



Planung der Baugrube für eine neue Schleuse am Elbe-Seitenkanal in Lüneburg

Planung der Baugrube für eine neue Schleuse am Elbe-Seitenkanal in Lüneburg

Planungsherausforderungen im Grenzbereich des Machbaren

Der Elbe-Seitenkanal (ESK) schließt den Seehafen Hamburg an das deutsche Binnenwasserstraßennetz an und ist damit die zentrale Hinterlandanbindung des Hamburger Hafens. Im Verlauf des ESK steht in Scharnebeck bei ESK-km 106 das Schiffshebewerk (SHW) Lüneburg. Das Doppel-Senkrechthebewerk, welches zwischen 1969 und 1975 errichtet wurde und schließlich 1976 in Betrieb genommen werden konnte, überwindet eine Fallhöhe von 38 m. Das SHW Lüneburg stellt in den heutigen Abmessungen zunehmend einen Engpass für die Schifffahrt dar und soll durch den Neubau einer Sparschleuse mit etagenförmig in den Kammerwänden integrierten Sparbecken und einer Nutzlänge von 225 m ergänzt werden. Für die Errichtung der Schleuse ist die Herstellung einer Baugrube mit den Abmessungen $L/B/H = 260\text{ m}/60\text{ m}/25\text{ m}$ in unmittelbarer Nähe zum bestehenden und im Betrieb verbleibenden SHW erforderlich. Im Rahmen der Planung lag der Schwerpunkt neben der Entwurfs- und Ausführungsplanung der technisch anspruchsvollen Baugrubenkonstruktion vor allem auch in der Betrachtung der Auswirkungen der neuen Baugruben-/Schleusenkonstruktion auf das direkt benachbarte SHW.

Keywords Elbe-Seitenkanal; Lüneburg, Schleuse; Baugrube; Boden-Bauwerks-Interaktion

1 Einleitung

Für die Baugrube der neuen Schleuse Lüneburg wurde 2011 eine Konzeption durch das Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover (NBA) erstellt.

Darauf aufbauend wurde die Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“ (INGE) im Rahmen des Planungsvertrags damit beauftragt, die Planung der Baugrube für die neu zu errichtende Schleuse unter Berücksichtigung der schwierigen Randbedingungen und der Aufrechterhaltung des Betriebs des SHW in unmittelbarer Nähe der Baumaßnahme zu erbringen. Bei der Planung und dem Bau der neuen Schleuse neben dem SHW ist vordergründig zu beachten, dass das bestehende SHW während der gesamten Bauzeit der Schleuse und darüber hinaus in Betrieb bleiben muss.

Um eine hohe Kosten- und Planungssicherheit zu erhalten, wurde die INGE mit der Vor-, Entwurfs- und Ausführungsplanung der Baugrube gemäß HOAI 2013 §43 (Leistungsphasen LPH 1–LPH 5) und §51 (Leistungsphasen LPH 2–LPH 5) beauftragt. Aufgrund der Nähe zum

Planning an excavation for a new lock at the Elbe-Seitenkanal near Lüneburg – great challenges to overcome

The Elbe-Seitenkanal connects the seaport of Hamburg to the German inland waterways; therefore, it is an important back country support for the Port of Hamburg. At ESK-km 106, near the city of Scharnebeck, the ship lift Lüneburg is located. The double vertical ship lift was built between 1969 and 1975 and operates since 1976. The ship lift overcomes a drop height of 38 m. For the contemporary sizes of ships, the ship lift is too small and has to be rebuilt. Thus, it should be constructed a thrift lock with in tiers integrated economizing basin in the chamber walls. The effective length would be augmented to 225 m. For the construction of the new lock an excavation with the dimensions $260\text{ m} \times 60\text{ m} \times 25\text{ m}$ is needed; close to the existing ship lift. Within the planning the focus lies on the impact of the challenging excavation/lock construction to the nearby ship lift.

Keywords Elbe-Seitenkanal; lock Lüneburg; excavation; ground-construction-interaction

bestehenden SHW wurden als besondere Leistungen außerdem 2-D- und 3-D-FE-Modellierungen, ein Messprogramm sowie ein Havariekonzept erstellt.

Das Projekt wurde gemäß aktuellem Stand des Bundesverkehrswegeplans 2030 in die Projektliste Wasserstraßen als „Neues Vorhaben mit vordringlichem Bedarf“ aufgenommen.

Das SHW Lüneburg in Scharnebeck ist ein Doppelschiffshebewerk mit zwei Trögen und folgenden Kenndaten:

- Bauart: Doppelsenkrechthebewerk mit Gegengewichten und zwei unabhängig voneinander arbeitenden Trögen in je vier Führungstürmen
- Baukosten: 190 Mio. DM (nach Nachrüstung)
- Fallhöhe: max. 38 m (abhängig vom Wasserstand der Elbe)
- Herstellung des Bauwerks in offener Baugrube mit Grundwasserabsenkung, anschließende Wiederverfüllung der Baugrube bis Oberkante Trogwanne
- Trogabmessungen: Nutzlänge/Nutzbreite/Drempeltiefe: 100 m/11,8 m/3,38 m (tatsächliche Länge zwischen den Toren = 105,6 m)



Bild 1 Luftbild
Aerial view

- Trogtore und Haltungstore im Oberhaupt und Unterhaupt sind Hubtore
- Torschutzeinrichtungen: Die an den Trogtoren angebauten Fangseile zum Schutz vor Schiffsstößen verkürzen die nutzbare Länge für die Schifffahrt auf 100 m
- Gesamtgewicht des mit Wasser gefüllten Trogs: 5 800 t
- Gesamtgewicht der bewegten Teile eines Trogs (einschl. Wasser): ca. 11 800 t

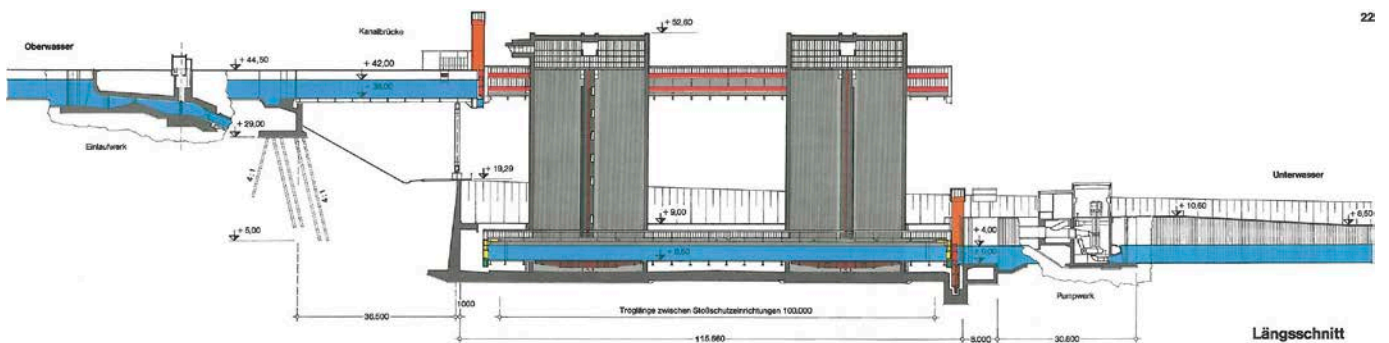
- Gewicht einer Gegengewichtsscheibe aus Schwerkong (224 Stk./Trog): ca. 26,5 t (gesamtes Gegengewicht 5 936 t/Trog)
- Dauer eines Hebe-/Senkvorgangs: 3 min
- Dauer einer Durchfahrt (inkl. Ein- und Ausfahrt): 15–20 min

