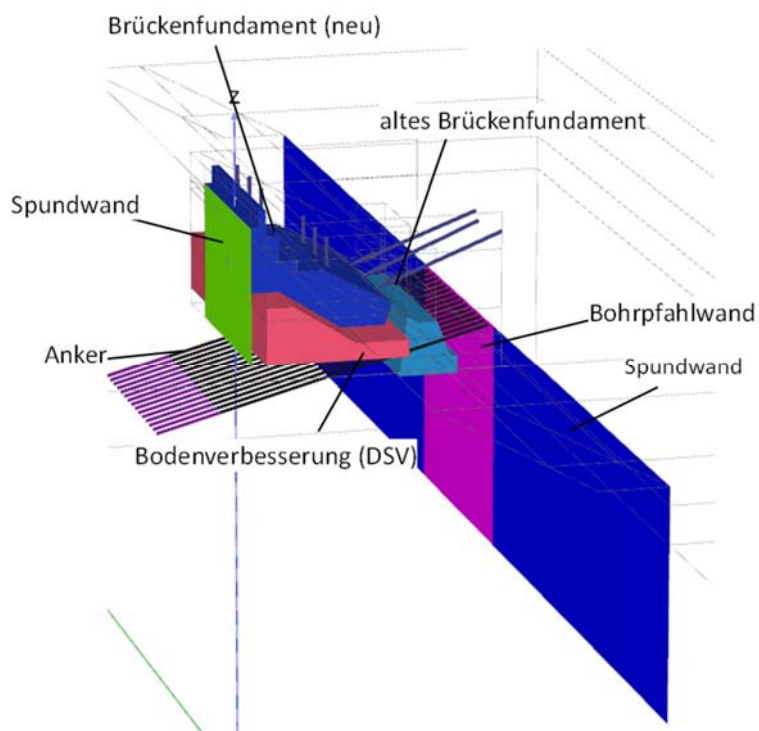


Bild 3-6 Strukturelemente des südlichen Widerlagers und DSV-Bodenverbesserung (Boden ausgeblendet)

3.2 Bestands-Uferwand und Rückverankerung

Die vorhandene Uferwand des Kanals besteht im Bereich des Brückenwiderlagers aus einer rückverankerten, überschnittenen Bohrpfehlwand ($d = 90 \text{ cm}$) und außerhalb des Brückenbereichs aus einer frei auskragenden Spundwand (Profil Larssen II neu). Die Anker sind nach [L 5] und [L 6] mit 412 kN und 310 kN an dem nördlichen bzw. südlichen Widerlager vorgespannt.

Die überschnittene Bohrpfehlwand und die Spundwand werden mit linear elastischen Plattenelementen abgebildet. Die angesetzte Dicke der Spundwand-Plattenelemente wurde aus dem Flächenträgheitsmoment des Spundwandprofils abgeleitet. Für die Bohrpfehlwand wird auf der sicheren Seite liegend eine Dicke von 65 cm und ein E-Modul von $E = 20\,000 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Die angesetzten Materialparameter sind in Bild 3-7 zusammengefasst.

Zwischen der Uferwand und dem umgebenden Boden werden Interface-Elemente angeordnet, die Relativverschiebungen des Bodens gegenüber der Wand erlauben. In der Kontaktfuge erfolgt keine Abminderung des Reibungswiderstandes ($R_{\text{inter}} = 1$).

Material set				Material set			
Identification	Bohrpfahlwand			Identification	Uferwand		
Comments	d=90cm			Comments			
Colour	RGB 255, 0, 251			Colour	RGB 0, 0, 255		
Material type	Elastic			Material type	Elastic		
Properties				Properties			
d	m		0,6500	d	m		0,1210
γ	kN/m ³		0,000	γ	kN/m ³		0,000
Isotropic		☒		Isotropic		☒	
E_1	kN/m ²		20,00E6	E_1	kN/m ²		210,0E6
E_2	kN/m ²		20,00E6	E_2	kN/m ²		210,0E6
ν_{12}			0,2000	ν_{12}			0,3000
G_{12}	kN/m ²		8,333E6	G_{12}	kN/m ²		80,77E6
G_{13}	kN/m ²		8,333E6	G_{13}	kN/m ²		80,77E6
G_{23}	kN/m ²		8,333E6	G_{23}	kN/m ²		80,77E6
Rayleigh α			0,000	Rayleigh α			0,000
Rayleigh β			0,000	Rayleigh β			0,000
Prevent punching		☒		Prevent punching		☒	

Bild 3-7 Kennwerte der Uferwand im FE-Modell (Plattenelemente)

Die Rückverankerung setzt sich zusammen aus der freien Ankerlänge und der Verpressstrecke. Die freie Ankerlänge wird mit sog. node-to-node-anchor-Elementen und die freie Verpressstrecke mit sog. embedded-beam-Elementen abgebildet. Die

Dehnsteifigkeit dieser Elemente wird aus dem Ankerdurchmesser von 32 mm und dem E-Modul des Stahlquerschnitts abgeleitet (siehe Bild 3-8). Der Mantelreibungswiderstand der Verpresskörper wird mit $T = 136,7 \text{ kN/m}$ so angesetzt, dass die Tragkraft der Anker von 615 kN nach [L 5] mit der modellierten Verpresskörperlänge von 4,5 m abgetragen werden kann.

Dehnsteifigkeit des Ankers	
E-Modul Stahl:	2.10E+08 kN/m ²
Durchmesser:	0.032 m
Querschnittsfläche:	8.04E-04 m ²
EA =	1.689E+05 kN
Dehnsteifigkeit des Verpresskörpers	
Durchmesser	0.2 m
A_ersatz	3.14E-02 m ²
E_ersatz	5.38E+06 kN/m ²

Material set

Identification

Verpresskörper

Comments

Colour

RGB 151, 33, 181

Material type

Elastic

Properties

E	kN/m ²	5.380E6
ν	kN/m ³	0.000
Beam type	Predefined	
Predefined beam type	Massive circular beam	
Diameter	m	0.2000
A	m ²	0.03142
I ₂	m ⁴	0.07854E-3
I ₃	m ⁴	0.07854E-3
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000

Axial skin resistance

Axial skin resistance	Linear	
T _{skin, start, max}	kN/m	136.7
T _{skin, end, max}	kN/m	136.7

Base resistance

F _{max}	kN	0.000
------------------	----	-------

Material set

Identification

Ankerstab

Comments

Stumpo Druckrohranker
Stange d=32 mm

Colour

RGB 31, 26, 30

Material type

Elastic

Properties

EA	kN	168.9E3
----	----	---------

Bild 3-8 Kennwerte der freien Ankerstrecke und der Verpressstrecke im FE-Modell

3.3 Bestandsfundamente der vorhandenen Brücke

Die Pfeiler der vorhandenen Brücke werden oberirdisch zurückgebaut, bleiben unterhalb der Böschung jedoch erhalten und liegen im Endzustand zwischen dem neuen Widerlager und der Kanalwand (siehe Bild 3-4 und Bild 3-6). Die Pfeilerfundamente werden mit linear-elastischen Volumenelementen abgebildet ($E = 20\,000 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0,2$, $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$). Die Interaktion zwischen dem Fundamentkörper und dem umgebenden Boden ist für die Bettungen des neuen Widerlagers von geringem Einfluss, sodass auf Interface-Elemente verzichtet wird.

Die Auflagerlast der Bestandsbrücke (siehe Kap. 2.2) beträgt für die Gebrauchslastkombination $G + 0,3 \cdot Q = 3920 \text{ kN} + 0,3 \cdot 1810 \text{ kN} = 4463 \text{ kN}$. Da die Bestands-Brückenlasten im Sinne einer Vorbelastung des Bodens günstig wirken, wird in der FE-Berechnung nur 50% dieser Last berücksichtigt und als Flächenlast am Pfeilerkopf mit $0,5 \cdot 4463 \text{ kN} / 27,24 \text{ m}^2 = 81,9 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

3.4 Baugrube

Die frei auskragenden Baugrubenwände sind als Stahlspundwände vorgesehen und werden mit linear elastischen Plattenelementen abgebildet. Die angesetzten Kennwerte wurden aus den vorgesehenen Spundwandprofilen für den Querverbau (AZ 12-770) und den Längsverbau (AZ 25) nach [D 6] abgeleitet. Die seitlichen Spundwände werden nach dem Bau der Widerlager zurückgebaut, während die Spundwand an der Rückseite des Widerlagers erhalten bleiben soll [D 7].

An der Außen- und Innenseite der Plattenelemente werden Interface-Elemente angeordnet, die Relativverschiebungen des Bodens gegenüber dem Plattenelement erlauben. In der Kontaktfuge zwischen dem Boden und den Plattenelementen erfolgt keine Abminderung des Reibungswiderstandes.

Längsverbau			
E1 =	240000000	kN/m ²	Baustoff S240 GP
Profil:	AZ 25		
I _{yy} =	59410	cm ⁴ /m	
A =	163,3	cm ² /m	
EA =	3919200	kN/m	
EI _{yy} =	142584	kN*m ² /m	
w =	1,281905	kN/m/m	
Ersatzdicke Wand:			
d _{ersatz} =	0,192	m	

Plate - Spundwand_Längsverbau

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Spundwand_Längsverbau
Comments		
Colour		RGB 55, 121, 242
Material type		Elastic
Properties		
d	m	0,1920
v	kN/m ³	0,000
Isotropic		☒
E ₁	kN/m ²	240,0E6
E ₂	kN/m ²	240,0E6
v ₁₂		0,3000
G ₁₂	kN/m ²	92,31E6
G ₁₃	kN/m ²	92,31E6
G ₂₃	kN/m ²	92,31E6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		☒

Bild 3-9 Angesetzte Kennwerte für die Baugrubenwände - Längsverbau

Querverbau				
E1 =	240000000	kN/m ²	Baustoff	S240 GP
Profil:	AZ 12-770			
I _{yy} =	21430	cm ⁴ /m		
A =	120,1	cm ² /m		
EA =	2882400	kN/m		
EI _{yy} =	51432	kN*m ² /m		
w =	0,942785	kN/m/m		
Ersatzdicke Wand:				
d _{ersatz} =	0,137	m		

Plate - Spundwand_Querverbau		
Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Spundwand_Querverbau
Comments		
Colour		RGB 119, 255, 0
Material type		Elastic
Properties		
d	m	0,1370
γ	kN/m ³	0,000
Isotropic		☒
E ₁	kN/m ²	240,0E6
E ₂	kN/m ²	240,0E6
ν ₁₂		0,3000
G ₁₂	kN/m ²	92,31E6
G ₁₃	kN/m ²	92,31E6
G ₂₃	kN/m ²	92,31E6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		☒

Bild 3-10 Angesetzte Kennwerte für die Baugrubenwände – Querverbau

Nach der Fertigstellung der Widerlager werden die Baugruben mit nichtbindigem Material verfüllt. Für die Verfüllung wird ein linear-elastisches idealplastischen Mohr-Coulomb-Materialmodell ($E = 25\,000\text{ kN/m}^2$, $\varphi = 30^\circ$, $c = 0$, $\gamma = 18\text{ kN/m}^3$) verwendet.

3.5 Grundwasser

Der Grundwasserspiegel wird im gesamten Berechnungsausschnitt hydrostatisch entsprechend dem mittleren Wasserstand im Teltow- Kanal angenommen mit einer Druckhöhe bei +32,3 m NHN (siehe Tabelle 2-1).

3.6 Materialmodell und Materialparameter für den Boden

Die Bodenschichten wurden mit dem Materialmodell Hardening Soil (HS) modelliert. Dieses Materialmodell ermöglicht die Berücksichtigung von

- Mohr-Coulomb-Bruchkriterium (Reibungswinkel ϕ' , Kohäsion c'),
- spannungsabhängiger Bodensteifigkeit,
- unterschiedliche Steifigkeit bei Erst- und Ent-/Wiederbelastung,
- nicht-linearem Lastverformungsverhalten vor Erreichen der Scherfestigkeit

Das Hardening-Soil-Modell ist gut geeignet, das komplexe Materialverhalten von natürlichen Böden realistisch wiederzugeben und stellt ein etabliertes Werkzeug für

numerische Verformungsprognosen in Lockergesteinen dar. Die spannungsabhängige Steifigkeit wird mit der folgenden Beziehung ermittelt:

$$E_{Oed} = E_{Oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_v \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m$$

Mit E_{Oed} = Oedometersteifigkeit (entspricht Steifemodul E_s)

E_{Oed}^{ref} = Referenzwert der Oedometersteifigkeit bei p_{ref}

σ'_v = Überlagerungsdruck in kN/m²

p_{ref} = Atmosphärischer Druck = 100 kN/m²

m = 0,5 (Sande) bis 0,7 (Geschiebelehm oder Mergel)

Das HS-Modell verwendet weiterhin eine Sekantensteifigkeit bei deviatorischer Belastung, E_{50} , sowie eine Ent-/Wiederbelastungssteifigkeit, E_{ur} . Die Spannungsabhängigkeit dieser Steifigkeitsparameter ist analog zur oedometrischen Steifigkeit definiert. Nähere Informationen zu dem HS-Materialmodell sind in [U 1] enthalten.

Die im Geotechnischen Bericht [S 1] angegebenen tiefenabhängigen Steifemoduli können in die Erstbelastungssteifigkeit E_{Oed}^{ref} des HS-Modells überführt werden. Die Umrechnung ist in Anlage 2 für die Bodenprofile BS 4/20 (Widerlager Nord) und BS 2/20 (Widerlager Süd) dargestellt.

Die weiteren Steifigkeitsparameter des HS-Modells können über erfahrungsbasierte Korrelationen aus E_{Oed}^{ref} abgeleitet werden (hier: $E_{50}^{ref} = E_{Oed}^{ref}$, $E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{Oed}^{ref}$ für Auffüllung (Schicht 2a/2b), Sand „mitteldicht gelagert“ (Schicht 4a/4b) und Geschiebelehm (Schicht 3), $E_{ur}^{ref} = 5 \cdot E_{Oed}^{ref}$ für den Mergel (Schicht 5) und $E_{ur}^{ref} = 2,5 \cdot E_{Oed}^{ref}$ für den Sand „dicht gelagert“ (Schicht 6). Die Scherfestigkeiten und Wichten werden direkt aus dem Geotechnischen Bericht übernommen. Die angesetzten Materialparameter des HS-Modells sind in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 zusammengefasst. Der Dilatanzwinkel wird in den Sanden mit $\psi = \varphi' - 30^\circ$ angesetzt.

Eine eiszeitliche Vorbelastung wird im Mergel (Schicht 5) und in den unteren Sanden (Schicht 6) angesetzt. Der angesetzte Wert von POP = 500 kN/m² entspricht ca. 55 m Eisüberdeckung und liegt gegenüber der geologisch belegten Gletscherhöhe der Weichseleiszeit von ca. 100 m im Berliner Raum auf der sicheren Seite. Der initiale Seitendruckbeiwert wird in den eiszeitlich vorbelasteten Schichten mit $K_0 = 0,8$ angesetzt, sonst mit $K_0 = 1 - \sin \varphi$.

Tabelle 3-1 Angesetzte Materialparameter der Bodenschichten (Hardening-Soil-Modell) am südlichen Widerlager

Material-parameter	Symbol	Auf-füllung	Geschiebe-lehm	Sand-locker	Sand mitteld. gelagert	Mergel steif	Sand dicht
Reibungswinkel	φ' [°]	27,5	27,5	30	32,5	28	35
Kohäsion	c' [kN/m ²]	0	2	0	0	5	0
Dilatanzwinkel	ψ [°]	0	0	0	2,5	0	5,0
Wichte trocken	γ_k [kN/m ³]	18	21	18	17,5	21,5	18
Wichte gesättigt	γ_{sat} [kN/m ³]	20	21	20	19,5	21,5	21
Steifigkeit Erstbelastung	E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	25 000	8000	25 000	47 000	34 000	132 000
Deviatorische Steifigkeit	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	25 000	8000	25 000	47 000	34 000	132 000
Steifigkeit Ent- / Wiederbelastung	E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	75 000	24 000	75 000	141 000	170 000	330 000
Referenz-spannung	p_{ref} [kN/m ²]	100	100	100	100	100	100
Exponent	m	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5
Vorbelastung	POP [kN/m ²]	0	0	0	0	500	500
Initieller Seitendruck-beiwert	K_0 [kN/m ²]	1-sin φ	1-sin φ	1-sin φ	1-sin φ	0,8	0,8

Tabelle 3-2 Angesetzte Materialparameter der Bodenschichten (Hardening-Soil-Modell) am nördlichen Widerlager

Material-parameter	Symbol	Auf-füllung	Geschiebe lehm	Sand mitteld. gelagert	Mergel steif	Sand dicht
Reibungswinkel	φ' [°]	27,5	27,5	32,5	28	35
Kohäsion	c' [kN/m ²]	0	2	0	5	0
Dilatanzwinkel	ψ [°]	0	0	2,5	0	5,0
Wichte trocken	γ_k [kN/m ³]	18	21	17,5	21,5	18
Wichte gesättigt	γ_{sat} [kN/m ³]	20	21	19,5	21,5	21
Steifigkeit Erstbelastung	E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	25 000	8000	47 000	34 000	132 000
Deviatorische Steifigkeit	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	25 000	8000	47 000	34 000	132 000
Steifigkeit Ent- / Wiederbelastung	E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	75 000	24 000	141 000	170 000	330 000
Referenzspannung	p_{ref} [kN/m ²]	100	100	100	100	100
Exponent	m	0,5	0,7	0,5	0,7	0,5
Vorbelastung	POP [kN/m ²]	0	0	0	500	500
Initieller Seitendruckbeiwert	K_0 [kN/m ²]	1-sin φ	1-sin φ	1-sin φ	0,8	0,8

3.7 Widerlager des Neubaus und Brückenlasten

Die Widerlager des Neubaus werden mit linear elastischen Volumenelementen abgebildet ($E = 33\,000\text{ N/mm}^2$, $\nu = 0,2$, $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$). Zwischen dem Widerlagerkörper und dem umgebenden Boden werden Interface-Elemente angeordnet, die Relativverschiebungen des Bodens gegenüber dem Widerlager erlauben. In der Kontaktfuge zwischen Boden und Widerlager erfolgt keine Abminderung des Reibungswiderstandes.

Die Bettungsermittlung wird für die Lastkombination 1,0 * ständige Lasten (G) + 0,3 * Verkehrslasten (Q) des Neubaus durchgeführt. Die Überbaulasten werden als

Einzellasten entsprechend der Lage der Bögen, Stützen und Endauflager des Neubaus an der Oberseite des Brückenwiderlagers aufgebracht.

Die Auflagerkräfte nach [D 8] (definiert in den lokalen Stab-Koordinatensystemen der Tragwerksplanung) werden für den Ansatz im FE-Modell in das globale Koordinatensystem des FE-Modells umgerechnet. Die im FE-Modell angesetzten Auflagerkräfte sind in Anlage 1 zusammengestellt (für eine Neigungs der Bogenfüße gegen die Horizontale von 17°). Die Momente in Brückenquerrichtung an den Auflagerpunkten sind für die Bettungsermittlung unerheblich und werden vernachlässigt.

3.8 Baugrundverbesserungsmaßnahmen

Das nördliche Widerlager wird auf den anstehenden mitteldicht gelagerten Sanden gegründet. Baugrundverbesserungsmaßnahmen sind an dem nördlichen Widerlager nicht vorgesehen.

Für das südliche Widerlager ist eine Ertüchtigung der locker bis sehr locker gelagerten Sande unterhalb der Gründungssohle mittels Düsenstrahlverfahren vorgesehen. Für den DSV-Körper wird im FE-Modell ein Mohr-Coulomb-Materialmodell (MC) verwendet. Die Steifigkeits- und Festigkeitswerte des DSV-Materials werden mit $E = 5000 \text{ N/mm}^2$ (E-Modul) und $f_{mk} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ (einaxiale Druckfestigkeit) angesetzt. Die einaxiale Druckfestigkeit wird unter Ansatz eines Reibungswinkels $\varphi' = 32,5^\circ$ in die Kohäsion c überführt mit

$$c = \tan\varphi \cdot \left(\frac{\frac{f_{mk}}{2}}{\sin\varphi} - \frac{f_{mk}}{2} \right)$$

Damit ergeben sich die in Bild 3-11 angeführten Materialkennwerte des DSV-Materials.

DSV-Sohle		
E =	5000000	kN/m ²
f _{mk} =	3000	kN/m ²
phi =	32.5	°
c =	823	kN/m ²

Stiffness		
E'	kN/m ²	5.000E6
v' (nu)		0.3500
Alternatives		
G	kN/m ²	1.852E6
E _{oed}	kN/m ²	8.025E6
Strength		
c' _{ref}	kN/m ²	823.0
φ' (phi)	°	32.50
ψ (psi)	°	0.000

Bild 3-11 Angesetzte Materialkennwerte der DSV-Sohle

3.9 Berechnungsphasen

Die Berechnungsphasen wurden aus dem geplanten Bauablauf abgeleitet. Alle Phasen starten von der vorherigen Berechnungsphase, sofern nicht anders angegeben.

0. Initialer Spannungszustand: $\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v$, ebenes Gelände ohne Bauwerke, Grundwasserspiegel in Höhe +32,3 m NHN
1. Aktivierung der Böschung und des Kanals: Aushub des Kanals mit einer Kanalsohle in Höhe +30,0 m NHN, Aktivierung der Uferwand einschließlich Rückverankerung (vorgespannt)
2. Bestandsbrücke: Aktivierung des vorhandenen Brückenpfeilers und der Überbaulasten
3. (a) Rückbau und Bodenverbesserung: Rückbau Bestandsbrücke durch Deaktivierung der Brückenlasten und des Pfeilers oberhalb der Böschung, Aktivierung Düsenstrahlkörper am Widerlager Süd
(b) Aushub: Aktivierung der Baugrubenwände, Profilierung der neuen Böschung, Deaktivierung des Bodens in der Baugrube bis zur Gründungssohle
4. Widerlager: Aktivierung des neuen Brückenwiderlagers einschließlich Eigengewicht
5. Verfüllung der Baugrube
6. Aktivierung der Brückenlasten des Neubaus für den Lastfall „1,0*G + 0,3*Q“
7. Aktivierung der Brückenlasten des Neubaus für den Lastfall „1,0*G + 1,0*Q“ (startet von Phase 5)

Die Modelle in den einzelnen Berechnungsphasen sind in Anlage 3 dargestellt.

