

Numerische Untersuchungen zur Baugrube Schleuse Lüneburg unter Berücksichtigung des benachbarten Schiffshebewerks

Numerical Analyses of the Building Pit for Lüneburg Lock Taking Account of the Neighbouring Ship Lift

Dr.-Ing. habil. Sascha Henke, Dipl.-Ing. Peng Hao, GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin; Dipl.-Ing. Ulf, Matthiesen, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg; Dipl.-Ing. Roland Rother, Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover

Es ist geplant, neben dem bestehenden Schiffshebewerk Lüneburg bei Scharnebeck eine neue Schleuse zu errichten. Für den Bau dieser Schleuse ist eine Baugrube mit einer Breite von etwa 60 m sowie einer Tiefe von ca. 26 m erforderlich. Die Länge der Baugrube beträgt insgesamt etwa 260 m. Hinsichtlich Planung und Bau der Schleuse Lüneburg liegen besondere Randbedingungen vor, da das benachbarte Schiffshebewerk während des Baus und auch während des Betriebs der neuen Schleuse weiterhin befahren werden soll. Ein besonderes Augenmerk ist hierbei auf die zulässigen Verformungen des bestehenden Schiffshebewerks infolge der benachbarten Bautätigkeit gerichtet. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden durch die BAW, Dienststelle Hamburg, erste Untersuchungen zum Verformungsverhalten des Schiffshebewerks infolge des Baus einer benachbarten Baugrube durchgeführt. Hierauf aufbauend wurde die Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“ beauftragt, die Planung der Baugrube für die Schleuse Lüneburg vorzunehmen. Dies beinhaltet auch die Festlegung des notwendigen Abstands zwischen Schleuse und Schiffshebewerk auf Basis numerischer Untersuchungen.

In einer Vorstudie am ebenen Finite-Elemente-Modell wurde der Abstand zwischen Baugrube und Schiffshebewerk zu 60 m festgelegt.

Um die Verformungen des Schiffshebewerkes infolge des Baus der neuen Schleuse Lüneburg jedoch möglichst realitätsnah zu prognostizieren und die Ergebnisse der ebenen Berechnungen abzusichern, werden zusätzliche Untersuchungen am räumlichen Finite-Elemente-Modell durchgeführt.

Im Rahmen dieses Beitrages werden die durchgeführten numerischen Berechnungen sowie Besonderheiten der Modellbildung diskutiert. Es werden die Ergebnisse der Verformungsprognose vorgestellt und mit den vorgegebenen Grenzwerten für die maximale Auslenkung der Türme des Schiffshebewerkes verglichen. Abschließend wird ein Vergleich der aus dem numerischen Modell abgeleiteten Erddruckfiguren mit Ansätzen aus den gängigen nationalen Regelwerken gezeigt.

The construction of a new lock is planned near the existing ship lift in Lüneburg Scharnebeck. Therefore, a building pit with the following dimensions has to be constructed: height: 26 m, width: 60 m, length: 260 m. Challenging boundary conditions for the design and construction of Lüneburg lock exist as the neighbouring ship lift will remain in operation throughout the entire construction process. The resulting deformations of the existing ship lift owing to the construction works are of particular interest. Initial numerical investigations of the behaviour of the ship lift due to the construction of a building pit next to it were carried out by the BAW in Hamburg. Based on this feasibility study, the “Ingenieurgesellschaft Baugrube Schleuse Lüneburg” was awarded the contract to design the building pit for the new lock.

In the course of a preliminary study using 2d finite element simulations, the distance between the new lock and the ship lift was determined to be at least 60 m so that the resulting deformations of the ship lift remain below the predefined limit values.

A complex 3d finite element simulation is being performed to arrive at a more realistic prognosis of the de-

formations of the ship lift due to the adjacent construction work.

The numerical model used is presented in this paper. Furthermore, the paper describes specific modelling issues relating to the 3d simulation. The resulting deformations of the ship lift are discussed and compared with the predefined limit values. Finally, the resulting earth pressure distribution obtained in the numerical simulation is compared with the conventional earth pressure distribution approaches found in national standards.

1 Einleitung Introduction

Der 1976 eingeweihte Elbe-Seitenkanal (ESK) verbindet den Hamburger Hafen mit dem Hinterland und über den Mittellandkanal mit dem gesamten deutschen Wasserstraßennetz. Der ESK zweigt westlich von Wolfsburg vom Mittellandkanal ab (NN +65,0 m) und erreicht nach 115 km kurz oberhalb des Wehres Geesthacht die Elbe (NN +4,0 m). Die Höhendifferenz von 61,0 m überwindet der Kanal mit nur zwei Abstiegsbauwerken, den Schleusen Uelzen I und II (Fallhöhe 23,0 m) und dem Schiffshebewerk (SHW) Lüneburg (Fallhöhe 38,0 m) (siehe Bild 1).

Die Schleusen Uelzen I und Uelzen II besitzen eine Nutzlänge von 185 m bei einer Breite von 12 m bzw. 12,5 m. Die Tröge des Schiffshebewerks Lüneburg haben ebenfalls eine Breite von 12 m, jedoch nur eine



Bild 1: Elbe-Seitenkanal (Quelle: WSA Uelzen)
Figure 1: Elbe-Seitenkanal (Source: WSA Uelzen)

Nutzlänge von 100 m. Das Schiffshebewerk stellt somit einen Engpass dar, weil bereits Großmotorschiffe mit 110 m Länge das Hebewerk nicht passieren können.

Um die gegenwärtige Verkehrssituation am ESK zu verbessern, plant das Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals (NBA) in Hannover den Neubau einer Schiffsschleuse. Die geplante Schleuse hat eine nutzbare Kammerlänge von 225 m und eine Kammerbreite von 12,5 m. Die Ausführung der Schleuse ist in Massivbauweise geplant mit einem geschlossenen Rahmen als Tragkonstruktion. Die Sparbecken sind etagenförmig in die Kammerwände integriert. Es ist geplant, die Schleuse – wie das bestehende Schiffshebewerk – flach zu gründen (siehe Bild 2).

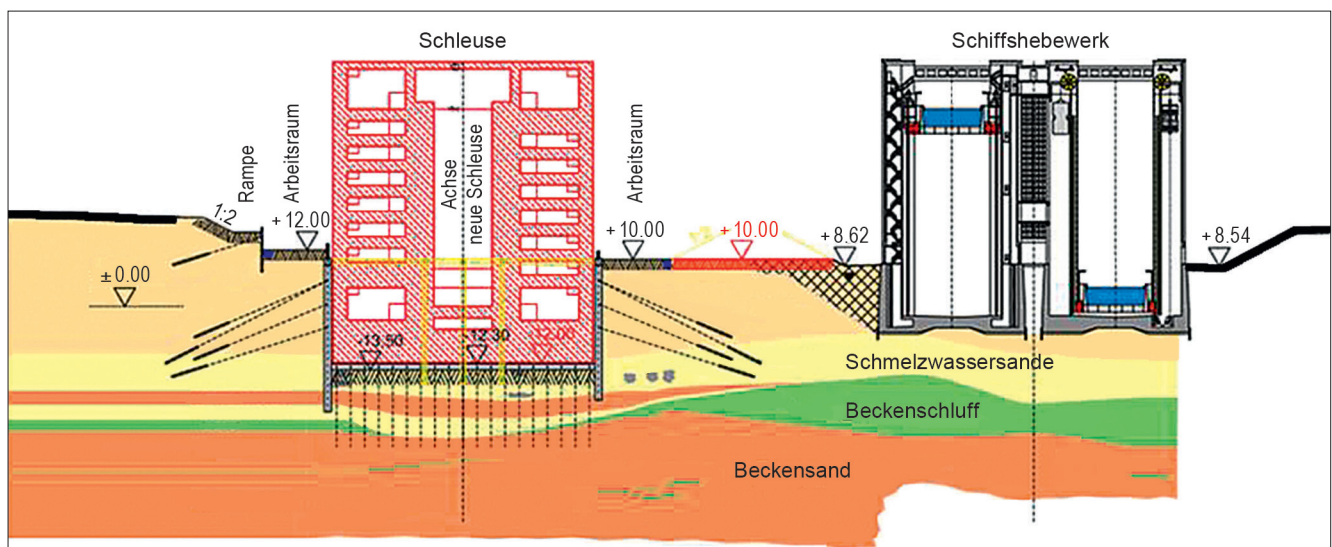


Bild 2: Geplante Schleuse einschl. Baugrube und SHW im Querschnitt (Quelle: Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“)
Figure 2: Planned lock including building pit and ship lift (Source: “Ingenieurgesellschaft Baugrube Schleuse Lüneburg”)

Die neue Schleuse soll westlich des vorhandenen Schiffshebewerks errichtet werden (siehe Bild 3). Die Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“ bestehend aus den Büros grbv (Objektplanung), Grontmij (Tragwerksplanungen) und GuD (Numerische Berechnungen) wurde mit der Planung der Baugrube für die Schleuse beauftragt. Der Achsabstand der Bauwerke ist ein Gegenstand der derzeitigen Planung. Im Rahmen der Planungen der Baugrube werden 2D- und 3D-Berechnungen mittels der Finite-Element-Methode (FEM) durchgeführt. Der Standort und der Bauablauf der Schleuse sind dahingehend zu überprüfen, ob die Auswirkungen durch die Baugrube und das spätere Schleusenbauwerk auf das vorhandene setzungempfindliche Schiffshebewerk verträglich sind.

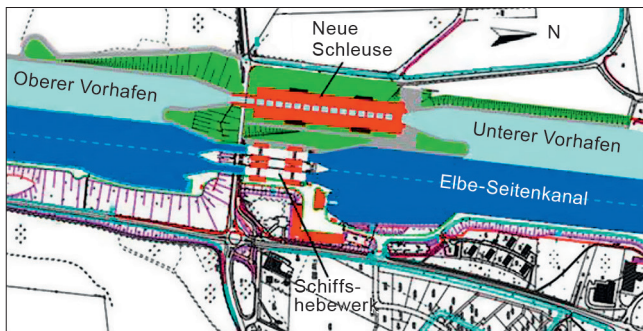


Bild 3: Entwurfsskizze SHW Lüneburg und geplante Schleuse mit erweiterten Vorhäfen (Quelle: NBA Hannover, Stand 2010)

Figure 3: Design sketch of Lüneburg ship lift and planned lock (Source: NBA Hannover, 2010)

2 Geologie und Grundwasser- verhältnisse

Geology and groundwater conditions

Das Untersuchungsgebiet liegt am Rande des Elbe-Urstromtals. Das Gebiet südlich des Schiffshebewerks und der geplanten Schleuse gehört zur Geest, während der nach Norden abfallende Bereich zur Vorgeest gehört und dem Urstromtal anzurechnen ist.

Der Baugrund im Bereich des Schiffshebewerks und der geplanten Schleuse besteht überwiegend aus dicht bis sehr dicht gelagerten, nichtbindigen Böden mit einer vergleichsweise dünnen, in seiner Mächtigkeit stark schwankenden, eingelagerten bindigen Schicht (Beckenschluff). Als unterste erkundete Bodenschicht liegt eine Schicht aus sehr dicht gelagertem Beckensand vor. Überlagert wird diese Schicht

von dem o.g. Beckenschluff. Hierauf folgen Schmelzwasserablagerungen. Weiter Richtung Norden wurden unregelmäßig geformte Linsen und Einzelschollen von Geschiebemergel und Schluff angetroffen. Der geologische Längsschnitt in Bild 4 zeigt beispielhaft den Verlauf der Bodenschichten im Bereich der geplanten Schleuse.