2 Planungsaufgabe und -herausforderungen

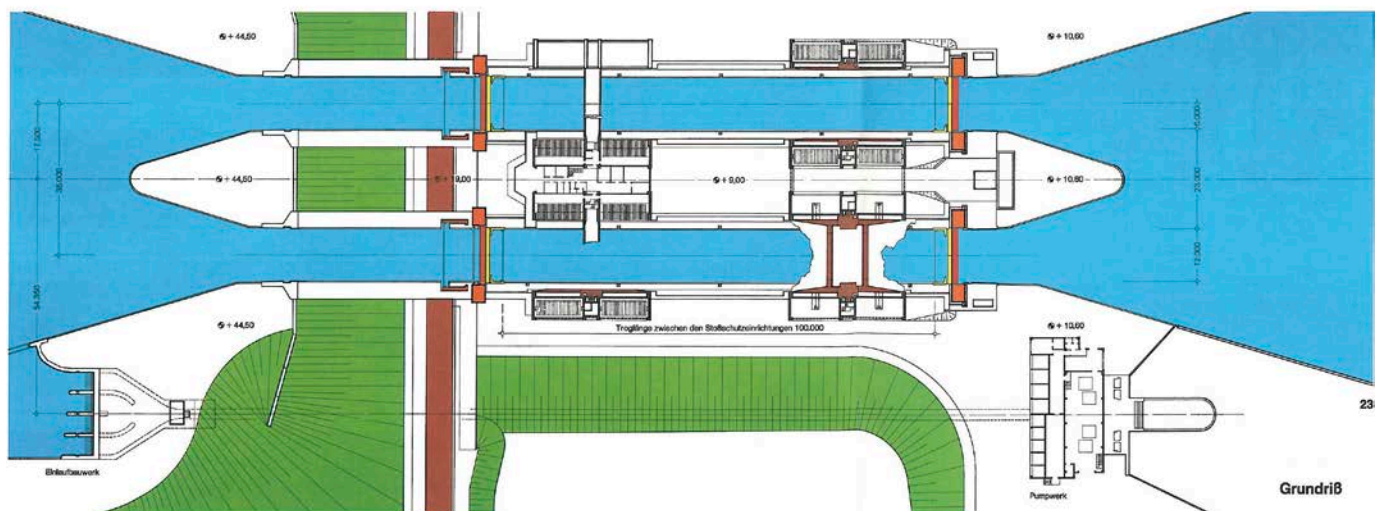
Neben der Vor-, Entwurfs- und Ausführungsplanung einer Baugrube zum Neubau der Schleuse Lüneburg westlich des bestehenden SHW (Objekt- und Tragwerksplanung) bestand die Planungsaufgabe u. a. auch in der Variantenuntersuchung/Abstandsvariation der Lage der neuen Schleuse in Bezug auf das bestehende SHW. Hierfür wurden Untersuchungen zur Boden-Bauwerks-Interaktion verschiedener Abstandsvarianten mittels der Finite-Elemente-Methode (2-D- und 3-D-FEM) mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Baugrubenkonzepktion für die neue Schleuse bei Aufrechterhaltung des Betriebs des vorhandenen SHW (SHW) durchgeführt.

Ferner mussten folgende Planungsrandbedingungen berücksichtigt werden:

- Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt
- Aufrechterhaltung Betrieb SHW, d. h. Minimierung der auftretenden Verformung durch Geometrie, Ab-



22



23

Bild 2 Längsschnitt/Grundriß
Longitudinal section/layout

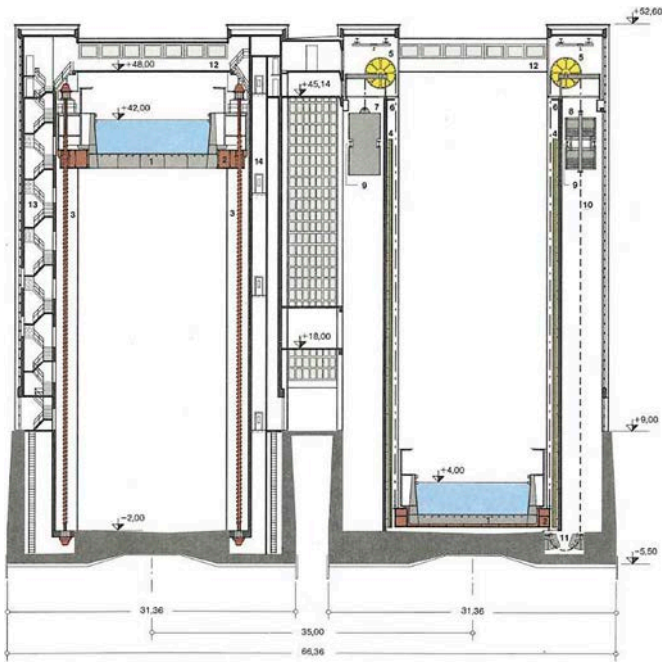


Bild 3 Querschnitt (SHW Bestand)
Cross section (existing structure)

stand, Lage der Baugrube für die neue Schleuse, Erreichbarkeit des vorhandenen SHW für betriebliche Belange (Zufahrten, Betriebsflächen)

- Baugrund- und Grundwasserverhältnisse
Bandbreite geotechnischer Kennwerte, stoffliche Modellierung der anstehenden Böden, Hydraulik/Wasserstände, mögliche Schadstoffbelastung der Böden
- Umwelteinflüsse
Größe des Eingriffs, Lärmbeanspruchung, CO₂-Bedarf
- Wirtschaftlichkeit
Wirtschaftlichkeit und Kostensicherheit bei geringen Risiken

Die Herausforderung der Planungen bestand dabei insbesondere in den vorgesehenen Abmessungen der neuen Schleuse resp. der zugehörigen Baugrube. Durch den tiefen Einschnitt in das Bestandsgelände, die Einwirkungen infolge des Erd- und Wasserdrucks und die unmittelbare



Bild 4 Planungsrandbedingungen Neubau
Boundary conditions of planning

Nähe zum bestehenden SHW ergeben sich hierbei die baulichen und planerischen Besonderheiten, die es zu beherrschen gilt.

3 Variantenuntersuchung/Abstandsvariation

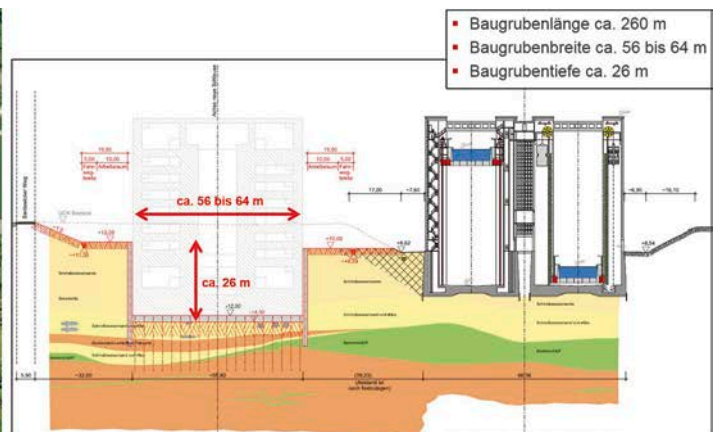
Im Rahmen der Vorplanung wurde zunächst die Lage der neuen Schleuse festgelegt, um eine wirtschaftliche Lösung mit geringem Platzbedarf unter Berücksichtigung der Einhaltung der zulässigen Verformungen und Beeinflussung insbesondere des bestehenden SHW zu ermitteln. Die Untersuchungen wurden u. a. durch Berechnungen unter Verwendung der Finiten-Elemente-Methode (FEM) an 2-D-Modellen durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der Abstand der Baugrube der neuen Schleuse zum bestehenden SHW mit den Abständen 40 m, 50 m und 60 m variiert und die aus dem Bau und dem Betrieb der Schleuse resultierenden Verformungen des SHW bzgl. der Grenzwerte der zulässigen Verformungen des SHW untersucht.

