

FE-Modellierung der Pfeilerverlängerung mit Fangedämmen am Wehr Geesthacht

Dr.-Ing. Jörg Meier, Gruner AG
Dipl.-Ing. Konrad Westermann, Gruner AG
Dipl.-Ing. Laurent Pitteloud, Gruner AG

Einleitung

Für die Prognose der Verformungen bei der Grundinstandsetzung samt Erweiterung des Wehrr Geesthacht wurde eine aufwändige 3D-FE-Simulation erstellt, in der neben den Bauzuständen auch die zugehörige Grundwasserströmung berücksichtigt worden ist. Dieser praxisnahe Beitrag beleuchtet ausgewählte Aspekte der Erstellung dieser FE-Modelle.

Motivation

Für die Planung der Grundinstandsetzung der ca. 60 Jahre alten Wehranlage Geesthacht (Abbildung 1) berät die BAW die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) in verkehrswasserbaulichen Fragen. Die eigentlichen Planungsleistungen werden im Auftrag der WSV durch Drittbüros erbracht. Es ist geplant, die Wehrfelder und jeweils die Hälfte der angrenzenden Wehrpfeiler im Schutze von trockenen Baugruben zu sanieren bzw. zu verlängern (Massivbauinstandsetzungen, Erneuerung der Wehrverschlüsse etc.) sowie auch die Tosbecken zu verlängern und zu verstärken. Die Baugrubensicherung erfolgt mittels ausgesteifter Spundwände, welche im Ober- und Unterwasser durch Fangedämme ergänzt werden. Als Auftriebssicherung dient eine rückverankerte Unterwasserbetonsohle.

Auf den bestehenden Pfeilern liegt die Brücke der Bundesstraße 404. Im Rahmen der Beratungsleistungen der BAW sollte untersucht werden, welche Deformationen für die Wehrpfeiler infolge der asymmetrischen Belastung in den einzelnen Bauzuständen zu erwarten sind und welche Auswirkungen dies auf die Straßenbrücke hat. Hierzu sollte für den Bereich des Wehrfelds 3 eine 3D-FE-Simulation mit Plaxis 3D erstellt werden, welche auch die Grundwasserströmung berücksichtigt. Dieses Modell sollte darauf aufbauend um das Wehrfeld 4 erweitert werden (Abbildung 2).

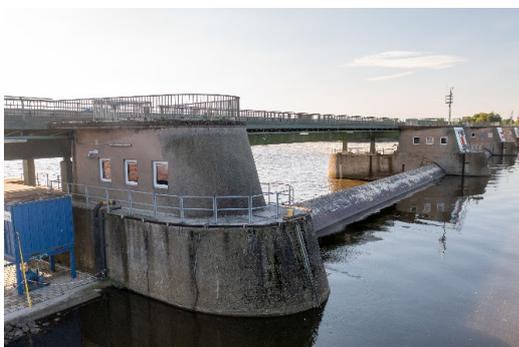


Abbildung 1: Wehrfeld der Wehranlage Geesthacht (Quelle: Pressefoto BAW)

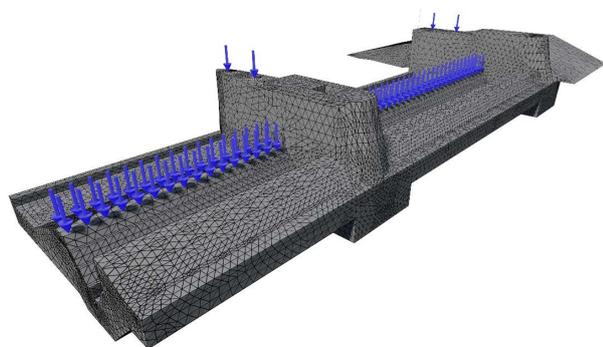


Abbildung 2: Modell der bestehenden Betonstrukturen (Wehrfelder 3 + 4, Pfeiler 4 + 5, Baugrund ausgeblendet)