4 ERGEBNISSE

4.1 Verformung der Widerlager

Die Verformung der Widerlager aus den geotechnischen Berechnungsmodellen (G-Modell) wird für den Abgleich mit den Berechnungsmodellen der Tragwerksplanung (T-Modelle) für den Lastfall „1,0*G + 1,0*Q“ (Berechnungsphase 7) ausgewertet. Die folgenden Graphiken zeigen die horizontale (in Brückenlängsrichtung) und vertikale Verformung des nördlichen und südlichen Widerlagers.

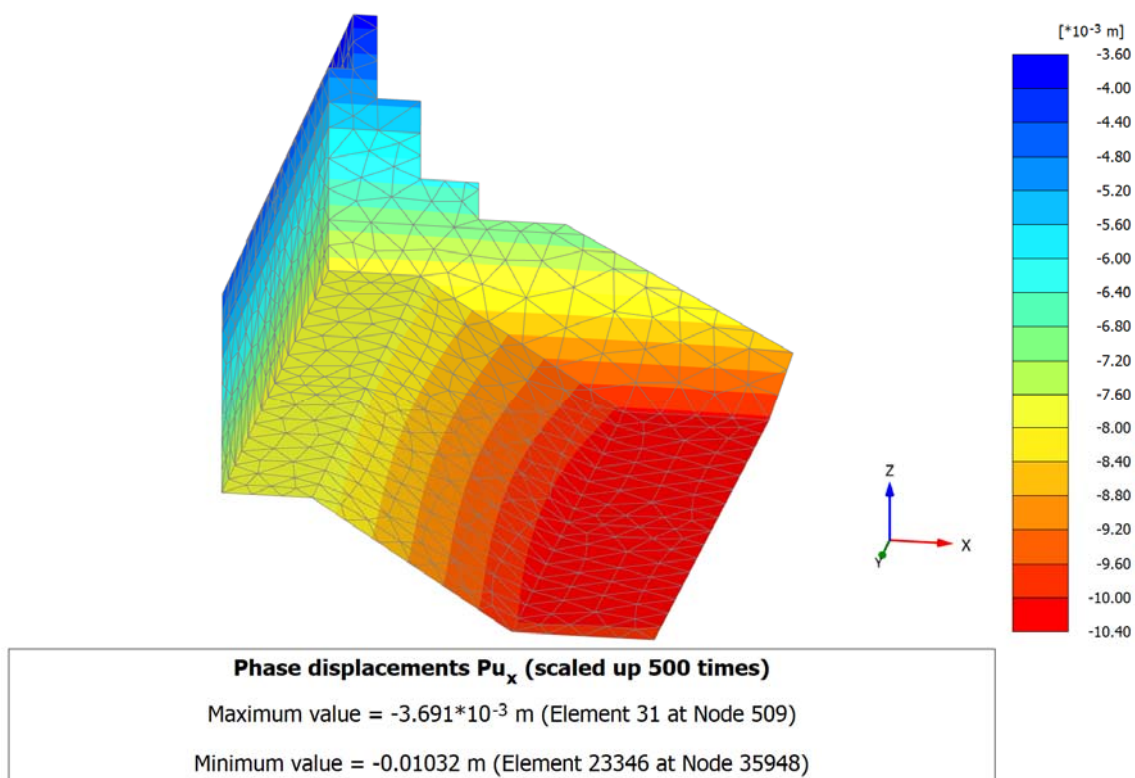


Bild 4-1 Verformung des Widerlagers Nord in Brückenlängsrichtung für den Lastfall „1,0*G+1,0*Q“ (positive Werte ... in Richtung Kanal)

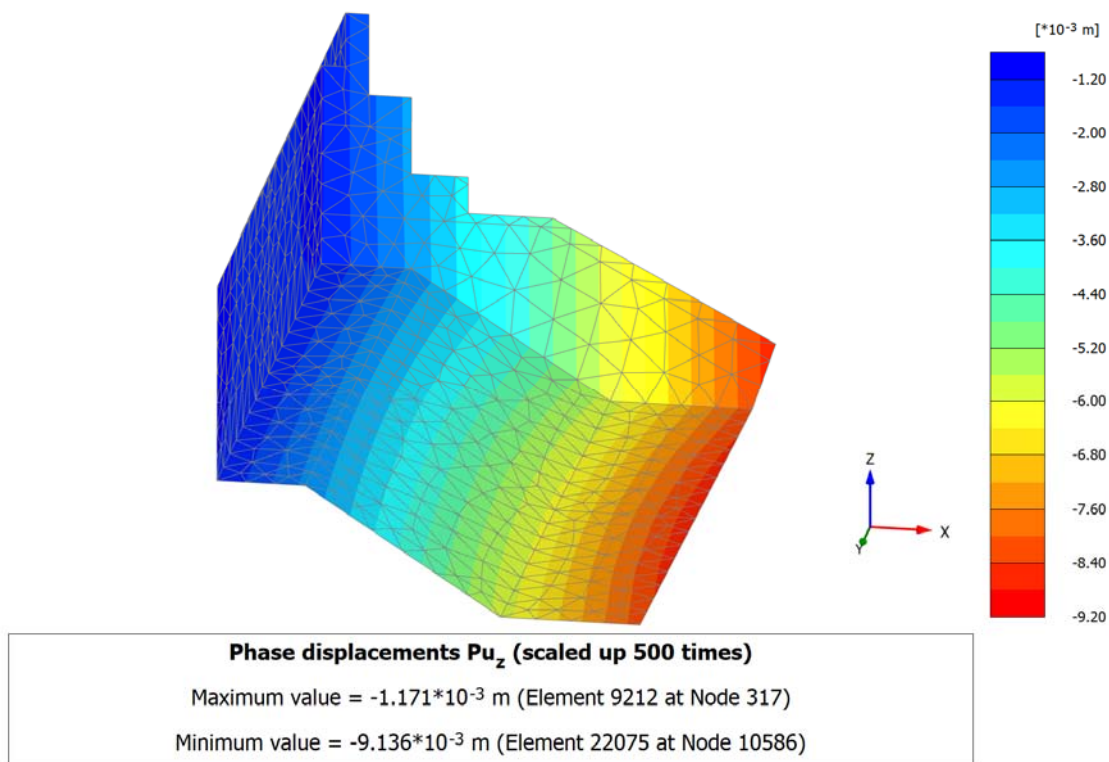


Bild 4-2 Vertikale Verformung des Widerlagers Nord für den Lastfall „1,0*G+1,0*Q“ (negative Werte ... Setzung)

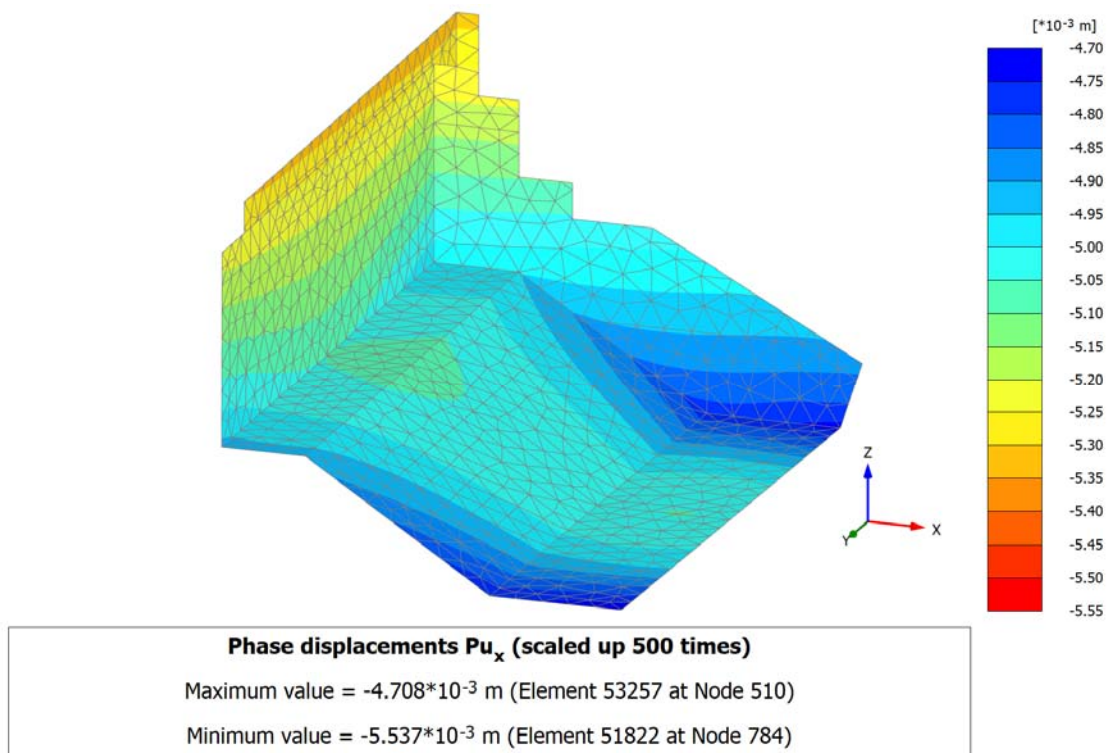


Bild 4-3 Verformung des Widerlagers Süd in Brückenlängsrichtung für den Lastfall „1,0*G+1,0*Q“ (positive Werte ... in Richtung Kanal)

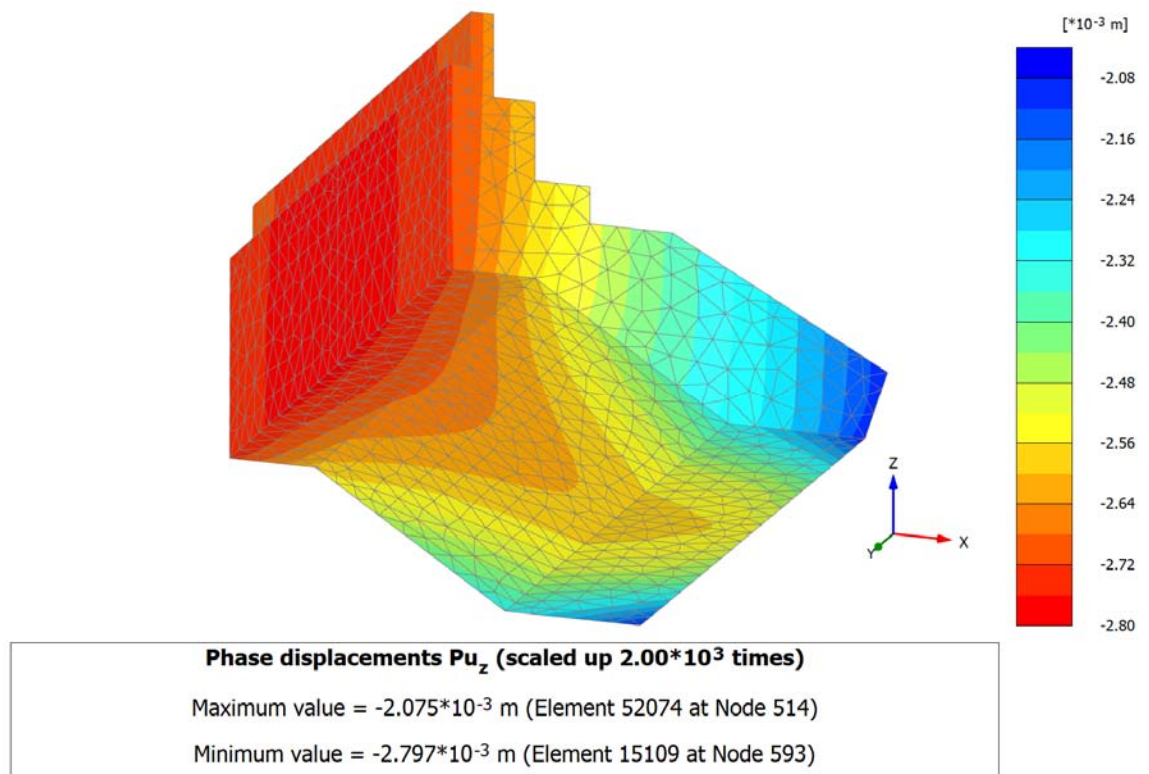


Bild 4-4 Vertikale Verformung des Widerlagers Süd für den Lastfall „1,0*G+1,0*Q“
(negative Werte ... Setzung)

4.2 Bettung der Widerlager

Die Bettungsmoduli werden für die Lastkombination „1,0*G + 0,3*Q“ ermittelt. Der Bettungsmodul $k_{s,n}$ normal zur Sohlfläche des Widerlagers wird mit den Zusatznormalspannungen aus den Brückenlasten $\Delta\sigma'_n = \sigma'_{n,(Ph6)} - \sigma'_{n,(Ph5)}$ und den Setzungen u_n normal zur Sohlfläche aus der Berechnungsphase 6 (Brückenlasten G + 0,3*Q des Neubaus) ermittelt mit

$$k_{s,n} = \Delta\sigma'_n / u_n.$$

Der Bettungsmodul $k_{s,tang}$ tangential zur Sohlfläche des Widerlagers wird mit den Zusatzschubspannungen aus den Brückenlasten $\Delta\tau_{tang} = \tau_{tang,(Ph6)} - \tau_{tang,(Ph5)}$ und der Verschiebungen u_{tang} tangential zur Sohlfläche aus der Berechnungsphase Ph6 (Brückenlasten des Neubaus) ermittelt zu

$$k_{s,tang} = \Delta\tau_{tang} / u_{tang}.$$

Bild 4-5 und Bild 4-6 zeigen die Bettungsmoduli für das nördliche Widerlager, während Bild 4-7 und Bild 4-8 die Bettungsmoduli für das südliche Widerlager darstellen. Mittlere Bettungsansätze sind mit rot gekennzeichnet.

In Anlage 5 ist die Verschiebung- und Spannungsverteilung an der Sohlfläche der Widerlager dargestellt, die die Grundlage für die Ermittlung der Bettungen ist.