Der Grenzwert für die max. verträglichen horizontalen Verformungen am Kopf des SHW wurde vom Auftraggeber auf Grundlage der max. Nachstellmöglichkeit am SHW mit 20 mm vorgegeben. Im Ergebnis wurde unter Berücksichtigung der Untersuchungen festgelegt, dass zur Gewährleistung der Sicherheit des SHW während des Baus der Baugrube und im Betrieb der Schleuse ein Abstand zwischen Baugrube und SHW von 60 m für die weitere Planung anzusetzen ist, was schließlich in der weiteren Planung verfolgt wurde.

4 Baugrubenkonzepion (Vorplanung)

Aus den Planungsrandbedingungen waren folgende Anforderungen für die Baugrubenkonstruktion zu berücksichtigen:

- Ausbildung eines steifen, verformungsarmen Verbau-systems
- Herstellung einer wasserdichten Baugrube einschließlich Dichtsohle



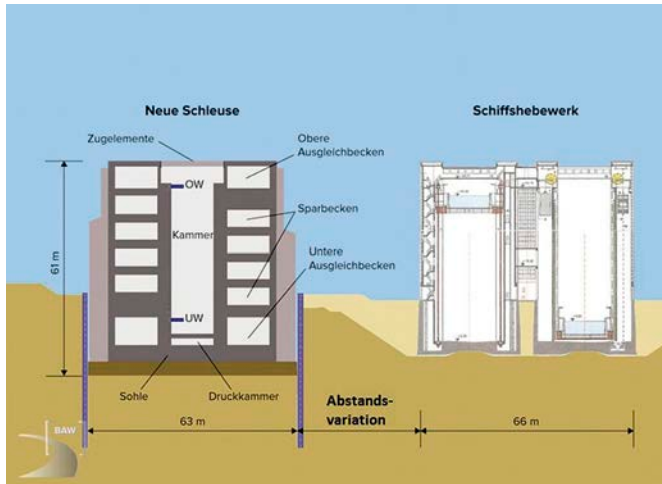


Bild 5 Prinzipskizze zur Abstandsvariation zwischen Neubau und Bestand
Variation of the distance between the new construction and the existing structure

- Begrenzung der Aushubentlastung und damit der Mitnahmesetzung infolge Schleusenneubau
- Marktverfügbarkeit/Wettbewerbsfähigkeit
- Minimierung der Einflüsse der Baugrubenkonstruktion auf das bestehende SHW
- Minimierung der Einflüsse der Baugrubenkonstruktion auf den späteren Schleusenneubau

Für den lichten Abstand von ca. 60 m zwischen Baugrube und SHW wurden vier Baugrubenkonzepte erarbeitet, statisch vordimensioniert und hinsichtlich der Einzelkriterien „Kosten“, „Ausführungsrisiko Baugrube“, „Bauzeit“, „Auswirkungen auf das SHW“ und „Auswirkungen auf den Schleusenneubau“ bewertet.

- Baugrubenkonzept 1 – „SW + UWBS + Anker“
- Baugrubenkonzept 2 – „SW + UWBS + Steifen“
- Baugrubenkonzept 3 – „SW + UWBS + HDI + Steifen“
- Baugrubenkonzept 4 – „SW + UWBS + Anker + Steifen“

(SW = Schlitzwand, UWBS = Unterwasserbetonsohle, HDI = Hochdruckinjektionssohle)

Im Ergebnis der Vorplanung wurde das Baugrubenkonzept 4 – „SW + UWBS + Anker + Steifen“ als technische Vorzugsvariante der Baugrubenkonstruktion zum Neubau der Schleuse Lüneburg in die Entwurfsplanung übernommen.

5 Numerische Modellierungen

Als besondere Leistung wurden im Rahmen der Planung ergänzende numerische Untersuchungen durchgeführt. Neben der wesentlichen Fragestellung der Beeinflussung des SHW durch die Herstellung der Baugrube sowie den Neubau und Betrieb der Schleuse stand zudem die Ableitung von verschiebungsabhängigen Erddruckansätzen im Bereich der Baugrubenwandung im Vordergrund. Diese Fragestellungen wurden anhand eines 3-D-FE-Modells unter Verwendung des Programmpakets Plaxis 3D als Hauptmodell eingehend untersucht und werden nachfolgend erläutert (Bild 7). Weiterhin wurden gesonderte Aspekte, wie beispielsweise die Krafteinleitung der Ankerkräfte, die Auswirkungen der Aussteifung der Sohle auf die Spannungsverteilung bzw. den Erddruckverlauf im Bereich der Schlitzwand sowie der Einfluss des Stoffmodells und der Sohldicke hierauf, der Einfluss von Fugen

Schnitt A - A M 1:500

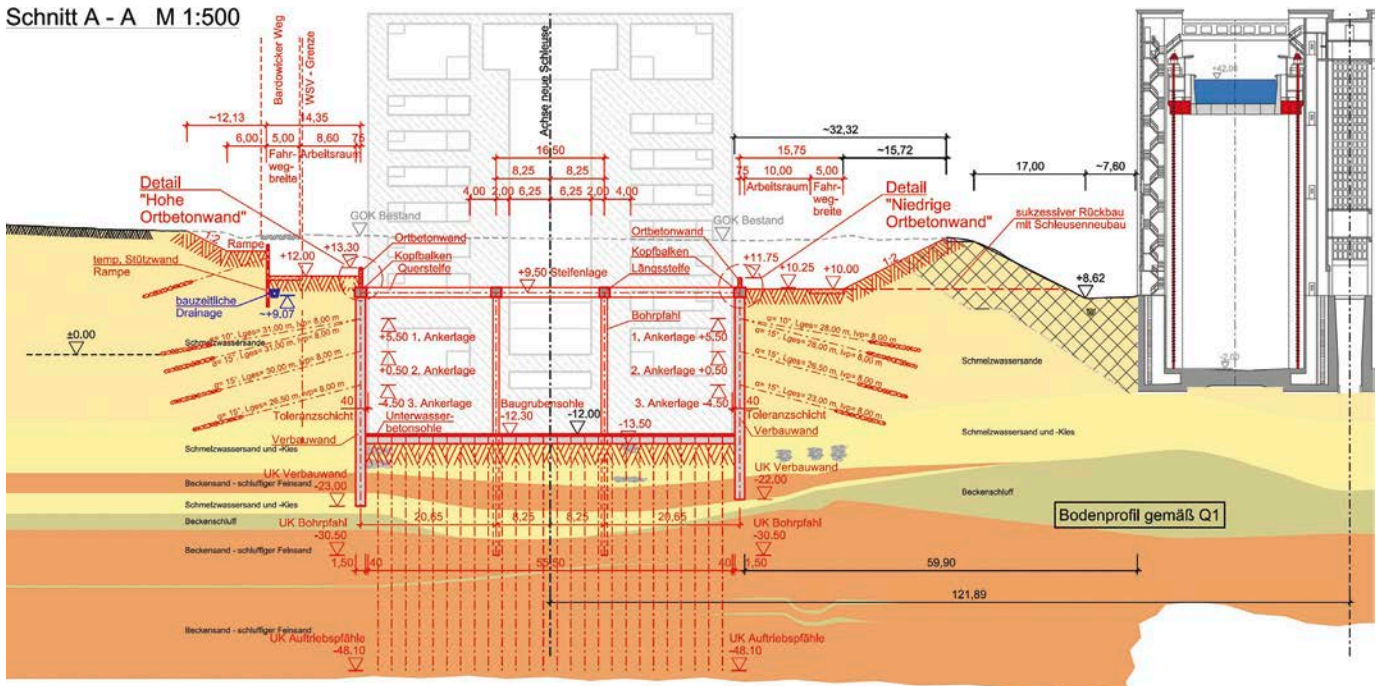


Bild 6 Querschnitt Baugrubenkonzeption
Cross section of the excavation conception

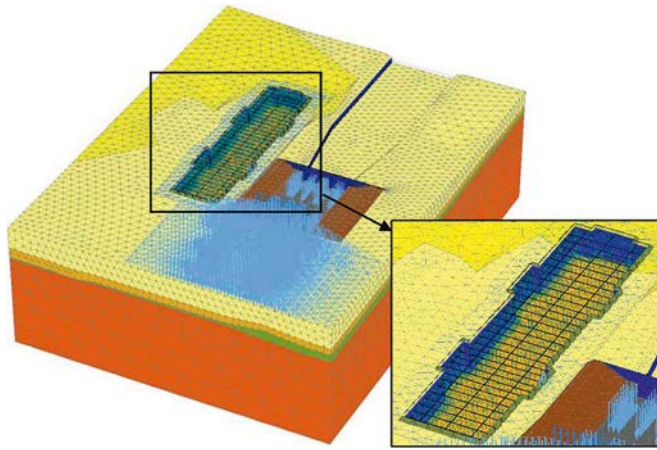


Bild 7 3-D-FE-Modell mit Detailausschnitt der Baugrube
3-D-FE model with a detailed view of the excavation

in der Schlitzwand, der Einfluss des Wandreibungswinkels auf die Erddruckverteilung oder der Einfluss der Änderung des Wasserspiegels in der Baugrube, in Detailmodellen betrachtet.

