

„CADINP-programmierte Gesamtmodelle für den Sandtorkai in Hamburg“

Dr.-Ing. Markus Wetzel
Dipl.-Ing. Bernd von Seht
Dipl.-Ing. Christian Kühner

Ingenieurbüro Wetzel & von Seht, Hamburg

Zusammenfassung

Südlich der historischen Hamburger Speicherstadt ist auf einem ehemals bebauten Gelände zwischen der Straße „Am Sandtorkai“ und dem Sandtorhafen die Errichtung einer Gebäudespanne mit 8 Baufeldern geplant. Als Bebauung sind voneinander unabhängige Büro- und Wohngebäude geplant, die alle aus einem mehrgeschossigen Sockelbauwerk und einem aufgesetzten Hochbau bestehen.

Hinsichtlich ihrer Lage im Hamburger Hochwasserschutzgebiet und der dadurch entstehenden Lastfallkombinationen, sowie aufgrund von Auskragungen von ca. 10,75 m in die Wasserstraße hinein und des schwierigen Baugrundes, wurden mittels CADINP programmierte Gesamtmodelle entwickelt.

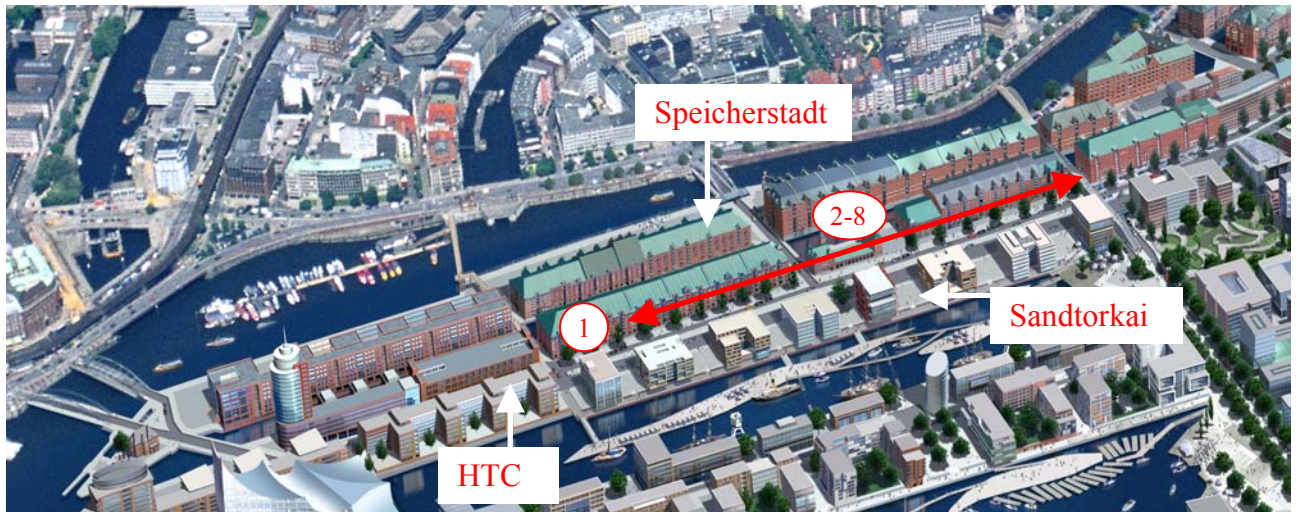
Im Rahmen dieses Berichtes sollen Erfahrungen und Vorteile der Modellierung ohne graphische Eingabe solcher Modelle vermittelt werden, die über eine reine Lastermittlung hinausgehen.



Übersicht HafenCity Hamburg

Vorstellung des Bauvorhabens – Sandtorkai Baufeld 1

In unmittelbarer Nähe zum Rathaus und zum Hauptbahnhof wird die City Hamburg um ein Stadtviertel in einer metropolen Mischung aus Wohnen, Kultur, Freizeit, Tourismus, Handel und Gewerbe erweitert. Dabei geben die historisch gewachsene Identität der Hamburger City und die Speicherstadt den städtebaulichen Maßstab für die zeitliche auf etwa 25 Jahre angelegte Realisierung der HafenCity vor. Die Lage am Wasser der Hafenbecken und der Elbe bietet die Chance zur Entwicklung eines lebendigen, unverwechselbaren maritimen Ambiente.

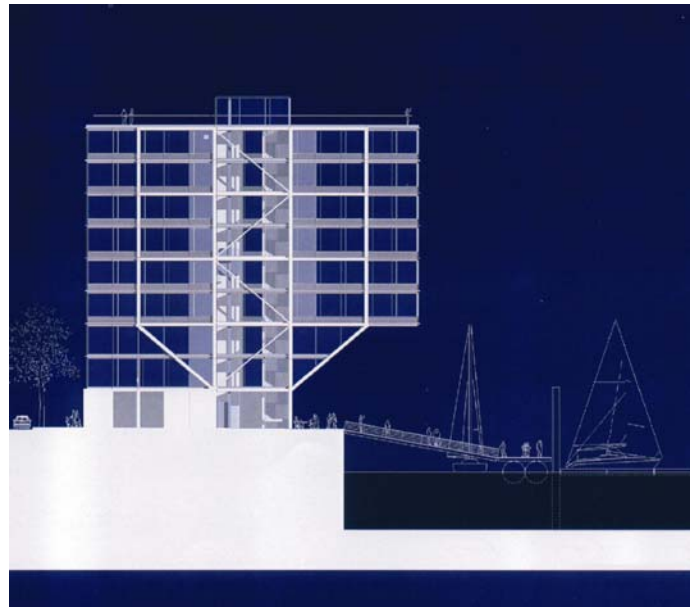


Übersicht der Baufelder 1-8 „Am Sandtorkai“

Der geplante Neubau für Baufeld 1 an der Promenade am Sandtorkai besteht aus einem siebengeschossigen Hochhaus (E01 bis E08) und einem zweigeschossigen Sockelbauwerk (E00 und U01). Die Grundrissabmessungen eines Regelgeschosses betragen ca. 30 x 18 m. Der gesamte Sockel hat eine Grundfläche von ca. 44 x 22 m. Da die Promenade am Sandtorhafen stützenfrei überbaut werden soll, ist eine beiderseitige Auskragung des Gebäudes von ca. 10,75 m zu gewährleisten.



Isometrie Baufeld 1, IOA



Seitenansicht Baufeld 1, IOA

Die Abfangung der Lasten aus den Obergeschossen erfolgt wasser- und straßenseitig über je 4 schrägliegende Stützen, die über ein in der Decke über E02 verlaufendes Zugband kurzgeschlossen werden.