Modellwahl

Abbildung 3 zeigt die Lage des zu untersuchenden Wehrfelds 3 zwischen den Pfeilern 3 und 4. Aufgrund seiner Lage zwischen den beiden geometrisch gleichen Wehrfeldern 2 und 4 - d. h. da die Baugrubensicherung das gesamte Wehrfeld überspannt und in den Achsen der benachbarten Pfeiler anschließt - eignet sich das Wehrfeld 3 gut, um ein sich räumlich wiederholendes Verhalten zu untersuchen (annähernd symmetrische Verhältnisse, "Scheibenmodell"). Im Zusammenspiel mit der vorliegenden, überwiegend horizontalen Schichtung des Baugrundes bietet sich hier die Nutzung von Symmetrieebenen an (Abbildung 3, rote Box). Die Anordnung der Symmetrieebene erfolgt in den Wehrfeldmitten und explizit nicht in den Pfeilerachsen, da die Pfeiler im Zuge der Bauzustände eine einseitige Belastung erfahren. Die Nutzung von Symmetrieebenen erlaubt eine erhebliche Verringerung der Elementanzahl und somit auch eine Reduktion der Rechenzeit, mit minimalen Einschränkungen bei der Genauigkeit der Ergebnisse.

Mit der Erweiterung auf das Wehrfeld 4 und damit den Pfeiler 5 sind deren Randlage und damit Asymmetrie zu berücksichtigen. Ebenso kann die vorgängige Erstellung der Baugrube und Sanierung im Feld 3 eine Auswirkung auf die Ergebnisse im Feld 4 haben. Die in Abbildung 3 grün markierte Ausdehnung der roten Box wird daher als notwendige Erweiterung des Modellausschnitts angesehen, um die genannten Einflüsse abbilden zu können (finale FE-Modell Abbildung 4 und 5).

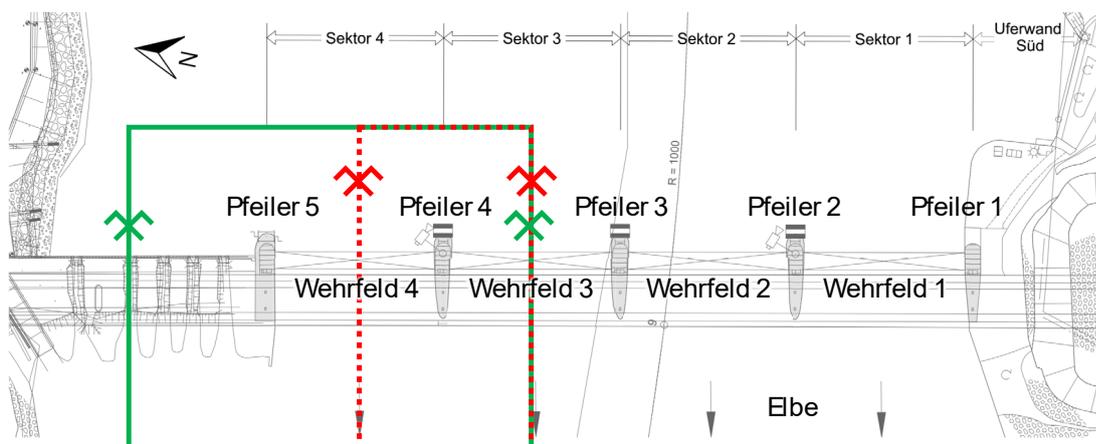


Abbildung 3: Modellgrenzen (rot: Baugrube Wehrfeld 3; grün: Erweiterung auf Wehrfeld 4)