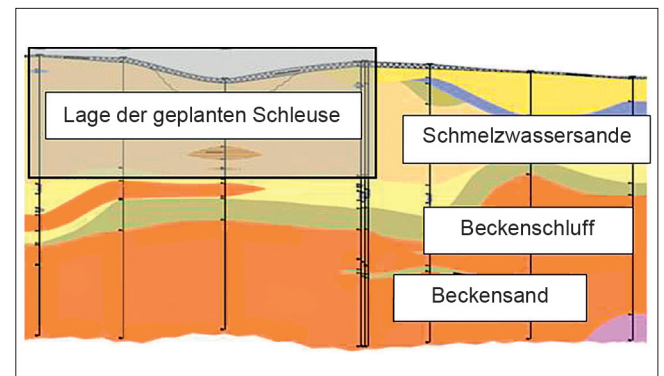


Bild 4: Geologischer Längsschnitt (Nord-Süd-Richtung) im Bereich der geplanten Schleuse

Figure 4: Geological longitudinal section (north-south direction) in the area of the planned lock

Im Untersuchungsgebiet liegen zwei Grundwasserstockwerke vor. Das erste (obere) Grundwasserstockwerk wird aus den oberen Sanden sowie den Schmelzwasserablagerungen gebildet und wird von der Beckenschluffschicht unterlagert, welche als Stockwerkstrenger fungiert. Im Liegenden dieses Grundwassergeringleiters befindet sich das zweite (untere) Grundwasserstockwerk, das aus dem Beckensand gebildet wird.

Die Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet werden durch die tief in den oberen Grundwasserleiter eingreifenden Bauwerksteile des Schiffshebewerks, durch die Wasserstände des ungedichteten unteren Vorhafens sowie durch das im Bereich des Schiffshebewerks verlegte Dränagesystem geprägt. Aufgrund dieser zahlreichen Wirkfaktoren liegt im Untersuchungsgebiet ein äußerst komplexes Grundwasser-Strömungsfeld vor.

Um die Auswirkungen des Baus der Schleuse auf die Grundwasser-Strömungsverhältnisse zu erfassen, wird zeitgleich zu den Planungen der Baugrube ein 3D-Grundwassermodell des Untersuchungsgebiets erstellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können somit direkt in die Tragwerksplanung der Schleusenbaugrube sowie die 3D-FEM-Berechnungen einfließen.

3 Voruntersuchungen zur Lage der Schleuse

Preliminary analyses to establish the lock position

3.1 2D-FE-Modell

2D FE model

Im Jahr 2010 wurde die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, beauftragt, das NBA Hannover bei der Konzeption der Baugrube sowie der Lage der neuen Schleuse zu beraten. Hierbei galt es zunächst anhand einer Voruntersuchung Aussagen zum Verformungsverhalten des Schiffshebewerks einschließlich einer ersten Abschätzung zur möglichen Lage der Schleuse zu treffen.

Für die Festlegung des genauen Standorts der Schleuse waren die Auswirkungen aus der Bauausführung und dem Betrieb auf das benachbarte bestehende Hebewerk zu untersuchen. Der seitliche Abstand zwischen dem Schiffshebewerk und der neuen Schleuse wurde hierfür mittels 2D-FEM-Berechnungen unter Anwendung der Software Plaxis 2D untersucht. Hierbei erfolgte die Schnittführung in Oberwasser-Richtung, durch die südlichen Türme des Schiffshebewerks und das Oberhaupt der Schleuse (siehe Bild 5).



Bild 5: Lageplan SHW Lüneburg und geplante Schleuse einschl. Schnittführung 2D-FEM-Untersuchung
 Figure 5: Site plan of the ship lift and planned lock including profile for the preliminary 2d finite element simulation

Im Untersuchungsbereich lagen zu diesem Zeitpunkt lediglich Altaufschlüsse aus den zum Bau des Schiffshebewerks durchgeführten Baugrunderkundungen (1967 bis 1970) vor. Diese lagen jedoch vorwiegend im Bereich des Schiffshebewerks und der Trasse des ESK, sodass für den Bereich der geplanten Schleuse Annahmen zur möglichen Bodenschichtung getroffen werden mussten.

Sämtliche Baugrundsichten wurden mit dem elastoplastischen Stoffgesetz HS-Small modelliert. Grundlage für die Wahl der Bodenparameter waren die von der BAW erstellten Baugrundgutachten (1967/68) aus denen die benötigten Stoffparameter abgeleitet wurden. Die Wahl der zusätzlich erforderlichen Materialparameter zur Beschreibung des initialen Schubmoduls bei kleinen Dehnungen erfolgte anhand von Korrelationen in Anlehnung an die Empfehlungen von Benz (2007) sowie Erfahrungswerten der BAW.

Die Berechnungen wurden der Historie bzw. dem Bauablauf des Schiffshebewerks und der geplanten Schleuse entsprechend durchgeführt. Das Schiffshebewerk wurde in einer geböschten Baugrube mithilfe einer Grundwasserabsenkung hergestellt und entsprechend modelliert. Die Baugrube der geplanten Schleuse wurde als ausgesteifte Baugrube in Schlitzwandbauweise mit rückverankerter Unterwasserbetonsohle modelliert (siehe Bild 6). Hinsichtlich des Baugrubenverbbaus mussten ebenfalls Annahmen getroffen werden.

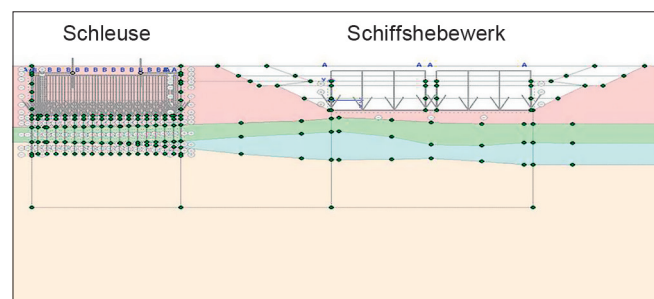


Bild 6: Ausschnitt 2D-FEM-Modell
 Figure 6: Extract from the 2d finite element model

3.2 Ergebnisse der Parameterstudien

Results of the parametric studies

Der Schwerpunkt der numerischen Untersuchung lag in der Bewertung der Verschiebungen am bestehenden Schiffshebewerk, verursacht durch den Bau und den Betrieb der geplanten Schleuse. Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden daher die vertikalen Verschiebungen

der Sohle unter dem westlichen Trog des Schiffshebewerks für verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Abständen zwischen Schiffshebewerk und Schleuse unter unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt und ausgewertet

Der Abstand zwischen Schleuse und Schiffshebewerk wurde zwischen 30 m und 60 m variiert. Wie erwartet, weist das Schiffshebewerk infolge des Schleusenneubaus eine Kippbewegung Richtung Schleuse auf. Bild 7 zeigt die maximalen vertikalen Verschiebungen der Schiffshebewerksohle (westlicher Trog) und Verkippungen für verschiedene Abstände zwischen Schleuse und Schiffshebewerk.

Da zum Zeitpunkt dieser Voruntersuchung eine Vielzahl der maßgeblichen Modellparameter noch unbekannt waren und somit das numerische Modell in großem Umfang auf Annahmen beruhte, wurde empfohlen, die dargestellten Ergebnisse lediglich als eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Verformungen anzusehen. Es wurde anhand von Parameterstudien gezeigt, dass die ermittelten Verformungen unter Veränderung einiger Kenngrößen mehr oder weniger stark variieren können.

Unter anderem wurden der Einfluss einiger Bodenparameter, wie z. B. der Bodensteifigkeiten untersucht, sowie die Wahl des Stoffgesetzes. Zur Bewertung der Wahl des Stoffgesetzes HS-Small wurde das Stoffgesetz Hardening Soil ohne Berücksichtigung des initialen Schubmoduls G_0 und somit höherer Steifigkeiten in Bereichen kleiner Dehnungen in zwei Vergleichsrechnungen (Abstand Schleuse – Schiffshebewerk: 30 m und 50 m) verwendet. Dies führte bei beiden Beispielrechnungen zu erheblichen Setzungszunahmen unterhalb der Schiffshebewerksohle. Die Berücksichtigung der ‚Small-Strain-Stiffness‘ hat somit maßgeblichen Einfluss auf die realistische Abschätzung von Setzungen unterhalb des Schiffshebewerks.

4 Weitere Untersuchungen

Further investigations

Um belastbarere Prognosen zu den Verformungen am Schiffshebewerk machen zu können, wurde entsprechend empfohlen, die derzeit angenommenen Modellparameter zu verifizieren. Hierfür wurde eine umfassende Baugrunderkundung ausgearbeitet, welche 2010/2011 zur Ausführung kam. Im Zuge dieser Bau-

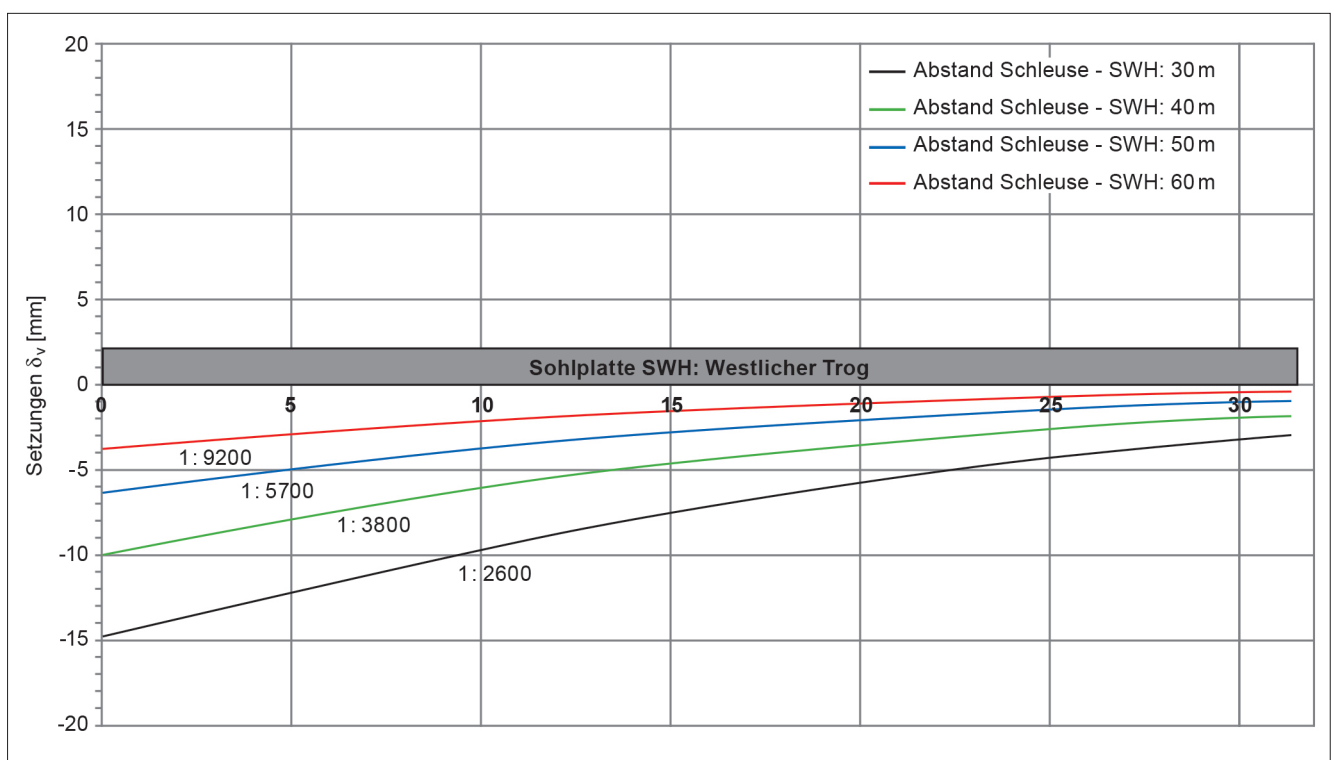


Bild 7: Setzungen SHW Sohlplatte westlicher Trog (2D-FE-Untersuchung zum Abstand Schleuse – SHW, 2010)