Die Geschossdecken werden als Flachdecken mit Randüberzügen ausgeführt und über 8 konsolenähnliche Einbauteile je Decke an ein außenliegendes Rahmentragwerk angeschlossen. Die Auskragung der Deckenplatten über die letzte Stützenachse hinweg beträgt ca. 2,70 m. Der Abstand der Außenkante des Randüberzuges und der Systemachse des Rahmentragwerks beträgt ca. 61 cm. Die 30 cm dicken Flachdecken werden durch die Überzüge so ausgebildet, dass die Lasten der einzel-

nen Geschossdecken in Katastrophenlastfällen geschossweise in das Rahmentragwerk eingeleitet werden und nicht gesammelt auf den schrägen Stützen auflagen.

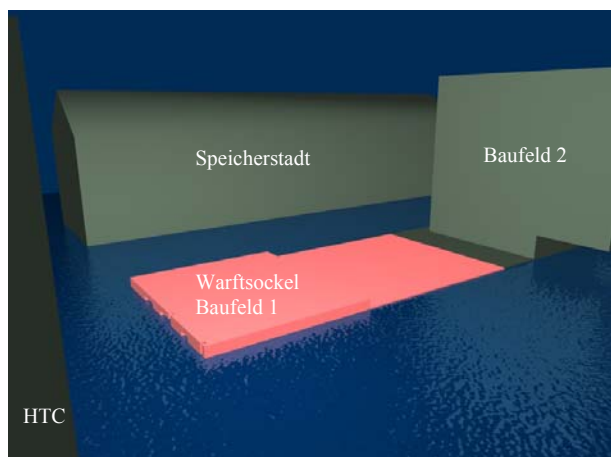
Das außenliegende Rahmentragwerk wird als Verbundtragwerk ausgebildet, welches je Geschoss an 8 Punkten an die Decken angeschlossen ist. Es besteht aus geschweißten Stahlhohlkastenprofilen, einem Stahlkern und einer Betonverfüllung. Die Stiele und Riegel des Rahmens werden in allen X-Knoten biegesteif miteinander verbunden. In allen T-Knoten werden die Stiele gelenkig zwischen den Riegeln angeordnet. Die Aussteifung des Rahmentragwerks erfolgt über diagonal verlaufende Verbandsstäbe zwischen den beiden innenliegenden Rahmenstielen. Die Stiele und Riegel des Rahmentragwerks und die schrägen Stützen der Auskragung haben je eine Außenabmessung von 40 x 40 cm. Die sechs Stützenstränge im Gebäudeinneren werden als Verbundstützen (System Geilinger) und Stanzpilzen ausgebildet.

Das Sockelgeschoss ist eine WU-Stahlbetonkonstruktion, die neben den vertikalen Lasten des aufgehenden Gebäudes auch die horizontalen Lasten aus Wind und Wasserdruck in die Gründung weiterleiten muss. Die Wanddicken bis Ebene E00 betragen 35 cm. Im Untergeschoss U01 werden die Außenwände auf $d = 50$ cm verstärkt.

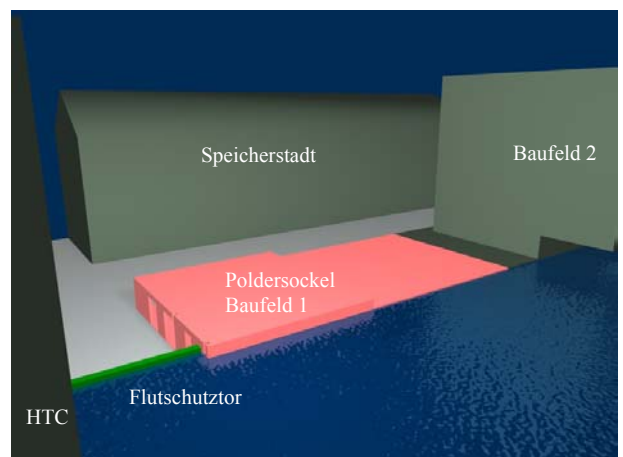
Besondere Lage im Hochwasserschutzgebiet

Aufgrund ihrer Lage im Hamburger Hochwasserschutzgebiet unterliegen die geplanten Bauwerke der „Verordnung zum Schutz vor Sturmfluten im Gebiet der Hafencity“. Zum Zeitpunkt der Errichtung der Baufelder 1-8 liegen diese noch außerhalb der Deichlinie der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH). Zu einem späteren Zeitpunkt sollen die 8 Sockelbauwerke Teil der nach Süden verschobenen Deichlinie der FHH bilden. Für das Sockelbauwerk leiten sich daraus die beiden unterschiedlichen Schutzfunktionen ab:

- **Warft:** Das Sockelbauwerk des Baufeldes 1 ist im Hochwasserfall allseitig vom Hochwasser umspült, ähnlich einer Insel, und schützt den aufgehenden Hochbau. Eine Rettung erfolgt über das Sockelbauwerk, welches von der Feuerwehr als Rettungsweg genutzt wird.
- **Polder:** Nach den Plänen der FHH wird zu einem späteren Zeitpunkt das gesamte Sockelbauwerk der acht Baufelder Bestandteil der Deichlinie. Für diese Schutzfunktion wird zwischen HTC und Baufeld 1 ein öffentliches Hochwasserschutztor geplant. Da die Sockelbauwerke alle unabhängig voneinander gegründet sind, werden diese untereinander mittels Fugenbändern verbunden, so dass eine geschlossene Deichlinie entlang der Baufelder ausgebildet werden kann.



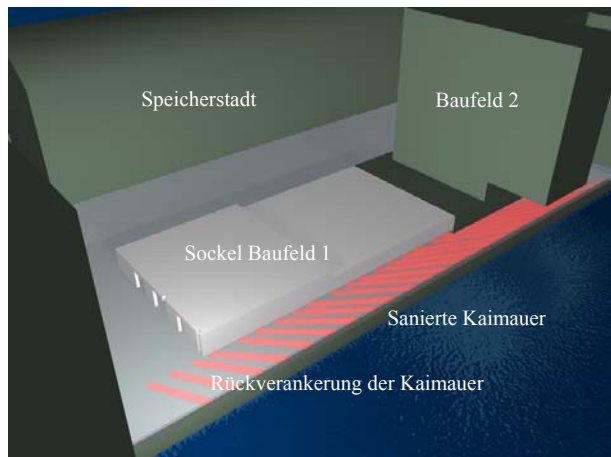
Warft, allseitig vom Hochwasser umströmt, WvS



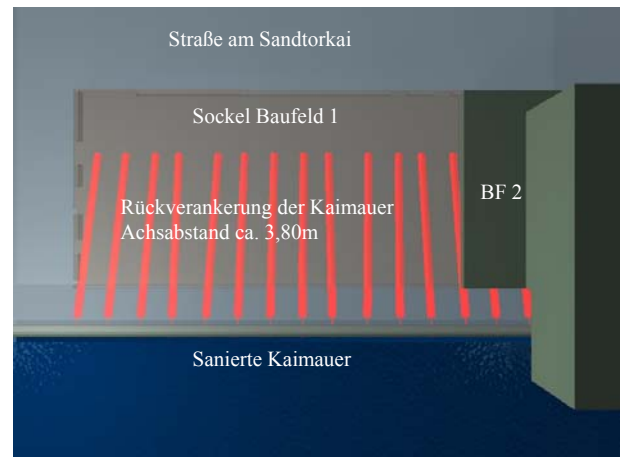
Polder, einseitige Hochwasserbelastung, WvS