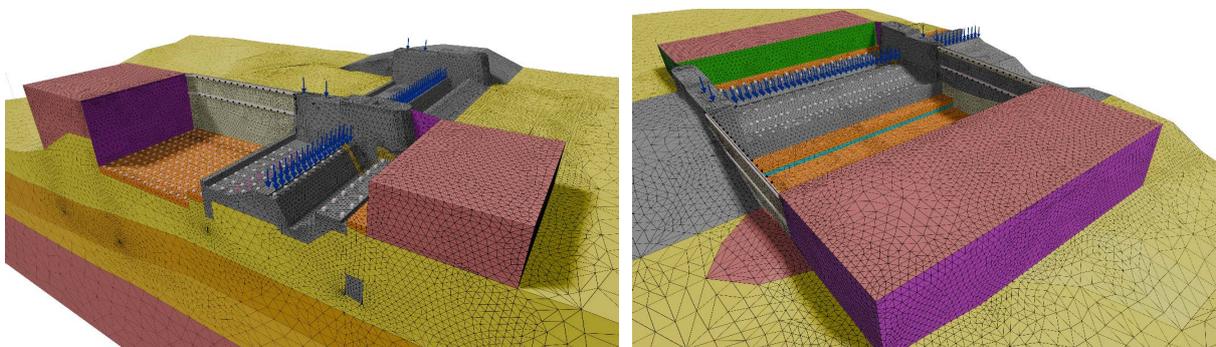


Abbildung 4: Ansicht auf das Modell Wehrfeld 3 (mit Baugrube Wehrfeld 3) Abbildung 5: Ansicht auf das um Wehrfeld 4 erweiterte Modell (mit Baugrube)

Erstellung der Modellgeometrie, Diskretisierung

Bei der Modellierung des Wehrs wurde beschlossen keine starke Abstrahierung vorzunehmen, um unter anderem bei den Strömungsanalysen Ungenauigkeiten infolge zu starker Vereinfachungen zu vermeiden. Beim bestehenden Wehr (Wildner 1959) und der geplanten Erweiterung (Lühr & von Thaden 2018, Jäppelt et al. 2022) wurde daher eine realitätsnahe Modellierung der Geometrie gewählt. Einige dieser Objekte weisen triviale Formen auf (z. B. rechteckige Fläche für ein Spundwandsegment), andere sind nicht-trivial krummflächig begrenzt (z. B. die oberirdische Betonstruktur der Pfeiler). All diese Objekte müssen jeweils zueinander passend (ohne Lücken oder Überlappungen) geformt sein und in ihrer Gesamtheit das FE-Modell ergeben. Das vorliegende Modell der Baugrube Wehrfeld 3 besteht aus 1064 Objekten, das Modell mit Erweiterung auf Wehrfeld 4 aus 1565 Objekten.

Bei dieser Geometrisierung sind weitere Vorgaben zu beachten: So sollten möglichst wenige "ungünstig geformte" (z. B. zu spitzwinklige) FE-Elemente resultieren, um numerische Instabilitäten bzw. zu kleine Lastinkremente zu vermeiden. Ein häufiger Grund für spitzwinklige Elemente und große Elementzahlen sind knapp nebeneinander liegende Eck- bzw. Endpunkte und ungünstige Verschneidungen der Objekte. Zu den Vorgaben bei der Geometrisierung zählt weiterhin, dass die Anzahl der FE-Elemente in einem Umfang bleiben sollte, der erträgliche Rechenzeiten ermöglicht. Mit Blick auf die notwendige Geometrisierung und die Vorgabe, Plaxis 3D in der Version 2018 zu verwenden, wurden die folgenden Überlegungen angestellt:

- *modifizierbare Modelle:* Gemäß dem Auftrag der BAW waren die Plaxis-Modelle so zu erstellen, dass diese der BAW übergeben und durch die BAW für weitere Untersuchungen modifiziert bzw. ergänzt werden können.
- *Plaxis Input:* Der Plaxis 3D Input ist für geometrisch einfache Modelle ausreichend, bietet aber für die hier benötigte Geometrie zu wenig Möglichkeiten bei Eingabe, 3D-Navigation, Bearbeitung und auch Fehlersuche.
- *möglichst weitgehender Verzicht auf automatische Verschneidung im Plaxis:* Plaxis verschneidet die vom Nutzer eingegebene "Quellgeometrie" und bestimmt so die für die Diskretisierung zu verwendenden geometrischen Körper. Bei ungünstiger Quellgeometrie (knapp nebeneinander liegende Eckpunkte, geringfügig überlappende Volumina etc.) erzeugt diese Verschneidung zwangsweise ungünstig geformte FE-Elemente. Bei der Erstellung der Modelle für das Wehr Geestacht sollten daher bereits in der Quellgeometrie möglichst Objekte verwendet werden, die keine weitere Verschneidung benötigen.
- *Python-Scripting:* Plaxis bietet die Möglichkeit, Modellgeometrie auch über Python-Skripte zu erstellen. Dies ist insbesondere interessant für repetitive Geometrien (z. B. Serie von Abschlügen im Tunnelbau). Abgesehen von einigen Ausnahmen ist die Definition von geometrisch komplexen Objekten rein über Python allerdings wenig intuitiv, bedingt Wissen im Bereich der Programmierung und benötigt die Bereitschaft, mit "Python" zu arbeiten. Für die Geometrie dieser Modelle wurde daher auch diese Option verworfen.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde entschieden, die Quellgeometrie außerhalb des Plaxis in der Software "Blender" (OpenSource, blender.org) zu erstellen und nachfolgend über die Plaxis-Funktion "Run Commands..." ins Plaxis zu übertragen. Mit den umfangreichen Möglichkeiten zur

Geometrierstellung und -modifikation sowie Funktionen zur Prüfung hat sich diese Option aus Sicht der Autoren sehr bewährt. Eine nachträgliche Anpassung der Modellgeometrie ist so auch mit Plaxis-Bordmitteln ohne vertiefte Programmierkenntnisse möglich.

Modellphasen

Im Gegensatz zur Geometriedefinition, bei der die visuelle Arbeitsweise mit Blender sehr vorteilhaft ist, wurde die Definition der Modellphasen ausschließlich Skript-basiert realisiert. Hauptgründe für diese Entscheidung waren die folgenden – stark ineinander greifenden - Punkte:

- *Verhalten des Plaxis-Inputs:* Die Definition der Modellphasen erfolgt im Plaxis-Input primär grafisch, wobei insbesondere bei nachträglichen Änderungen in der Modellgeometrie nicht immer direkt ersichtlich ist, welche Optionen von der Vorphase kopiert (und nicht vererbt) werden. Eine Übersicht über alle effektiven Änderungen in einer Modellphase ist nicht auf einen Blick verfügbar und daher schwer nachvollziehbar.
- *Prüfbarkeit:* Insbesondere bei aufwändigen Modellen kommt der Qualitätskontrolle der Definition der Modellphasen eine besondere Bedeutung zu. Diese Prüfbarkeit gewinnt nochmals an Bedeutung, wenn - wie hier – die Grundwasserströmung mit simuliert wird und die Kompatibilität der Simulationsrandbedingungen zu gewährleisten ist.
- *Begrenzte Anzahl von Anpassungen pro Modellphase:* Aus der Erfahrung der Autoren hat es sich bewährt, pro Modellphase jeweils gut voneinander abgegrenzte Vorgänge bzw. Arbeitsschritte zu modellieren. In der entsprechend resultierenden Anzahl von Modellphasen finden somit jeweils nur wenige Anpassungen im Modell statt, was auch die Prüfung und Nachvollziehbarkeit begünstigt.

Diesen Überlegungen folgend wurden für die Modelle des Wehrs Geesthacht die Modellphasen über eine externe Programmiersprache definiert und ebenfalls mit der Plaxis-Funktion "Run Commands..." übertragen. Eine nachträgliche Anpassung der Modellphasen ist so auch mit Plaxis-Bordmitteln ohne vertiefte Programmierkenntnisse möglich.