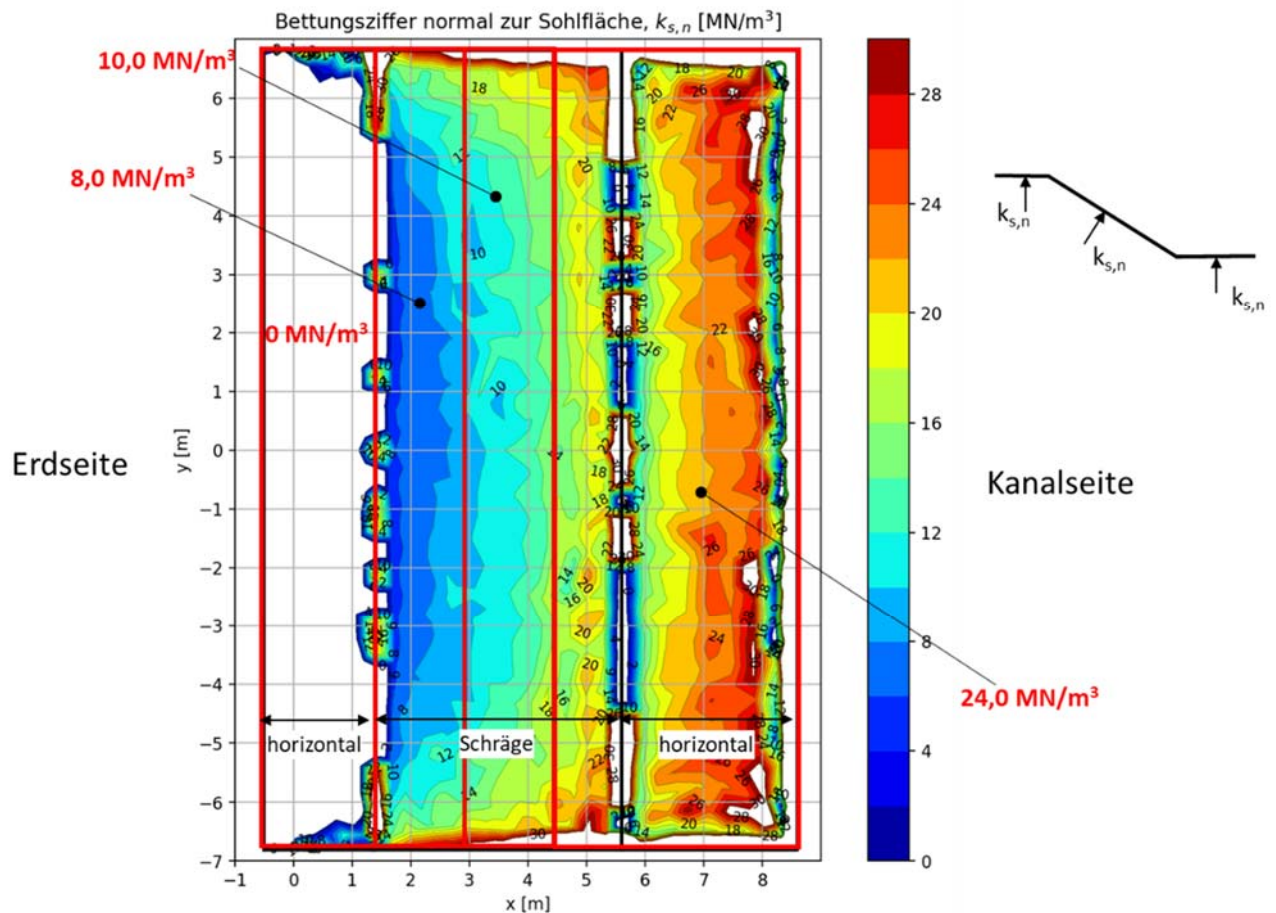


Bild 4-5 Widerlager Nord - Bettungsmodul $k_{s,z}$ normal zur Sohlfläche

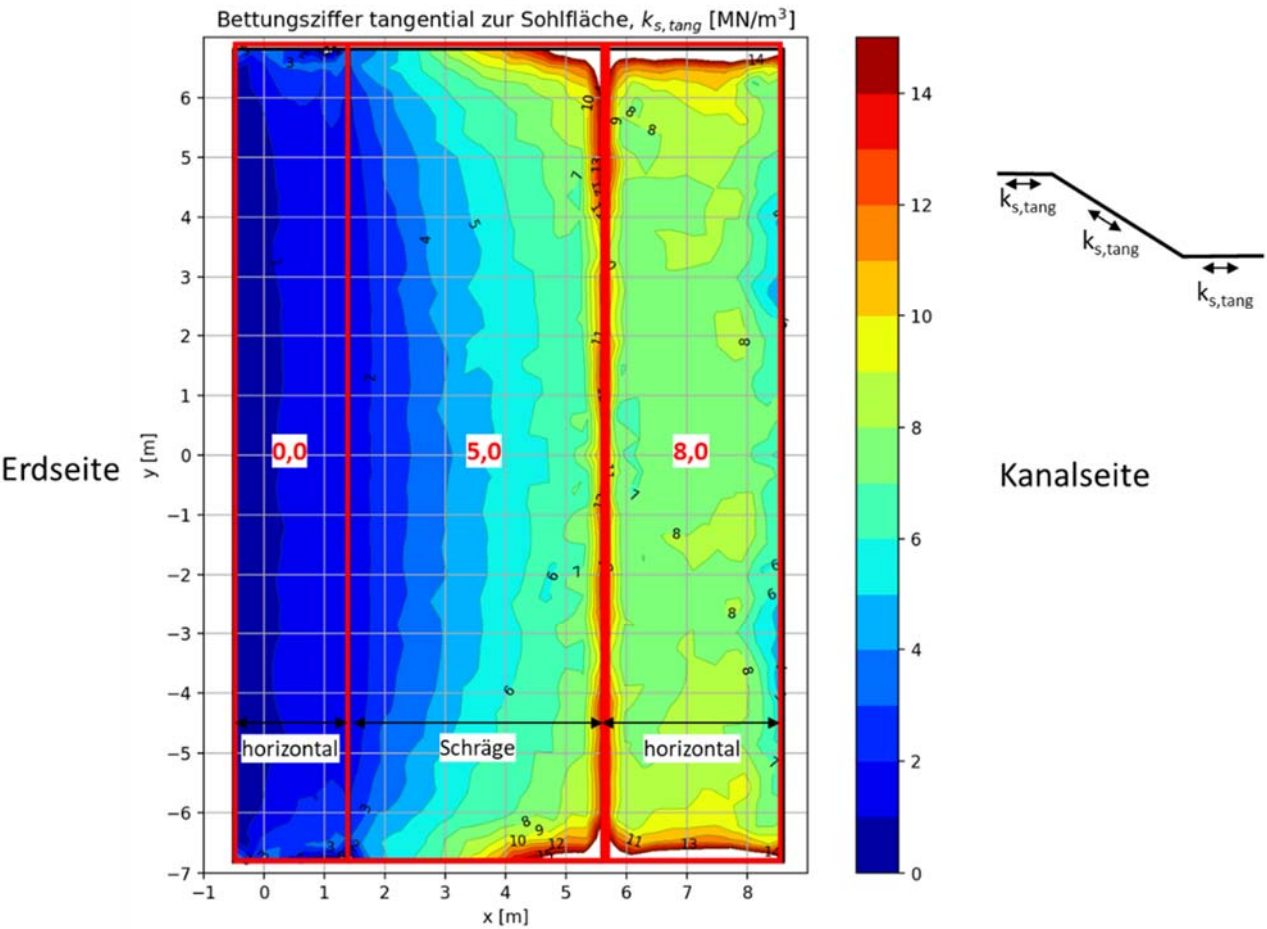


Bild 4-6 Widerlager Nord - Bettungsmodul $k_{s,tang}$ tangential zur Sohlfläche

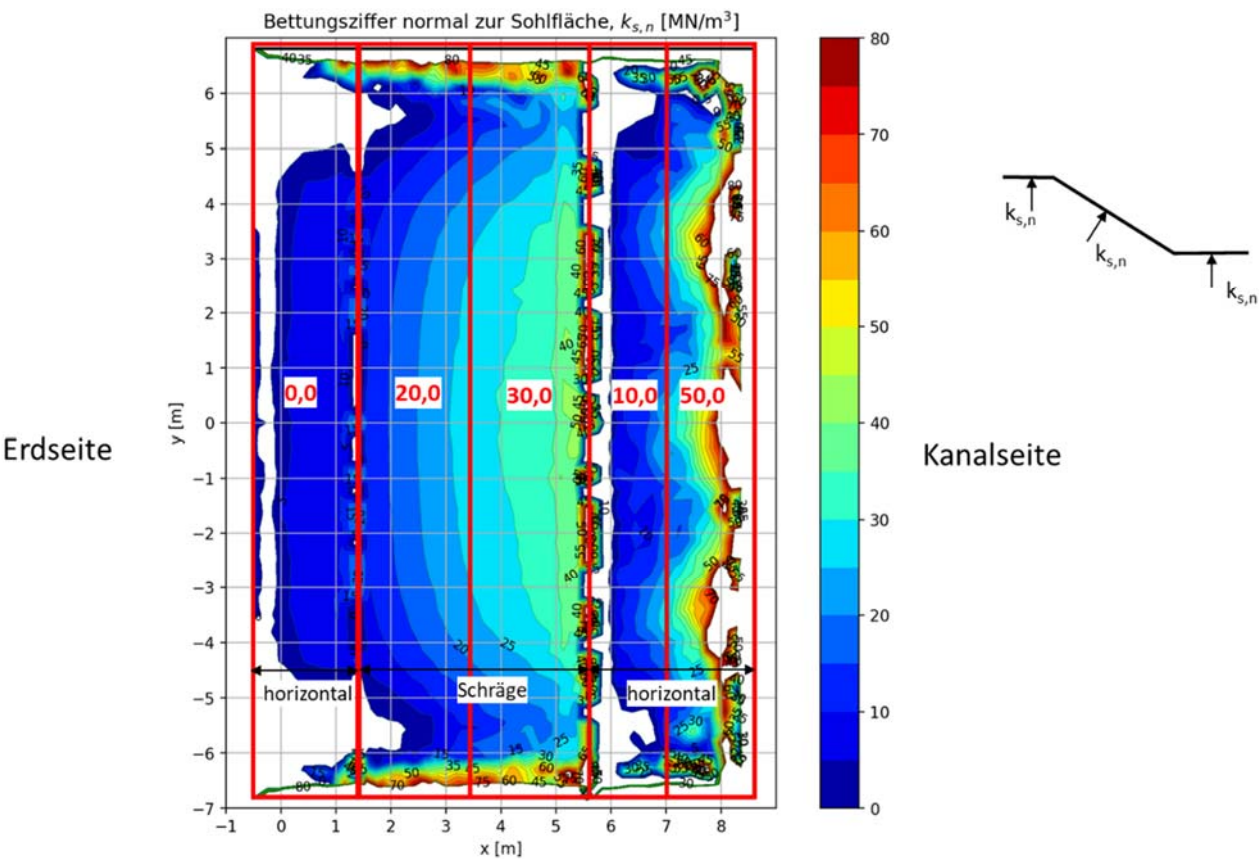


Bild 4-7 Widerlager Süd - Bettungsmodul $k_{s,z}$ normal zur Sohlfläche

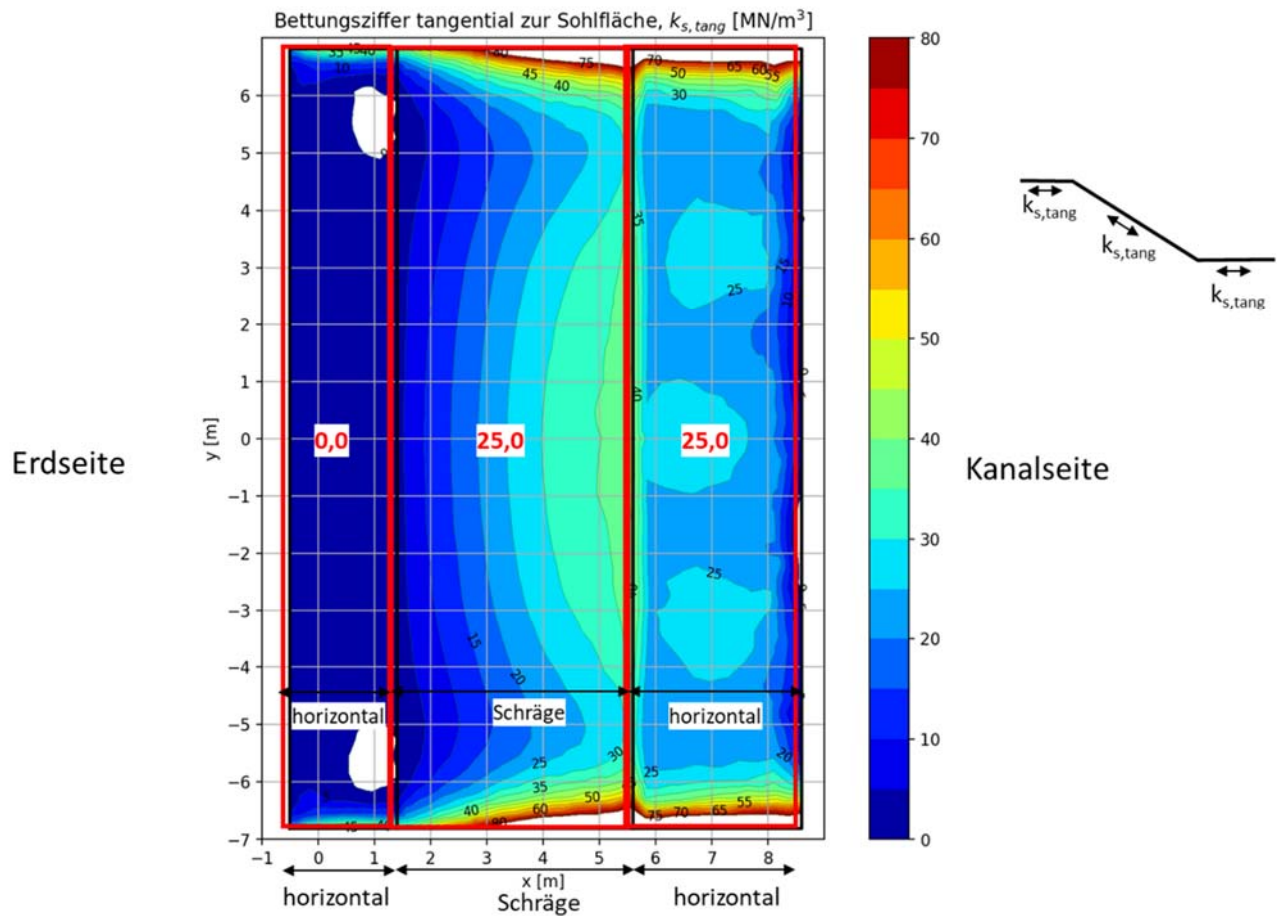


Bild 4-8 Widerlager Süd - Bettungsmodul $k_{s,tang}$ tangential zur Sohlfläche

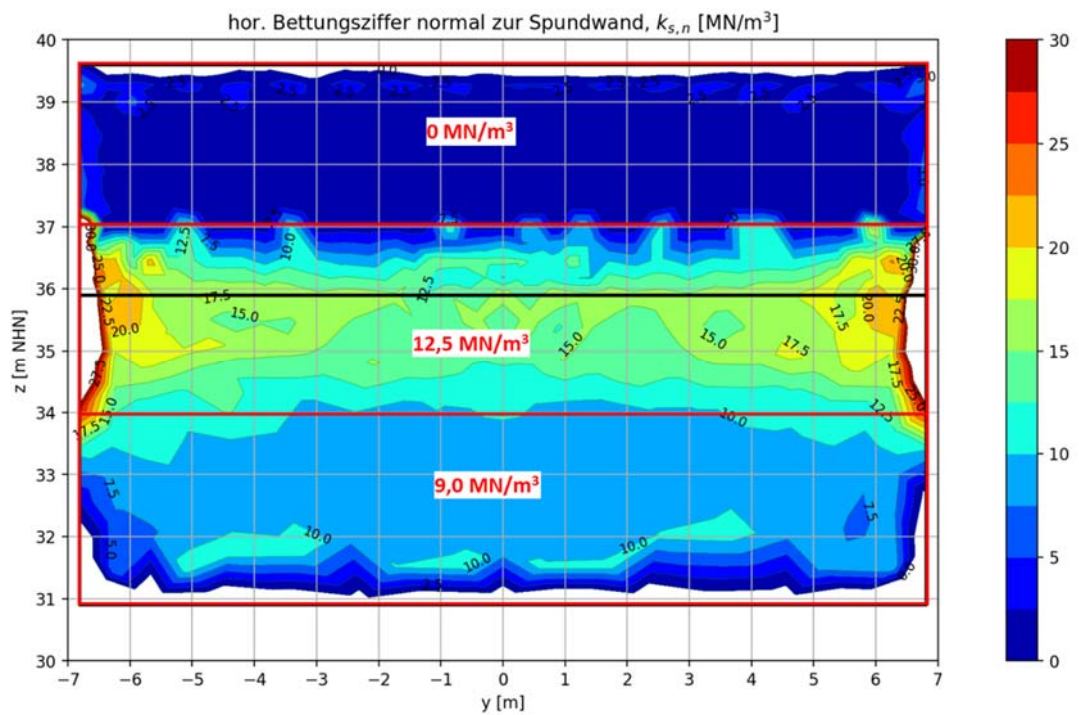
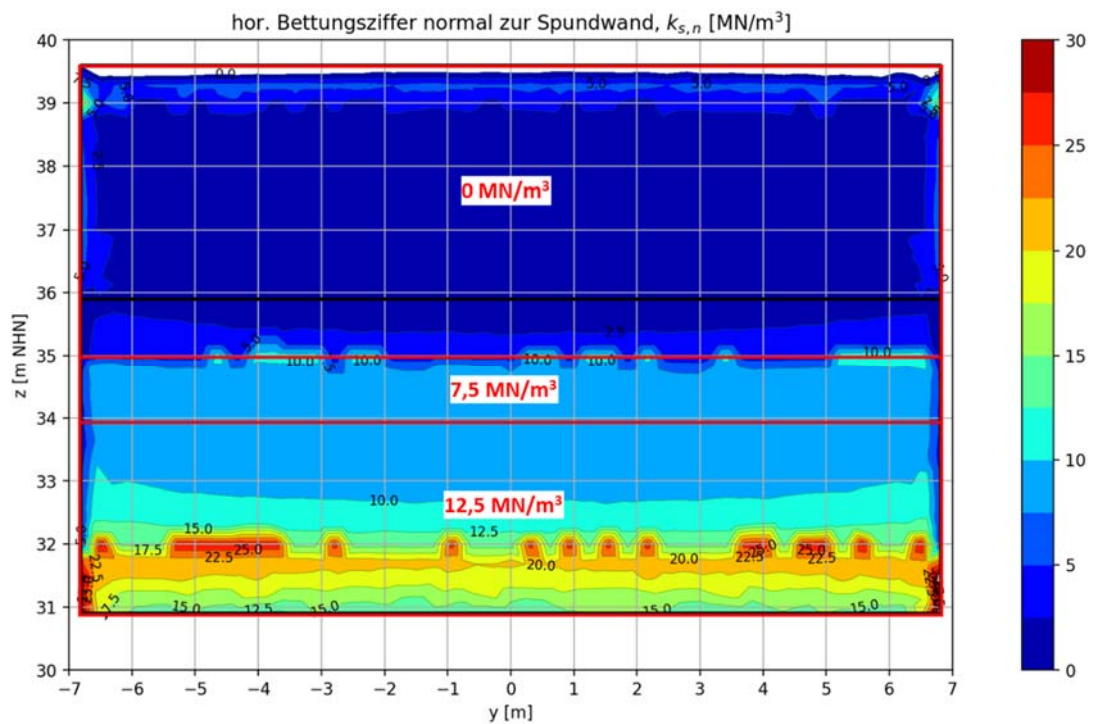
4.3 Bettung der Spundwände

Wie bei der Ermittlung der Bettungsmoduli der Widerlager werden die Bettungsmoduli der rückwärtigen Spundwände für den Lastfall „1,0*G + 0,3*Q“ ausgewertet. Der Bettungsmodul normal zur Spundwand wurde aus dem Quotient der horizontalen Zusatzspannungen normal zur Spundwand aus den Brückenlasten $\Delta\sigma'_n = \sigma'_{n,(Ph6)} - \sigma'_{n,(Ph5)}$ und der horizontalen Verschiebungen u_n normal zur Spundwand aus der Berechnungsphase Ph6 (Brückenlasten des Neubaus) ermittelt mit

$$k_{s,n} = \Delta\sigma'_n / u_n.$$

Bild 4-9 und Bild 4-10 zeigen die Bettungsmoduli normal zur Spundwand des nördlichen bzw. des südlichen Widerlagers. Mittlere Bettungsansätze sind rot gekennzeichnet.

In Anlage 5 ist die horizontale Verschiebung- und Spannungsverteilung normal zur Spundwand dargestellt.

Bild 4-9 Widerlager Nord - Bettungsmodul $k_{s,n}$ normal zur SpundwandBild 4-10 Widerlager Süd - Bettungsmodul $k_{s,n}$ normal zur Spundwand

4.4 Überprüfung der Grenztiefe

In den nachfolgenden Abbildungen ist die effektive Vertikalspannung an Unterkante des Modells in Höhe +10,0 m NHN im Bereich des Widerlagers für die Berechnungsphase 4 „Endaushub“ und die Berechnungsphase 7 „1,0*G + 1,0*Q“ dargestellt. Der Spannungszuwachs im Bereich des Widerlagers beträgt ca. 30 kN/m² und entspricht damit 30 / 330 ≈ 9% der Vertikalspannung am Ende des Aushubs. Das Kriterium für Setzungsberechnungen nach DIN 4019 [R 1], dass die Setzungsermittlung nur bis zu der Tiefe erfolgen muss, in der die Zusatzspannung ≤ 20% der initiellen Bodenspannung beträgt, ist somit eingehalten.

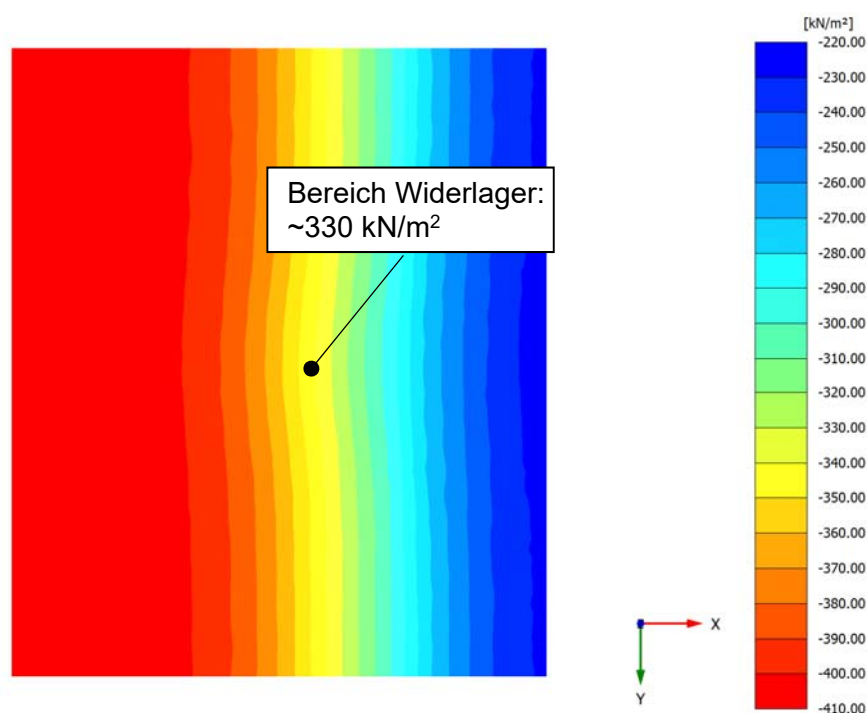


Bild 4-11 Effektive Vertikalspannung an UK Modell bei Endaushub (Phase 4), WL Nord

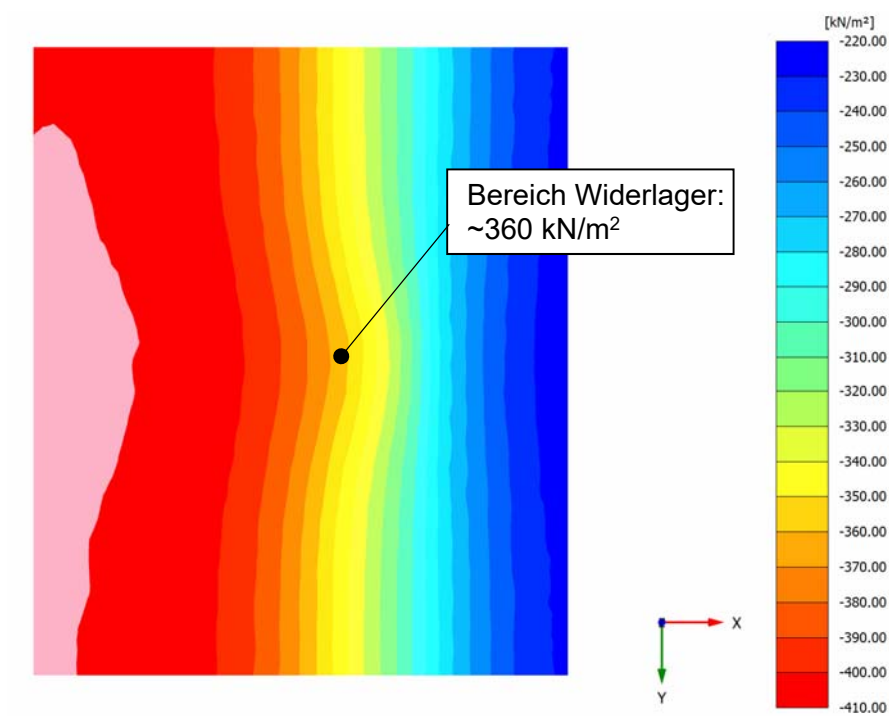


Bild 4-12 Effektive Vertikalspannung an UK Modell bei Brückenlasten „1,0*G + 1*Q“ (Phase 7), WL Nord

5 BANDBREITE DER BETTUNGSSTEIFIGKEITEN FÜR DIE TRAGWERKS- BERECHNUNG

Die Bettungen der Kontaktflächen des Widerlagers gemäß Kap. 4.2 und Kap. 4.3 wurden mit charakteristischen Baugrundsteifigkeiten ermittelt und stellen Grundwerte der Bettung dar. Um Baugrundinhomogenitäten bezüglich der Bodenkennwerte und übliche Idealisierungen des Berechnungsmodells zu berücksichtigen, werden die mittleren Bettungen mittels Streuungsfaktoren in Bandbreiten umgerechnet.

$$\begin{array}{lll} \text{weicher Grenzwert} & \min k_s = & \alpha_{\min} \times k_s \\ \text{steifer Grenzwert} & \max k_s = & \alpha_{\max} \times k_s \end{array}$$

Zur näherungsweisen Ermittlung der Bandbreite der Bettung werden die Faktoren der Sensitivitätsanalyse gemäß RE-ING [R 5], Tabelle 2.5.1 Abschnitt „Flachgründungen“ auf die Bettungen angesetzt:

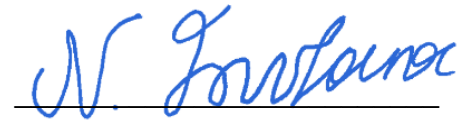
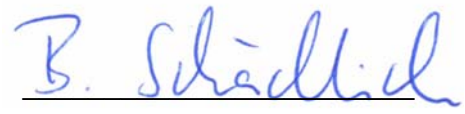
$$\begin{array}{l} \alpha_{\min} = 0,5 \\ \alpha_{\max} = 2,0 \end{array}$$

In der Tragwerksplanung sind mindestens die folgenden Variationen der Bettungssteifigkeiten zu untersuchen:

- Variante 1: beide Widerlagerseiten weich
- Variante 2: beide Widerlagerseiten steif

Bei Variante 1 sollte die horizontale Bettung an der rückwärtigen Spundwand (Kap. 4.3) vernachlässigt werden, da die dauerhafte Funktionsfähigkeit der Spundwand nicht sichergestellt ist.

Zum Abgleich des Modells der Tragwerksplanung mit dem geotechnischen Berechnungsmodell empfiehlt sich eine Vergleichsberechnung mit dem Streuungsfaktor $\alpha = 1$. Die Verformungen des Widerlagers sollten für den Lastfall $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q$ dann den Verschiebungen gemäß Kap. 4.1 entsprechen.