Besonderheiten der Baugrundsituation

Die Kaimauer am Sandtorkai wurde vor Beginn der Baumaßnahme von der FHH saniert. Ein Spundwandprofil mit Betonholm wurde vor die alten Pfähle gesetzt und mit Ankern im Baugrund rückverankert. Diese haben einen Rasterabstand von ca. 3,80 m und liegen unterhalb des Gebäudes. Durch einen einzuhaltenden Sicherheitsabstand zu den Ankern von beidseitig 50 cm ergeben sich mögliche Gründungskorridore für den Hochbau mit einer Breite von ca. 2,80 m, in denen die Pfähle der Gründung abgesetzt werden können. Die Sohle wird als fugenlose Platte mit einer Dicke von 65 cm ausgebildet.



Sockelbauwerk und Rückverankerung Kaimauer, WvS



Grundriss Rückverankerung, WvS

Umsetzung eines Gesamtmodells mit Sofistik

Bei üblichen Hochbauten mit einem Bruttorauminhalt von ca. 24.000 m³ ist es meistens nicht notwendig, ein dreidimensionales statisches Modell zu entwickeln. Zweidimensionale geschossweise Abbildungen sind dabei oft ausreichend. Die Randbedingungen für die Bebauungen am Sandtorkai haben jedoch eine ganzheitliche Betrachtung in einem Modell erfordert.

Der komplexe Baugrund mit den beschränkten Gründungskorridoren, die unterschiedlichen Lastfallkombinationen im Hochwasserfall, die Lastverteilung des Sockelbauwerks in die Pfahlgründung und die Erfassung der Systemsteifigkeit des außenliegenden Verbundtragwerks wären in einer 2-dimensionalen Berechnung nur mit großem Aufwand umfassend abbildbar gewesen.

Obwohl mit *Monet* und *Sofipus* Programme mit graphischer Eingabe zur Verfügung stehen, wurde für Baufeld 1 ein dreidimensionales Gebäudemodell ausschließlich über den *Teddy* in CADINP erzeugt. Auf den ersten Blick erscheint diese Art der Gesamtmodellerzeugung als sehr aufwendig, ist jedoch im Hinblick auf folgende Punkte sehr effizient:

- **Anpassung der Feinheit der FEM-Struktur:** Bei Gesamtmodellen muss trotz immer verbesserter Rechnerleistungen die Größe der Matrixgleichungen „im Auge“ behalten werden. Zu feine Netzgenerierungen führen bereichsweise zu unrealistischen Ergebnissen, ebenso werden die Ansprüche an den Gleichungslöser in unwirtschaftliche Dimensionen getrieben.

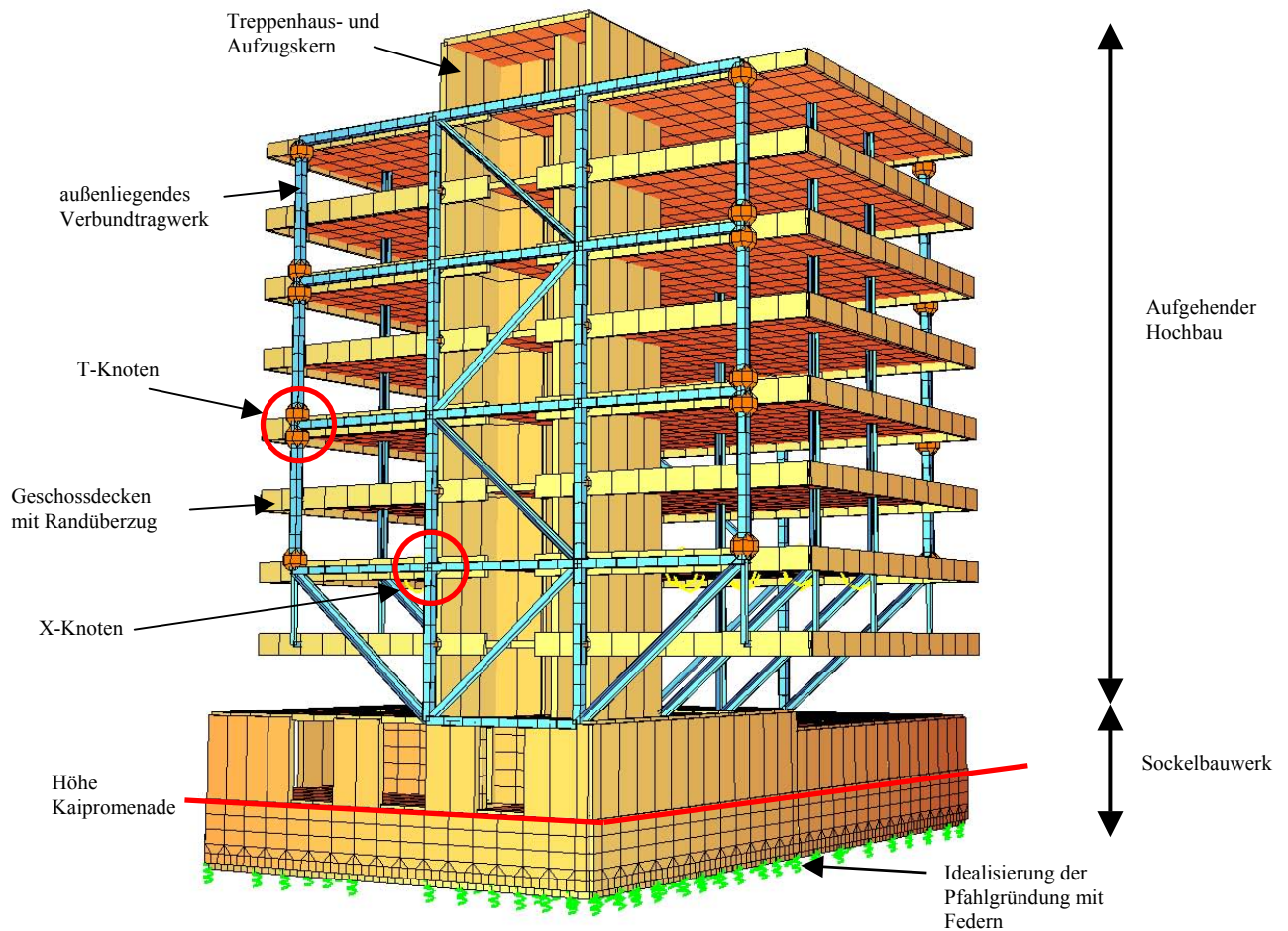
Die Eingabe im *Teddy* mittels Schleifen und Gruppen ermöglicht eine schnelle und sinnvolle Anpassung der Systemfeinheit in den gewünschten Bereichen. In Bereichen, in denen die FE-Elemente nur der Lastverteilung dienen, können großflächige Elemente verwendet werden, die an Bereiche größerer Feinheit über Dreiecks- und Trapezelemente angeschlossen werden. Auf diese Weise kann die Anzahl der zu lösenden Gleichungen bezüglich der unterschiedlichen Lastfallkombinationen in einem angemessenen Rahmen gehalten werden.