Figure 7: Settlements of the western trough foundation of the ship lift (2d finite element simulation of the distance between lock and ship lift, 2010)

grunderkundung wurden zum einen die Schichtenverläufe im Bereich der geplanten Schleuse flächenhaft erkundet sowie zum anderen die Stoffparameter zur Beschreibung des Materialverhaltens der einzelnen Bodenschichten mittels geotechnischer Feld- und Laborversuche ermittelt. Zusätzlich wurden für die Ermittlung elastischer Bodeneigenschaften an zwei Gruppen von jeweils drei Bohrlöchern geophysikalische Crosshole- und Downhole-Versuche vorgenommen.

Für eine fundierte Aussagekraft des Simulationsmodells war es erforderlich, die Ausführung der Baugrube zu präzisieren, um deren Bauablauf, Ausbau und Steifigkeit möglichst genau in das Modell einfließen lassen zu können. Dies erfolgt derzeit im Zuge der Planungen der Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“. Im Rahmen dieser Planungen der Baugrube werden nun unter Verwendung der o. g. ermittelten Modellparameter 2D- und 3D-FEM-Berechnungen durchgeführt mit dem Ziel einer wirklichkeitsnahen Erfassung der Wechselwirkungen aus der Herstellung und dem Betrieb der Schleuse auf das bestehende Schiffshebewerk.

5 Geplante Baugrube

Planned building pit

Durch die Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“ erfolgt zurzeit die Planung der Baugrube für die neue Schleuse Lüneburg.

Der geplante Schleusenneubau hat eine nutzbare Kammerlänge von 225 m und eine Kammerbreite von 12,50 m. Bei der zugrunde liegenden Planung wird von einer Sparschleuse mit etagenförmig in den Kammerwänden integrierten Sparbecken ausgegangen, siehe Bild 2.

Für die Schleuse ist eine Baugrube erforderlich, die die folgenden lichten Abmessungen aufweist:

- Länge: ca. 262 m
- Breite (Regelbereich): ca. 56 m
- Breite (Umlaufbereich): ca. 65 m
- Tiefe: ca. 26 m

Aufbauend auf den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie der BAW, Dienststelle Hamburg, die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellt wurde, sowie unter Berücksichtigung der detaillierten Baugrunduntersu-

chungen im Bereich der geplanten Schleuse Lüneburg wurden umfangreiche Studien am ebenen numerischen Modell zur Festlegung des Abstandes der Schleuse zum Schiffshebewerk sowie zur Abstimmung eines bevorzugten Baugrubenkonzepts durchgeführt. Eine detaillierte Darstellung der im Rahmen der Vorstudie durchgeführten numerischen Berechnungen entfällt an dieser Stelle aus Platzgründen.

Die Ergebnisse der Vorplanung sind jedoch nachfolgend zusammengefasst:

Der Abstand der Schleuse zum Schiffshebewerk wurde zu 60 m festgelegt, da sich anhand der ebenen Berechnungen zeigte, dass in diesem Fall die vorgegebenen Grenzwerte der zulässigen Verformungen des Schiffshebewerks eingehalten werden konnten.

Die Baugrube wird durch eine vierfach gestützte Schlitzwand mit der Schlitzwanddicke von 1,5 m umschlossen. Es wird hierbei eine kombinierte Stützung aus einer oberen Steifenlage und drei darunter angeordneten Ankerlagen gewählt.

Ein Schnitt durch die Baugrube mit der vorgesehenen Aussteifungskonstruktion bestehend aus oberer Steifenlage und drei darunter angeordneten Ankerlagen ist nachfolgend in Bild 8 dargestellt.

Die Baugrubensohle wird als Unterwasserbetonsohle mit einer Rückverankerung durch GEWI-Pfähle geplant.

Eine Draufsicht auf die Baugrube mit einem möglichen Steifenlayout ist in Bild 9 dargestellt.

Zur Reduzierung der Einwirkungen auf die Verbauwand wird unter Berücksichtigung eines Mindestflurabstandes von ca. 0,50 m zu den vorhandenen Grundwasserniveaus ein großflächiger Voraushub zur Errichtung der Arbeitsebenen auf dem Niveau NHN +12,00 m (Bereich Süd und Südwest) bzw. auf dem Niveau NHN +10,00 m (übrige Bereiche) vorgenommen. Die Arbeitsebenen erhalten eine Gesamtbreite von 15 m, wobei 5 m für einen umlaufenden Fahrweg und 10 m als Arbeitsraum und für BE-Fläche vorgesehen sind.

Im Bereich zwischen dem Schiffshebewerk und der Baugrube wird nur der erforderliche Arbeitsraum von 15 m Breite neben der Baugrube vorab ausgehoben.

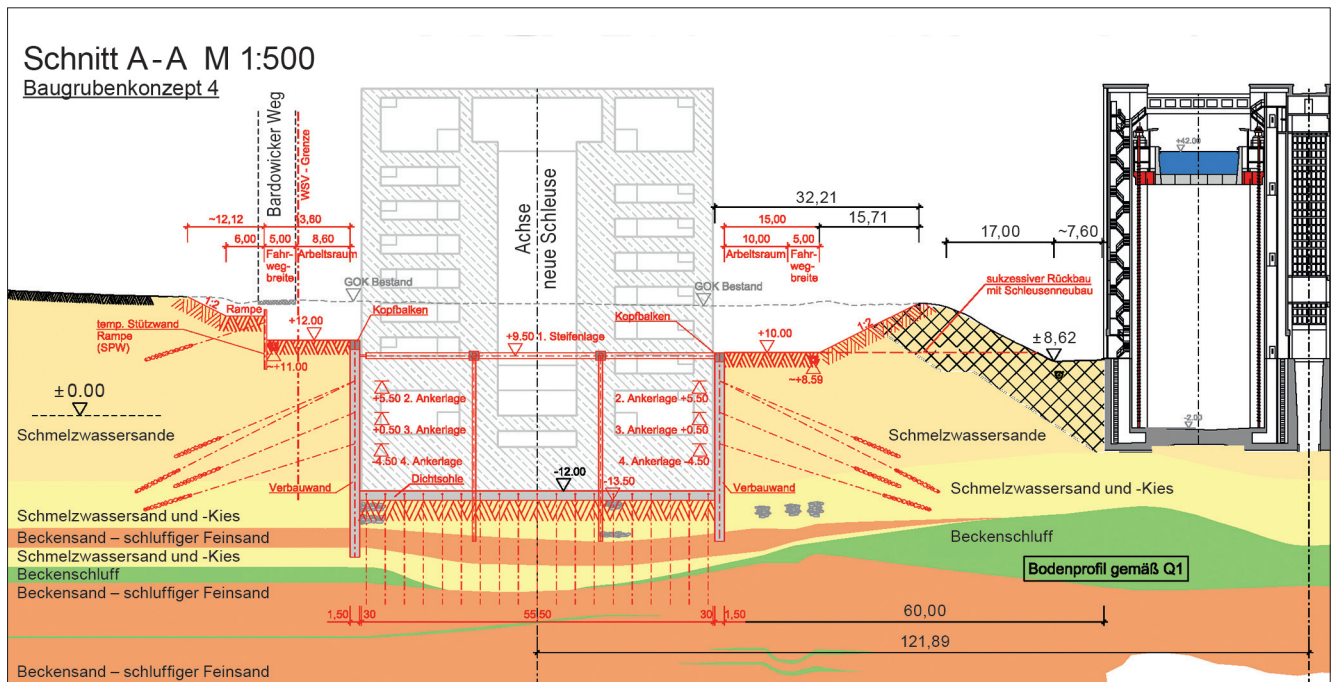


Bild 8: Schnitt durch die Baugrube der neuen Schleuse Lüneburg
 Figure 8: Cross-section of the building pit for Lüneburg lock



Bild 9: Draufsicht auf die Baugrube der neuen Schleuse Lüneburg mit möglichem Steifenlayout (Planungsstand 03/2015)
 Figure 9: Plan view of the building pit of Lüneburg lock with a potential strut layout (as at 03/2015)

Hierdurch verbleibt bauzeitlich eine Bodenmiete (s. Bild 10). Dies hat zur Folge, dass die Mitnahmehebungen während des Aushubes der Baugrube und damit auch die Verformungen des Schiffshebewerks reduziert werden. Parallel zum Schleusenneubau nach Fertigstellung der Baugrube wird diese Bodenmiete sukzessive rückgebaut, sodass die Setzungen im Endzustand, welche vorwiegend durch die Eigengewichts-

lasten des Schleusenneubaus hervorgerufen werden, reduziert werden.

Die nachfolgend beschriebenen numerischen Berechnungen am räumlichen FE-Modell werden unter Berücksichtigung dieses Baugrubenkonzepthes durchgeführt.

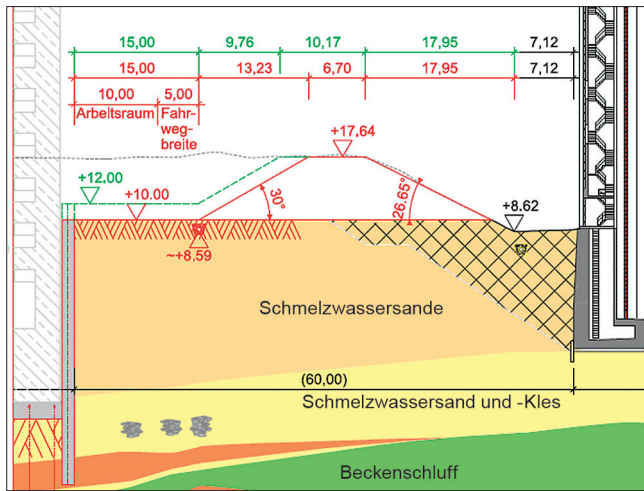


Bild 10: Geometrie der Bodenmiete neben dem Schiffshebewerk

Figure 10: Geometry of the soil heap next to the ship lift

6 Numerische Modellierung

Numerical modelling

In diesem Abschnitt wird das verwendete räumliche Finite-Elemente-Modell der Baugrube Schleuse Lüneburg zur Prognose der Verformungen des benachbarten Schiffshebewerks vorgestellt.