5.1 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Der Baugrund wurde im Geotechnischen Bericht der BAW aus dem Jahre 2013 mit folgendem Baugrundauf-

bau beschrieben: Unter einer Auffüllung wurden obere Sande bzw. glazial vorbelastete Schmelzwassersande mit teildichter bis überwiegend dichter Lagerung erkundet. Diese bilden die oberste Schicht im Baugrundmodell. Unterhalb dieser Schicht stehen Schmelzwassersande/-kiese mit vergleichbaren Lagerungen an. Der unterhalb dieser Schicht anstehende Beckenschluff aus tonigem bis schwach tonigem Schluff weist eine vorwiegend steife Konsistenz auf. Die unterste Schicht im Modell bildet der Beckensand.

Für die Planung wird die Auswertung der Grundwasserstands- bzw. Potenzialmessungen im umfangreichen Messstellennetz aus dem Jahr 2013 zugrunde gelegt. Die Pegelmittelwerte im Bereich des Schleusenneubaus liegen hierbei zwischen ca. +9,50 m NN und +11,20 m NN bzw. +5,90 m NN im Bereich des Unterwassers. Im numerischen Modell werden zum einen Berechnungen mit stationären hydraulischen Randbedingungen durchgeführt, wobei die Wasserstände gemäß den Messungen angesetzt werden. Weiterhin wird ergänzend eine instationäre Strömungsberechnung mit den Randbedingungen für das Grundwasser gemäß einer vorliegenden hydrologischen Studie angesetzt. Die Grundwasserabsenkung innerhalb der Baugrube ist erst nach Herstellung der Unterwasserbetonsole vorgesehen, sodass i. Allg. kein Eingriff in die Grundwasserverhältnisse außerhalb der Baugrube erfolgt. Der Aufbau ist im Schnitt in den Bildern 6, 7 erkennbar.

Tab. 1 Bodenkennwerte für Einsatz im FE-Modell
Soil parameters used in the FE analysis

		Small Strain Hardening-Soil Parameter in FEM						
		Hinterfüllung Hebewerk	Obere Sande	Geschiebe- mergel	Schmelz- wassersand*	Schmelzwasser- sand/-kies*	Beckenschluff	Beckensand
γ^{unsat}	[kN/m ³]	18	18,5	22	19	19	20,5	19
γ^{sat}	[kN/m ³]	20	20,5	22	21	21	20,5	21
γ'	[kN/m ³]	10	10,5	12	11	11	10,5	11
k_f	[m/s]	1E-04	2E-04	5E-08	5E-04	1E-03	1E-08	5E-05
φ'	[°]	32	35	36,5	37,5	37,5	38	39
ψ'	[°]	2	5	4	7,5	7,5	8	9
c'	[kN/m ²]	0	0	5	0	0	10	0
E_{50}^{ref}	[MN/m ²]	20	50	25	80	110	45	140
$E_{\text{Oed}}^{\text{ref}}$	[MN/m ²]	20	40	25	80	110	30	140
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	[MN/m ²]	60	120	100	220	300	180	350
m	[-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5
ν_{ur}	[-]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
p^{ref}	[kN/m ²]	100	50	200	200	400	400	500
G_0	[MN/m ²]	80	80**	100**	130**/***	190**/***	150**/***	280**/***
$\gamma_{0,7}$	[-]	2E-04	2E-04	3E-04	2E-04	2E-04	3E-04	2E-04

* Kennwertesätze für Schmelzwassersand bzw. Schmelzwassersand/-kies gelten für große bis sehr große Festigkeiten, wie sie gemäß [U.4] im Untersuchungsgebiet vorwiegend vorkommen

** Ermittlung des dyn. Schubmoduls G_0 unter Berücksichtigung der Beziehung von Alpan (siehe [U.17])

*** Ermittlung des dyn. Schubmoduls G_0 aus Crosshole-Seismik

Das numerische Hauptmodell weist trotz der großen Abmessungen von $L/B/H = 550\text{ m}/400\text{ m}/170\text{ m}$ im betrachteten Bereich mit 16 berücksichtigten Bohrungen eine vergleichsweise hohe Genauigkeit auf, um hiermit die Verformungen bei den komplexen Interaktionen entsprechend genau ermitteln zu können. Der Baugrund wird insgesamt über 384 787 zehnknotige Tetraeder-Volumenelemente mit quadratischer Ansatzfunktion diskretisiert. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Strukturelemente zur Abbildung der Bauwerke stößt das Modell somit an die Grenzen des zu der Zeit modelltechnisch Machbaren.

Für den Untergrund wird in allen Berechnungen das Hardening-Soil-Modell mit Small-Strain-Erweiterung verwendet. Die Materialkennwerte wurden aus den Ergebnissen des Baugrundgutachtens abgeleitet. Nach einer Bandbreitenbetrachtung wurden die in der Tab. 1 zusammengefassten Berechnungskennwerte mit der BAW abgestimmt und für die Berechnungen angesetzt.

5.2 Bauwerk und Baugrube

Die Baugrube besteht aus der Schlitzwand und der Unterwasserbetonsohle. Die Schlitzwand wurde im ersten Planungsstadium zunächst mit einer Dicke von 1,5 m mehrlagig rückverankert und in der oberen Lage ausgesteift bzw. nach einer Planungsanpassung später mit einer Dicke von 2,0 m ausschließlich in der oberen Lage ausgesteift vorgesehen. Die Schlitzwand wurde im FE-Modell mit Plattenelementen und einem linear-elastischen Stoffverhalten abgebildet. Die Rückverankerung wurde auf der SHW-zugewandten Seite (Ost) über sogenannte „embedded piles“ für die Verpresskörper mit „node-to-node anchor“ als Stahlzugglied abgebildet, um hier eine ausreichende Genauigkeit der Boden-Bauwerks-Interaktionen gewährleisten zu können. Zur Reduzierung des Modellierungsaufwands wurde auf der abgewandten Seite (West) auf sogenannte „fixed-end anchor“ zurückgegriffen. Die Anker wurden in der weiteren Planungsphase verworfen (s. Abschn. 6). Die Aussteifung der oberen Lage wird ebenfalls als steifes Druckstabsystem über node-to-node anchor abgebildet.

Die Unterwasserbetonsohle wurde über Kontinuumselemente mit dem Mohr-Coulomb-Modell und hierauf für den Beton abgestimmte Parameter modelliert. Für die Rückverankerung der Sohle im FE-Modell wurden embedded piles verwendet. Aufgrund der Komplexität und Größe des Gesamtmodells wurde die Anzahl der Zugpfähle reduziert. Hierfür wurde der Rasterabstand der Zugpfähle von 2 m auf 11,5 m vergrößert und die Ankergeometrie und -kennwerte entsprechend angepasst. Die Vergleichbarkeit der Systeme bzgl. Lastabtrag und Verformung für diese Fragestellung wurde anhand eines Detailmodells nachgewiesen.