- **Unterschiedliche Lastfallkombinationen:** Die Gründung des Baufeldes 1 muss unterschiedlichen Bauwerkszuständen und Hochwasserbelastungen Rechnung tragen. So ist in der Zeit, in der das Sockelbauwerk als Warft fungiert, also allseitig von Wasser umströmt ist, nur mit einer Auftriebsbelastung des Baukörpers zu rechnen. Alle horizontalen Lasten aus Hochwasser schließen sich kurz. Wird zu einem späteren Zeitpunkt das Flutschutztor errichtet, die Deichlinie mit Hilfe der Sockelbauwerke geschlossen, ist die Gründung nicht nur der vollen Auftriebslast, sondern zusätzlich den horizontalen Belastungen aus ca. 7,00 m hoch einseitig anstehendem Wasser ausgesetzt. Eine Programmierung einzelner Grundlastfälle ermöglicht eine an den Bauzustand und an die Hochwasserbelastung angepasste Zusammenstellung von Summenlastfällen.
- **Besondere Lastzustände:** Auch ausschlaggebend für diese Art der Gesamtmodellierung ist die Tatsache, dass es auf Grund der Hafenlage zu einem sogenannten „harten Schiffsstoß“ kommen kann, d.h. ein Schiff kollidiert mit dem Bauwerk, so dass Teile der Tragkonstruktion zum Einsturz bzw. Versagen kommen können. Die Gesamttragfähigkeit darf durch Auftreffen eines Schiffes auf einen Punkt nicht gefährdet werden. Diese Problematik der Robustheit und Duktilität des Gesamttragwerks ist mit wenig Aufwand zu simulieren, zum Beispiel durch Ausfall wesentlicher Gebäudeteile.
- **Umfang und Stabilität des Rechensystems:** Erfahrungen mit frei generierten Netzen in *Monet* und *Sofiplus* haben gezeigt, dass graphisch unterstützten Modelleingaben häufig sehr zeitaufwendige Vorarbeiten vorausgehen. Die Zuverlässigkeit der Generierung und der Berechnung sind bei einer Eingabe in CADINP über den *Teddy* „unübertroffen“. Außerdem können spezielle Elemente über gezielte Auswahl bzw. Nummerierung direkt und schnell angesteuert und modifiziert werden.

Mittels folgender Programmmodule der Sofistik AG wurden Gesamtmodelle entwickelt:

AQUA:	zur Erzeugung der Querschnitte des außenliegenden Verbundtragwerks und der Einbauteile, mit denen die Decken an das Außentragwerk angeschlossen werden
GENF:	Generierung des Gesamtmodells bestehend aus Quad-, Stab-, Fach- und Federelementen
ASE:	Erzeugung der Grund- und Summenlastfälle
MAXIMA:	Generierung aller Überlagerungen für die Bauwerkszustände und Hochwasser
BEMESS:	Bemessung der Quad-Elemente der Sohle und des Sockelbauwerks
WINGRAF:	Ausgabe der statischen Berechnung

Die folgende Isometrie zeigt das generierte Modell des Baufeldes 1 am Sandtorkai in Hamburg, bestehend aus ca. 15.000 Knoten und ca. 10.000 Elementen.



Mit Hilfe des Gesamtmodells wurden folgende Punkte der statischen Berechnung bearbeitet:

- Lastermittlung:* Die im Gesamtmodell erzeugten tragenden Bauteile und deren Querschnitte ermöglichen die Verfolgung des Lastflusses bis in die Sohle
- Pfahlbelastung:* Mit Hilfe des Modells konnte für alle Lastfallkombinationen die maßgebenden Pfahlbelastungen am Pfahlkopf ermittelt werden
- Sohlbemessung:* Die 65 cm dicke Sohle wurde im Gesamtmodell bemessen
- Bemessung der Sockelwände:* Die lastverteilenden Außen- und Innenwände des Sockelbauwerks wurden im Gesamtmodell bemessen
- Schnittgrößen-ermittlung des Außentragwerks:* Die Schnittgrößen des Außentragwerks und der Einbauteile, welche die Decken mit dem Außentragwerk verbinden, wurden dem Gesamtmodell entnommen und einer Bemessung zu Grunde gelegt

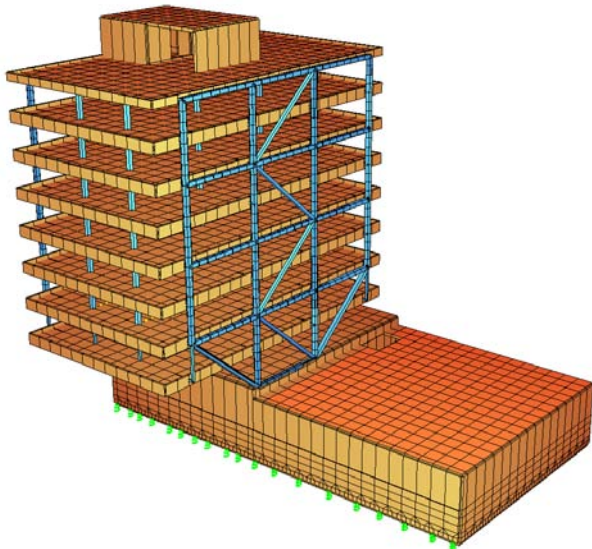
Lediglich die aufgehenden Geschossdecken und der exzentrisch angeordnete Treppen- und Aufzugskern wurden nicht am Gesamtmodell bemessen. Zweidimensionale Berechnungen, z. B. der Geschossdecken haben vergleichbare Schnittgrößen an den Übergangspunkten an das Außentragwerk ergeben.