Ziel der numerischen Modellierung ist neben der Prognose der Verformungen des Schiffshebewerks infolge des Baus der benachbarten Schleuse auch eine Abschätzung der Erddruckbelastung auf die Baugrubenwände. Somit ist es erforderlich, dass der Bauablauf zur Errichtung der Baugrube möglichst vollständig im numerischen Modell berücksichtigt wird.

6.1 Stoffmodell und -kennwerte

Soil model and soil parameters

In den numerischen Berechnungen wird der Baugrundaufbau gemäß den in Abschnitt 2 dargestellten Randbedingungen berücksichtigt. Somit sind im Wesentlichen Beckensand und -schluff sowie die Schmelzwassersande und -kiese die maßgebenden Bodenschichten. Obere Sande wurden nur im nördlichen Bereich der geplanten Schleuse vorgefunden, Geschiebemergel wurde im modellierten Bereich nicht angetroffen.

Für den Untergrund wird in allen Berechnungen das Hardening-Soil-Modell mit Small-Strain-Erweiterung verwendet. Dieses Modell ist in der Literatur ausführlich dokumentiert und wird deshalb nachfolgend nur kurz beschrieben, siehe z. B. Schanz (1998), Schanz et al. (1999), Plaxis (2012).

Das Hardening-Soil-(HS)-Modell gehört zur Familie der „Double Hardening“ Modelle. Durch die Einführung zweier weiterer Fließbedingungen neben der Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb können sowohl irreversible Schubverzerrungen aus deviatorischer Erstbelastung als auch irreversible Volumendehnungen aus isotroper Erstbelastung beschrieben werden. Weitere Merkmale des Modells sind die spannungsabhängige Steifigkeit und die Unterscheidung zwischen Erst- sowie Ent- und Wiederbelastung mittels einer isotropen Fließfläche im Spannungsraum.

In der Vergangenheit wurde oft darüber berichtet, dass Materialien unter dynamischer Lasteinwirkung höhere Steifigkeiten aufweisen als bei quasi-statischer Lasteinwirkung. Mit der Entwicklung neuer Messmethoden wurde jedoch klar, dass diese in dynamischen Anwendungen beobachtete höhere Materialsteifigkeit nicht nur auf die Art der Last (also dynamisch oder annähernd statisch) zurückzuführen ist, sondern vielmehr auf das Dehnungsniveau. Bei sehr kleinen Dehnungsniveaus sind die Bodensteifigkeiten um ein Vielfaches höher als die in klassischen Laborversuchen bei relativ großen Dehnungen ermittelten Steifigkeiten. Das Hardening-Soil-Modell mit Small-Strain-Erweiterung trägt diesem Sachverhalt Rechnung, siehe hierzu z. B. Benz (2007).

Neben der Sekantensteifigkeit E_{ur} für große Dehnungen wird im Hardening-Soil-Modell mit Small-Strain-Erweiterung (kurz HS-Small oder HSS) der Schubmodul G_0 definiert, der die Steifigkeit bei sehr kleinen Dehnungsniveaus beschreibt. Die Querdehnzahl ν_{ur} wird wie im Hardening-Soil-Modell im gesamten Dehnungsbereich als konstant angenommen. Zur Definition der dehnungsabhängigen und spannungsabhängigen Steifigkeit verwendet das HS-Small-Modell neben den bekannten Parametern des Hardening-Soil-Modells zwei zusätzliche Parameter G_0 und $\gamma_{0,7}$ (Schubverzerrung bei $G = 0,7G_0$).

Die Quantifizierung der zusätzlichen Parameter erfolgt an dynamischen Laborversuchen (z. B. Resonant-Column Tests) oder seismischen Messungen im Feld (i. d. R. nur G_0).

Die in den numerischen Berechnungen angesetzten Stoffkennwerte wurden anhand von vorliegenden Messdaten (Oedometer- und Triaxialversuche, Drucksondierungen, Cross-Hole-Seismik) abgeleitet und durch vorhandene Erfahrungswerte abgesichert. Eine Zusammenstellung der Hardening-Soil-Stoffkennwerte für die numerischen Berechnungen kann Tabelle 1 entnommen werden.

6.2 Numerisches Modell (3D)

Numerical model (3D)

Die Berechnung erfolgt unter Verwendung des Programmpaketes Plaxis 3D. Es wird über die Vorgabe von insgesamt 16 Bohrprofilen, die im Rahmen der Baugrunduntersuchungen ermittelt wurden, ein möglichst realistisches räumliches Baugrundprofil in den numerischen Berechnungen berücksichtigt.

In dem numerischen Modell werden die Bauteile Schlitzwand, Steifen, Anker, Unterwasserbetonsohle sowie Rückverankerung möglichst realistisch modelliert. Nachfolgend wird die Modellierung der einzelnen Bauteile beschrieben.

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

Tabelle 1: In den Berechnungen angesetzte Parameter des Hardening-Soil-Stoffmodells

Table 1: *Hardening Soil Small parameters used in the numerical simulations*

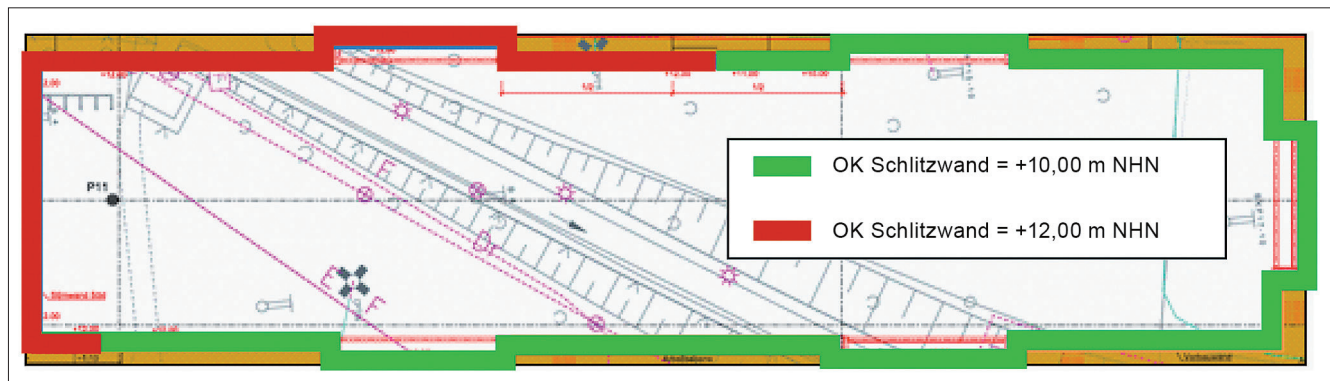


Bild 11: Schlitzwandoberkanten
 Figure 11: Top level of the diaphragm wall

6.2.1 Schlitzwand *Diaphragm wall*

Die Schlitzwand hat eine Dicke von 150 cm. Die Oberkante auf der südlichen und südwestlichen Seite liegt bei 12,00 mNHN und auf der nördlichen, östlichen und nordwestlichen Seite bei 10,00 mNHN (s. Bild 11). Eine einheitliche Unterkante von -22,50 mNHN wird für alle Schlitzwände angesetzt.

Die Schlitzwand wird im FE-Modell mit Plattenelementen abgebildet. Die Bauwerks-Baugrund-Interaktion wird im Modell durch Interface-Elemente mit einem Interfacefaktor $R_{\text{inter}} = 0,5$ simuliert.

6.2.2 Unterwasserbetonsohle (UWBS) und Rückverankerung *Underwater concrete base and rear-anchoring*

Die Oberkante der UWBS liegt bei -12,00 mNHN und die Unterkante bei -13,50 mNHN. Die UWBS wird mit Hilfe von Volumenelementen abgebildet. Es wird ein linear-elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

Zur Sicherung gegen Auftrieb wird die UWBS durch GEWI-Pfähle gehalten. Diese Auftriebspfähle werden im Modell mit sogenannten „Embedded Piles“ abgebildet. Die „Embedded Piles“ sind Balkenelemente, die über axiale und Biegesteifigkeit verfügen. Die Interaktion zum Baugrund durch Mantelreibung und Fußwiderstand erfolgt über Interface-Elemente. Die Mantelreibung τ wird „layer dependent“, d. h. aus Festigkeitsparametern des Bodens sowie dem Interfaceparameter R_{inter} errechnet.

Zudem wird eine Obergrenze der Mantelreibung τ_{max} vorgegeben, welche nicht überschritten werden kann.

Aus der Planung ergibt sich ein Pfahlraster von etwa 2 m. Aus modellierungstechnischen Gründen ist die Modellierung einer so großen Anzahl an Ankern, wie sie sich aus diesem engen Raster ergibt, nicht realisierbar. Mit der Voraussetzung, dass die äquivalente Tragfähigkeit der Pfähle erhalten bleibt, wird in der numerischen Berechnung der Abstand zwischen den Zugpfählen von 2 m auf ca. 11,5 m vergrößert, d. h. ca. 33 Auftriebspfähle werden im FE-Modell durch einen Ersatzpfahl idealisiert. Um eine äquivalente Tragfähigkeit für den Ersatzpfahl zu erhalten, wird der Durchmesser des Ersatzpfahls so angepasst, dass die Mantelreibung des Ersatzpfahles gleich der gesamten Mantelreibung der hierdurch ersetzten Auftriebsanker entspricht. Zudem wird der E-Modul des „Embedded Piles“ für den Ersatzpfahl so angepasst, dass dessen axiale Steifigkeit der axialen Steifigkeit von 33 Stahlzuggliedern entspricht, sodass auch das axiale Verformungsverhalten des Ersatzpfahls näherungsweise dem Verformungsverhalten der Auftriebsanker entspricht.

6.2.3 Aussteifung Schlitzwand *Bracing the diaphragm wall*

Die Aussteifung der Schlitzwand besteht aus vier Aussteifungslagen, wobei die obere Lage aus Steifen und die unteren drei Lagen aus Verpressankern gebildet werden. Die Steifen werden im numerischen Modell mit „node-to-node“ Ankerelementen abgebildet. Hierbei werden linear-elastische Stoffkennwerte für die Steifen berücksichtigt.

Aufgrund der hohen Anzahl an Anker im Modell werden die Anker auf der Ost- und Südseite, d. h. die dem Schiffshebewerk zugewandten Seiten mit „node-to-node“ Ankerelementen für das Zugglied und „embedded pile“ Elementen für den Verpresskörper modelliert. Für den Verpresskörper wird die Mantelreibung abhängig von der jeweiligen Bodenschicht ermittelt, wobei eine Grenzmantelreibung von 80 kN/m^2 nicht überschritten werden darf.

Auf der West- und Nordseite der Baugrube werden die Anker aus modellierungstechnischen Gründen vereinfacht als „fixed-end“ Ankerelemente, also quasi als Federelemente modelliert. Eine Vergleichsrechnung hat gezeigt, dass mit beiden Ankertypen ein vergleichbares Verformungsverhalten der Anker erzielt werden kann.

Die Anker werden jeweils mit der aus der Tragwerksplanung berechneten charakteristischen Ankerkraft vorgespannt.

Eine Darstellung des Aussteifungssystems im numerischen Modell ist in Bild 12 abgebildet.