6 UNTERSCHRIFTEN
Dr.-Ing. J. Mittag
Dr.-Ing. Ioanna-Kleoniki Fontara
i.V. Dr.techn. B. Schädlich

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1 – Lasten des Überbaus	1 Seite
Anlage 2 – Ableitung der Bodensteifigkeiten für das HS-Modell	4 Seiten
Anlage 3 – Geometrie und FE-Netz der numerischen Modelle	11 Seiten
Anlage 4 – Materialkennwerte	22 Seiten
Anlage 5 – Berechnungsergebnisse	6 Seiten

Anlage 1

Lasten des Überbaus

 Lastfall $1,0 \cdot G + 0,3 \cdot Q$

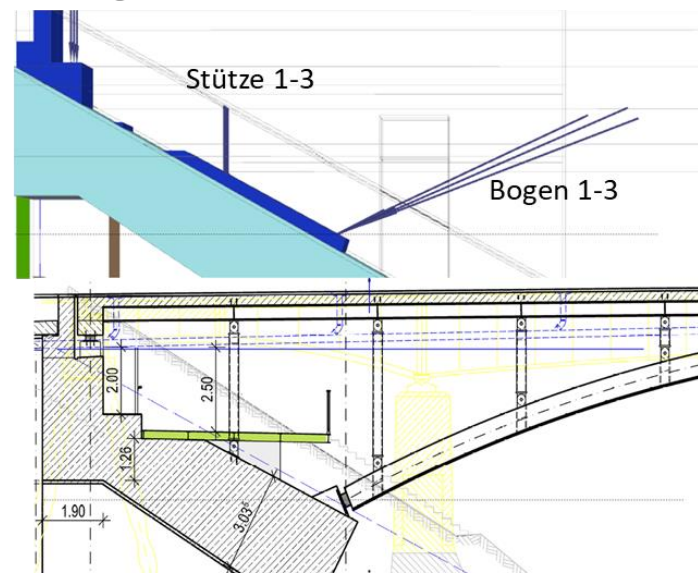
Auflagerkräfte [kN] des Überbaus nach Angabe Tragwerksplaner

	Bogen 1	Bogen 2	Bogen 3
$N(1g+0,3q)$	-4301	-4301	-4301
$V_y(1g+0,3q)$	-81	-81	-81
$V_z(1g+0,3q)$	-179	-179	-179
	Stützen 1	Stützen 2	Stützen 3
$N(1g+0,3q)$	-941	-1078	-910
$V_y(1g+0,3q)$	0	0	0
$V_z(1g+0,3q)$	-66	29	67
	Auflager 1	Auflager 2	Auflager 3
$N(1g+0,3q)$	357	398	450
$V_y(1g+0,3q)$	0	0	0
$V_z(1g+0,3q)$	0	0	0

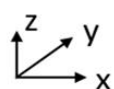
Druck

Ansatz in Plaxis			
	Bogen 1	Bogen 2	Bogen 3
x	-4052	-3412	-4006
y	-81	-22	82
z	-1453	-1270	-1437
	Stützen 1	Stützen 2	Stützen 3
x	0	0	0
y	-37	9	38
z	-538	-508	-523
	Auflager 1	Auflager 2	Auflager 3
x	0	0	0
y	0	0	0
z	-235	-244	-262

Auflager 1-3

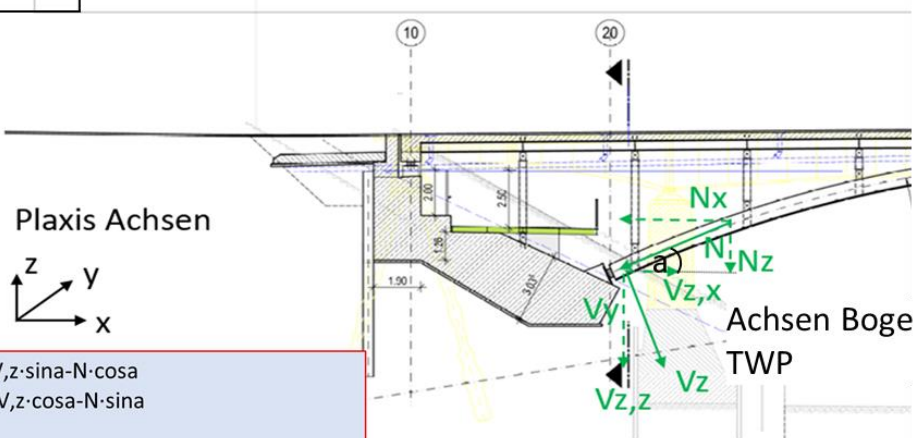


Plaxis Achsen



$$\Sigma F_x = V_{z,x} \cdot \sin \alpha - N \cdot \cos \alpha$$

$$\Sigma F_z = -V_{z,z} \cdot \cos \alpha - N \cdot \sin \alpha$$

 Achsen Bogen
TWP


Anlage 2

Ableitung der Bodensteifigkeiten für das HS-Modell - WL Nord

Die Steifigkeitskennwerte der Bodenschichten im Geotechnischen Bericht wurden in Abhängigkeit der Tiefe t ab Geländeoberkante (GOK) festgelegt. Für FE-Berechnungen auf der Grundlage des Hardening Soil (HS) Modells müssen diese tiefenabhängige Steifigkeitsangabe in den spannungsabhängigen ödometrischen Steifemodul E_{oed} überführt werden. Die Umrechnung erfolgt für den initiellen Spannungszustand.

GW-Spiegel: 32.3 m ü. NHN

Hinweise: t ist die Tiefe ab GOK

Umrechnungsformel: $E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\varphi - \sigma_1' \cdot \sin\varphi}{c \cdot \cos\varphi + p^{ref} \cdot \sin\varphi} \right)$

Bodenschicht	Geotechnischer Bericht						Angesetzte HS-Materialparameter für $p^{ref}=100\text{ kPa}$	
	Steifigkeiten E_s/v_t [MN/m ²]	Scherfestigkeit c [kN/m ²]	φ [°]	Wichte γ [kN/m ²]	Vorbelastung?	OK Schicht [m ü. NHN]	E_{oed}^{ref} [MN/m ²]	m [--]
Auffüllung	15	0	27.5	18.0	nein	41.5	25	0.5
Geschiebelehm	5	2	27.5	21.0	nein	39.0	8	0.7
Sand md	30	0	32.5	19.5	nein	37.0	47	0.5
Mergel steif	75	5	28.0	21.5	ja	28.0	34	0.7
Sand dicht	125	0	35.0	21.0	ja	22.0	132	0.5

t ... Tiefe unter GOK

Abminderungsfaktor auf E_s -Werte des Geotechnischen Berichtes: 0.660 für nicht vorbelastete Böden
1.000 für vorbelastete Böden

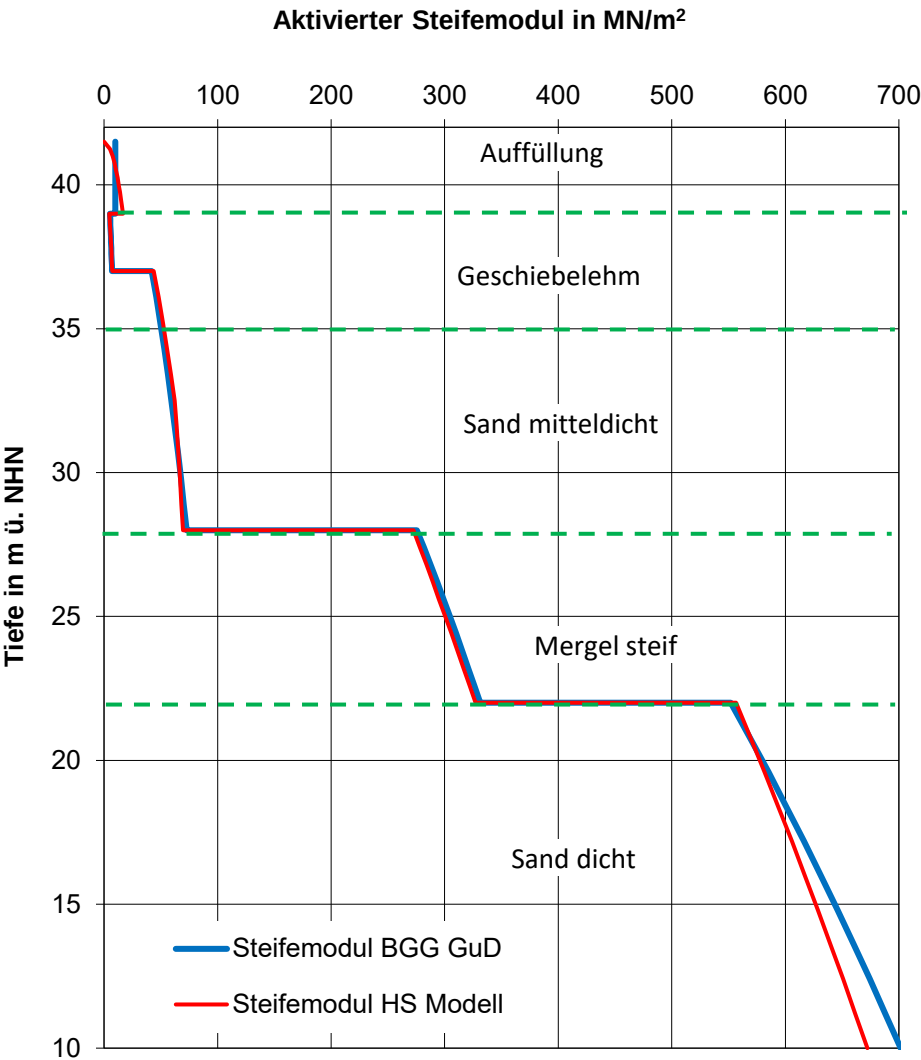
Die E_s -Werte des Baugrundgutachtens basieren auf Rückrechnungen von Setzungsmessungen an ausgeführten Bauwerken (siehe Th. Richter 1995: Zur rechnerischen Abschätzung des Lastsetzungsverhalten von Bauwerken). In diesen Rückrechnungen wurde die Zunahme der Bodensteifigkeit durch die Gebäudeauflast nicht explizit betrachtet, d.h. dieser Effekt ist implizit in den abgeleiteten E_s -Werten enthalten.

In den FE-Berechnungen mit dem HS-Modell hingegen wird dieser versteifenden Effekt über die spannungsabhängigen Steifigkeitsparameter direkt berücksichtigt. FE-Vergleichsberechnungen zeigten, dass bei üblichen Auflasten die Steifigkeitszunahme in den nicht vorbelasteten Bodenschichten ca. 30-50% beträgt.

In den eiszeitlich vorbelasteten Schichten tritt in der FE-Berechnung dagegen keine nennenswerte Steifigkeitszunahme durch die Auflast auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Fall die Bodensteifigkeit durch den Ent-/Wiederbelastungsmodul E_{ur} bestimmt wird, der im HS-Modell von der kleineren Hauptspannung σ_3' (d.h. näherungsweise der horizontalen Spannung) abhängt. Die Zunahme des Seitendrucks durch die Auflast ist deutlich geringer als die Zunahme der vertikalen Bodenspannung (in den vorbelasteten Schichten ca. 25% der vertikalen Spannungszunahme), was sich in einer entsprechend geringen Steifigkeitserhöhung ausdrückt.

Für den Abgleich der tiefenabhängigen E_s -Werte mit den E_{oed} -Werten des HS-Modells werden daher die E_s -Werte des Geotechnischen Berichtes für die nicht vorbelasteten Schichten mit dem Faktor $1/1,5 = 0,6667$ abgemindert. Für die eiszeitlich vorbelasteten Schichten werden dagegen die 1,0-fachen E_s -Werte des Geotechnischen Berichtes zugrunde gelegt.

Das Diagramm auf der folgenden Seite zeigt die Entwicklung des Steifemoduls über die Tiefe ab GOK für den Steifigkeitsansatz des Geotechnischen Berichtes und des HS-Modells.



Ableitung der Bodensteifigkeiten für das HS-Modell - WL Süd

Die Steifigkeitskennwerte der Bodenschichten im Geotechnischen Bericht wurden in Abhängigkeit der Tiefe t ab Geländeoberkante (GOK) festgelegt. Für FE-Berechnungen auf der Grundlage des Hardening Soil (HS) Modells müssen diese tiefenabhängige Steifigkeitsangabe in den spannungsabhängigen ödometrischen Steifemodul E_{oed} überführt werden. Die Umrechnung erfolgt für den initiellen Spannungszustand.

GW-Spiegel: 32.3 m ü. NHN

Hinweise: t ist die Tiefe ab GOK

Umrechnungsformel: $E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\varphi - \sigma'_1 \cdot \sin\varphi}{c \cdot \cos\varphi + p^{ref} \cdot \sin\varphi} \right)$

Bodenschicht	Geotechnischer Bericht						Angesetzte HS-Materialparameter	
	Steifigkeiten	Scherfestigkeit		Wichte	Vorbe-	OK Schicht	für $p^{ref}=100\text{ kPa}$	
	E_s/vt [MN/m ²]	c [kN/m ²]	φ [°]	γ [kN/m ²]	lastung?	[m ü. NHN]	E_{oed}^{ref} [MN/m ²]	m [--]
Auffüllung	15	0	27.5	18.0	nein	41.5	25	0.5
Geschiebelehm	5	2	27.5	21.0	nein	39.0	8	0.7
Sand locker	18	0	30.0	18.0	nein	35.0	25	0.5
Sand md	30	0	32.5	19.5	nein	32.0	47	0.5
Mergel steif	75	5	28.0	21.5	ja	28.0	34	0.7
Sand dicht	125	0	35.0	21.0	ja	17.0	132	0.5

t ... Tiefe unter GOK

Abminderungsfaktor auf E_s -Werte des

Geotechnischen Berichtes: 0.660 für nicht vorbelastete Böden
1.000 für vorbelastete Böden

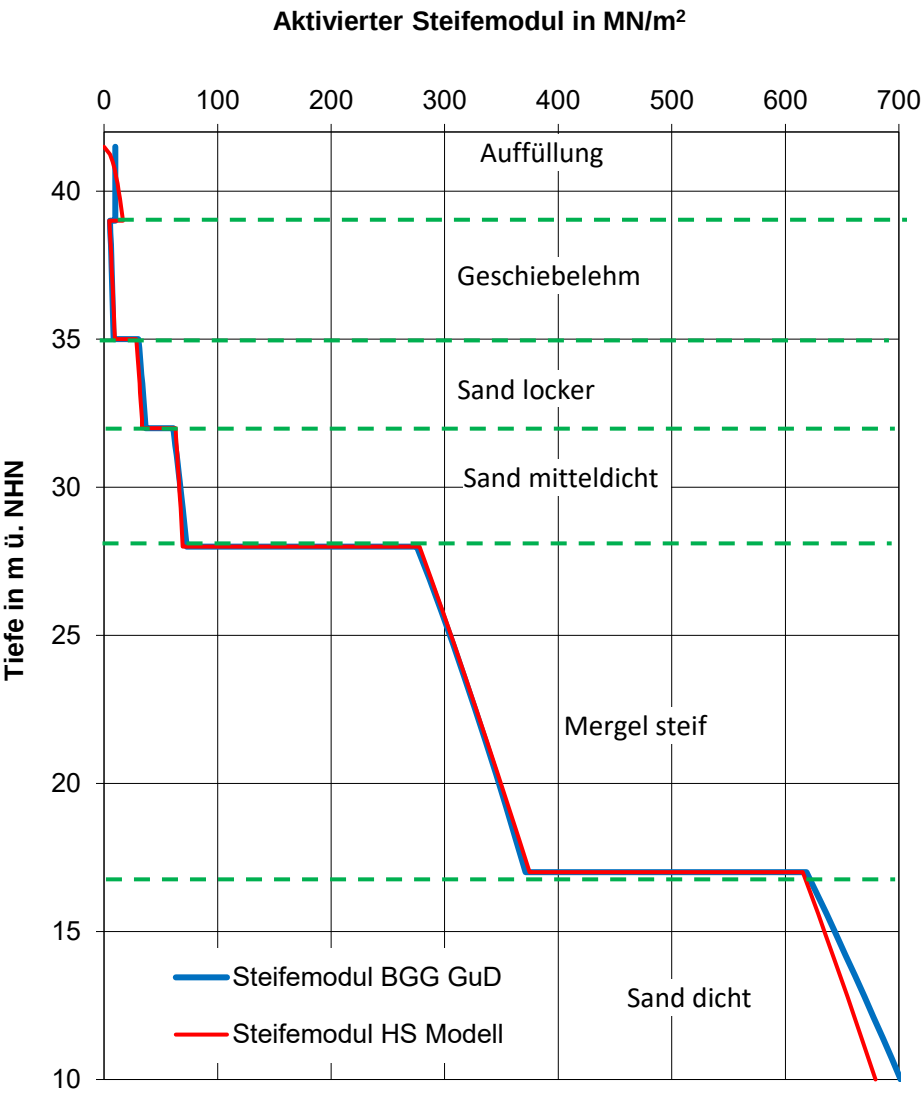
Die E_s -Werte des Baugrundgutachtens basieren auf Rückrechnungen von Setzungsmessungen an ausgeführten Bauwerken (siehe Th. Richter 1995: Zur rechnerischen Abschätzung des Lastsetzungsverhalten von Bauwerken). In diesen Rückrechnungen wurde die Zunahme der Bodensteifigkeit durch die Gebäudeauflast nicht explizit betrachtet, d.h. dieser Effekt ist implizit in den abgeleiteten E_s -Werten enthalten.

In den FE-Berechnungen mit dem HS-Modell hingegen wird dieser versteifenden Effekt über die spannungsabhängigen Steifigkeitsparameter direkt berücksichtigt. FE-Vergleichsberechnungen zeigten, dass bei üblichen Auflasten die Steifigkeitszunahme in den nicht vorbelasteten Bodenschichten ca. 30-50% beträgt.

In den eiszeitlich vorbelasteten Schichten tritt in der FE-Berechnung dagegen keine nennenswerte Steifigkeitszunahme durch die Auflast auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Fall die Bodensteifigkeit durch den Ent-/Wiederbelastungsmodul E_{ur} bestimmt wird, der im HS-Modell von der kleineren Hauptspannung σ'_3 (d.h. näherungsweise der horizontalen Spannung) abhängt. Die Zunahme des Seitendrucks durch die Auflast ist deutlich geringer als die Zunahme der vertikalen Bodenspannung (in den vorbelasteten Schichten ca. 25% der vertikalen Spannungszunahme), was sich in einer entsprechend geringen Steifigkeitserhöhung ausdrückt.

Für den Abgleich der tiefenabhängigen E_s -Werte mit den E_{oed} -Werten des HS-Modells werden daher die E_s -Werte des Geotechnischen Berichtes für die nicht vorbelasteten Schichten mit dem Faktor $1/1,5 = 0,6667$ abgemindert. Für die eiszeitlich vorbelasteten Schichten werden dagegen die 1,0-fachen E_s -Werte des Geotechnischen Berichtes zugrunde gelegt.

Das Diagramm auf der folgenden Seite zeigt die Entwicklung des Steifemoduls über die Tiefe ab GOK für den Steifigkeitsansatz des Geotechnischen Berichtes und des HS-Modells.



Anlage 3

3.1 Geometrie und FE-Netz des Modells Widerlager Nord

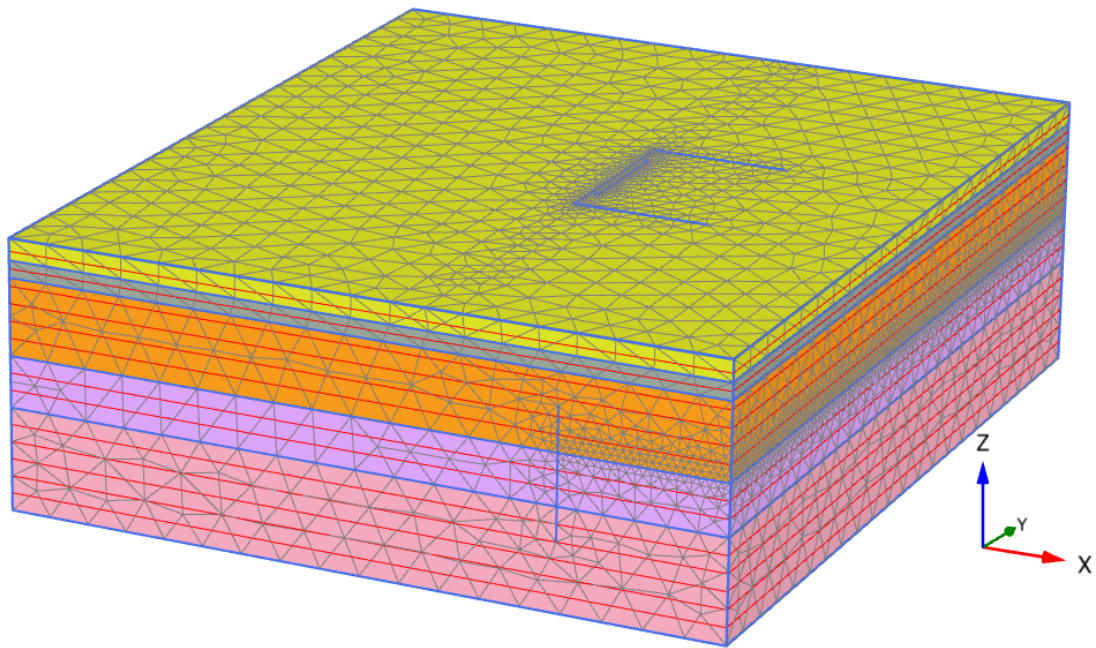


Abbildung A3 - 1: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 0 – Initieller Spannungszustand:
 Diskretisierung der Bodenelemente

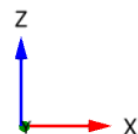


Abbildung A3 - 2: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 0 – Initieller Spannungszustand:
 Längsschnitt Bodenschichtung

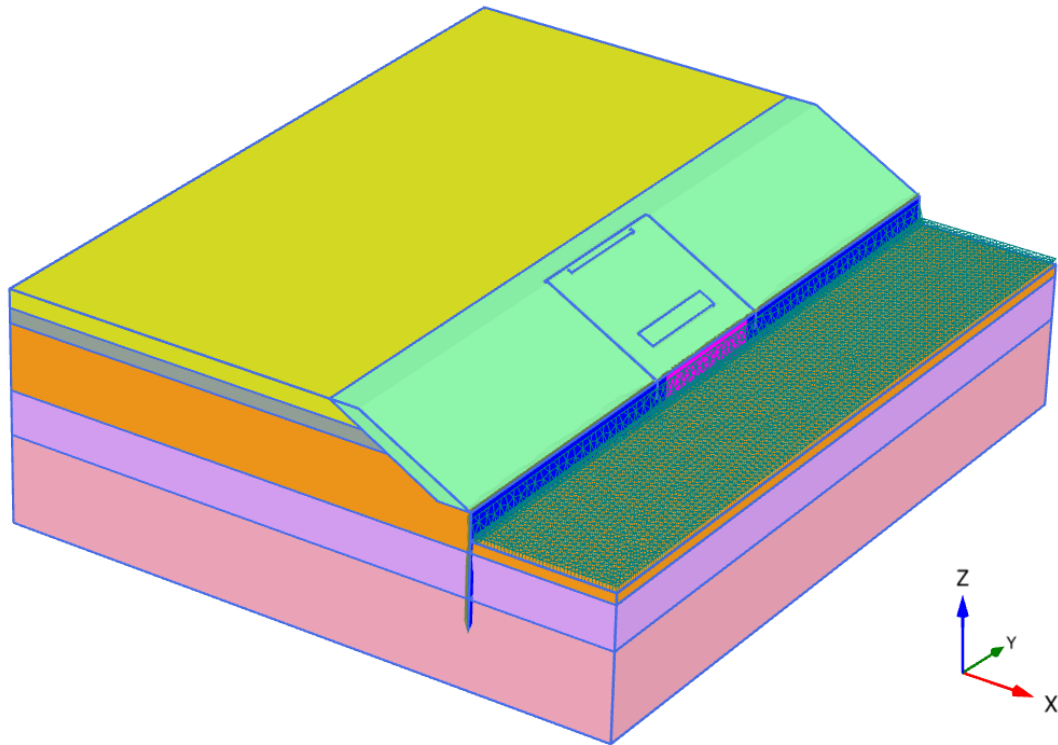


Abbildung A3 - 3: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 1 – Kanal

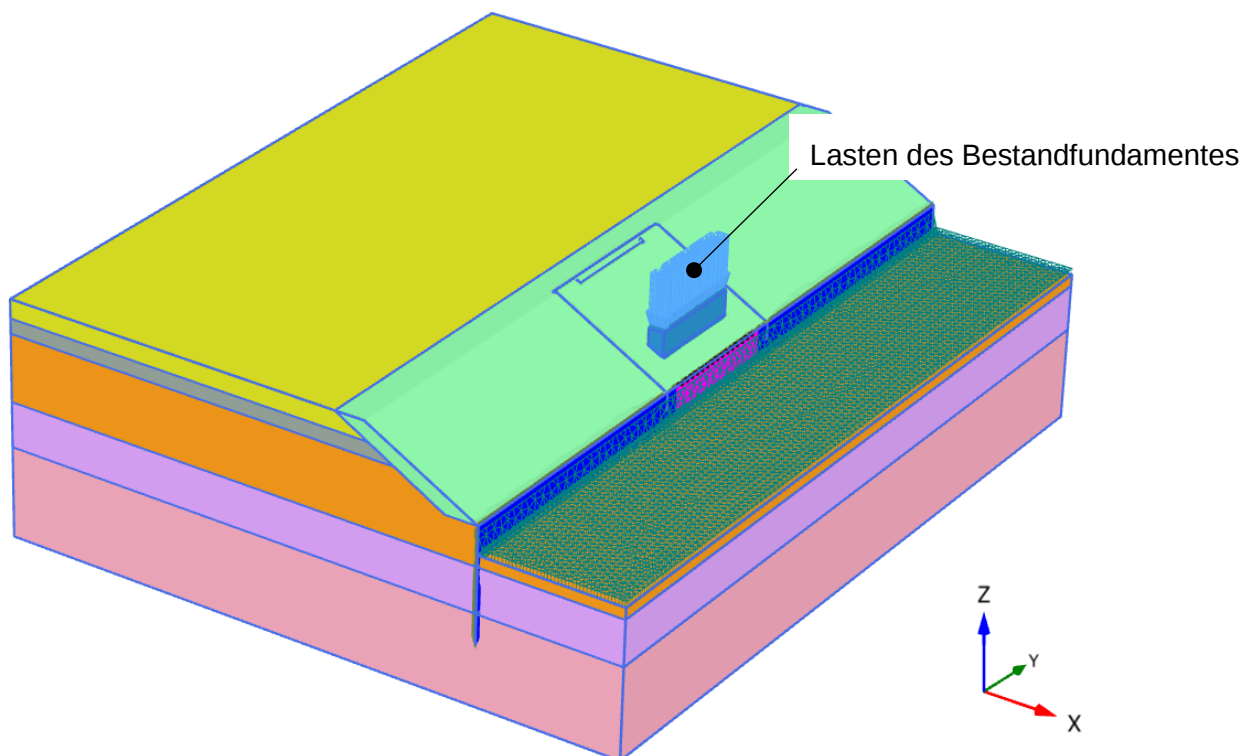


Abbildung A3 - 4: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 2 – Brücke Bestand