Die modellierten Modellphasen lassen sich grob in 3 Gruppen einteilen: Zum Ersten die Erzeugung des Zustands vor Baubeginn, bestehend aus 13 Phasen (inkl. Bau des ursprünglichen Wehrs, Bau der Brücke, Erosion der Elbsohle etc.; Abbildung 6). Zum Zweiten die Erstellung der Baugrube und die Sanierungsmaßnahmen im Wehrfeld 3 (Abbildung 4 und 7). Und zum Dritten die Instandsetzungsmaßnahmen im Wehrfeld 4 (Abbildung 5 und 8) bis hin zum Endzustand (Abbildung 9).

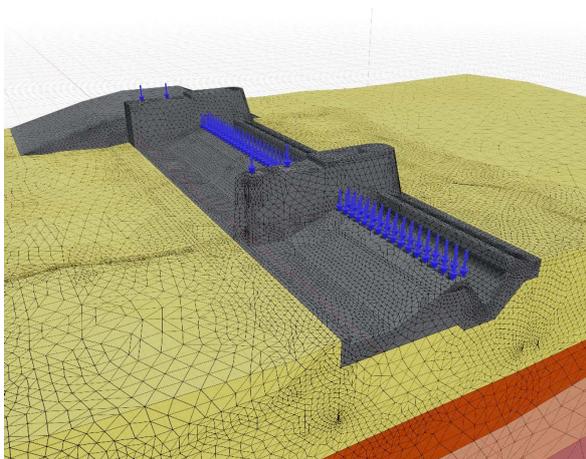


Abbildung 6: Modellphase "Zustand heute"

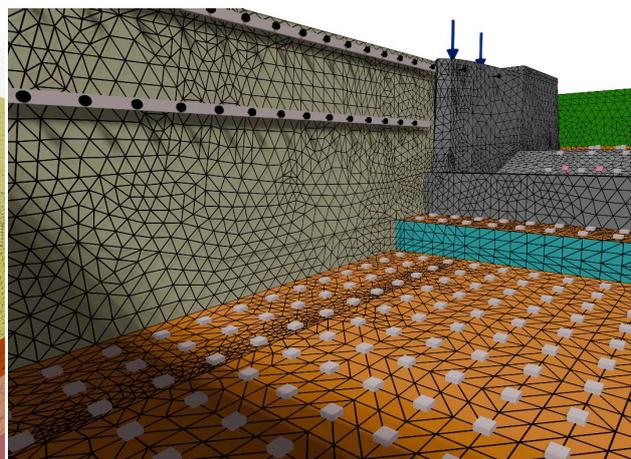


Abbildung 7: Blick aus Baugrube "Wehrfeld 3"

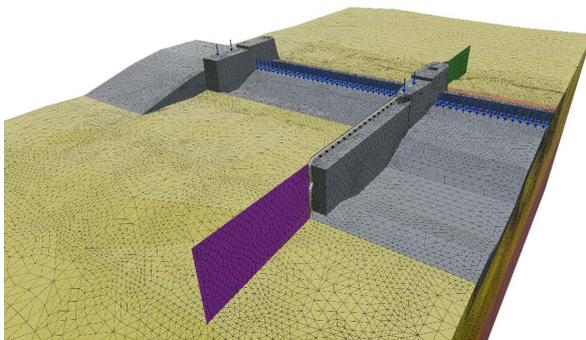


Abbildung 8: Wehrfeld 3 abgeschlossen

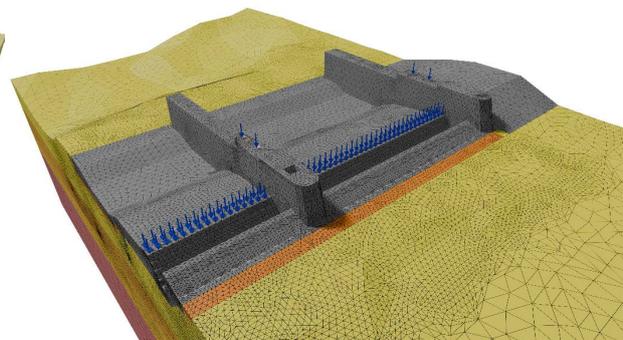


Abbildung 9: Modellphase "Endzustand"