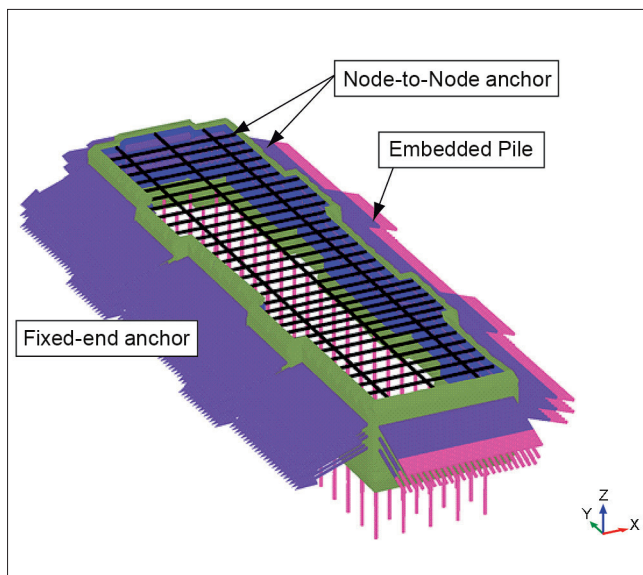


Bild 12: Darstellung des Aussteifungssystems im numerischen Modell

Figure 12: Anchors and struts in the numerical model

6.2.4 Schiffshebewerk *Ship lift*

Die Sohlplatte sowie die seitlichen Stützwände der Gründungsstruktur des Schiffshebewerks werden im Modell mit Volumenelementen abgebildet. Es werden hierfür linear-elastische Stoffkennwerte von Beton angesetzt.

Die Türme des Schiffshebewerks werden nicht diskret modelliert. Hierfür werden Ersatzlasten für die Türme inklusive Kammer, Gewicht, Treppenhaus sowie Fahrstuhlschächten berücksichtigt.

Zudem wird im numerischen Modell auch der untere Vorhafen abgebildet, wobei eine Sohlhöhe von $0,0 \text{ mNHN}$ angesetzt wird.

Das zugrunde liegende numerische Modell ist in Bild 13 dargestellt.

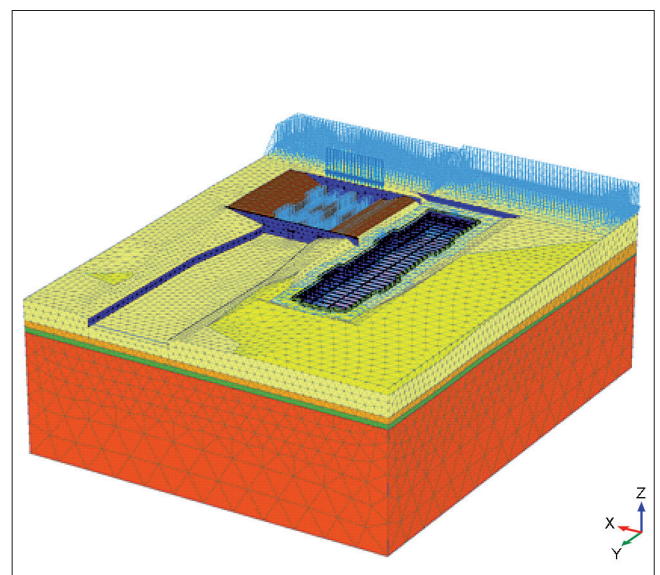


Bild 13: Numerisches Modell mit Baugrube und Schiffshebewerk

Figure 13: Numerical model including excavation pit and ship lift

6.2.5 Schleuse

Lock

Die neu zu errichtende Schleuse wird im Modell mit Hilfe einer Flächenlast von 1000 kN/m^2 idealisiert. Um die Steifigkeit des Schleusenbauwerks in der numerischen Berechnung zu berücksichtigen, wird die Schleuse durch den Einsatz von Volumenelementen idealisiert, um das steife Verformungsverhalten der Schleuse im numerischen Modell zu berücksichtigen. Dieser Volumenkörper wird von der Gründungssohle bis zur Geländeoberkante bei +12 mNHN abgebildet. Eine detaillierte Abbildung der Geometrie der Schleuse erfolgt im numerischen Modell nicht.

6.3 Bauablauf

Construction phases

In der numerischen Berechnung wird zunächst der Bau des Schiffshebwerks sowie des unteren Vorhakens simuliert, damit den Berechnungen zum Bau der Baugrube für die Schleuse Lüneburg ein realistischer Ausgangsspannungszustand zugrunde liegt. Es wird hierbei auch die großflächige Grundwasserabsenkung berücksichtigt, in deren Schutz damals das Schiffshebwerk errichtet wurde.

Nachdem der Ausgangsspannungszustand für den Bau der Baugrube ermittelt wurde, erfolgt die Simulation der Baugrubenherstellung. Hierbei werden die folgenden relevanten Bauphasen berücksichtigt:

- Voraushub bis zum Erreichen der Arbeitsebene von +10 mNHN bzw. +12 mNHN
- Bau der Schlitzwände und Aufbringen einer Verkehrslast aus Baustellenverkehr
- Baugrubenaushub im Trockenen bis +9 mNHN
- Einbau obere Steifenlage bei +9,5 mNHN
- Unterwasseraushub bis Baugrubensohle
- Einbau von Sohlverankerung und Unterwasserbetonsohle
- Stufenweises Absenken des Wassers in der Baugrube und Einbau der jeweils folgenden Ankerlage bis die Baugrube bei -12 mNHN vollständig gelenzt ist
- Aktivierung der Ersatzlast für die Schleuse in zwei Schritten

7 Ergebnisse

Results

Nachfolgend werden als Ergebnis der numerischen Berechnungen die Verformungen des Schiffshebwerks in den maßgebenden Bauphasen (vollständig gelenzte Baugrube = maximale Hebungen des Schiffshebwerks, Auflast aus Schleusenneubau = maximale Setzungen des Schiffshebwerks) dargestellt und mit den vorgegebenen Grenzwerten verglichen.

Weiterhin wird der Erddruckverlauf auf die Schlitzwand direkt neben dem Schiffshebwerk in verschiedenen Bauphasen dargestellt und mit klassischen Erddruckansätzen gemäß EAU (2012) und EAB (2012) verglichen.

7.1 Verformung Schiffshebwerk

Deformation of the ship lift

Das wesentliche Ziel der numerischen Untersuchung ist die Ermittlung der resultierenden Verformung des Schiffshebwerks infolge der benachbarten Baumaßnahme. Hierbei sind sowohl die maximalen Hebungen als auch die maximalen Setzungen des Schiffshebwerks sowie die hieraus resultierenden Schiefstellungen der Türme des Schiffshebwerks infolge der benachbarten Baumaßnahme zu prognostizieren.

Es zeigt sich anhand der numerischen Berechnungen, dass die maximalen Hebungen des Schiffshebwerks nach vollständigem Lenzen der Baugrube eintreten, während die maximalen Setzungen aus dem Bau der neuen Schleuse resultieren.

Die akkumulierten Verformungen der Trogwannen des Schiffshebwerks nach vollständigem Lenzen der Baugrube für die neue Schleuse Lüneburg sind in Bild 14 dargestellt. Es ist hierbei zu erkennen, dass die maximalen Hebungen der Trogwannen im nordwestlichen Bereich in einer Größenordnung von etwa 16 mm liegen. Diese Verformungen treten jedoch nur lokal in der nordwestlichen Ecke, d. h. im Bereich des nördlichen Tors des Schiffshebwerks auf und nehmen in Richtung Süden ab. Im Bereich des Turms betragen die maximalen Hebungen etwa 15 mm.

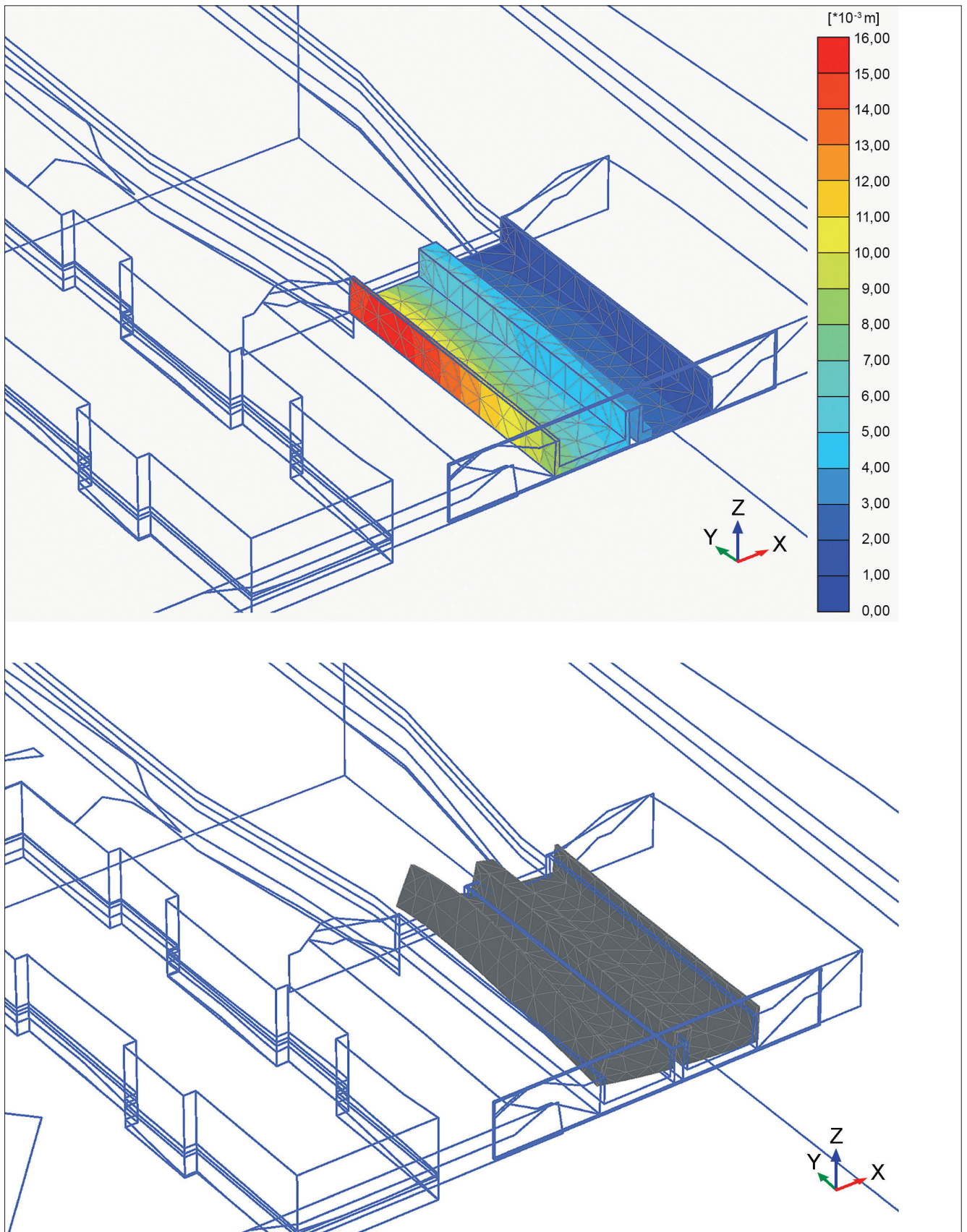


Bild 14: Resultierende Verformungen der Tröge des Schiffshebewerks bei vollständigem Lenzen der Baugrube (oben: Konturplot der resultierenden Verformungen, unten: überhöhte Darstellung der verformten Tröge)