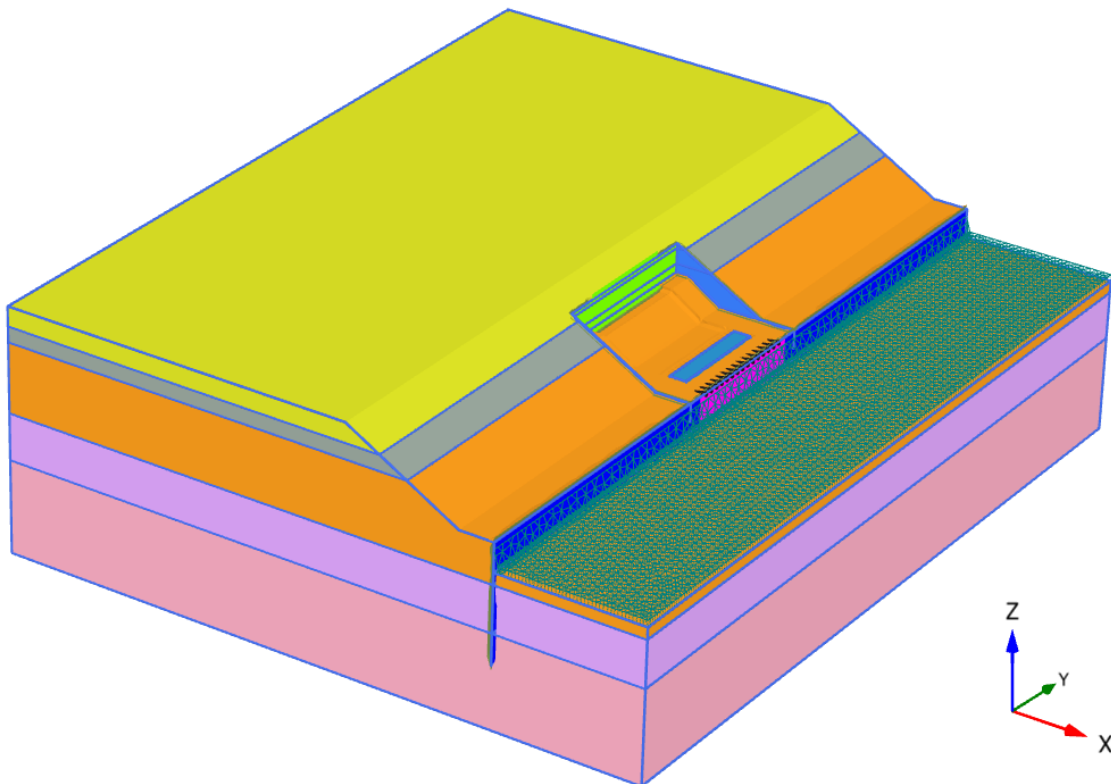


Abbildung A3 - 5: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 3 – Abbruch Bestand + Baugrube

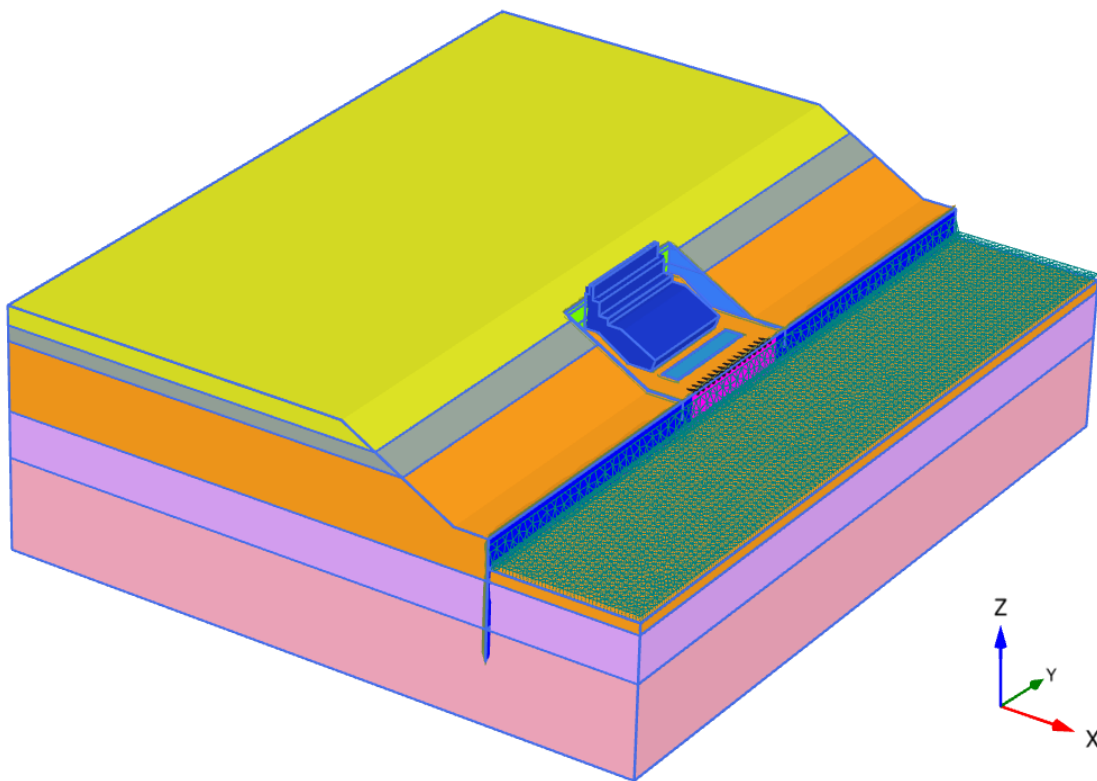


Abbildung A3 - 6: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 4 – Wiederlager ohne Last

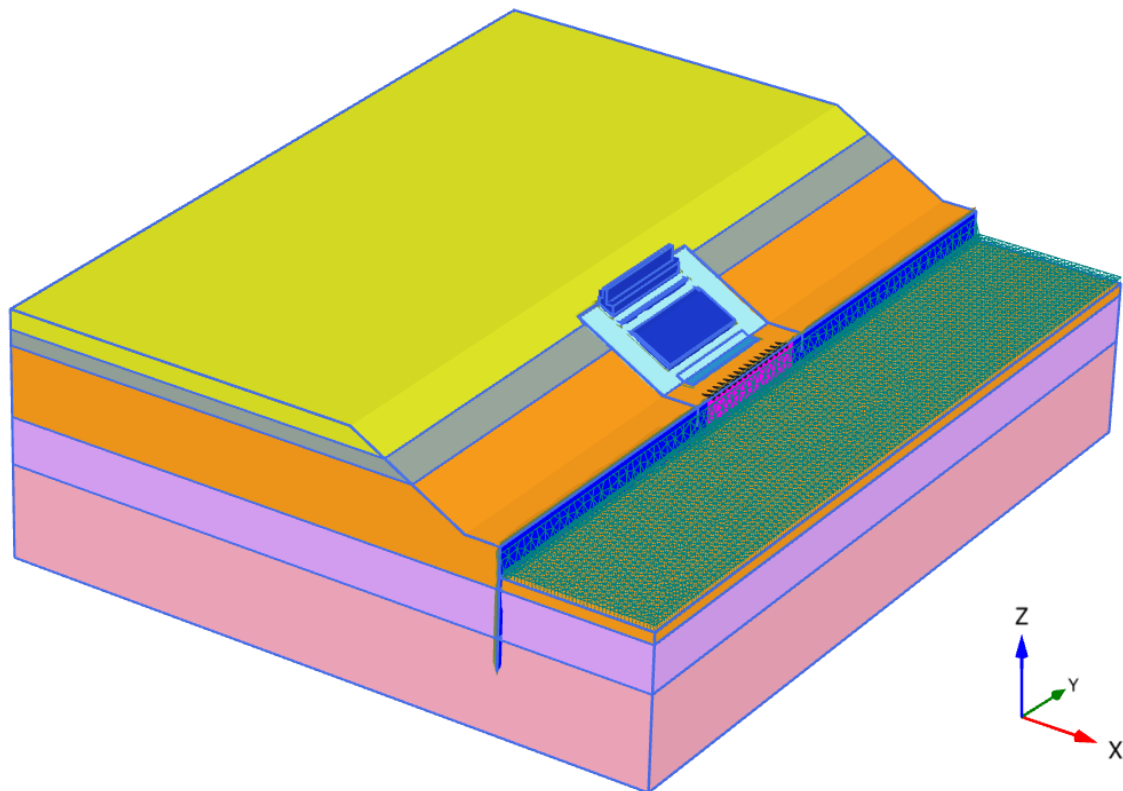


Abbildung A3 - 7: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 5 – Verfüllung Baugrube

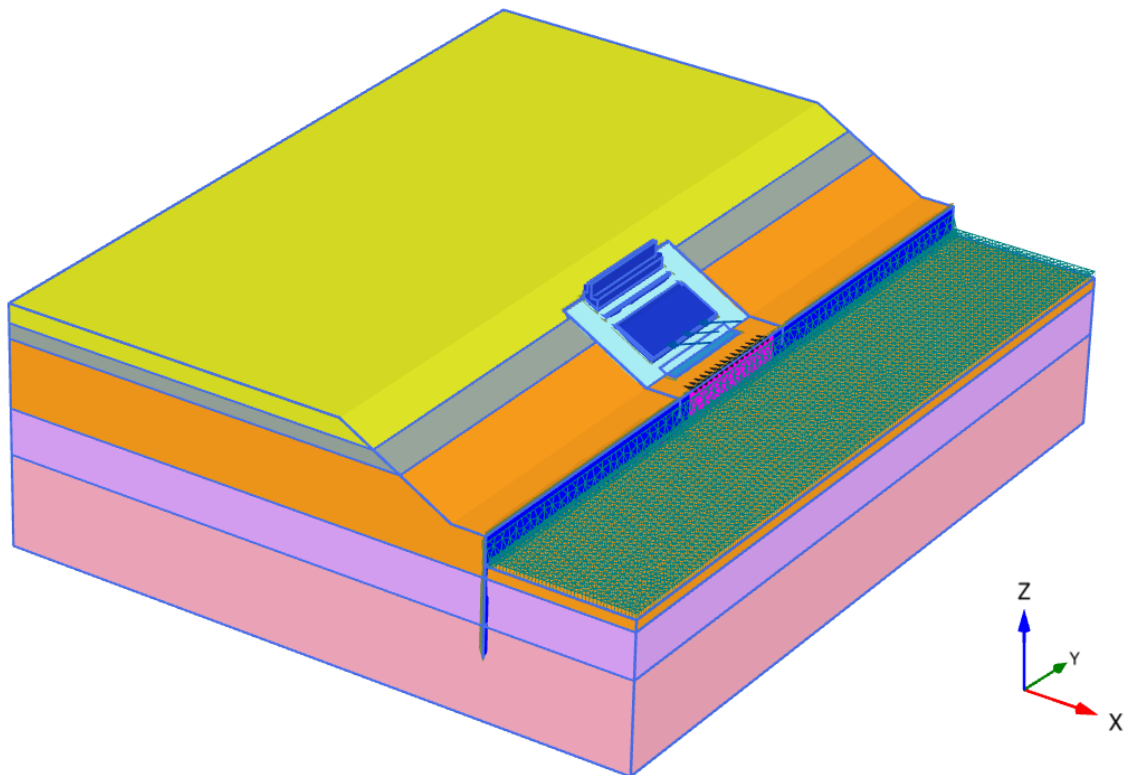


Abbildung A3 - 8: Widerlager Nord - Isometrie Gesamtmodell Phase 6 – Überbaulasten

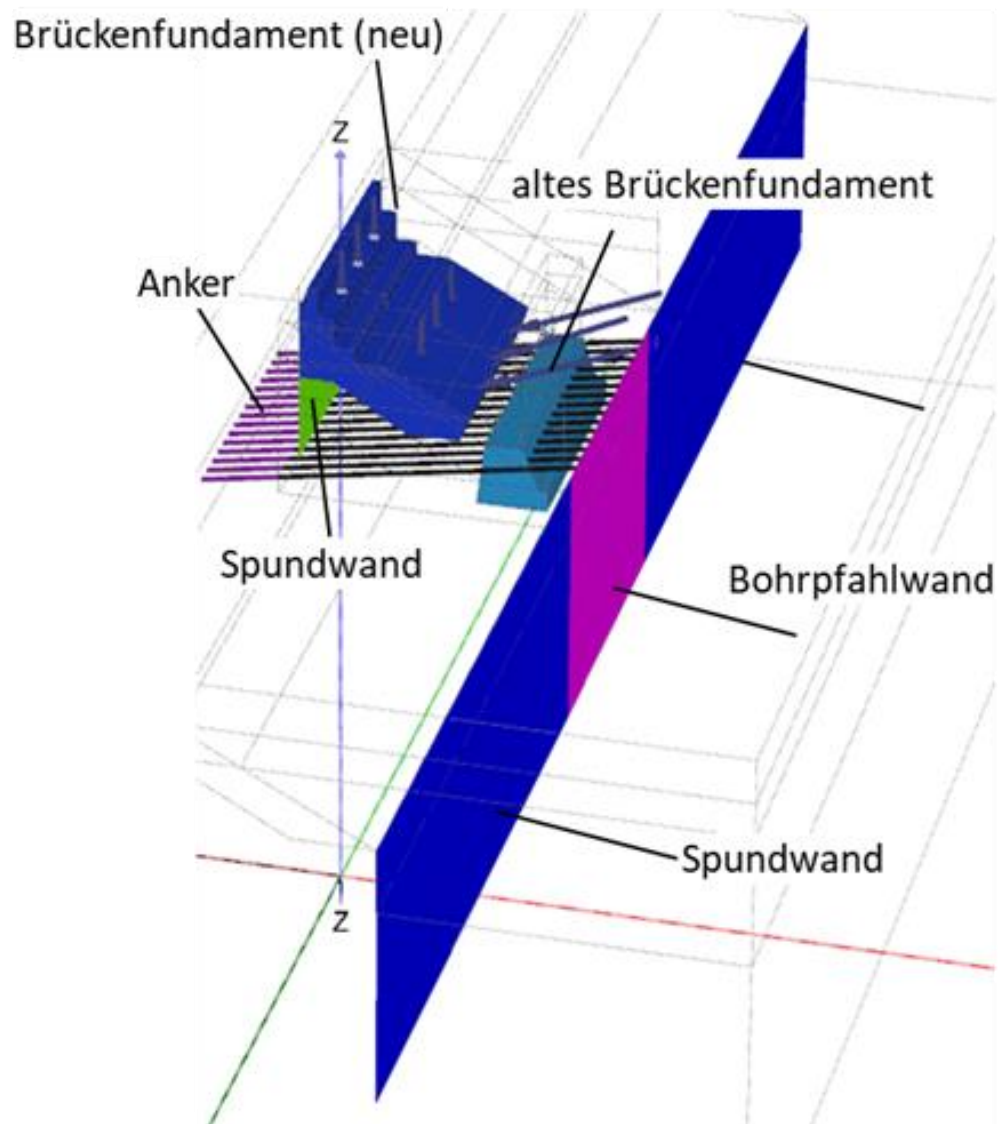


Abbildung A3 - 9: Widerlager Nord - Detail FE-Modell Phase 6 – Strukturelemente (ohne Bodenelemente)

3.2 Geometrie und FE-Netz des Modells Widerlager Süd

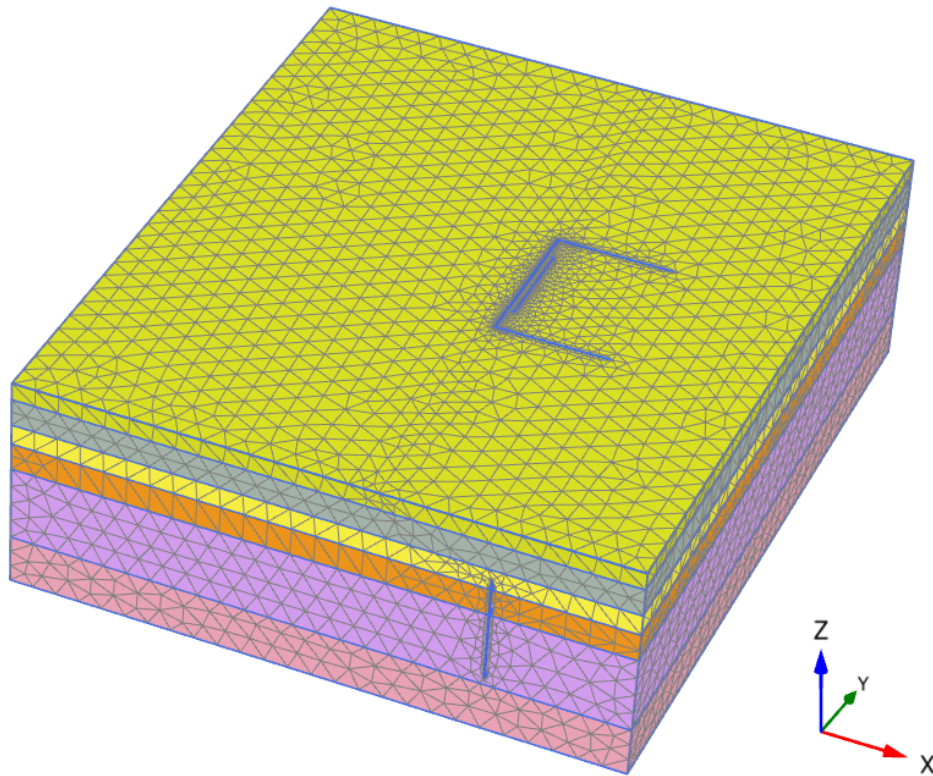


Abbildung A3 - 10: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 0 – Initieller Spannungszustand:
Diskretisierung der Bodenelemente

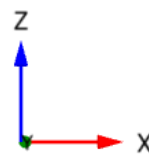
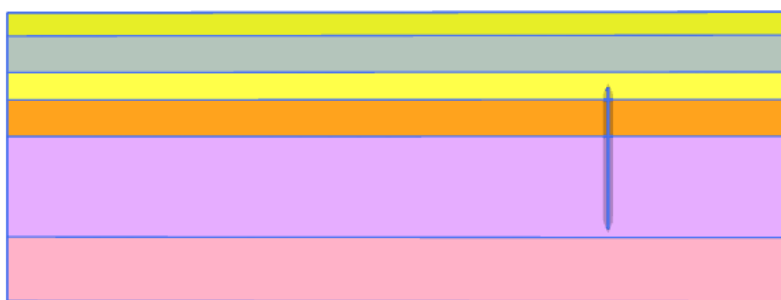


Abbildung A3 - 11: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 0 –Initieller Spannungszustand:
Längsschnitt Bodenschichtung

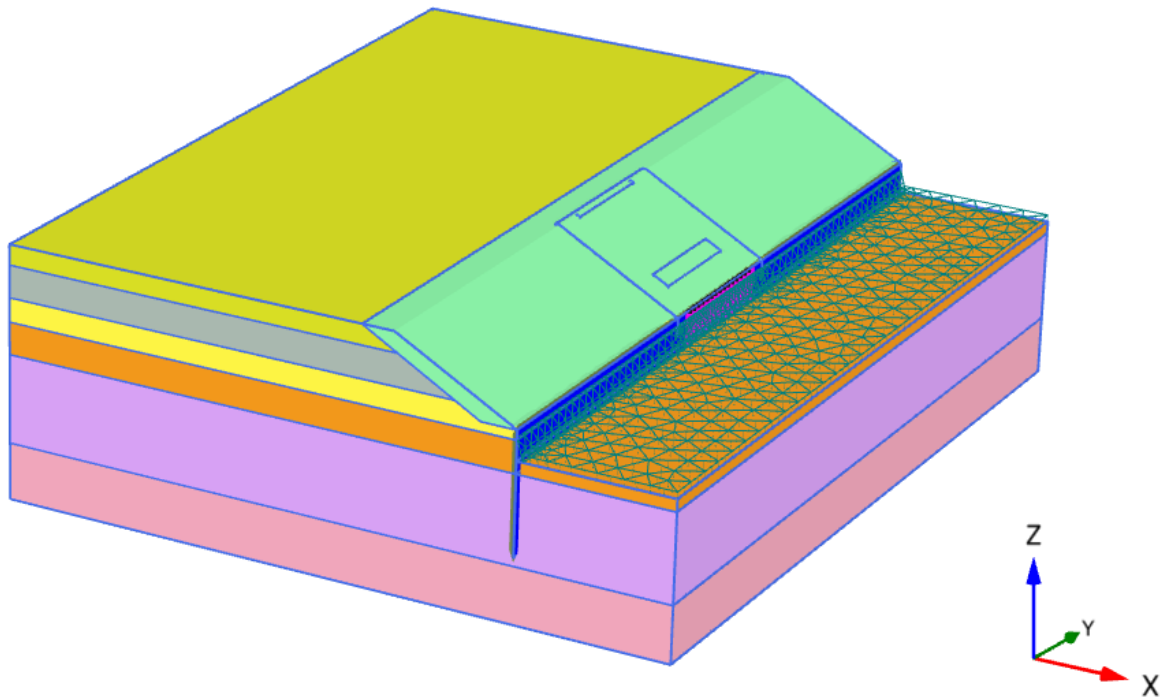


Abbildung A3 - 12: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 1 – Kanal