Unterschiedliche Bauzustände und Modelle

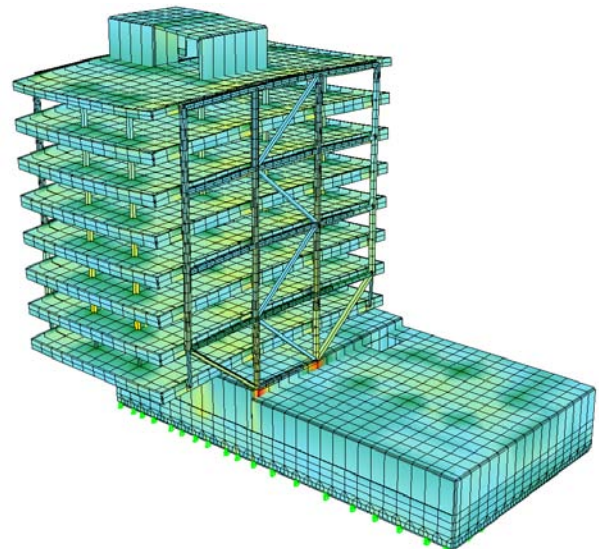
Das zu Beginn generierte Gesamtmodell wurde entsprechend der bereits erwähnten Bau- und Bauwerkszustände modifiziert. So wurden zwei weitere „abgespeckte“ Modelle erzeugt, die zum einen nur die „schlafte“ Sohle unter Kranbelastung und zum anderen das reine Sockelbauwerk abbilden. Mit dessen Hilfe konnte die Auftriebsicherheit ohne weitere Lasten des aufgehenden Hochbaus untersucht werden. Von großem Vorteil ist hierbei, dass alle Knoten- und Elementnummern in den unterschiedlichen Modellen gleich bezeichnet sind und die Ergebnisse über weitere Nachlaufprogramme angesprochen werden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen die aus dem Gesamtmodell abgeleiteten Modelle

Gesamtmodell:

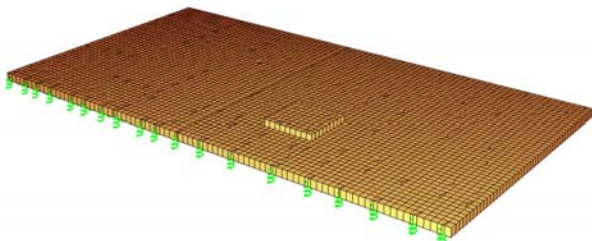


Gesamtmodell inkl. Pfahlgründung, WvS

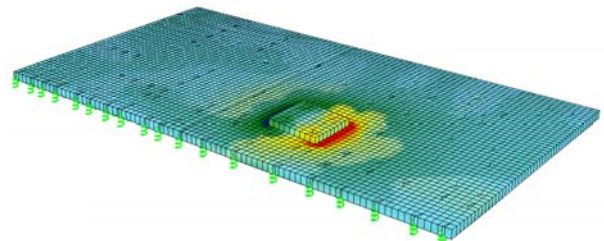


Gesamtmodell unter Eigengewicht, WvS

„Schlafte“ Sohlmodell mit Kranbelastungen:

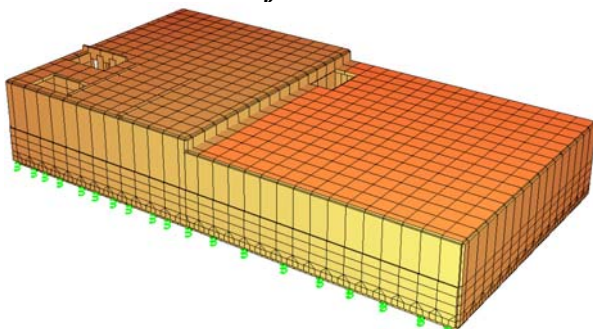


Generierte Sohlplatte mit Kranfundament, WvS

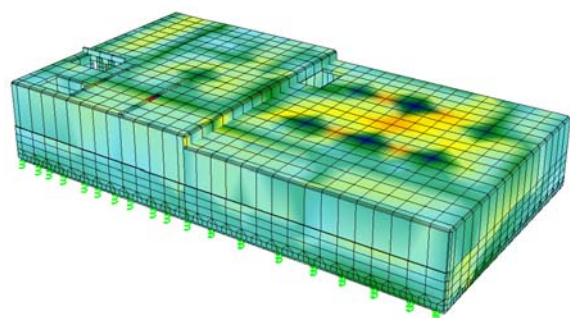


Sohlplatte mit einseitiger Kranbelastung, WvS

Sockelmodell zur Auftriebssicherheit:



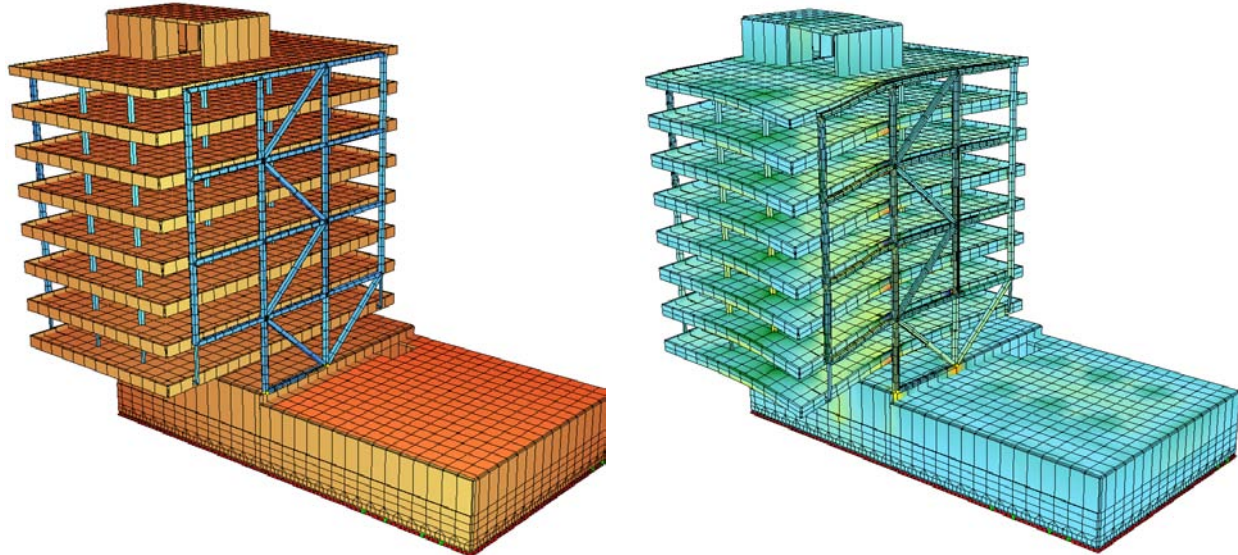
Generierter Sockel zur Auftriebssicherheit, WvS



Sockel unter Eigengewicht, WvS

Der Katastrophenlastfall „harter Schiffsstoß“ wird durch den Ausfall tragender Elemente wie z.B. einer Schrägstütze simuliert.