Figure 14: Resulting deformations of the trough tanks of the ship lift in the relevant step after the water was pumped out (top: contour plot of resulting deformations, bottom: deformed trough tanks)

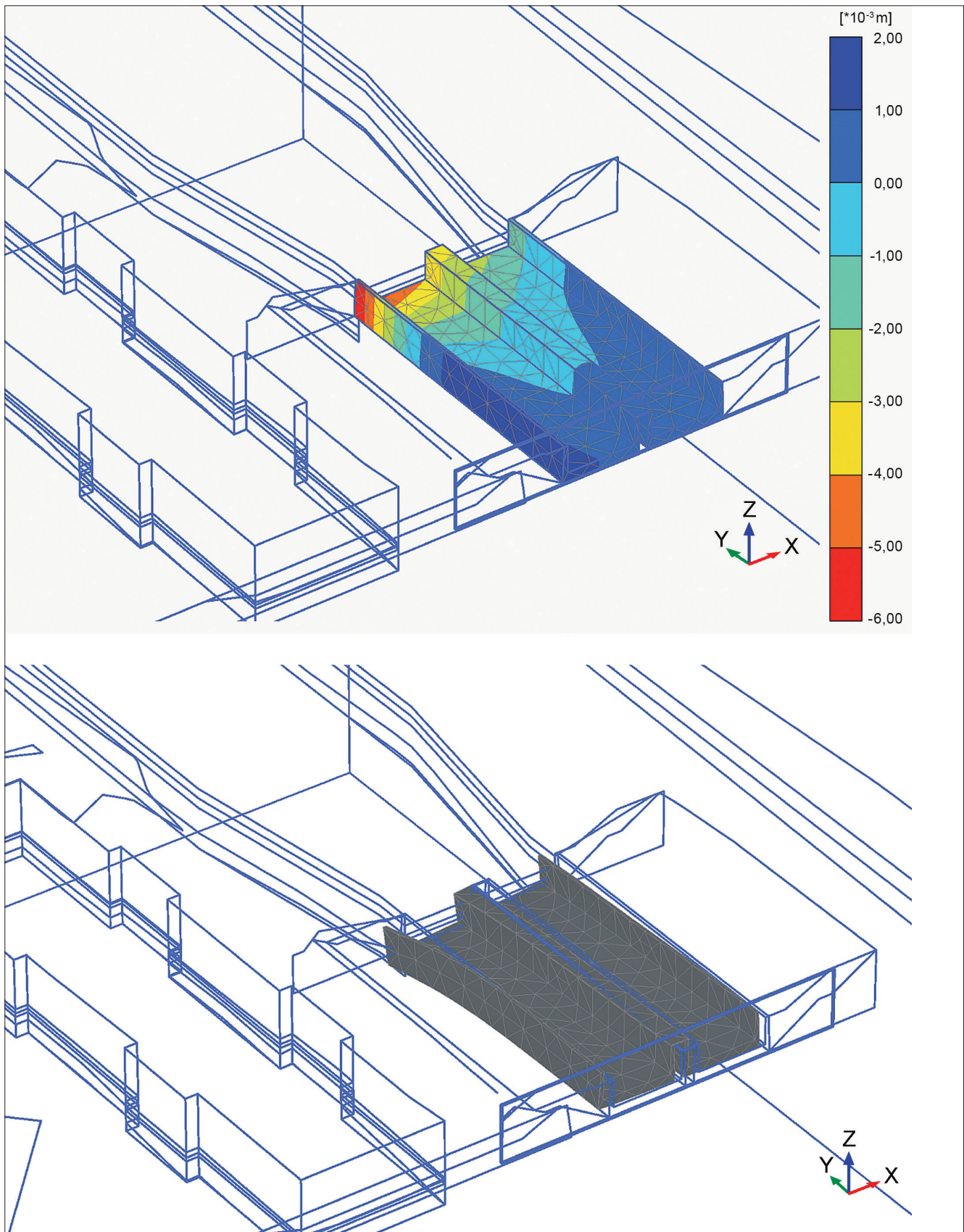


Bild 15: Resultierende Verformungen der Tröge des Schiffshebewerks nach Bau der Schleuse (oben: Konturplot der resultierenden Verformungen, unten: überhöhte Darstellung der verformten Tröge)

Figure 15: Resulting deformations of the trough tanks of the ship lift after construction of the new lock (top: contour plot of resulting deformations, bottom: deformed trough tanks)

Durch die Belastung infolge des Neubaus der Schleuse Lüneburg werden die Hebungen aus dem Baugrubenaushub kompensiert und es resultieren Setzungen des Schiffshebewerks. In Bild 15 werden die Setzungen des Schiffshebewerks im Zustand nach Fertigstellung der Schleuse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass wiederum im nordwestlichen Bereich des Schiffshebewerks die maximalen Verformungen auftreten. Der Maximalwert der resultierenden Setzungen beträgt an dieser Stelle etwa 5 mm. In Richtung Süden nehmen auch hier die Verformungen ab, sodass im Endzustand die maximalen Setzungen am Turm etwa 3 mm betragen.

Interessant zu betrachten ist auch die Entwicklung der Verformungen an verschiedenen maßgebenden Punkten über die Bauphasen, sodass hieraus die relevanten Verformungen sowohl am Turm als auch im Bereich des Nordtores des Schiffshebewerks abgelesen werden können, siehe Bild 16.

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit fortschreitendem Aushub die Hebungen am Schiffshebewerk ebenfalls ansteigen. Erst mit dem Bau der Schleuse werden Setzungen am Schiffshebewerk festgestellt. Somit zeigt sich anhand dieser Untersuchung, dass die Steifigkeit des Baugrubenverbaus im Verhältnis zu den vertikalen Lastschwankungen infolge Aushub und Schleusenbau von untergeordneter Bedeutung für die Verformungen des Schiffshebewerks ist.

Von besonderem Interesse sind jedoch nicht die Verformungen der Trogwannen, sondern die hieraus resultierenden Auslenkungen der Turmköpfe. Für die Kopfauslenkung der Türme wurde eine maximal zulässige Auslenkung von 20 mm als Grenzwert vorgegeben. Die resultierende maximale Auslenkung der Turmköpfe wird konservativ aus den maximalen Hebungen bzw. Setzungen der Trogwanne unter Berücksichtigung des Höhe/Breite-Verhältnisses des westlichen Turmes von etwa 58 m/31,4 m berechnet.

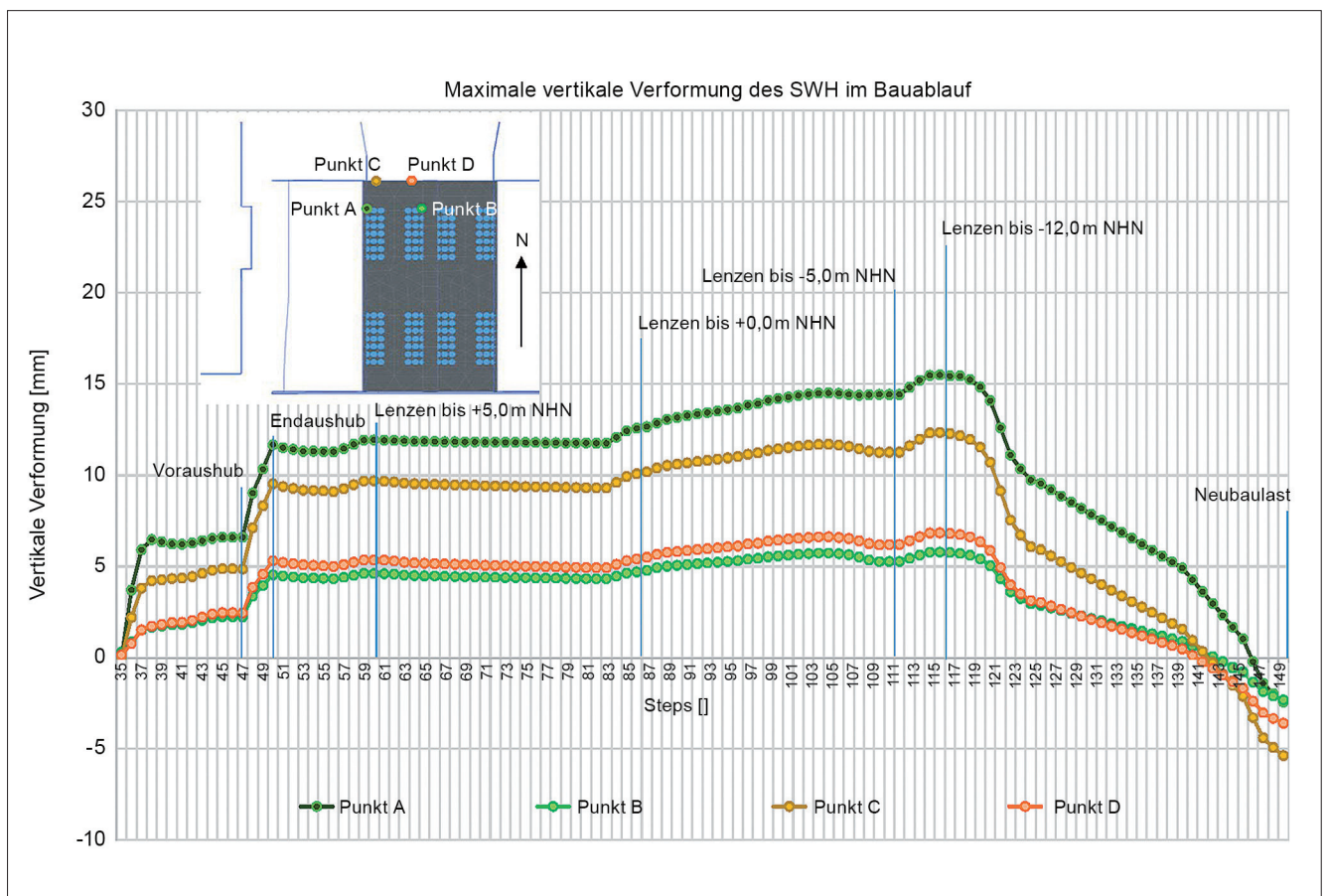


Bild 16: Entwicklung der vertikalen Verformungen an vier maßgebenden Punkten der Trogwanne des Schiffshebewerks
 Figure 16: Development of vertical deformations at four significant positions on the trough tanks of the ship lift

	Horizontale Auslenkung an OK SHW [mm]
Lenzen bis -12 mNHN	18
Belastung	-2*

*Negativ ist in Richtung Schleuse

Tabelle 2: Resultierende horizontale Auslenkung am Kopf des westlichen Turms des Schiffshebewerks

Table 2: Horizontal deformation at the head of the western tower of the ship lift

Es ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten maximalen Auslenkungen am westlichen Turmkopf. Die anderen Türme erfahren deutlich geringere Verformungen.

Es ist zu beachten, dass die Auslenkung des westlichen Turms konservativ unter Berücksichtigung der jeweils maximalen Setzungen im westlichen und östlichen Turmbereich ermittelt wurde, obwohl diese nur lokal auftreten und im Mittel geringer sind.