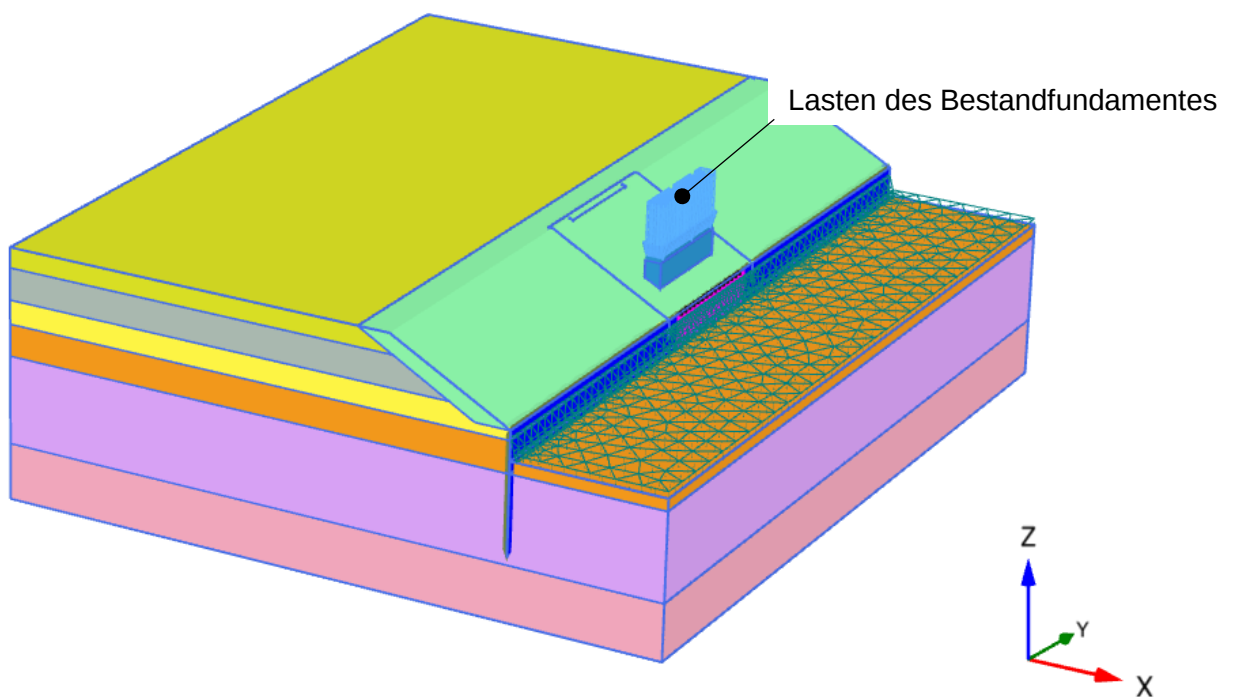


Abbildung A3 - 13: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 2 – Brücke Bestand

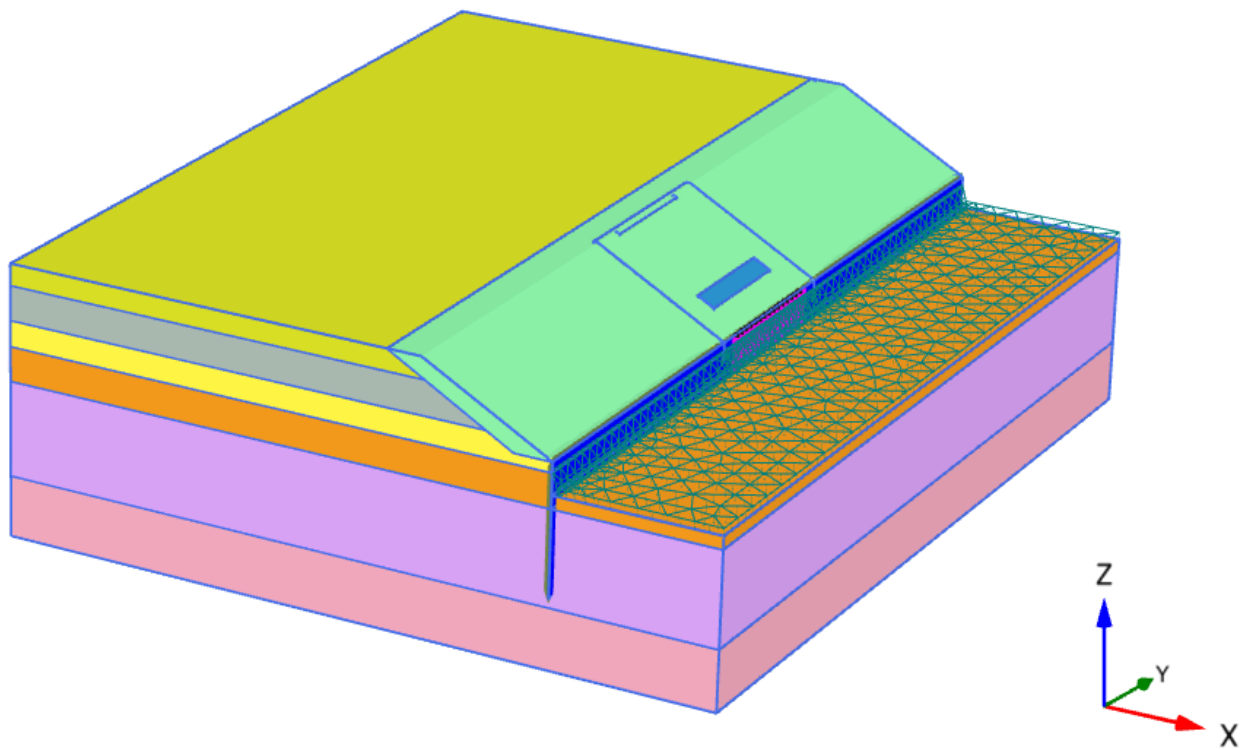


Abbildung A3 - 14: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 3a– Abbruch Bestand + Baugrundverbesserung

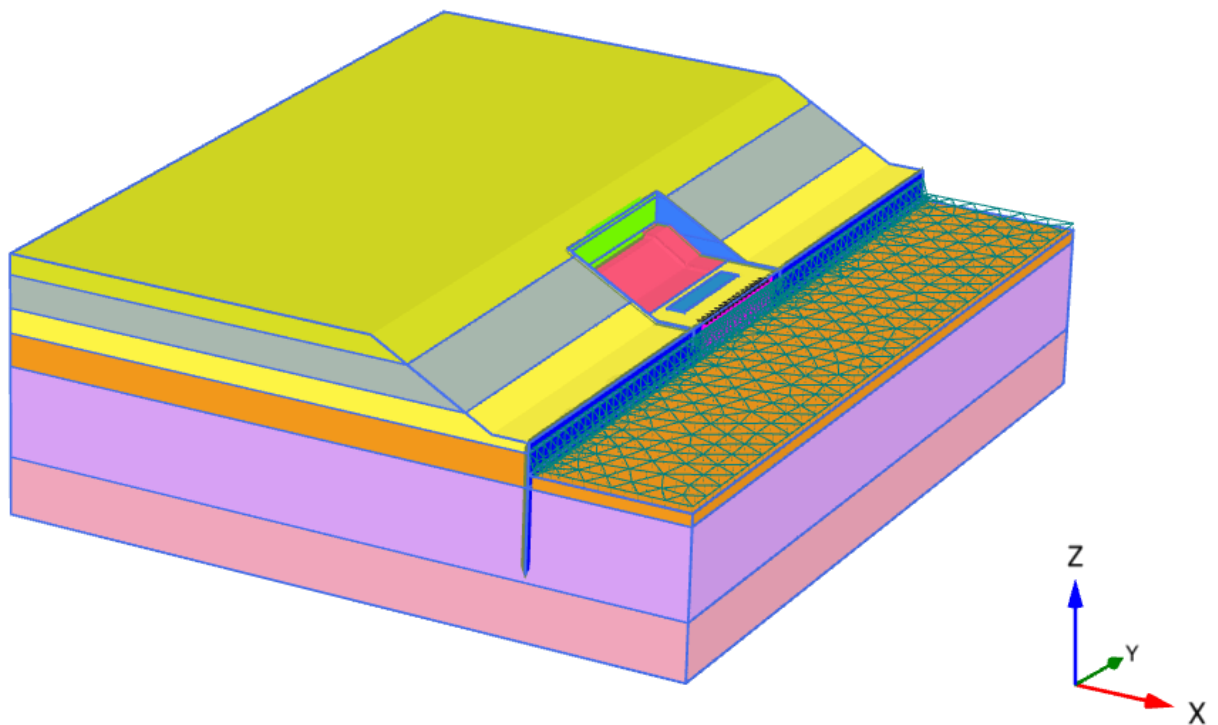


Abbildung A3 - 15: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 3b – Baugrube

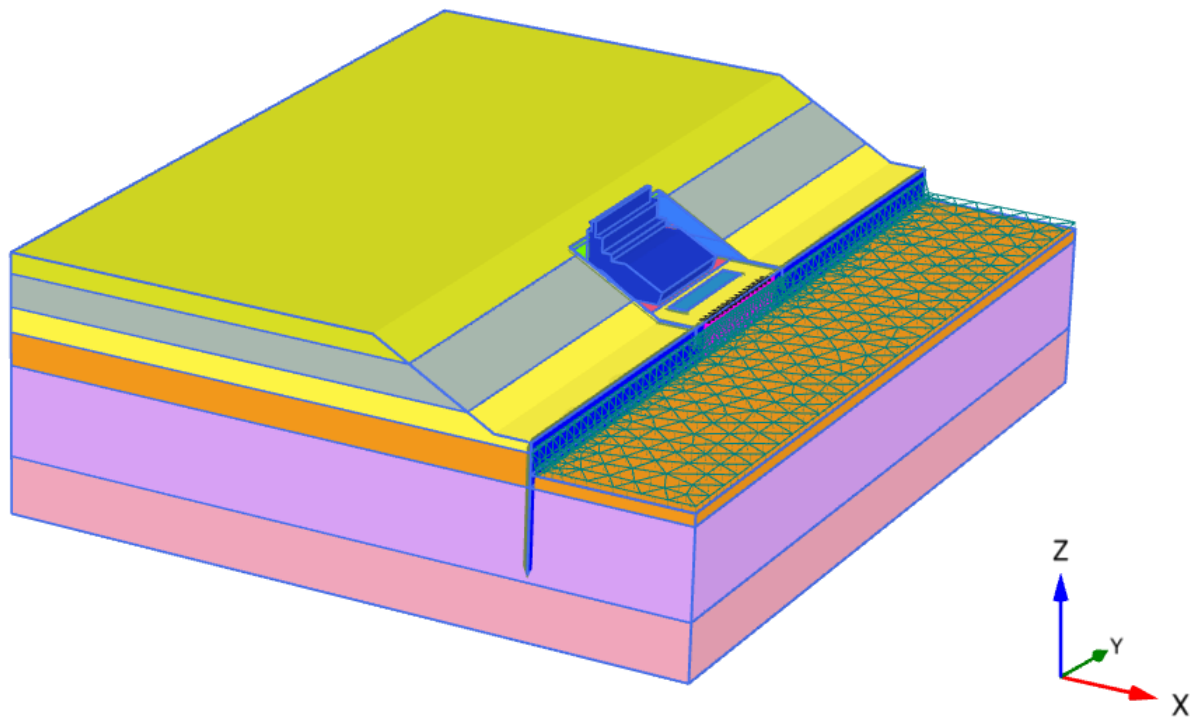


Abbildung A3 - 16: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 4 – Wiederlager ohne Last

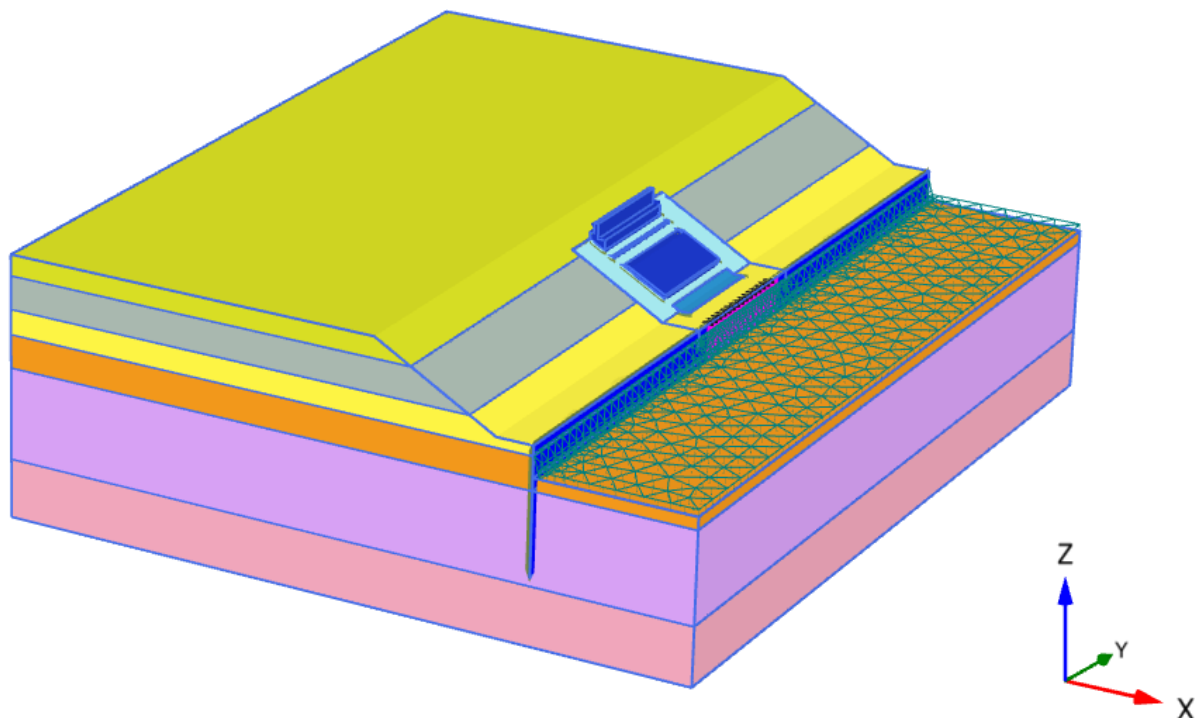


Abbildung A3 - 17: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 5 – Verfüllung Baugrube

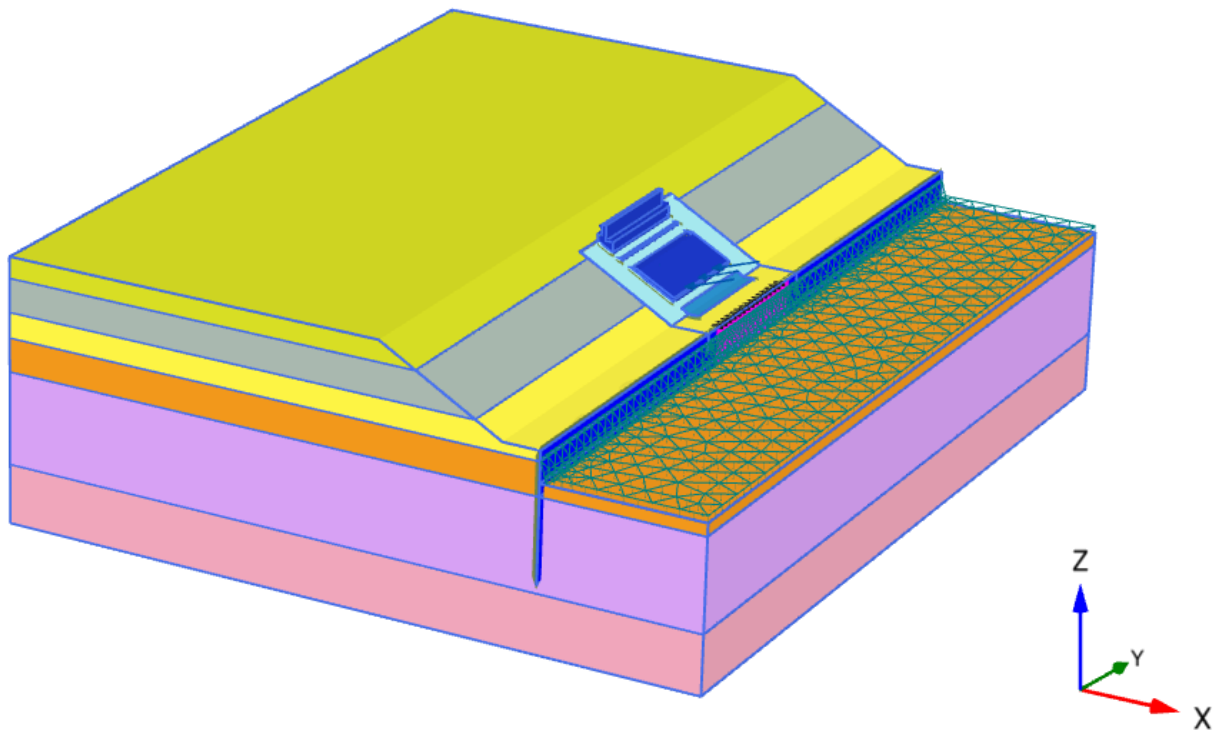


Abbildung A3 - 18: Widerlager Süd - Isometrie Gesamtmodell Phase 6 – Überbaulasten

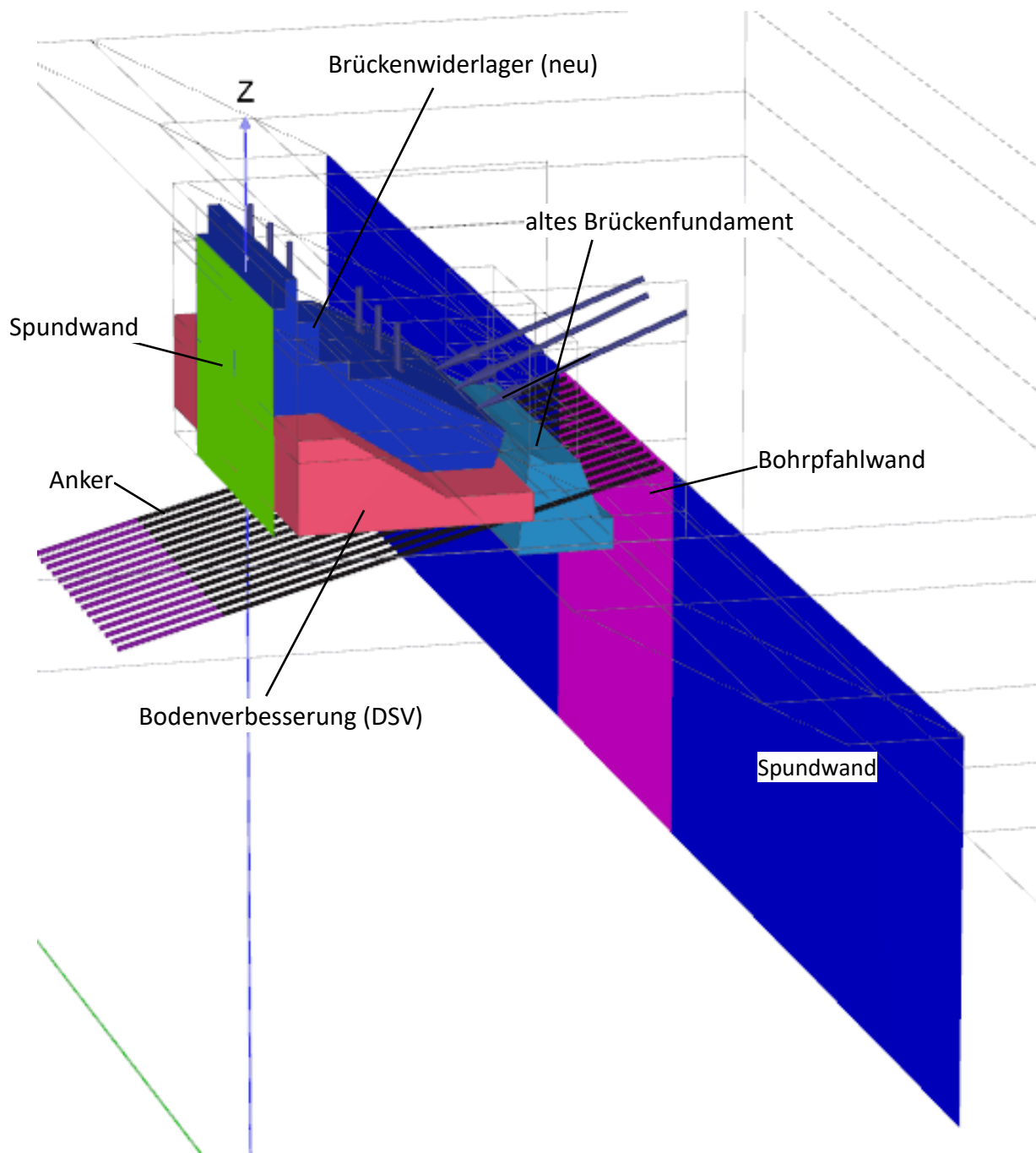


Abbildung A3 - 19: Widerlager Süd - Detail FE-Modell Phase 6 – Brückenlasten, Strukturelemente und Bodenverbesserung (DSV)