Gesamtmodell mit Ausfall einer Schrägstütze:

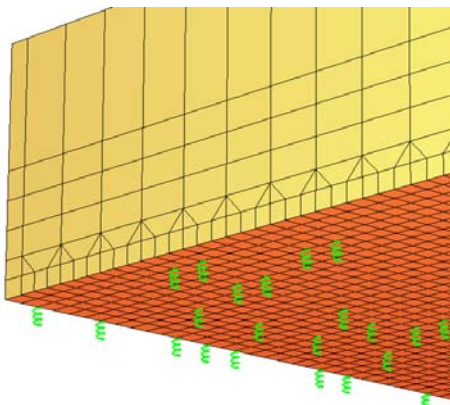


Gesamtmodell - „harter Schiffsstoß“, WvS Gesamtmodell - „harter Schiffsstoß“ unter Eigengewicht, WvS

Idealisierung der Pfahlgründung

Ursprünglich war angedacht, nur ein Gesamtmodell zu entwickeln, welches der Lastvorermittlung dienen und das Auskragsverhalten über das Wasser abschätzen sollte. Die Tatsache, dass nicht an allen gewünschten Punkten des Grundstücks Pfähle der Gründung abgesetzt werden konnten, haben zumindest für das 1.Untergeschoss des Sockelbauwerks eine genauere bzw. feinere Betrachtung gefordert. Eine zu grobe Vernetzung hätte den Lastfluß bzw. die Verteilung in die Pfähle nur sehr unbefriedigend abgebildet.

Um die Rechenleistungen bezüglich einer zu großen Anzahl von Knoten gering zu halten, wurde im Bereich der Sohle eine feinere Elementierung gewählt. Die Quad-Elemente der Wandscheiben des Untergeschosses wurden mit den Abmessungen von ca. 1,20 * 0,80 m generiert. Im unteren Bereich der Wandscheiben wurde das Rastermaß auf ein Drittel reduziert, so dass sich für die Sohle ein beinahe quadratisches Raster von 40 * 40 cm ergab. Der Übergangsbereich der unterschiedlichen Feinheiten wurde mittels Dreiecks- Trapezelementen verbunden.