Es kann anhand der numerischen Berechnungen gezeigt werden, dass die vorgegebene maximal zulässige Auslenkung der Türme des Schiffshebewerks rechnerisch in keiner Bauphase überschritten wird, sodass mit keiner negativen Beeinträchtigung für das Schiffshebewerk infolge der benachbarten Bautätigkeiten gerechnet wird. Somit bestätigt die numerische Untersuchung, dass der Abstand zwischen Schiffshebewerk und Schleuse mit 60 m ausreichend groß gewählt wurde.

7.2 Erddruck auf Schlitzwand

Earth pressure distribution on diaphragm wall

Neben der Prognose von Verformungen ist es mit Hilfe der numerischen Simulation möglich, Aussagen hinsichtlich der Erddruckverteilung auf die Schlitzwand zu treffen.

Nachfolgend wird für drei relevante Bauphasen aus dem numerischen Modell die Erddruckverteilung auf die dem Schiffshebewerk direkt gegenüberliegende Schlitzwand ermittelt. Die numerisch ermittelten Erddruckverteilungen werden mit Erddruckfiguren aus der EAB (2012) bzw. der EAU (2012) verglichen.

Es handelt sich bei den Bauphasen um die drei nachfolgend benannten Phasen:

- BZ-1: Aushub innerhalb der Baugrube auf -13,50 mNHN (Endaushub), wobei das Grundwasser in der Baugrube noch bei +9,00 mNHN steht
- BZ-2: Lenzen in der Baugrube auf +0,00 mNHN vor Einbau der zweiten Ankerlage
- BZ-3: Vollständig gelenzte Baugrube mit allen Ankerlagen

7.2.1 Erddruckansatz nach EAB (2012)

Earth pressure computations according to EAB (2012)

Gemäß EAB (2012) können je nach Lage und Anzahl der Stützungen verschiedene Lastfiguren für einfach und mehrfach gestützte Ortbetonwände angesetzt werden, siehe Bild 17.

Im vorliegenden Fall der Baugrube für die Schleuse Lüneburg sind die Fälle

- Bild EB 70-1a für den einfach gestützten Fall (BZ-1)
- Bild EB 70-2a für den Fall der zweifachen Stützung (BZ-2)
- Bild EB 70-3b für den Endzustand mit vier Ankerlagen (BZ-3)

die relevanten Erddruckfiguren.

Die Ansätze nach EAB gelten jedoch ausschließlich für eine begrenzte Aushubtiefe vor dem Einbau der nächsten Steifen- oder Ankerlage. Es wird vorausgesetzt, dass vor dem Einbau der jeweils nächsten Steifen- oder Ankerlage nicht tiefer als 1/3 der gesamten Aushubtiefe ausgehoben wird, siehe EAB (2012), EB 70-1. Beim vorliegenden Vorhaben wird jedoch bereits vor dem Einbau der zweiten Ankerlage die gesamte Aushubtiefe erreicht. Somit stimmt die Voraussetzung gemäß EAB (2012) nicht mit dem Bauablauf in diesem Projekt überein. Der Einfluss dieser Abweichung von den Voraussetzungen der EAB (2012) auf die Erddruckfiguren wird nachfolgend in Abschnitt 6.2.3 durch einen Vergleich mit den numerischen Ergebnissen untersucht.

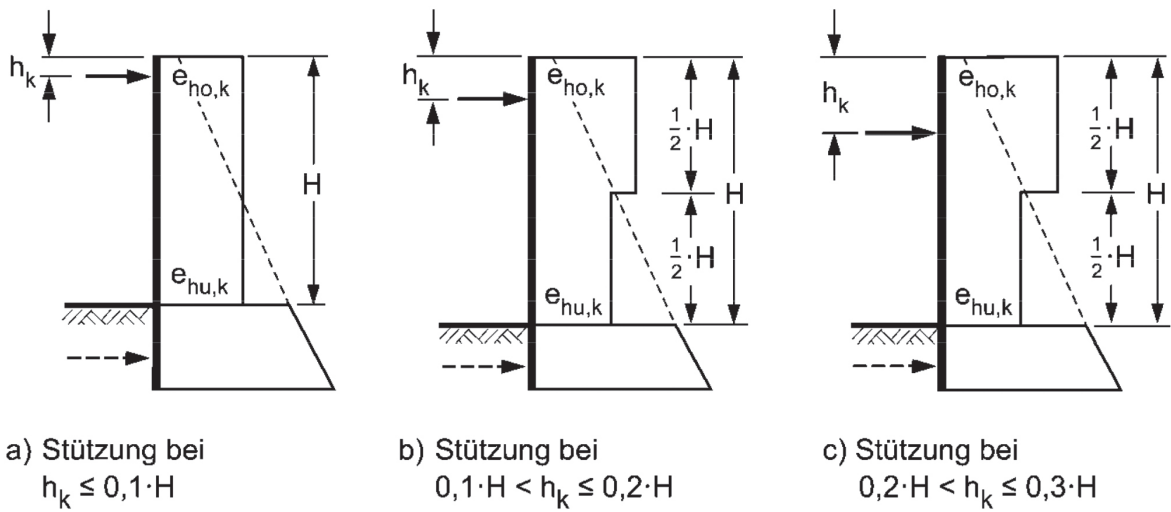


Bild EB 70-1. Lastfiguren für einmal gestützte Spundwände und Ortbetonwände

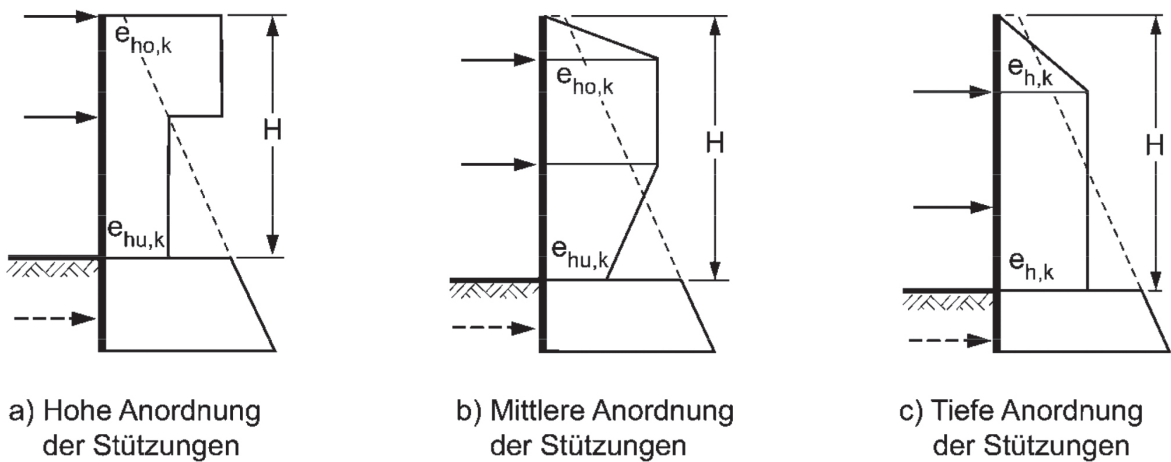


Bild EB 70-2. Lastfiguren für zweimal gestützte Spundwände und Ortbetonwände

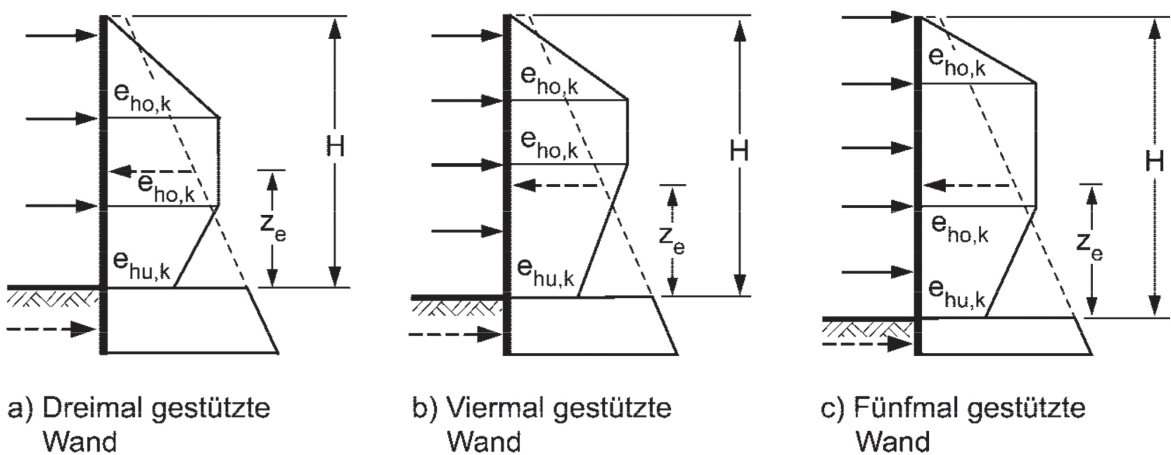


Bild EB 70-3. Lastfiguren für dreimal oder öfter gestützte Spundwände und Ortbetonwände

Bild 17: Erddruckfiguren nach EAB (2012)

Figure 17: Earth pressure distribution according to EAB (2012)

7.2.2 Erddruckansatz nach EAU (2012)
Earth pressure computations according to EAU (2012)

Kapitel 8.2.3.2 der EAU (2012) empfiehlt Umlagerungsfiguren für einfach bzw. doppelt verankerte Wände. Im Gegensatz zur EAB liegen bei den Empfehlungen der EAU keine Begrenzungen der Aushubtiefe vor dem Einbau der nächsten Steifen- oder Ankerlagen vor. Damit entspricht dieser Ansatz eher dem Bauablauf für die Baugrube der Schleuse Lüneburg.

Für einfach verankerte Wände gelten die in E 77, Abschnitt 8.2.3 der EAU angegebenen Lastfiguren, siehe Bild 18.

Diese Erddruckfiguren gelten ebenso für die Ermittlung der Schnittgrößen, der Auflagerkräfte und der Einbindelänge einer zweifach verankerten Wand. Die zur Festlegung der Lastfigur benötigte Höhe der Ankerkopflage liegt in diesem Fall bei der mittleren Kote zwischen den beiden Ankerlagen.

Für mehr als zweifach verankerte Wände existiert in den EAU (2012) keine Empfehlung hinsichtlich einer

Umlagerungsfigur. Der Einfluss des Einbaus der weiteren beiden Aussteifungslagen im vorliegenden Fall der Baugrube der neuen Schleuse Lüneburg wird nachfolgend im Rahmen des Vergleichs mit den Ergebnissen der Finite-Elemente-Berechnung untersucht.

7.2.3 Vergleich des numerisch ermittelten Erddruckverlaufs mit den Ansätzen nach EAB (2012) und EAU (2012)
Comparison of the numerically determined earth pressure distributions and the computations according to EAB (2012) and EAU (2012)

Die numerisch ermittelten Erddruckverteilungen werden den Erddruckansätzen mit einem erhöhten aktiven Erddruck mit 90%-Anteil des Erdruhedruckes mit Umlagerungsfiguren nach EAB und EAU gegenübergestellt, siehe Bild 19. Hier wird nur die Erddruckverteilung für die in der Nähe des Schiffshebewerks befindliche östliche Schlitzwand dargestellt.