Die Sohlplatte, die seitlichen Stützwände der Gründungsstruktur des SHW und der untere Vorhafen wurden im

numerischen Modell mit Volumenelementen abgebildet. Hierbei wurden linear-elastische Materialeigenschaften vorausgesetzt. Die weitere Abbildung des SHW erfolgte über eine entsprechende Belastung des Systems.

Die neu zu errichtende Schleuse wurde im numerischen Modell mithilfe von Flächenlasten idealisiert. Um die Steifigkeit des Bauwerks zu simulieren, wurde die Schleuse durch den Einsatz von gewichtslosen Volumenelementen mit entsprechend steifem Verhalten abgebildet.

Die Boden-Bauwerks-Interaktion wurde über Interface-Elemente berücksichtigt.

5.3 Berechnungsablauf

Der Berechnungsablauf wurde im Wesentlichen dem geplanten Bauablauf angepasst. Zunächst wurde der damalige Bau des SHW in seinen Grundzügen nachvollzogen. Die Verformungen aus der Errichtung des SHW wurden anschließend auf null zurückgesetzt, da sie sich vor der Herstellung der Baugrube bereits eingestellt haben und somit den aktuellen Ausgangszustand darstellen. Die Herstellung der Baugrube wurde in den einzelnen Phasen zur Herstellung der Umschließung, der Unterwasserbetonsohle, der Rückverankerungen und Aussteifungen sowie der einzelnen Wasserhaltungsmaßnahmen und Voraushubschritte unterteilt und umgesetzt. Am Ende steht der Bau des Schleusenbauwerks in zwei Schritten bis zum Geländeniveau.

5.4 Berechnungsergebnisse

5.4.1 Verformungen

Der Schwerpunkt der FE-Berechnungen lag in der Verformungsuntersuchung des SHW infolge des Baus der Baugrube des Schleusenneubaus. Aus den Simulationen ergibt sich eine max. akkumulierte vertikale Verformung innerhalb der Baugrube aus allen Bauphasen vom Voraushub der Baugrube bis zum Lenzen der Baugrube von ca. 15 cm Hebung im Bereich der Sohle. Die maßgebende max. Verformung am nordwestlichen Turm sowie am nördlichen Tor des SHW, als die der Baugrube am nächsten gelegenen und somit am stärksten beanspruchten Strukturen, treten bei dem Bauzustand ein, bei dem die Baugrube bis auf NHN $-12,00\text{ m}$ gelenzt wird. Die Verformung des SHW ist in Bild 8a dargestellt. Für den westlichen Trog ergibt sich in diesem Zustand eine Hebung auf der Westseite von 16 mm und auf der Ostseite von 6 mm. Das Schleusentor erfährt eine Differenzhebung von 5 mm. Für beide Strukturen beträgt die horizontale Verformung 3 mm von der Baugrube weg. Die Schiefstellung liegt bei beiden unter 1:3000 in diesem Bauzustand.

Aus der numerisch ermittelten Differenzsetzung sowie aus dem Höhe/Breite-Verhältnis des westlichen Trogs

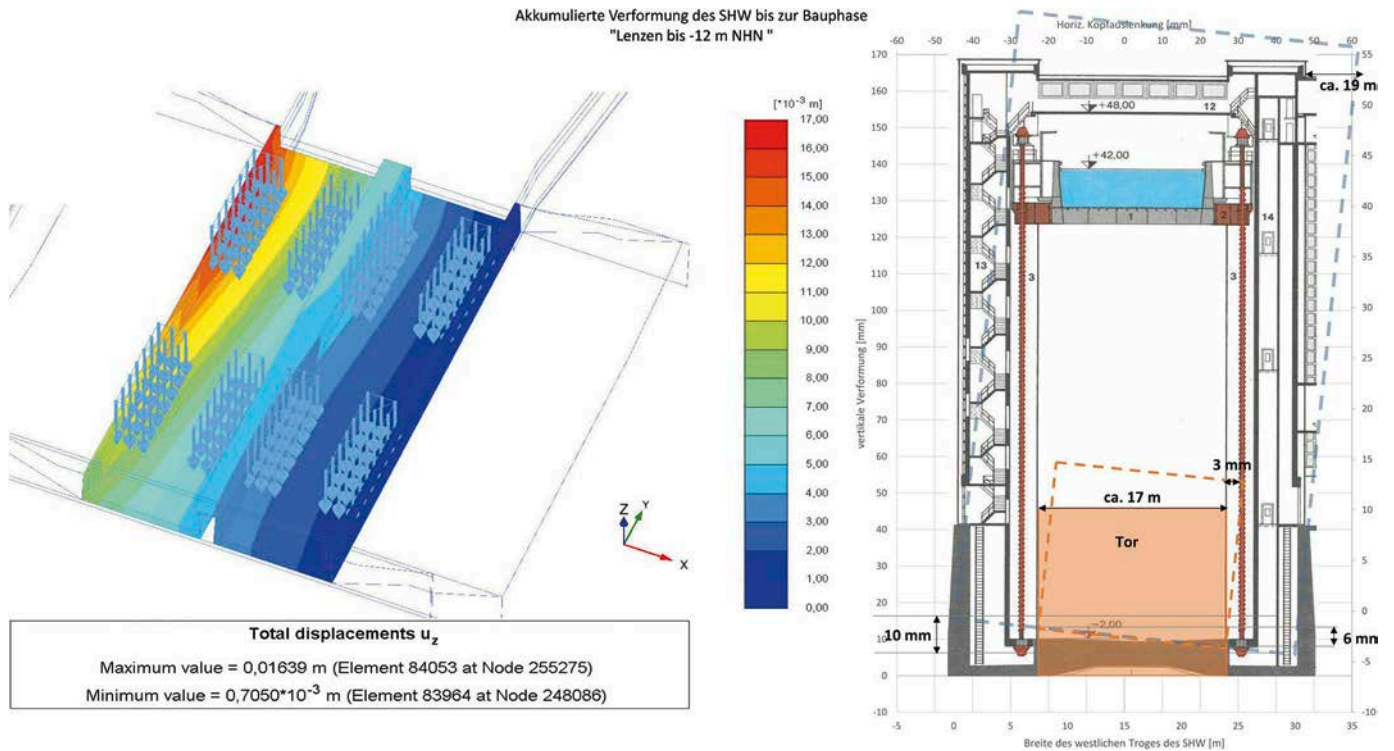


Bild 8 a) Verformungen des SHW im kritischen Berechnungsschritt (Lenzen der Baugrube auf NHN –12,00 m); b) Ermittlung der max. Verformungen an der Oberkante des Turms bzw. des Tors des SHW
a) Displacements of the SHW in the crucial calculation steps (pump out down to NHN –12,00 m); b) Determination of the maximal deformations at the top of the tower or the gate of the SHW

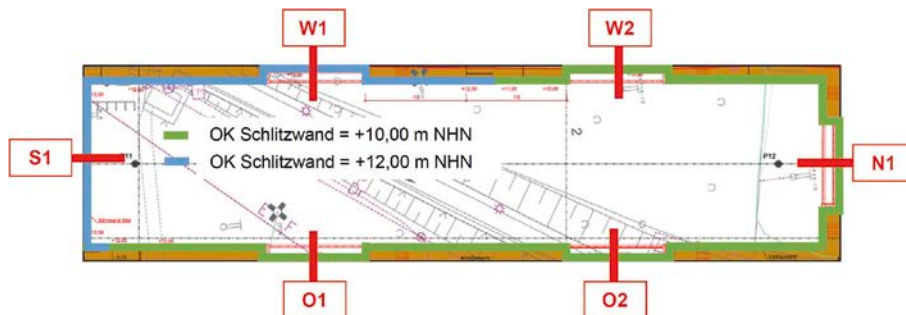


Bild 9 Bemessungsschnitte entlang der Baugrubenumschließung
Design locations along the excavation enclosure

wird die max. Auslenkung an der Oberkante des SHW bzw. des Tors ermittelt (Bild 8b). Auf diesem Wege wurde eine max. Auslenkung an der Oberkante des Turms von 17 mm bzw. 3 mm am Tor ermittelt. Diese Werte liegen im Rahmen der Genauigkeit des Modells unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte (s. Abschn. 3).