Sohlen- und Pfahlabbildung mit Federn, WvS

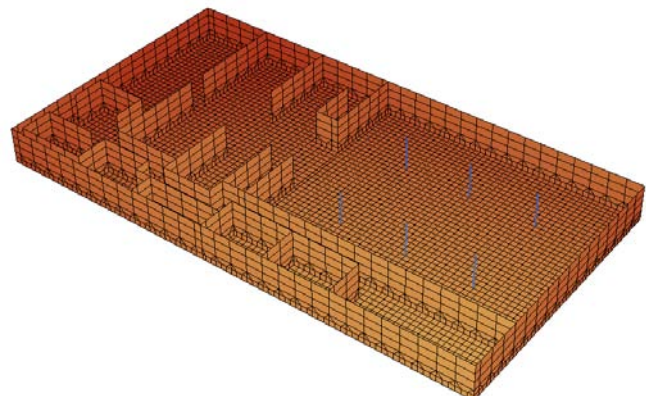


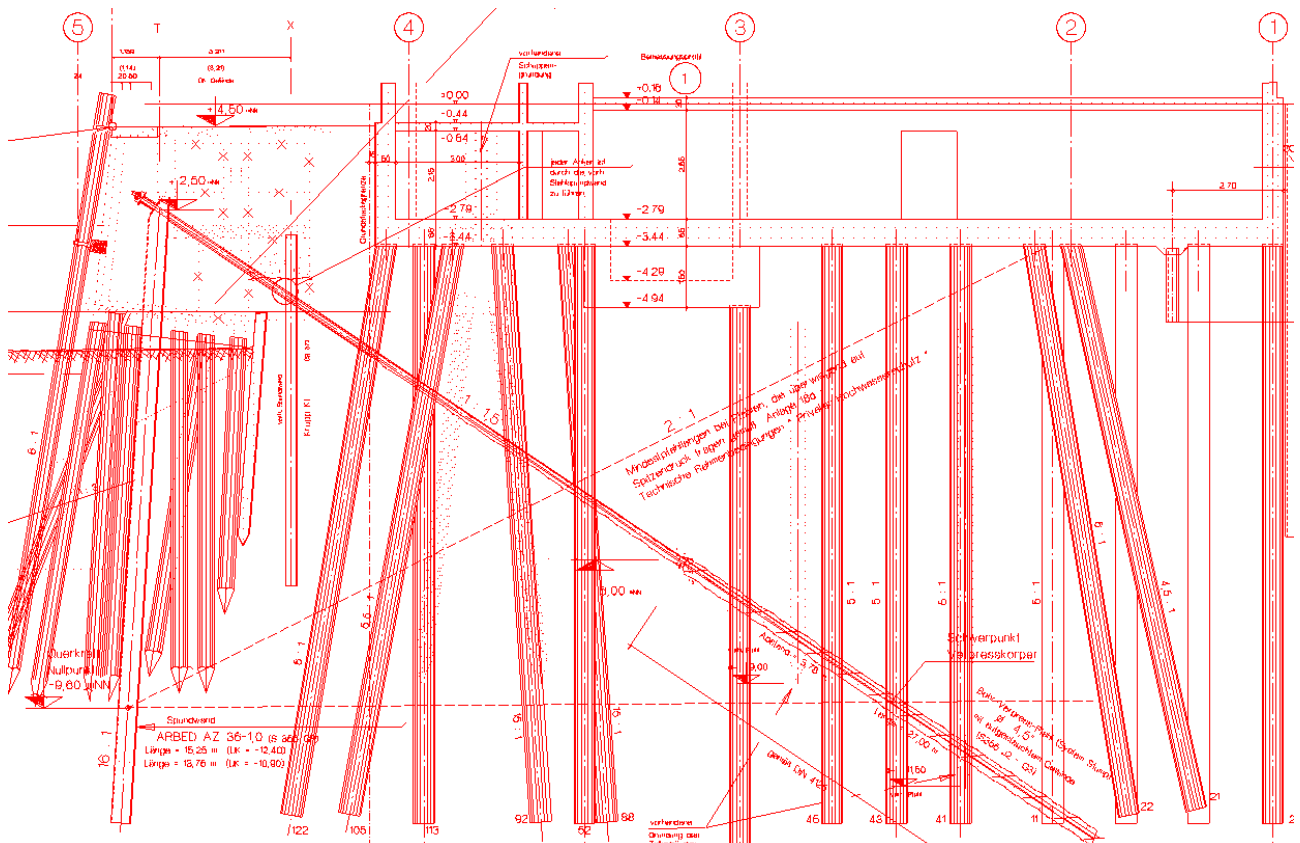
Abbildung des Untergeschosses, WvS

Nach Abstimmung mit dem Bodengutachter und einer Abschätzung der Setzungen wurden Federn mit Ersatzfedersteifigkeiten der Pfähle eingegeben. Tragfähige Bodenschichten ca. 8 m unterhalb der Bauwerkssohle, die Wahl von Bohrpfählen mit Durchmessern von ca. 56 cm und Tragfähigkeiten im Mittel von ca. 1550 kN ließen keine Pfahlbiegung zu. Da auch kein Erdkörper zur Aufnahme der Horizontallasten aktiviert werden konnte, wurde das gesamte Gebäude auf vertikalen und geneigten Pfählen gegründet. Eine Idealisierung von axialen geneigten Federn beschreibt dieses Tragverhalten sehr gut, da auch die inneren Gleichgewichtszustände der aufgelösten Pfahlböcke abgebildet werden. Anfangs wurde überlegt, ob man nicht die Zugkraft eines Pfahles auf 400 kN beschränken sollte, da sich bei einer Auftriebsbelastung ein Schlupf und Umlagern der Belastung einstellen würde. Diese Überlegung wurde aufgrund einer sehr schwer fassbaren bodenmechanischen Situation nicht weiter verfolgt. Da durch die beschränkten Gründungskorridore, die großen horizontalen Lasten und die vielen Lastfallkombinationen die Entwicklung des Pfahlbildes ein interaktiver Prozess ist, erwies sich die *Teddy*-Eingabe als anwenderfreundlich. Pfahlneigungen und Positionen konnten sehr übersichtlich und schnell abgepasst werden. Eine Überprüfung der Pfahllasten nach Herstellung und Aufmaß der Pfähle ist ebenfalls mittels einer Knotentransformation leicht zu erfassen.

FEDE	NR	KA	64257		DZ	1	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	60702		DZ	1	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	41890	DX 1	DZ	7.5	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	60694	DX -1	DZ	5	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	61302		DZ	1	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	61294	DX -1	DZ	8	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	61952		DZ	1	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	60046		DZ	1	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	40195	DY -1	DZ	4.5	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	40193	DY -1	DZ	6	CP	450000	\$FLIE	-400
FEDE	NR	KA	40395	DY -1	DZ	4.5	CP	450000	\$FLIE	-400

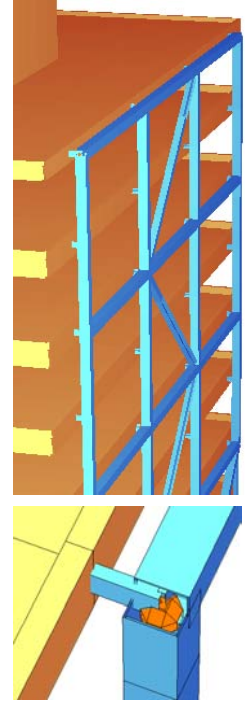
Generierung der Gründungselemente mit Federn, WvS

Die folgende Darstellung zeigt einen Schnitt der ausgeführten Pfahlgründung mit den Schrägankern der Kaianlage.



Außenliegendes Verbundtragwerk und Anschlusspunkte an die Geschossdecken

Das Außentragwerk mit Abmessungen von 40*40 cm wird mit einem Achsabstand von 61 cm vor den Geschossdecken angeordnet. In Abstimmung mit der ausführenden Firma wurden die unterschiedlichen Querschnitte des außenliegenden Verbundtragwerks in *Aqua* generiert. Die 8 Übergangspunkte je Geschossdecke an das Tragwerk wurden mit geschweißten Einbauprofilen, die in den Decken verankert sind, ausgebildet. Im Hinblick auf statisch unbestimmte Bereiche des Rahmentragwerks ist der Generierung der Übergangspunkte bzw. Einbauteile besonderes Augenmerk zu widmen. Eine einfache Kopplung von Decken und Verbundtragwerk hätte die Steifigkeiten und Verschieblichkeiten unrealistisch beschrieben. So wurden die einzelnen Einbauteilquerschnitte im *Aqua* erzeugt und die Auflagerbedingungen am Außentragwerk über „ANSC“ erfasst. Ebenso wurden zur Vermeidung von Singularitäten die Stäbe der Übergangspunkte wenige Quad-Elemente in die Geschossdecken hineingeführt.



Eine zweidimensionale Heißbemessung des Rahmentragwerks durch die ausführende Firma, der die Kraft- und Weggrößen des Rahmentragwerks zugrunde lagen, ergab für die Gebrauchslastfälle vergleichbare Werte der Schnittgrößen. Es zeigt sehr gut, dass mit dem generierten Querschnitten und Übergangsbedingungen das Steifigkeitsverhalten umfassend abgebildet wurde.

```

§ Riegel Außentragwerk 40*40cm
QNR NR 2 MNR 1 BEZ 'Riegel'
  QPOL UPZ 1 ; QP 101 0.200 0.200
  102 0.200 -0.200
  QPOL APZ 1 ; QP 103 0.185 0.185
  104 0.185 -0.185
  QPOL UPZ 3 ; QP 201 0.185 0.185
  202 0.185 -0.185
  QPOL APZ 3 ; QP 105 0.030 0.130
  106 0.030 -0.130
  QPOL UPZ 1 ; QP 107 0.030 0.130
  108 0.030 -0.130
    
```

```

§ Kopplung Deckenplatte an Rahmen
ANSC 1 MY MZ
ANSC 2 QY MY MZ
ANSC 3 QY QZ MY MZ
ANSC 22 QY QZ MY MZ
ANSC 23 QZ MY MZ

§ Einbauteile Decke über B09/Verbundtragwerk
STAB NR 901 9003 9033 QNR 31 ANFA 2
STAB NR 902 9033 9063 QNR 31
STAB NR 903 9009 9039 QNR 35 ANFA 23
STAB NR 904 9039 9069 QNR 32
STAB NR 905 9015 9045 QNR 35 ANFA 22 QNRE 36
STAB NR 906 9045 9075 QNR 32
STAB NR 907 9021 9051 QNR 31 ANFA 2
STAB NR 908 9051 9081 QNR 31
    
```

Zusammenstellung der Summenlastfälle und Überlagerungen

Betrachtet man die zuvor beschriebenen Bauwerkszustände Warft und Polder und eine mit Federn idealisierte „schwimmende“ Gründung, ist ein umfassendes Gesamtmodell von Vorteil. Im vorliegenden Beispiel wurden für die beiden unterschiedlichen Modelle Sockel und Gesamtbauwerk Grundlastfälle in einzelnen *ASE*-Läufen erzeugt. Je nach Bauwerkszustand können diese Lastfälle einfach zu Summenlastfällen zusammengefasst werden und so alle Bauzustände und Belastungen für das Sockelbauwerk und die Gründung ermittelt werden. Dem Umstand, dass zu einem späteren Zeitpunkt das Warftbauwerk durch Errichten eines Flutschutztores zum Polderbauwerk wird, kann auf diese Weise umfassend und sehr kompakt Rechnung getragen werden.