Anlage 4

4.1 Materialkennwerte - Modell Widerlager Nord

4.1.1 Boden HS-Modell - Teil 1

Identification		Auffüllung	Geschiebelehm	Mergel steif	obere Sande md	untere Sande dicht
Identification number		1	2	3	4	5
Drainage type		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
Colour						
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00	21,00	21,50	17,50	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00	21,00	21,50	19,50	21,00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$E_{\text{iso}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	25,00E3	8000	34,00E3	47,00E3	132,0E3
$E_{\text{axial}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	25,00E3	8000	34,00E3	47,00E3	132,0E3
$E_{\text{vol}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	75,00E3	24,00E3	170,0E3	141,0E3	330,0E3
power (m)		0,5000	0,7000	0,7000	0,5000	0,5000
Use alternatives		No	No	No	No	No
C_{v}		0,01380	0,04312	0,01015	7,340E-3	2,614E-3
C_{h}		4,140E-3	0,01294	1,826E-3	2,202E-3	0,9409E-3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
C_{ref}	kN/m ²	0,000	2,000	5,000	0,000	0,000
φ (phi)	°	27,50	27,50	28,00	32,50	35,00
ψ (psi)	°	0,000	0,000	0,000	2,500	5,000
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
v_{ref}		0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
K_{h}^{nc}		0,5383	0,5383	0,5305	0,4627	0,4264
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Z_{ref}	m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
R_{v}		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0,9866	0,9866	0,9866	0,9866	0,9866
v_{v}		0,4950	0,4950	0,4950	0,4950	0,4950
$K_{\text{a,ref}} / n$	kN/m ²	3,073E6	983,3E3	6,965E6	5,777E6	13,52E6
Stiffness		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable

Identification		Auffüllung	Geschiebelehm	Mergel steif	obere Sande md	untere Sande dicht
Drainage conductivity γ, dk	m ³ /day/m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Drainage conductivity γ, dk	m ³ /day/m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K _s determination		Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
K _{1,2} = K _{0,1}		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
K _{0,1}		0,5383	0,5383	0,8000	0,4627	0,8000
K _{0,2}		0,5383	0,5383	0,8000	0,4627	0,8000
OCR		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
POP	kN/m ²	0,000	0,000	500,0	0,000	500,0
k _s	m/day	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
k ₁	m/day	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
k ₂	m/day	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
e _{int}		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
S _s	1/m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
c _s		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

4.1.2 Boden HS-Modell - Teil 2

Identification		Oberfläche Böschung
Identification number		9
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	25,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	25,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	75,00E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		0,01380
C_s		4,140E-3
e_{init}		0,5000
c_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,5000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000

Identification		Oberfläche Böschung
z_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	3,073E6
Stiffness		Standard
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		Yes
δ_{inter}		0,000
Cross permeability		Impermeable
Drainage conductivity $_1, dk$	m ³ /day/m	0,000
Drainage conductivity $_z, dk$	m ³ /day/m	0,000
K_0 determination		Manual
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,y}$		0,5000
OCR		1,000
POP	kN/m ²	0,000
k_x	m/day	0,000
k_y	m/day	0,000
k_z	m/day	0,000
e_{init}		0,5000
S_s	1/m	0,000
c_k		1000E12

4.1.3 Widerlager

Identification		Beton-alt	Beton neu
Identification number		6	7
Drainage type		Non-porous	Non-porous
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	25,00	25,00
γ_{sat}	kN/m ³	25,00	25,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	20,00E6	33,00E6
ν (nu)		0,2000	0,2000
G	kN/m ²	8,333E6	13,75E6
E_{oed}	kN/m ²	22,22E6	36,67E6
V_s	m/s	1808	2323
V_p	m/s	2953	3793
Set to default values		Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
Z_{ref}	m	0,000	0,000
Stiffness		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity i, dk	m ³ /day/m	0,000	0,000

Identification		Beton-alt	Beton neu
Drainage conductivity z, dk	$m^3/day/m$	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,y}$		0,5000	0,5000
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
k_z	m/day	0,000	0,000
e_{init}		0,5000	0,5000
c_k		1000E12	1000E12

4.1.4 Boden - Mohr-Coulomb

Identification		Verfüllung	Verfüllung IF
Identification number		8	10
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00	20,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	25,00E3	25,00E3
ν (nu)		0,3500	0,3500
G	kN/m ²	9259	9259
E_{oed}	kN/m ²	40,12E3	40,12E3
c_{ref}	kN/m ²	0,000	1,000
ϕ (phi)	°	30,00	0,000
ψ (psi)	°	0,000	0,000
V_s	m/s	71,04	71,04
V_p	m/s	147,9	147,9
Set to default values		Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
z_{ref}	m	0,000	0,000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
z_{ref}	m	0,000	0,000
Tension cut-off		Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000	0,000

Identification		Verfüllung	Verfüllung IF
Undrained behaviour		Standard	Standard
Skempton-B		0,9699	0,9699
v_u		0,4950	0,4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	895,1E3	895,1E3
Stiffness		Standard	Standard
Strength		Manual	Rigid
R_{inter}		0,6000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity $_1, dk$	m ³ /day/m	0,000	0,000
Drainage conductivity $_z, dk$	m ³ /day/m	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,y}$		0,5000	0,5000
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
k_z	m/day	0,000	0,000
e_{init}		0,5000	0,5000
S_s	1/m	0,000	0,000
c_k		1000E12	1000E12

4.1.5 Anker

Identification		Ankerstab
Identification number		1
Comments		Stumpo Druckrohranker Stange d=32 mm
Colour		
Material type		Elastic
EA	kN	168,9E3
Identification number		1
Identification number		1

4.1.6 Plate -Elemente

Identification		Bohrpfahlwand	Spundwand_Querverbau	Uferwand	Spundwand_Längsverbau
Identification number		1	2	3	4
Comments		d=90cm			
Colour					
Material type		Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
d	m	0,6500	0,1370	0,1210	0,1920
γ	kN/m ³	0,000	0,000	0,000	0,000
Isotropic		Yes	Yes	Yes	Yes
E ₁	kN/m ²	20,00E6	240,0E6	210,0E6	240,0E6
E ₂	kN/m ²	20,00E6	240,0E6	210,0E6	240,0E6
ν ₁₂		0,2000	0,3000	0,3000	0,3000
G ₁₂	kN/m ²	8,333E6	92,31E6	80,77E6	92,31E6
G ₁₃	kN/m ²	8,333E6	92,31E6	80,77E6	92,31E6
G ₂₃	kN/m ²	8,333E6	92,31E6	80,77E6	92,31E6
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000	0,000
Prevent punching		Yes	Yes	Yes	Yes
Identification number		1	2	3	4

4.1.7 Embedded-beam-Elemente

Identification		Verpresskörper
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
E	kN/m ²	5,380E6
γ	kN/m ³	0,000
Beam type		Predefined
Predefined beam type		Massive circular beam
Diameter	m	0,2000
A	m ²	0,03142
I ₂	m ⁴	0,07854E-3
I ₃	m ⁴	0,07854E-3
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Axial skin resistance		Linear
T _{skin, start, max}	kN/m	136,7
T _{skin, end, max}	kN/m	136,7
F _{max}	kN	0,000
Identification number		1

4.2 Materialkennwerte - Modell Widerlager Süd

4.2.1 Boden HS-Modell - Teil 1

Identification		Auffüllung	Geschiebelehm	Mergel steif	obere Sande md	untere Sande dicht
Identification number		1	2	3	4	5
Drainage type		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
Colour						
Comments						
γ_{sat}	kN/m ³	18,00	21,00	21,50	17,50	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00	21,00	21,50	19,50	21,00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$E_{\text{vib}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	25,00E3	8000	34,00E3	47,00E3	132,0E3
$E_{\text{vib}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	25,00E3	8000	34,00E3	47,00E3	132,0E3
$E_{\text{vib}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	75,00E3	24,00E3	170,0E3	141,0E3	330,0E3
power (m)		0,5000	0,7000	0,7000	0,5000	0,5000
Use alternatives		No	No	No	No	No
C_{v}		0,01380	0,04312	0,01015	7,340E-3	2,614E-3
C_{v}		4,140E-3	0,01294	1,826E-3	2,202E-3	0,9409E-3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
C_{ref}	kN/m ²	0,000	2,000	5,000	0,000	0,000
φ (phi)	°	27,50	27,50	28,00	32,50	35,00
ψ (psi)	°	0,000	0,000	0,000	2,500	5,000
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
v_{ref}		0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
$K_{\text{v}}^{\text{ref}}$		0,5383	0,5383	0,5305	0,4627	0,4264
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Z_{ref}	m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
R_{v}		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0,9866	0,9866	0,9866	0,9866	0,9866
v_{v}		0,4950	0,4950	0,4950	0,4950	0,4950
$K_{\text{v,ref}} / n$	kN/m ²	3,073E6	983,3E3	6,965E6	5,777E6	13,52E6
Stiffness		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable

Identification		Auffüllung	Geschiebelehm	Mergel steif	obere Sande md	untere Sande dicht
Drainage conductivity γ, dk	m³/day/m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Drainage conductivity γ, dk	m³/day/m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K _s determination		Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
K _{1,2} = K _{0,1}		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
K _{0,1}		0,5383	0,5383	0,8000	0,4627	0,8000
K _{0,2}		0,5383	0,5383	0,8000	0,4627	0,8000
OCR		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
POP	kN/m²	0,000	0,000	500,0	0,000	500,0
k _s	m/day	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
k ₁	m/day	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
k ₂	m/day	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
e _{int}		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
S _s	1/m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
c _s		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

4.2.2 Boden HS-Modell - Teil 2

Identification		Oberfläche Böschung	Sand locker
Identification number		9	10
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00	20,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	25,00E3	25,00E3
$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	25,00E3	25,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	75,00E3	75,00E3
power (m)		0,5000	0,5000
Use alternatives		No	No
C_c		0,01380	0,01380
C_s		4,140E-3	4,140E-3
e_{init}		0,5000	0,5000
C_{ref}	kN/m ²	5,000	0,000
ϕ (phi)	°	30,00	30,00
ψ (psi)	°	0,000	0,000
Set to default values		Yes	Yes
v_{ur}		0,2000	0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0	100,0
K_0^{nc}		0,5000	0,5000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
z_{ref}	m	0,000	0,000
R_f		0,9000	0,9000

Identification		Oberfläche Böschung	Sand locker
Tension cut-off		Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Skempton-B		0,9866	0,9866
v_u		0,4950	0,4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	3,073E6	3,073E6
Stiffness		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity ₁ , dk	m ³ /day/m	0,000	0,000
Drainage conductivity ₂ , dk	m ³ /day/m	0,000	0,000
K_o determination		Manual	Manual
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,y}$		0,5000	0,5000
OCR		1,000	1,000
POP	kN/m ²	0,000	0,000
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
k_z	m/day	0,000	0,000
e_{init}		0,5000	0,5000
S_s	1/m	0,000	0,000
c_k		1000E12	1000E12

4.2.3 Widerlager

Identification		Beton-alt	Beton neu
Identification number		6	7
Drainage type		Non-porous	Non-porous
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	25,00	25,00
γ_{sat}	kN/m ³	25,00	25,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	20,00E6	33,00E6
ν (nu)		0,2000	0,2000
G	kN/m ²	8,333E6	13,75E6
E_{oed}	kN/m ²	22,22E6	36,67E6
V_s	m/s	1808	2323
V_p	m/s	2953	3793
Set to default values		Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
z_{ref}	m	0,000	0,000
Stiffness		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity i, dk	m ³ /day/m	0,000	0,000

Identification		Beton-alt	Beton neu
Drainage conductivity z, dk	$m^3/day/m$	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,y}$		0,5000	0,5000
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
k_z	m/day	0,000	0,000
e_{init}		0,5000	0,5000
c_k		1000E12	1000E12

4.2.4 Boden - Mohr-Coulomb

Identification		Verfüllung	Baugrundverbesserung
Identification number		8	11
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00	20,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	25,00E3	5,000E6
ν (nu)		0,3500	0,3500
G	kN/m ²	9259	1,852E6
E_{oed}	kN/m ²	40,12E3	8,025E6
c_{ref}	kN/m ²	0,000	823,0
ϕ (phi)	°	30,00	32,50
ψ (psi)	°	0,000	0,000
V_s	m/s	71,04	1005
V_p	m/s	147,9	2091
Set to default values		Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
Z_{ref}	m	0,000	0,000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000	0,000
Z_{ref}	m	0,000	0,000
Tension cut-off		Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Skempton-B		0,9699	0,9699
ν_u		0,4950	0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	895,1E3	179,0E6

Identification		Verfüllung	Baugrundverbesserung
Stiffness		Standard	Standard
Strength		Manual	Rigid
R_{inter}		0,6000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity $_1$, dk	m ³ /day/m	0,000	0,000
Drainage conductivity $_2$, dk	m ³ /day/m	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,y}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,4627
$K_{0,y}$		0,5000	0,4627
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
k_z	m/day	0,000	0,000
e_{init}		0,5000	0,5000
S_s	1/m	0,000	0,000
c_k		1000E12	1000E12

4.2.5 Anker

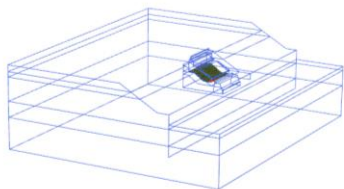
Identification		Ankerstab
Identification number		1
Comments		Stumpo Druckrohranker Stange d=32 mm
Colour		
Material type		Elastic
EA	kN	168,9E3
Identification number		1
Identification number		1

4.2.6 Plate - Elemente

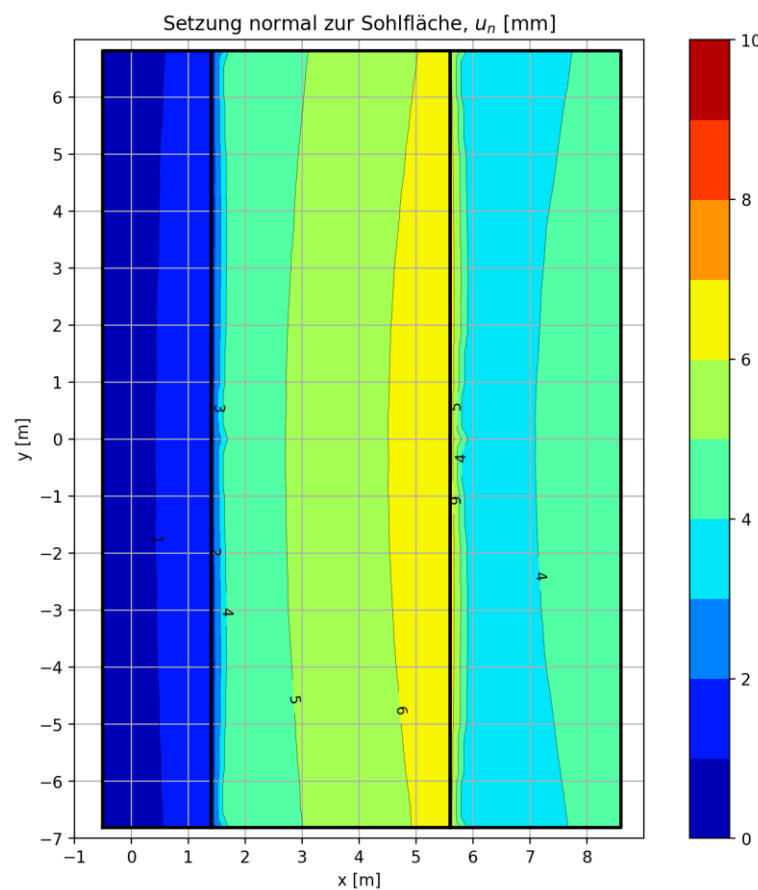
Identification		Bohrpfahlwand	Spundwand_Querverbau	Uferwand	Spundwand_Längsverbau
Identification number		1	2	3	4
Comments		d=90cm			
Colour					
Material type		Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
d	m	0,6500	0,1370	0,1210	0,1920
γ	kN/m ³	0,000	0,000	0,000	0,000
Isotropic		Yes	Yes	Yes	Yes
E ₁	kN/m ²	20,00E6	240,0E6	210,0E6	240,0E6
E ₂	kN/m ²	20,00E6	240,0E6	210,0E6	240,0E6
ν ₁₂		0,2000	0,3000	0,3000	0,3000
G ₁₂	kN/m ²	8,333E6	92,31E6	80,77E6	92,31E6
G ₁₃	kN/m ²	8,333E6	92,31E6	80,77E6	92,31E6
G ₂₃	kN/m ²	8,333E6	92,31E6	80,77E6	92,31E6
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000	0,000
Prevent punching		Yes	Yes	Yes	Yes
Identification number		1	2	3	4

4.2.7 Embedded - Beam - Elemente

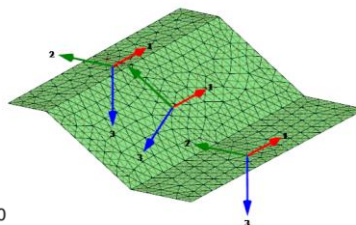
Identification		Verpresskörper
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
E	kN/m ²	5,380E6
γ	kN/m ³	0,000
Beam type		Predefined
Predefined beam type		Massive circular beam
Diameter	m	0,2000
A	m ²	0,03142
I ₂	m ⁴	0,07854E-3
I ₃	m ⁴	0,07854E-3
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Axial skin resistance		Linear
T _{skin, start, max}	kN/m	136,7
T _{skin, end, max}	kN/m	136,7
F _{max}	kN	0,000
Identification number		1



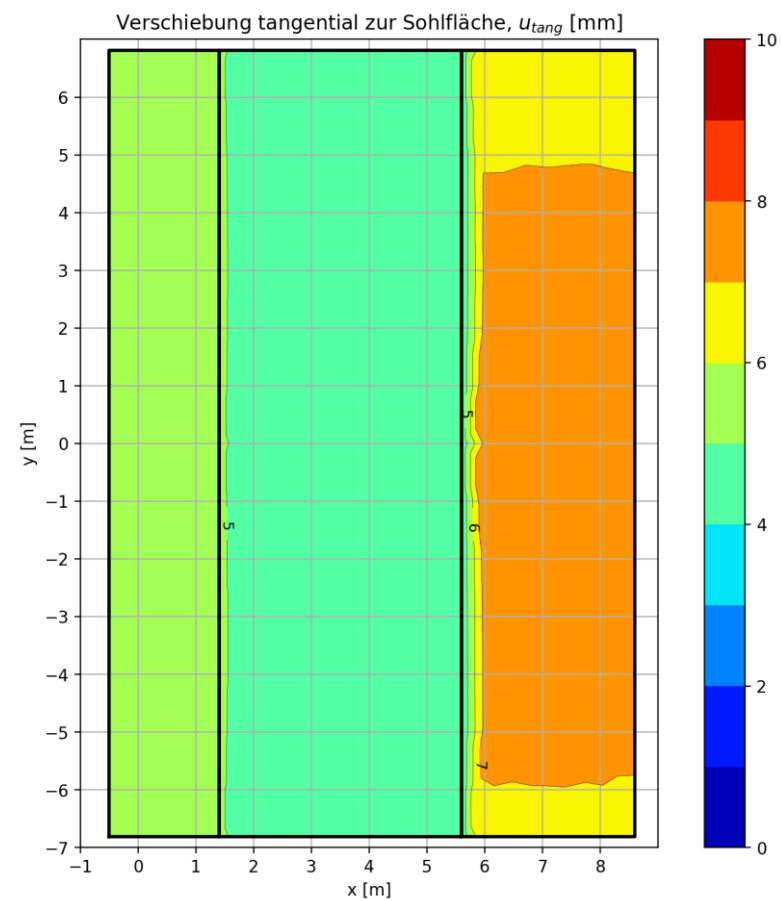
positiv: nach unten

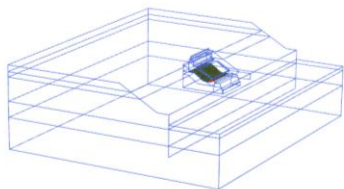


Widerlager Nord

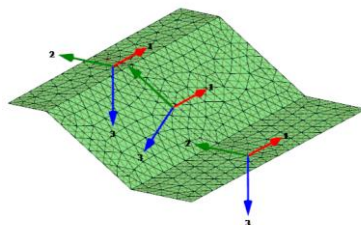
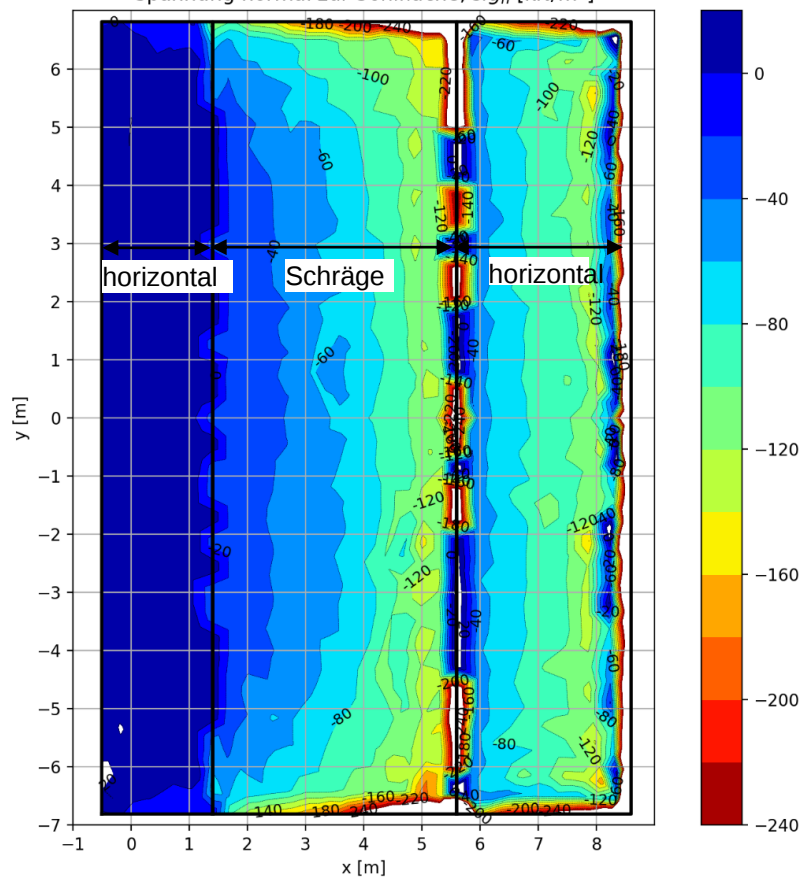
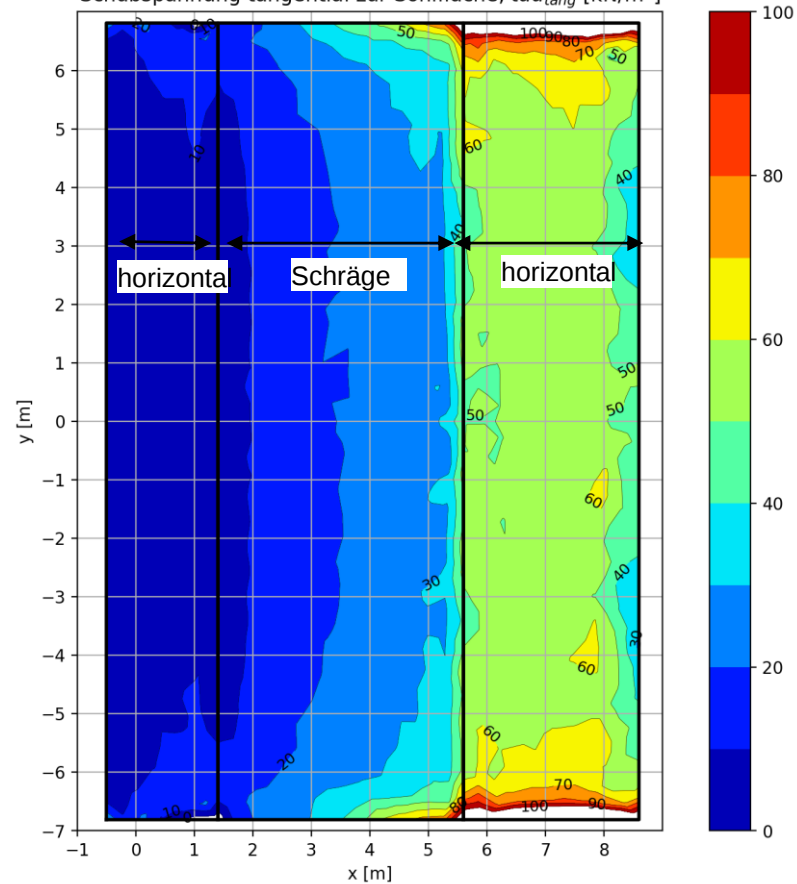