5.4.2 Erddruckansatz für Baugrubenumschließung

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Ermittlung von Erddruckansätzen für die Baugrubenumschließung aus den ermittelten Verformungen, die in der Tragwerksplanung für die Berechnungen in Ansatz gebracht wurden. Hierfür wurde an sechs repräsentativen Schnitten, wie sie in Bild 9 dargestellt sind, der mobilisierte aktive und passive Erddruck aus den Ergebnissen der FE-Berechnungen abgeleitet.

Der Ansatz des aktiven Erddrucks bzw. der Erdruhrdruckanteile sollte nach Abstimmung aller Planungsbeeteiligten in Abhängigkeit von der Systemhöhe in den einzelnen Bauphasen über einen linearen bzw. abschnittsweise linearen Erddruckansatz umgesetzt werden. Die grundsätzliche Lastfigur wurde in Anlehnung an die EAB gewählt. Es wurde hierfür die mobilisierte effektive Normalspannung auf die Außenseite der Schlitzwand herangezogen und hieraus eine Erddruckfigur mit entsprechender Überdeckung der lokalen Spannungsspitzen sowie einer entsprechenden Sicherheit abgeleitet. Ein Beispiel für den abgeleiteten Erddruckansatz am Schnitt W1 ist in Bild 10 für die maßgebenden Bauphasen dargestellt.

Im Bereich des passiven Erdwiderlagers wird für die einzelnen Bauphasen eine Bettung in Ansatz gebracht, die aus den Ergebnissen der numerischen Berechnung abge-

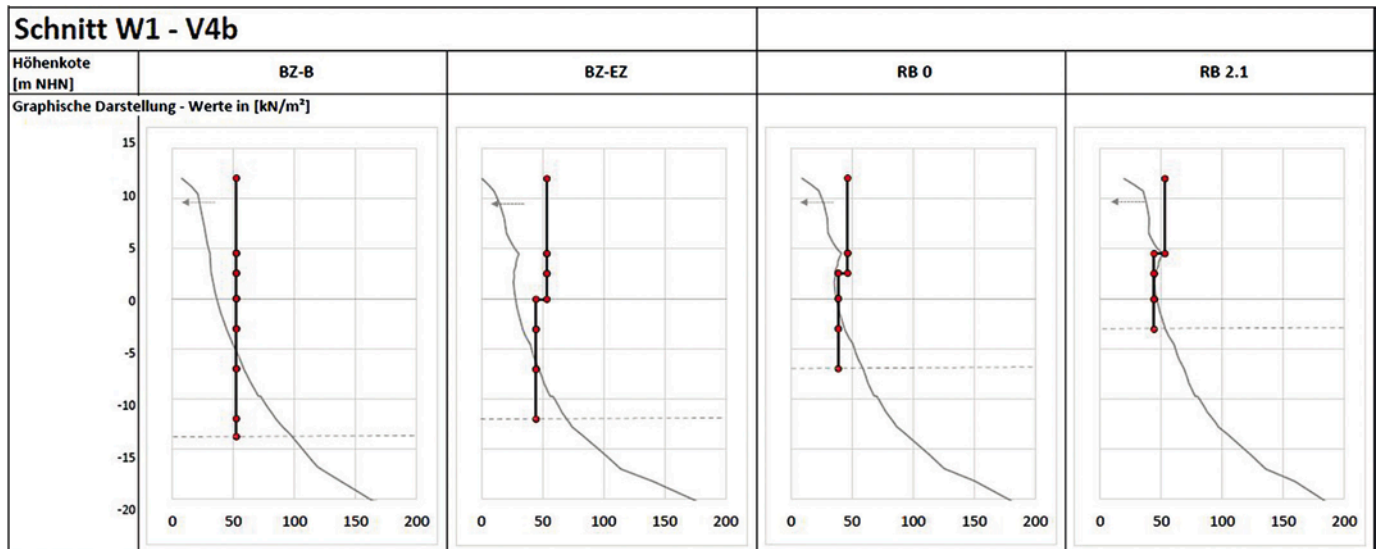


Bild 10 Erddruckansätze aus den numerisch berechneten Erddruckverläufen am Beispiel des Schnitts W1 für die maßgebenden Berechnungsschritte
Earth pressure deduced from the numerical calculations by the example of the design location W1 for the decisive calculation steps

leitet wurde. Der Bettungswiderstand aus der UWBS sowie dem Schleusenbauwerk für die späteren Bauphasen wird analog hierzu ermittelt. Für die Ermittlung der Bettungswiderstände wird die mobilisierte effektive Normalspannung auf die Schlitzwand herangezogen, d.h. die Differenz auf der Horizontalspannung auf der Innen- und Außenseite der Wand gebildet, wie es anhand des Beispiels für den Schnitt W1 in Bild 11 dargestellt ist. Zur Ermittlung des Bettungsmoduls k_s wird die mobilisierte Spannung $\Delta\sigma_h$ durch die horizontale Verschiebung der Wand u_h dividiert:

$$k_s = \Delta\sigma_h / u_h \quad (1)$$

Im Bereich des Bodens weist der Erddruck auf der Innen- und Außenseite der Wand eine vergleichbare Größenordnung auf (Bild 11). Aufgrund der Rückverdrehung der Schlitzwand im unteren Wandbereich findet hier eine Umlagerung des passiven Bereichs von der Innenseite der Baugrube auf die Außenseite der Baugrube statt. Dies hat zur Folge, dass der Erddruck auf die Außenseite der Wand im Bereich von etwa NHN -17,00 m größer ist als der Erddruck auf der Innenseite der Baugrube. Im Bereich der UWBS ist entsprechend der hohen Steifigkeit der Sohle gegenüber dem Boden ein deutlicher Zuwachs der horizontalen Spannungen zu verzeichnen. Bei gleicher Größenordnung der Verschiebungen sind hier die Bettungsmodule somit vergleichsweise hoch. Oberhalb der Sohle schließt das Schleusenbauwerk an. Aufgrund des hier verwendeten linear-elastischen, ideal-plastischen Stoffmodells findet eine Umlagerung der Spannung in Zug- und Druckzonen statt, die eine sprunghafte Verteilung der Bettungsmodule zur Folge hat.

Die Bettungsmodule werden über die Höhe des jeweiligen Bereichs (Boden, UWBS, Schleuse) gemittelt. Hierbei werden Extrema, wie sie beispielsweise bei sehr geringen Verschiebungen der Wand im Bereich der Rückverdrehung entstehen, nicht berücksichtigt (Bild 11c). Die Bet-

tungsmodule wurden weiterhin in Absprache mit der BAW aufgrund von in den gängigen Regelwerken angegebenen Erfahrungswerten für Bettungsmodule in dicht gelagertem Sand auf 20 MN/m^3 begrenzt.

Anhand dieses Beispiels zeigen sich erneut die Komplexität und die Sensibilität der aus den FE-Berechnungen abgeleiteten Ansätze und die Bedeutung des Zusammenspiels zwischen dem Entwurf und der hier ergänzenden Numerik. Die Herausstellung der Erddruckansätze hängt in ihrer Qualität und Quantität neben dem Detailgrad der numerischen Modellierung (Diskretisierung und Wahl des Stoffmodells etc.) auch stark von der Ausbildung des Schleusenbauwerks ab. Bei einer Änderung des Systems z. B. durch die Anpassung der Dimensionen und Steifigkeiten der Baugrubenumschließung oder auch der Lasten ist somit eine Anpassung der Erddruckansätze erforderlich.