Als Grundlastfälle wurden folgende Belastungen definiert:

Vertikale Belastungen:

- LF 1: g reines Eigengewicht der Konstruktion
- LF 2: del g Ausbaulasten des Bauwerks
- LF 3: p Vertikale Verkehrslasten des Bauwerks
- LF 30: AUF Vertikaler Auftrieb aus ca. 7,00 Meter Wassersäule

Horizontale Belastungen:

- LF 10: W N/Sm mittige Windbelastung in Nord/Südrichtung
- LF 11: W N/Sw außermittige Windbelastung in Nord/Südrichtung nach Westen
- LF 12: W NS/So außermittige Windbelastung in Nord/Südrichtung nach Osten
- LF 20: W O/Wm mittige Windbelastung in Ost/Westrichtung
- LF 21: W O/Wn außermittige Windbelastung in Ost/Westrichtung nach Nord
- LF 22: W O/Ws außermittige Windbelastung in Ost/Westrichtung nach Süd
- LF 31: HWS 7 südseitige Hochwasserbelastung aus ca. 7,00 Meter Wassersäule
- LF 32: SB 60 südseitige Sturzbrecherbelastung von 60 kN/m
- LF 33: Sunk nordseitige Sunkbelastung

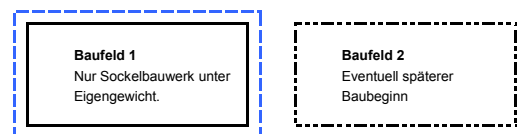
Für eine Ermittlung der Pfahlbelastungen sind 6 unterschiedliche Bauwerkszustände zu untersuchen:

Normallastfall: (Lastfall 101-112)

Diese Standardlastfallkombinationen beschreiben das vollständig hergestellte Bauwerk ohne eine Hochwassersituation oder Ausfall von wesentlichen Tragelementen unter Berücksichtigungen aller Windbelastungen.

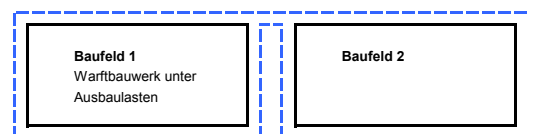
Warftbauwerk Rohbau: (Lastfall 201-202)

Diese Summenlastfälle beschreiben den vollständigen Rohbau ohne Fassade und Windlasten in einer Hochwassersituation. Das Bauwerk ist allseitig von Wasser umspült.



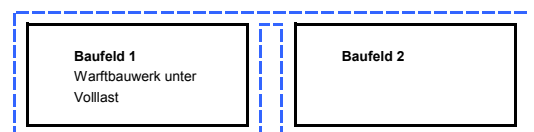
Warftbauwerk Ausbau: (Lastfall 203-210)

Diese Summenlastfälle beschreiben das vollständige Bauwerk mit Ausbaulasten in einer Hochwassersituation. Das Bauwerk ist allseitig von Wasser umspült.



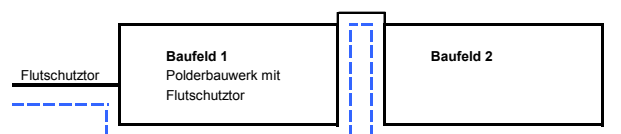
Warftbauwerk Vollast: (Lastfall 211-218)

Diese Summenlastfälle beschreiben das vollständige Bauwerk unter Vollast in einer Hochwassersituation. Das Bauwerk ist allseitig von Wasser umspült.



Polderbauwerk Ausbau: (Lastfall 301-304)

Diese Summenlastfälle beschreiben das vollständige Bauwerk mit Ausbaulasten in einer Hochwassersituation. Das Bauwerk ist elbseits von Wasser angeströmt.



Polderbauwerk Vollast: (Lastfall 305-308)

Diese Summenlastfälle beschreiben das vollständige Bauwerk unter Vollast in einer Hochwassersituation. Das Bauwerk ist elbseits von Wasser angeströmt.



Exemplarisch sind hier die Summenlastfälle 101-112, 211-218 und 301-304 dargestellt. Blau markierte Belastungen wurden in negativer Richtung berücksichtigt:

		Gesamtbauwerk			Windbelastungen						Hochwasser			
		LF1 g	LF2 del g	LF3 p	LF10 W N/S m	LF11 W N/S w	LF12 W N/S o	LF20 W O/W m	LF21 W O/W n	LF22 W O/W s	LF30 AUF	LF31 HWS 7	LF32 SB60	LF33 Sunk
Normallastfall - Volllast (LF 101-112)	Summenlastfall													
	LF 101	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 102	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 103	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 104	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 105	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 106	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 107	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 108	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 109	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 110	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
	LF 111	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
LF 112	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

		Gesamtbauwerk			Windbelastungen						Hochwasser			
		LF1 g	LF2 del g	LF3 p	LF10 W N/S m	LF11 W N/S w	LF12 W N/S o	LF20 W O/W m	LF21 W O/W n	LF22 W O/W s	LF30 AUF	LF31 HWS 7	LF32 SB60	LF33 Sunk
Warft - Volllast (LF 211-218)	Summenlastfall													
	LF 211	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐
	LF 212	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐
	LF 213	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐
	LF 214	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐
	LF 215	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
	LF 216	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
	LF 217	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒
LF 218	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	

		Gesamtbauwerk			Windbelastungen						Hochwasser			
		LF1 g	LF2 del g	LF3 p	LF10 W N/S m	LF11 W N/S w	LF12 W N/S o	LF20 W O/W m	LF21 W O/W n	LF22 W O/W s	LF30 AUF	LF31 HWS 7	LF32 SB60	LF33 Sunk
Polder - Ausbau (LF 301-304)	Summenlastfall													
	LF 211	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐
	LF 212	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐
	LF 213	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐
LF 214	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	

In einzelnen ASE-Lastfällen wurden die Grundlastfälle mit entsprechenden Faktoren über „LC“ zusammenkopiert. Als Gleichungslöser wurde ein iterativer Solver („STEU SOLV 2“) verwendet.

Fazit

Die auf den ersten Blick etwas „antiquierte“ Programmierung ohne graphische Unterstützung bei der Eingabe hat sich bei diesem Bauvorhaben als sehr effizient erwiesen. Die gleichbleibenden Knoten-, Element- und Gruppennummern, die einfache Ansteuerung und Modifizierung einzelner Elemente und die übersichtliche Art der Summenlastfallbildung waren besonders anwenderfreundlich. Die unterschiedlichen Bau- und Bauwerkszustände durch Modifizierung des Gesamtmodells, die vielen Hochwasserlastkombinationen und die Rechenstabilität des Systems sind als klare Vorteile zu nennen. In allen Fällen ist zu empfehlen, dass das *.dat*-File übersichtlich und ausführlich zu kommentiert wird, um die Bearbeitung zu einem späteren Zeitpunkt zu erleichtern.

Nachteilig ist diese Art der Programmierung bei schiefwinkligen oder stark schwankenden Rastermaßen. Eine kompakte Generierung des System wäre nur mit großem Aufwand möglich gewesen. Ebenfalls sind nachträgliche umfangreiche Änderungen des Entwurfes nur mit unverhältnismäßig großem Zeitaufwand möglich.