Modellierung der Grundwasserströmung

Naturgemäss befindet sich der Grossteil der Modelle unter dem Wasserspiegel der Elbe bzw. im Bereich der zeitweise gelenzten Baugrube. Um eine aussagekräftige Deformationsprognose zu erreichen, ist die Verteilung der Wasserdrücke im Modell erforderlich. Mit der Option "Steady state groundwater flow" bietet Plaxis die Option, in den jeweiligen Modellphasen eine Grundwasserströmungsberechnung der mechanischen Berechnung voranzustellen und so ein realistisches Abbild der Grundwasserströmung inkl. der Wasserdrücke zu ermitteln. Gemäss Vorgabe der BAW war diese Option in beiden Modellen zu verwenden.

Zumindest in der zu verwendenden Plaxis-Version 2018 konvergierten jedoch die Strömungsanalysen in einzelnen Berechnungsphasen nicht (Abbruch der Strömungsberechnung mit wenig aussagekräftiger Fehlermeldung). Teilweise wurden auch extreme Strömungskräfte in einzelnen Bereichen im Modell ermittelt, welche wiederum bei der nachfolgenden Spannungs-Verformungsanalyse für Instabilitäten sorgten. Das in diesen Modellen aufgetretene Konvergenzproblem kann wie folgt beschrieben werden:

Entsprechend dem regulären Vorgehen für Plaxis wird das Luftvolumen über und neben Wehr und Pfeilern durch mehrere Plaxis-Volumina ("Cluster") repräsentiert, deren Volumenelemente (mechanisch) deaktiviert sind und in denen nur der Wasserdruck wirkt. Im Zuge einer "Steady

state groundwater flow"-Berechnung muss Plaxis die Wasserdrücke für die Randflächen dieser (deaktivierten) Volumina bestimmen. Diese Wasserdrücke werden zusammen mit den explizit eingegebenen Wasserdruck-Randbedingungen für die Flow-Berechnung verwendet. Für einfache Geometrien (Schuhkarton) funktioniert dies gemäss den Erfahrungen der Autoren im Plaxis gut. Nun scheint bei komplexeren Geometrien diese automatische Bestimmung der Wasserdrücke auf den Randflächen nicht in allen Fällen sinnvolle Ergebnisse zu bringen. Entsprechend sind die durch Plaxis verwendeten Wasserdrücke auf den Randflächen der deaktivierten Elemente unrealistisch und auch die Resultate der Flow-Berechnung scheinbar nicht plausibel bzw. die Flow-Berechnung konvergiert nicht. Die finale Ursache für die Konvergenzprobleme konnte zwar auch mit der Hilfe des Herstellersupports nicht geklärt werden, es wurden aber zwei Lösungsansätze untersucht, die nachfolgend zusammengefasst werden sollen:

Lösungsansatz "Luftmaterial": Um die automatische Bestimmung der Wasserdrücke auf den Randflächen zu umgehen, müssen im Modell alle (!) Volumina inkl. der Luftvolumina mechanisch aktiviert werden. Die Strömungsberechnung findet dann entsprechend in allen Volumina statt. Den Luftvolumina muss dann ein Material mit sehr hoher Durchlässigkeit und extrem geringer Steifigkeit zugewiesen werden (z. B. ein rein linear-elastisches Material). Ein solches linear-elastisches Material ($E = 5 \text{ kN/m}^2$, $\nu_u = 0$, Trockenwichte=0.1, Nasswichte=10.1; $k = 1 \text{ km/d}$) bringt jedoch in der mechanischen Berechnung Probleme. Es resultieren infolge der geringen Steifigkeit und der Wirkung der Strömung extreme Deformationen (10 m und mehr). Trotz der geringen Steifigkeit, aber aufgrund der grossen Deformationen, werden durch die Luftvolumen signifikante Kräfte auf die "regulären" Materialvolumen aufgebracht. Entsprechend "zieht" die Luft am Boden an der Geländeoberkante und es bilden sich eine Vielzahl plastischer Punkte in dem dort anstehenden Lockergestein. Dieser Lösungsansatz wurde für diese Modelle deshalb verworfen.