positiv: in Richtung Erdseite

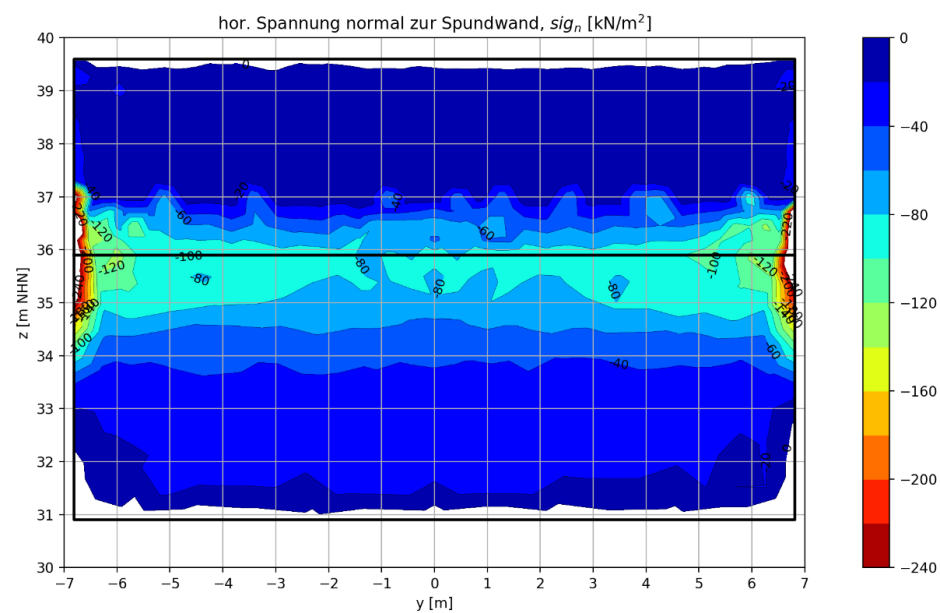
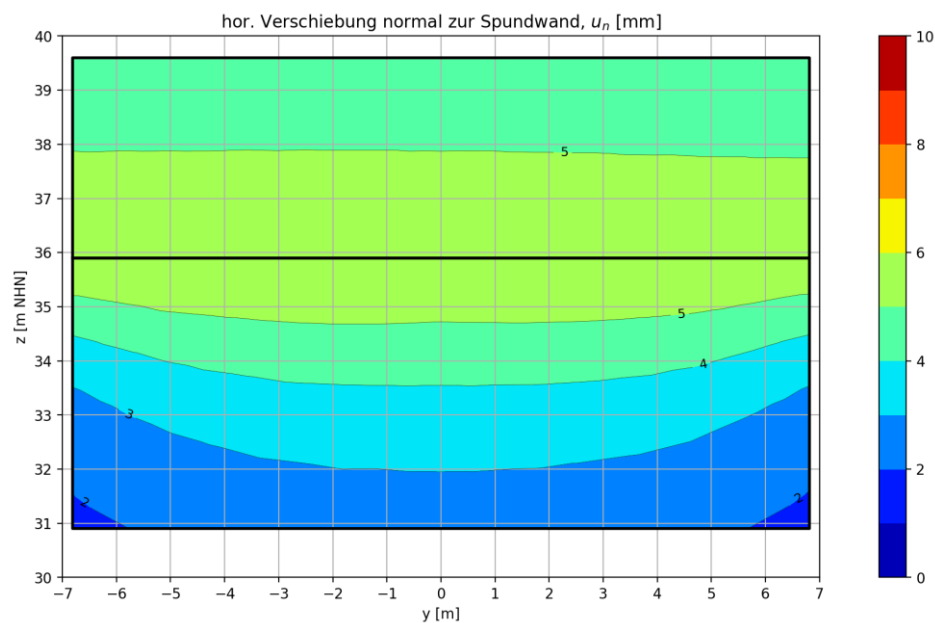
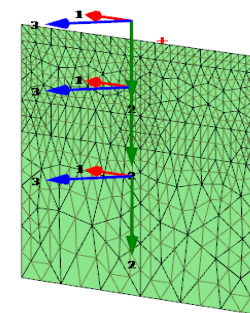
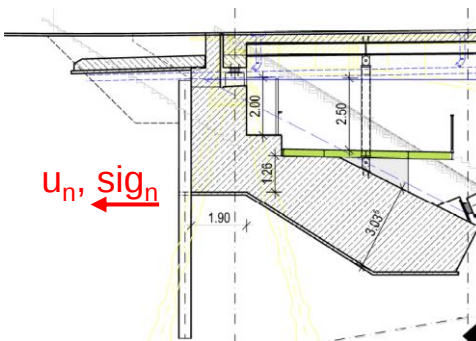
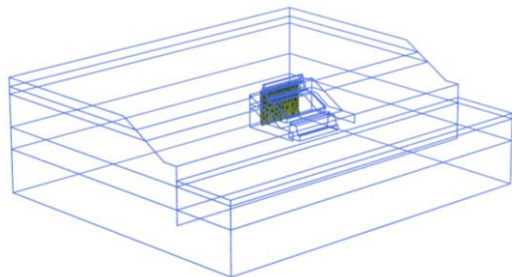


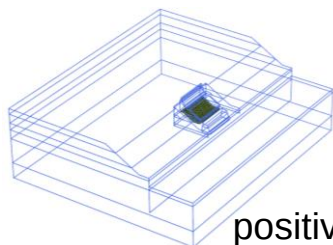


Widerlager Nord

Spannung normal zur Sohlfläche, σ_n [kN/m²]Schubspannung tangential zur Sohlfläche, τ_{tang} [kN/m²]

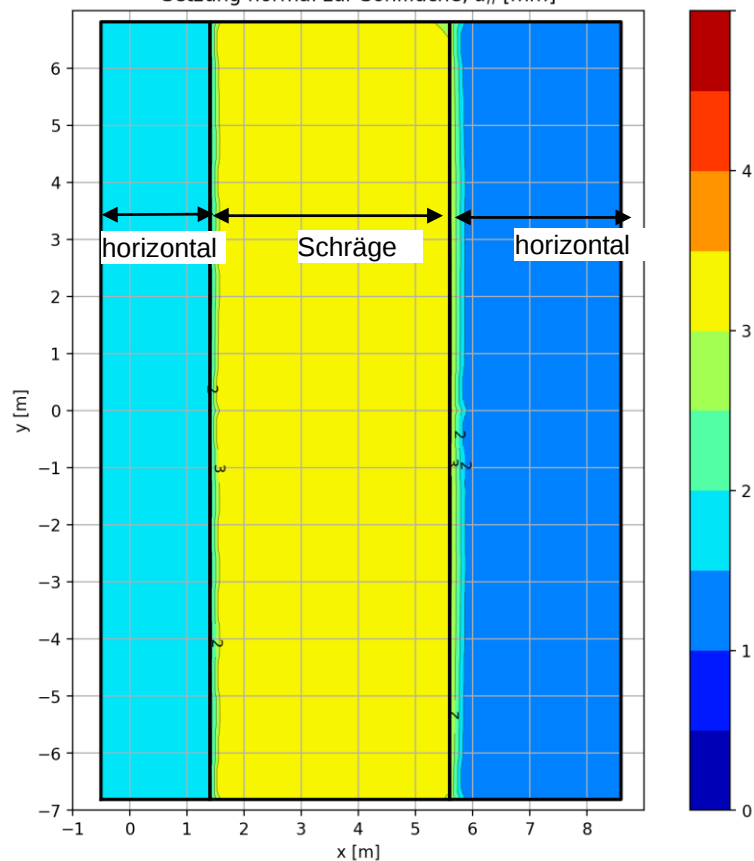
Widerlager Nord



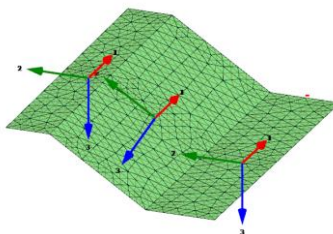


positiv: nach unten

Setzung normal zur Sohlfläche, u_n [mm]

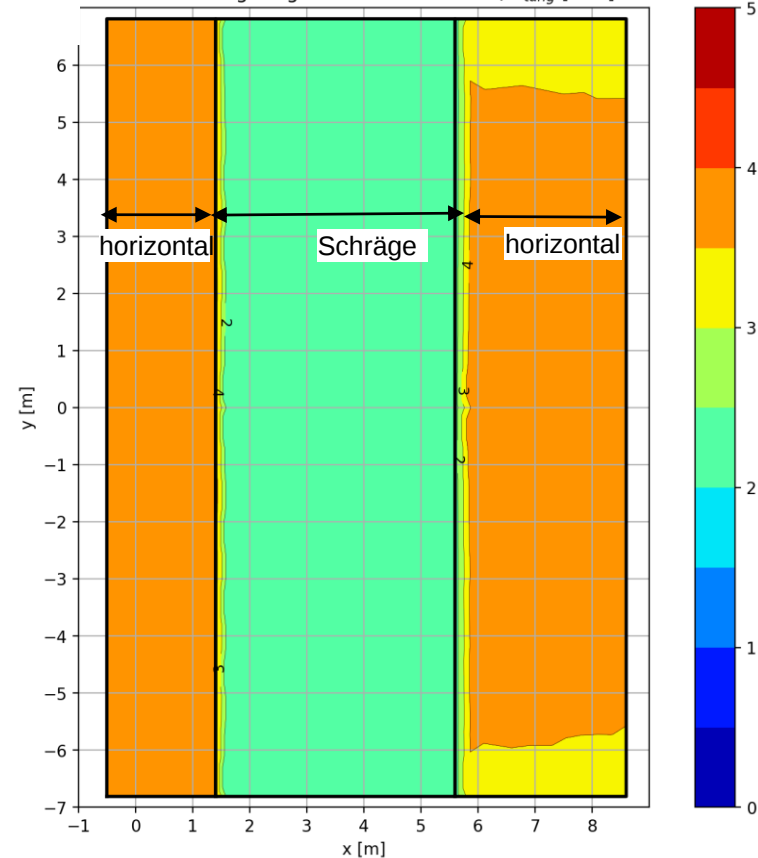


Widerlager Süd

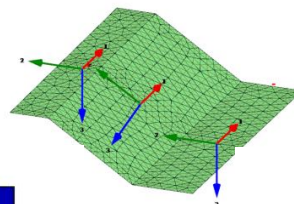
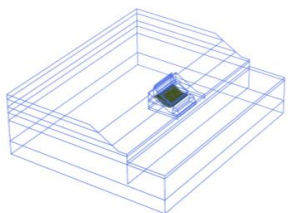
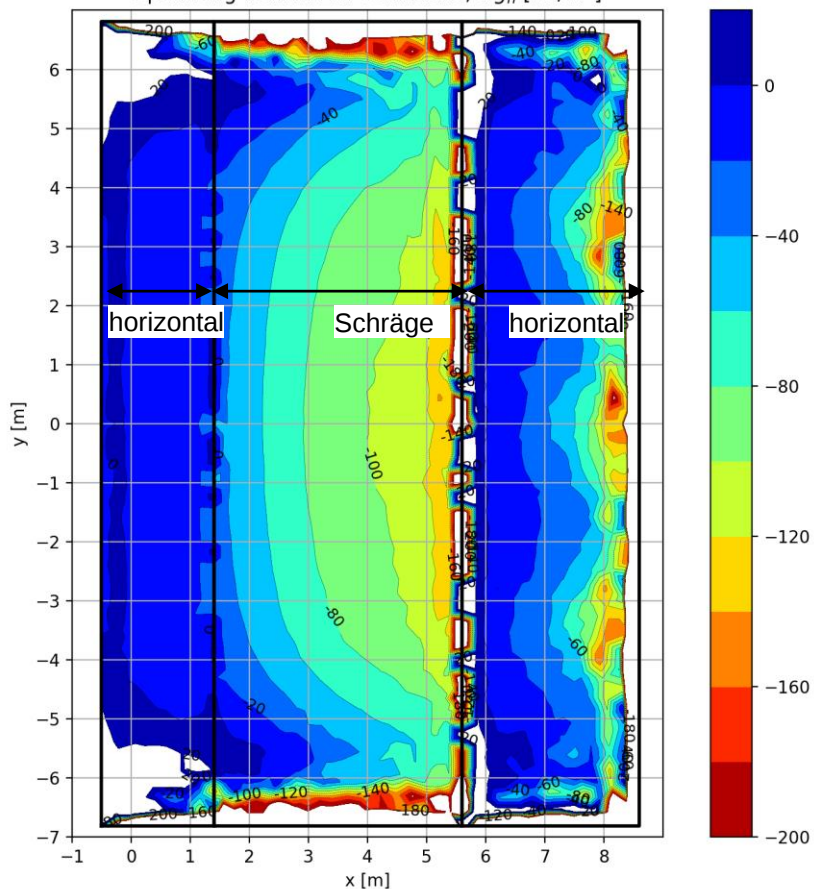
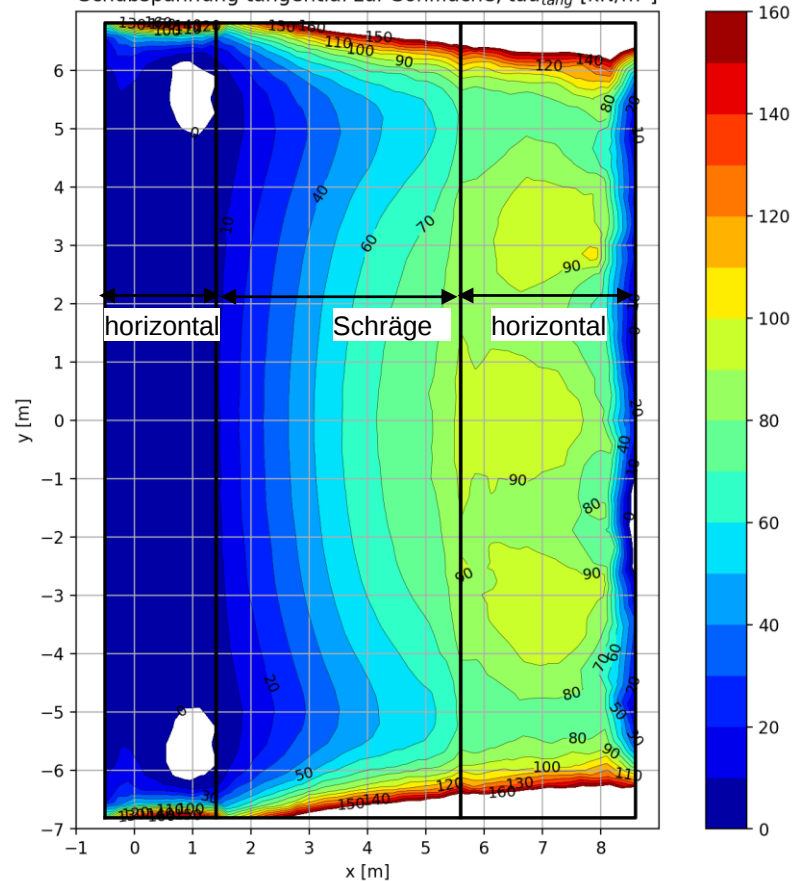


positiv: in Richtung Erdseite

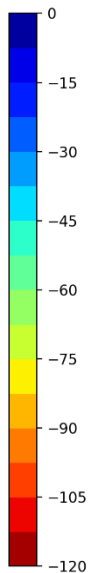
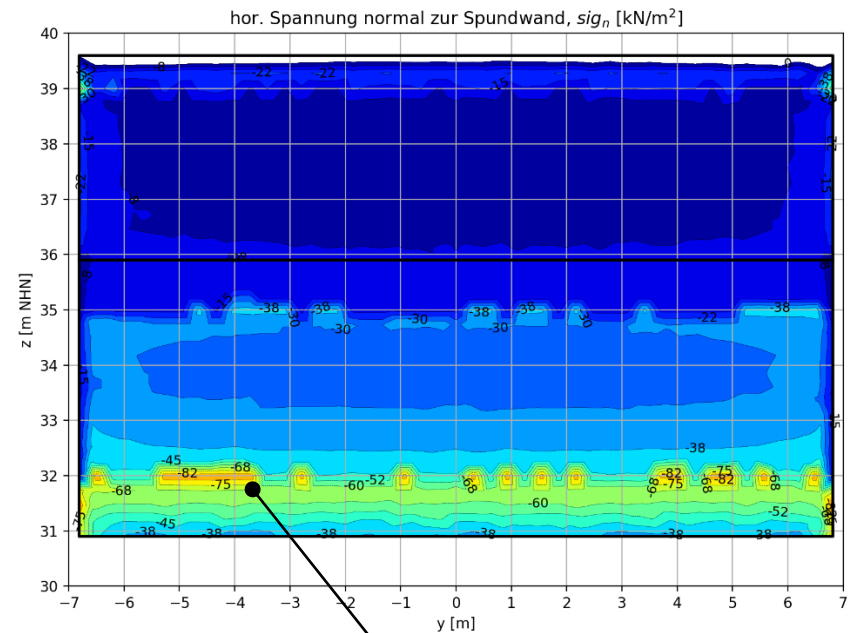
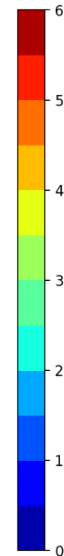
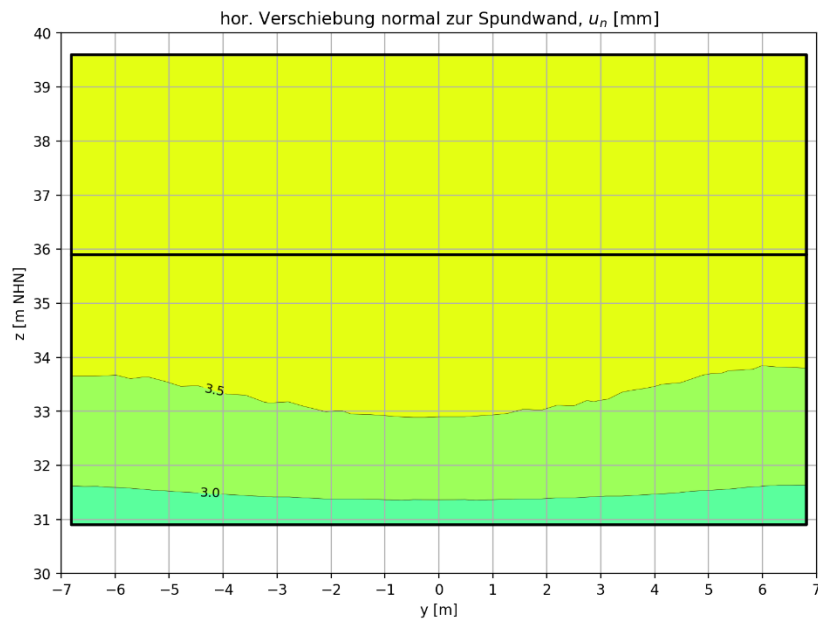
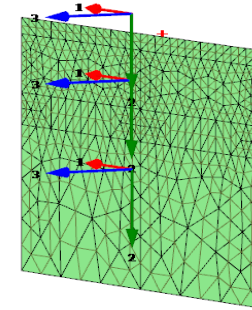
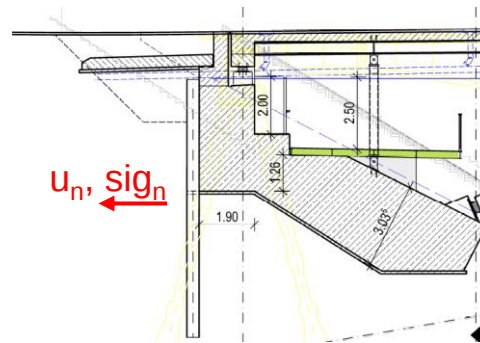
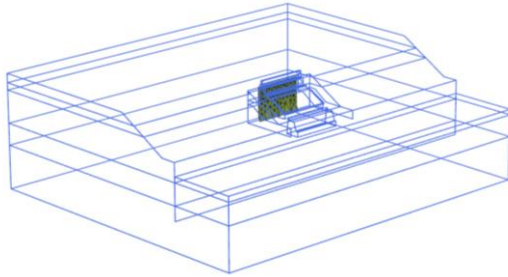
Verschiebung tangential zur Sohlfläche, u_{tang} [mm]



Widerlager Süd

Spannung normal zur Sohlfläche, σ_n [kN/m²]Schubspannung tangential zur Sohlfläche, τ_{tang} [kN/m²]

Widerlager Süd



Auswertungsartefakt an Schichtgrenzen