6 Baugrubenkonzept (Ausführungsplanung)

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde die Ausführungssicherheit (Bauzeit, Kosten) der Baugrubenkonstruktion weiter erhöht. Durch Erhöhung der Schlitzwandbreite von $d_{\text{SW}} = 1,50 \text{ m}$ auf $d_{\text{SW}} = 2,00 \text{ m}$ (s. Abschn. 5.2) konnten die gemäß Baugrubenkonzeption bisher vorgesehenen drei Ankerlagen entfallen. Ferner wurde die max. erforderliche Bewehrungsmenge in der Schlitzwand ebenfalls reduziert, um eine entsprechende Betonqualität/Fließfähigkeit auch bei höheren Suspensionsdichten sicherzustellen.

Die Entwurfsplanungen wurden entsprechend fortgeschrieben und im Rahmen der Ausführungsplanung in das neue Baugrubenkonzept 4b – „SW + UWBS + Steifen“ mit einer 2,00 m breiten Schlitzwand und nur noch einer oberen Stahlbeton-Aussteifungslage überführt.

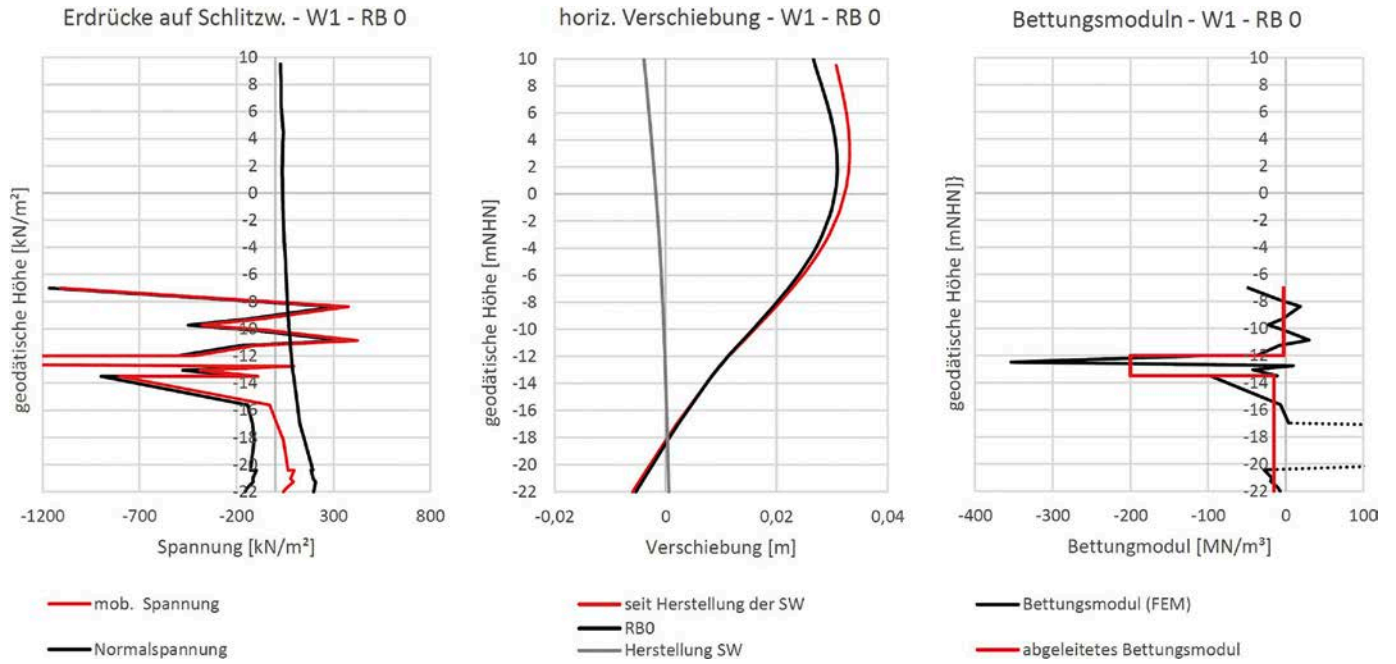


Bild 11 Numerisch berechnete Erddrücke (a), horizontale Verschiebungen (b) sowie abgeleitete Bettungsmodul (c) im Schnitt W1
 Calculated earth pressure (a), horizontal displacements (b) and deduced modulus of subgrade reaction (c) for the location W1

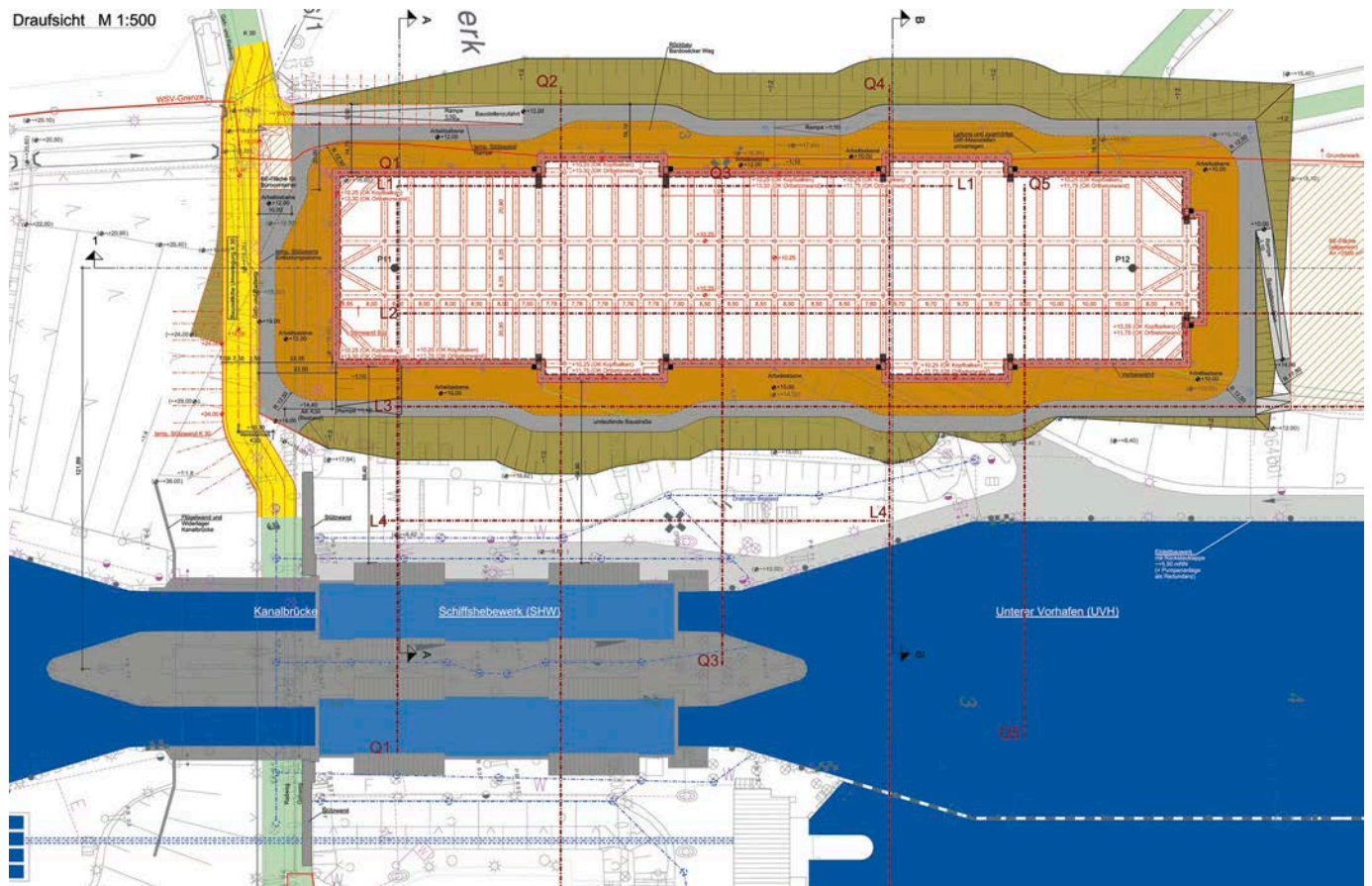


Bild 12 Grundriss Baugrubenplanung
 Layout of excavation planning

Die Ausführung der Schlitzwand erfolgt als klassische ebene Zweiphasenschlitzwand (Ortbetonwand mit eingestellter Bewehrung) mit einer Dicke $d_{SW} = 2,00$ m. Durch die 2,00 m breite Schlitzwand steht eine größere statische Höhe des Querschnitts zur Verfügung, sodass eine max.