Verwendeter Lösungsansatz: Aufgrund der obigen Erkenntnisse ergibt sich der Wunsch, dass die Luftvolumina für die Flow-Berechnung aktiv sind, für die mechanische Berechnung jedoch nicht. Vor diesem Hintergrund wurde nun folgendes realisiert:

- Die betroffenen Plaxis-Modellphasen werden in je zwei Modellphasen aufgeteilt.
- Die erste Modellphase führt eine Flow-Berechnung aus, bei der alle Volumina mechanisch aktiv sind und das Luftmaterial zugewiesen ist. Um die mechanische Berechnung weitestgehend zu "unterdrücken", sind für diese Phase $\sum M_{stage}$ und $\sum M_{weight}$ auf 0.01 gesetzt.
Die Wahl von $\sum M_{stage} = \sum M_{weight} = 0.01$ ist willkürlich und es könnte ggf. auch ein kleinerer Wert verwendet werden. Wichtig ist, dass dieser Wert nicht zu gross ist, um die oben genannten Probleme im mechanischen Verhalten im "Luftmaterial" zu vermeiden.
- In der zweiten Modellphase findet keine Flow-Berechnung statt (die Wasserdrücke werden von der vorhergehenden Modellphase übernommen), alle Luftvolumina werden wieder deaktiviert und $\sum M_{stage}$ sowie $\sum M_{weight}$ werden wieder auf 1.0 gesetzt und somit das mechanisch-gekoppelte Verhalten vollständig berechnet.

Wieso funktioniert das?

- In der ersten Modellphase erfolgt die Flow-Berechnung am gesamthaft aktivierten Modell, da keine "unsinnigen" Randbedingungen durch Plaxis automatisch erzeugt werden. In den aktivierten "Luft"-Elementen wird eine Durchströmung ermittelt (z. B. innerhalb der noch nicht gelenzten Baugrube).
- In dieser ersten Modellphase rechnet Plaxis die Wasserströmung zu 100 % (ignoriert also $\sum M_{stage}$ und $\sum M_{weight}$), zeigt aber im Output nur die 1 % der Strömung an. Mechanisch wird die Berechnung aber von $\sum M_{stage}$ und $\sum M_{weight}$ "gedeckt".
- Die zweite Modellphase übernimmt die zuvor erzeugten Wasserdrücke (auf Niveau 100 %), mit denen nun der mechanische Teil gerechnet wird. Da die Luftvolumina dann wieder deaktiviert sind, ergeben sich keine signifikanten negativen numerischen Einflüsse aus der "Luft", wie sie oben beschrieben wurden.

Simulationsresultate

Eine detaillierte Darstellung und Diskussion ist nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags und würde den zur Verfügung stehenden Umfang sprengen. Stellvertretend ist in Abbildung 10 eine qualitative Visualisierung des Deformationsfeldes im Zustand vor Baubeginn ersichtlich.