Beim Vergleich ist zu erkennen, dass für den Bauzustand BZ-1 beide Umlagerungsfiguren nach EAB und

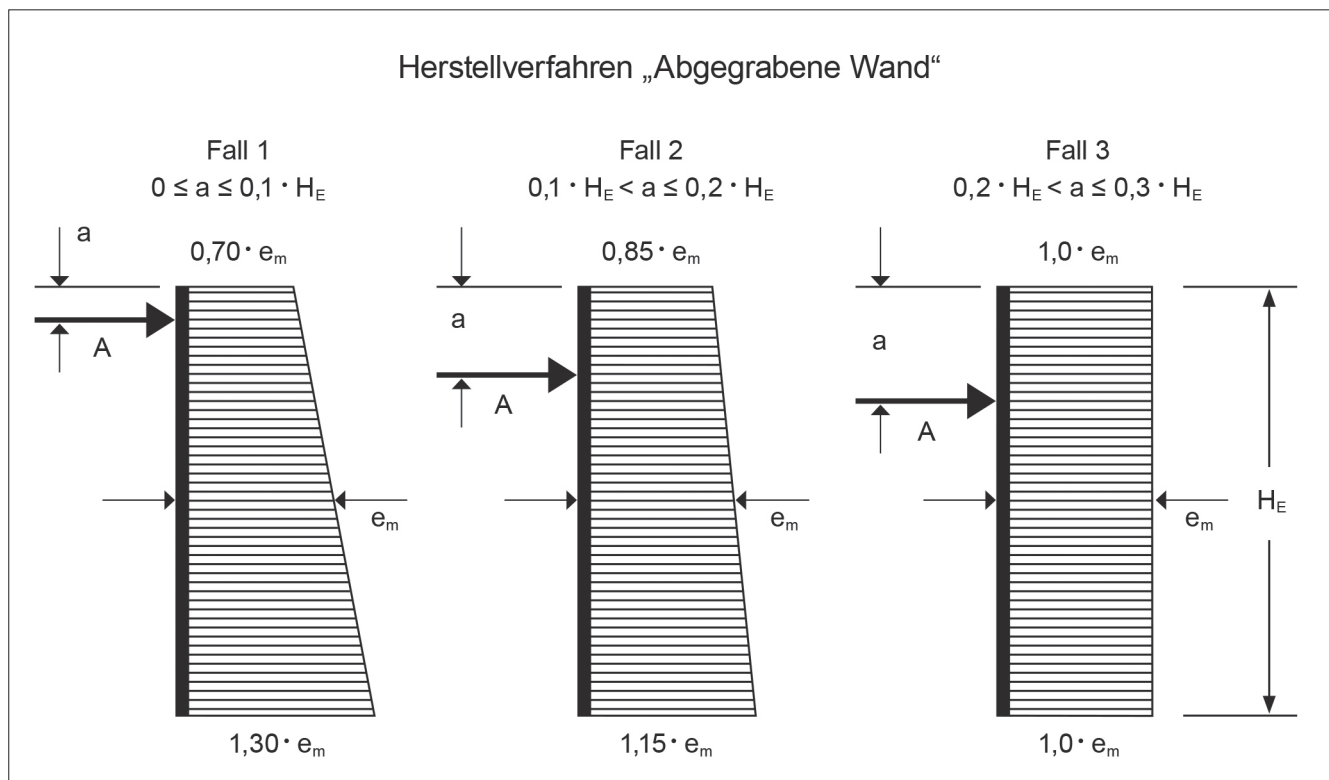


Bild 18: Erddruckfiguren nach EAU (2012)
 Figure 18: Earth pressure distribution according to EAU (2012)

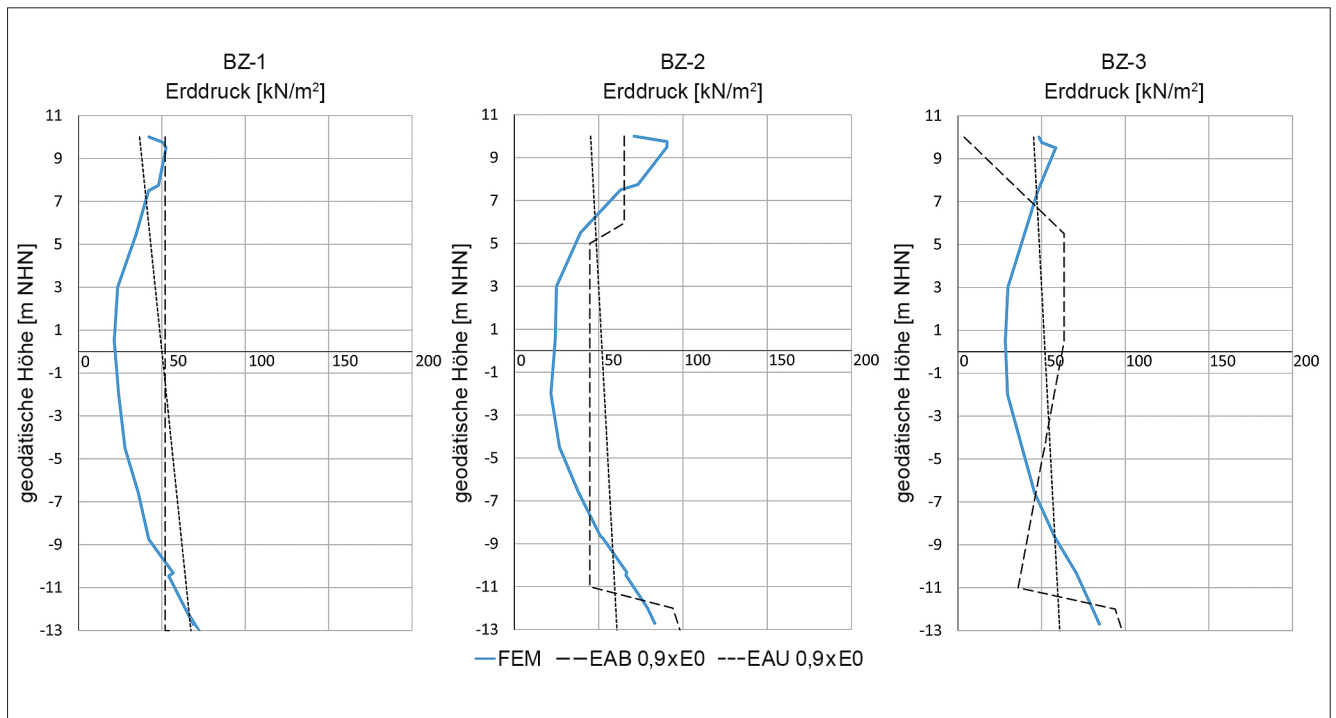


Bild 19: Erddruckvergleich zwischen numerischer Berechnung, EAB (2012) und EAU (2012)
 Figure 19: Earth pressure comparison between numerical calculation, EAB (2012) and EAU (2012)

EAU den Erddruck im Feldbereich überschätzen. Für den Bauzustand BZ-2 stellt die Umlagerung nach EAB den Erddruck im Bereich der oberen Steife etwas besser dar. Beim Bauzustand BZ-3 ist im Vergleich zwischen numerisch ermitteltem Erddruckverlauf und Erddruckfigur nach EAB aufgrund der gegenüber den Randbedingungen hinsichtlich der Gültigkeit der Erddruckfiguren nach EAB eine signifikante Abweichung der Erddruckfiguren erkennbar. Die Umlagerung nach EAU bildet die numerischen Ergebnisse im BZ-3 hingegen deutlich besser ab.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Conclusion and outlook

In diesem Beitrag wurden verschiedene numerische Untersuchungen zum Verformungsverhalten des bestehenden Schiffshebewerks in Lüneburg infolge des geplanten Neubaus einer Schleuse in unmittelbarer Nachbarschaft des Schiffshebewerks vorgestellt. Da das Schiffshebewerk während der gesamten Bauzeit und darüber hinaus weiterhin in Betrieb bleiben soll, gelten besondere Anforderungen an die maximal zulässigen Verformungen des Schiffshebewerks infolge der benachbarten Bautätigkeiten.

Aus diesem Grund wurden zunächst durch die BAW, Dienststelle Hamburg, numerische Voruntersuchungen zum Verformungsverhalten des Schiffshebewerks infolge von Baugruben mit unterschiedlichen Abständen zum Schiffshebewerk am ebenen FE-Modell durchgeführt.

Basierend auf den Ergebnissen der Vorstudie wurden durch die Ingenieurgesellschaft „Baugrube Schleuse Lüneburg“ unter Berücksichtigung genauerer Kenntnisse des Baugrundes vertiefende numerische Untersuchungen mit ebenen und räumlichen Berechnungen durchgeführt.

In diesem Beitrag wird ein räumliches Finite-Elemente-Modell der Baugrube für die neue Schleuse Lüneburg vorgestellt. Dieses numerische Modell beinhaltet auch das direkt neben der Baugrube befindliche Schiffshebewerk in Scharnebeck, sodass der Einfluss des Baus der Baugrube für die Schleuse Lüneburg sowie des Baus der Schleuse auf das benachbarte Schiffshebewerk untersucht werden kann.

Das räumliche FE-Modell hat aufgrund einer sehr hohen Anzahl an Anker- und Aussteifungselementen sowie aufgrund der großen Dimensionen der geplanten Bau-

grube eine derart hohe Komplexität, dass hiermit nah an den Grenzen der Möglichkeiten der numerischen Modellierung gearbeitet werden muss. Durch geschickte Vereinfachungen und Idealisierungen im numerischen Modell war es jedoch möglich, ein lauffähiges und validiertes numerisches Modell zu erstellen.

Mit diesem numerischen Modell wurden die zu erwartenden Verformungen am Schiffshebewerk infolge der benachbarten Herstellung der Baugrube für die Schleuse Lüneburg prognostiziert und es konnte gezeigt werden, dass die vorgegebenen Grenzwerte hinsichtlich der zulässigen Verformungen des Schiffshebewerk in allen Bauphasen eingehalten werden konnten.

Weiterhin ist es mit Hilfe der numerischen Simulationsergebnisse möglich, eine detaillierte Untersuchung hinsichtlich der anzusetzenden Erddruckumlagerungsfiguren für die Schlitzwände durchzuführen. Es konnte gezeigt werden, dass im vorliegenden Fall ein Bauablauf vorliegt, der so stark von den Voraussetzungen für die Gültigkeit der Erddruckumlagerungsfiguren gemäß EAB (2012) abweicht, dass die Erddruckumlagerungsfiguren nach EAB im vorliegenden Fall nicht anwendbar sind. Die Erddruckumlagerungsfiguren nach EAU (2012) repräsentieren den im vorliegenden Fall vorliegenden Bauablauf besser, sodass eine bessere Übereinstimmung zwischen numerischen Ergebnissen und Erddruckansatz gemäß EAU (2012) erzielt wird.

9 Literatur *References*

Benz, T. (2007): Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, Mitteilung Nr. 55.

EAB (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT).

EAU (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT).

Plaxis (2012): Material Models Manual.

Schanz, T. (1998): Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien. Mitteilung 45 des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart.

Schanz, T., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G. (1999): Beyond 2000 in Computational Geotechnics, chapter formulation and verification of the Hardening-Soil Model, pages 281-290. Balkema, Rotterdam.