dreilagige Bewehrungsführung umsetzbar ist und die Betonqualität/Fließfähigkeit auch bei höheren Suspensionsdichten sichergestellt wird. Die Aussteifung der Schlitzwand erfolgt mit einem umlaufenden Kopfbalken ($B/H = 2,30$ m/1,50 m) und Stahlbetonsteifen in Ort-

Schnitt A - A M 1:500

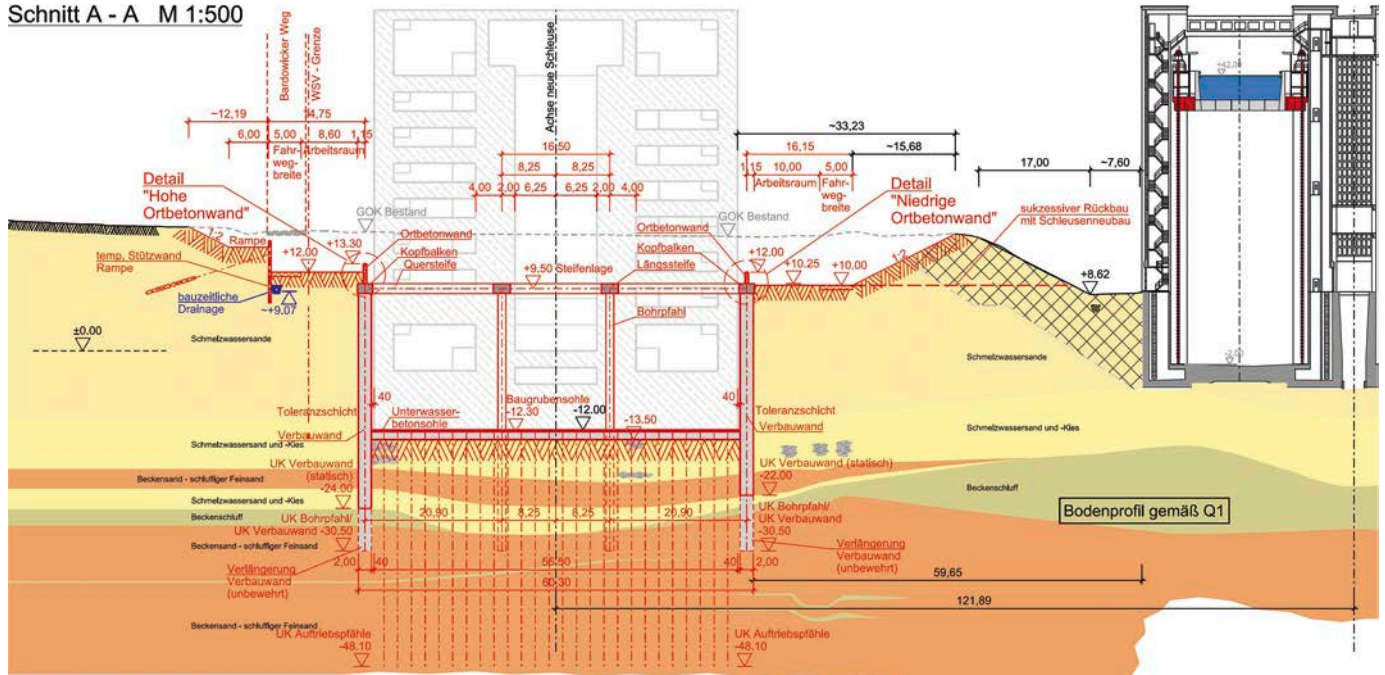


Bild 13 Querschnitt Baugrubenplanung
Cross section of excavation planning

betonbauweise (längs und quer) auf der Höhe NHN +9,50 m (Achshöhe). Die Steifen werden in Breiten von ca. 1,80–2,60 m bei einer einheitlichen Höhe von 1,50 m ausgeführt. Zum Abtrag der Vertikallasten des Steifenrosts werden Bohrpfähle \varnothing 1,20 m als Vertikalabstützungen unter den Knotenpunkten der Steifen angeordnet und binden jeweils mind. 2,50 m in die anstehenden tragfähigen Beckensande ein. Die Bohrpfähle und auch die Steifen werden vor dem Aushub von bzw. auf der Arbeitsebene ca. NHN +9,00 m hergestellt.

Nach dem Vollaushub der Baugrube erfolgt der Einbau der Unterwasserbetonsohle mit einer Dicke von $d_{UWBS} = 1,20$ m. Der Einbau des Betons erfolgt im Kontraktorverfahren unter Wasser. Für das spätere Lenzen der Baugrube wird die Sohle zur Auftriebssicherung mit Mikroverpresspfählen (Länge ca. 36 m, Raster ca. 2,10 m \times 2,10 m) gemäß DIN EN 14199 und DIN SPEC 18539 rückverankert.

Die besonderen Herausforderungen des Projekts liegen neben den geotechnischen Fragestellungen, den Boden-Bauwerks-Interaktionen und zugehörigen Modellierungsherausforderungen vor allem auch in den zugehörigen Massen, den Abmessungen und der bautechnischen Umsetzung der einzelnen Baugrubenelemente. So werden für die Baugrube ca. 26 000 m² Schlitzwand, 10 250 m³ Stahlbeton-Aussteifungen, 570 000 m³ Aushub, 2 700 m Vertikalabstützungen, 18 400 m³ Unterwasserbetonsohle und 3 700 Auftriebspfähle herzustellen sein.

7 Stand des Projekts

Die Planungsleistungen für die Baugrube zum Neubau der Schleuse Lüneburg wurden zum Jahresende 2017 ab-

geschlossen. Dem Bauherrn liegt damit die Entwurfs- und Ausführungsplanung objekt- und tragwerksplanerisch gesichert vor.

Beteiligte

Bauherr:

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, vertreten durch das Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

Bauherrenberatung:

Entwurfs- und Ausführungsplanung (Baugrube):

Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“, bestehend aus den Ingenieurbüros:
grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG, Hannover
Sweco GmbH, Hannover
GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin

Autoren

Dipl.-Ing. Björn Helfers, M.Sc.
grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG
Expo Plaza 10
30539 Hannover
b.helfers@grbv.de

Dr.-Ing. habil. Sascha Henke
BBI Geo- und Umwelttechnik Ingenieur-Gesellschaft mbH
(im Verbund mit GuD)
Lübecker Straße 1
22087 Hamburg
s.henke@b-b-i.de

Dr.-Ing. Hatice Kaya
BBI Geo- und Umwelttechnik Ingenieur-Gesellschaft mbH
(im Verbund mit GuD)
Lübecker Straße 1
22087 Hamburg
h.kaya@b-b-i.de



INGENIEURE IM BAUWESEN

Hauptsitz Hannover

Expo Plaza 10
30539 Hannover
Telefon +49 511 98494-0
Telefax +49 511 98494-20
info@grbv.de
www.grbv.de

Niederlassung Berlin

Wichmannstraße 6
10787 Berlin
Telefon +49 30 3001316-0
Telefax +49 30 3001316-20
berlin@grbv.de

Wasserbau

Hochbau

Ingenieurbau

Industriebau

Windenergie