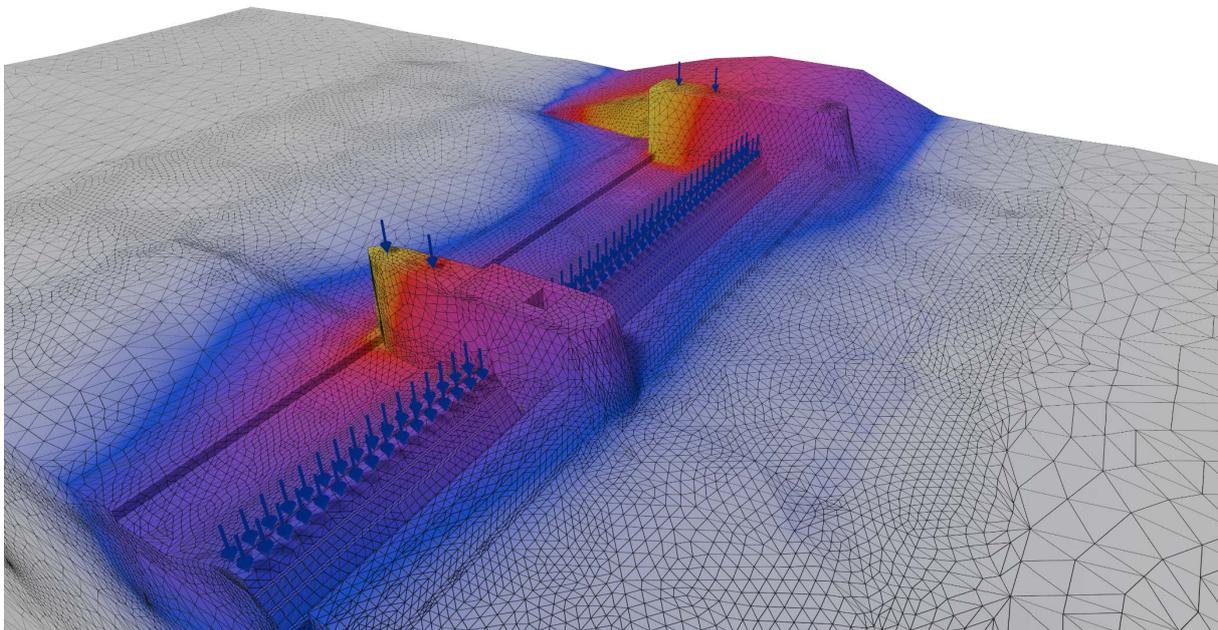


Abbildung 10: Qualitative Visualisierung des Deformationsfeldes im Zustand vor Baubeginn

Fazit

Für die Erstellung der geometrisch anspruchsvollen Plaxis-Modelle für die Deformationsprognose der geplanten Baumaßnahmen am Wehr Geesthacht hat sich der Einsatz der Software Blender in Verbindung mit einer quelltextbasierten Definition der Modellphasen sehr bewährt. Dieser Ansatz ermöglicht die Definition einer robusten sowie hochqualitativen FE-Diskretisierung und

erzeugt dennoch ein im Anschluss problemlos modifizierbares und weiterverwendbares FE-Modell. Besondere Herausforderungen traten in einigen Modellphasen bei der Strömungsberechnung auf, deren Lösungsansatz im vorliegenden Beitrag beschrieben ist.

Literatur

Jäppelt, U.; Rother, R.; von Thaden, H. (2022): Grundinstandsetzung Wehr Geesthacht an der Elbe. Bautechnik, Volume 99, Issue 5, S. 367-376.

Lühr, S.; von Thaden H. (2018): Planungen zur Grundinstandsetzung des Wehres Geesthacht an der Elbe. BAW - Kolloquium Entwicklungen und Fortschritte im Brücken- und massiven Verkehrswasserbau, 18. und 19. April 2018, S. 87-100.

Wildner, R. (vmtl. 1959): Bau der Staustufe Geesthacht, Historischer Bericht.

Verfügbar unter / Available at:

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/114186>

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

Meier, Jörg; Westermann, Konrad; Pitteloud, Laurent (2024): FE-Modellierung der Pfeilerverlängerung mit Fangedämmen am Wehr Geesthacht. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Numerik in der Geotechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 102-109.

