



Ett förtöjt fartygs rörelser vid kaj

- en metod för dimensionering av vågskydd

Daniel Aneljung
Mathias Pedersen

ABSTRACT

Purpose

The purpose of this master thesis is to demonstrate with an example how the harbour wave protection can be designed with regards to ship movements. An existing harbour is used in the example. The example will also show how the protection can be improved.

Method

The first step is to specify accepted ship movements.

Next step is to specify environmental conditions for the location, i.e. significant wave height and zero-crossing period.

Using these data as input the wave heights and periods inside the harbour can be calculated.

Then the ship movements are simulated. A verification of the model is performed. This is done by doing simulations where the result may be predicted.

After this verification the final ship movements are calculated. If the result is not satisfactory the wave protection is modified and the process is repeated.

Result

This method will not result in a lot of extra work compared to how the way harbours are designed today. The models needed in this process, model of the ship and of the harbour, should already have been created. They just need to be combined.

Using this method should lead to a cost optimization.

It is hard to say anything about the correctness of this method. There are no available measured data to compare the results from the example to.

Being able to compare the results from the example with measured actual ship movements would be an interesting way to continue this study.

SAMMANFATTNING

Syfte

Syftet med examensarbetet är att visa med ett exempel hur vågskyddet för en hamn kan dimensioneras med hjälp av en metod som utgår från fartygets rörelser. I exemplet används en befintlig hamn och exemplet ska också visa hur vågskyddet kan förbättras.

Metod

Problemet angrips genom att bygga upp modeller i dataprogram med vilkas hjälp sedan händelseförloppen simuleras.

Det första steget är att ta reda på hur stora rörelser ett fartyg kan ha vid en kaj utan att problem uppstår. Det finns två gränser som är intressanta. Den första är gränsen för att lastning och lossning kan ske utan problem. Den andra gränsen är när fartyget inte längre är säkert förtöjt.

Sedan tar arbetet vid med att ta reda på vilka egentliga rörelser som fartyget har när det ligger vid kajen.

Det börjar med att ta reda på vilken vågkaraktäristik som kan förväntas direkt utanför hamnen, så kallade miljödata. Utifrån dessa kan våghöjder och vågperioder inne i hamnen beräknas.

Nästa steg är att simulera fartygsrörelserna för framräknade vågkaraktäristika. Det är lämpligt att börja med en verifiering av modellen. Denna görs genom att göra simuleringar där resultatet kan förutsägas, till exempel rörelser på öppet vatten.

Efter verifiering görs den slutliga rörelseberäkningen. Är inte resultatet tillfredställande får vågskyddet modifieras. Nya vågkaraktäristika inne i hamnen får tas fram och de nya rörelserna beräknas.

Resultat

Metoden borde inte innebära något större merarbete jämfört med dagens sätt att dimensionera hamnar eftersom modellerna för både hamnen och fartygen redan borde vara framtagna. Det som behöver läggas till är att kombinera resultaten från de båda modellerna.

Metoden innebär en optimering av kostnaderna för vågskydd. Över- respektive underdimensionering av vågskyddet borde kunna undvikas.

Det är svårt att säga hur väl metoden fungerar eftersom det finns en del osäkerheter huruvida korrekta resultat fås fram vid beräkningen av rörelserna nära ränder såsom kaj och botten. Ett lämpligt sätt att fortsätta arbetet skulle vara att göra mätningar för att undersöka hur väl beräkningarna överensstämmer med verkligheten.

FÖRORD

Idén till det här examensarbetet har till stor del utarbetats av nedanstående teknologer och professor Lars Bergdahl.

Arbetet har utförts på institutionen för Vatten Miljö Transport på Chalmers i Göteborg. Vi skulle vilja tacka vår handledare och examinator, professor Lars Bergdahl för den hjälp och de råd du försett oss med.

Beräkningarna gjorde vi till stor del på Caran Automotive i Göteborg där vi fick omfattande hjälp och stort stöd av Karolina Eriksson och Yungang Liu. Tack för ert stora tålamod och alla förklaringar ni tagit er tid att ge oss.

Självklart ska även Ralf Westerén och Gösta Hammarberg på Visby hamn ha ett stort tack för ett gott samarbete och en trevlig resa till Sveriges största ö.

Göteborg 2001-12-17

Daniel Aneljung Mathias Pedersen

ABSTRACT	2
SAMMANFATTNING	3
FÖRORD	4
1 INLEDNING	7
1.1 BAKGRUND	7
1.2 SYFTE	9
1.3 METOD	9
1.4 BEGRÄNSNINGAR	10
2 TEORIAVSNITT	11
2.1 VÅGTEORI	11
2.1.1 Regelbundna vågor	11
2.1.2 Ytvattenvågor	12
2.1.3 Vågspektrum	13
2.1.4 Vågspredning	13
2.2 POTENTIALTEORI	14
2.2.1 Hastighetspotentialen och Laplace differentialekvation	14
2.2.2 Randvillkor	15
2.3 VÅGBERÄKNING	16
2.3.1 Ränder	16
2.3.2 Tillämpning av Greens funktion	17
2.4 RÖRELSEBERÄKNING	18
2.4.1 Rörelseekvationen	18
3 REKOMMENDERADE VÄRDEN PÅ RÖRELSER FÖR FÖRTÖJDA FARTYG	22
4 HAMNBESKRIVNING	24
5 FÄRJAN M/S VISBY	25
6 FÖRANKRINGSSYSTEM	29
7 MILJÖDATA	33
7.1 SIGNIFIKANTA VÅGHÖJDER OCH PERIODER	33
7.2 VÅGSPEKTRUM	34
8 VÅGMODELLERING	35
8.1 PROGRAMVARA	35
8.1.1 Hsolvmodulen	35
8.1.2 Hwavemodulen	35
8.2 INDATA	35
8.2.1 Vågdata	35
8.2.2 Geometri	35
8.2.3 Randvillkor	35
8.2.4 Vågriktningar	37
8.3 BERÄKNINGAR I HWAVE	38
8.3.1 Beräkning med nuvarande geometri	38
8.3.2 Resultat med nuvarande geometri	39
8.3.3 Beräkning efter ombyggnad av vågskyddet	40

8.3.4	Resultat efter ombyggnad av vågskyddet.....	41
8.3.5	Jämförelse av resultat.....	42
8.4	SLUTSATS FRÅN VÅGBERÄKNINGARNA	44
9	RÖRELSEBERÄKNING.....	45
9.1	PROGRAMVARA	45
9.1.1	WAMIT	45
9.1.2	MIMOSA.....	45
9.2	KOORDINATSYSTEM.....	46
9.3	INDATA	46
9.3.1	Förankring.....	46
9.3.2	Massdata.....	47
9.3.3	Geometri.....	47
9.3.4	Vågspektrum	48
9.3.5	Vågornas infallsvinkel mot fartyget.....	48
9.3.6	Randvillkor	48
9.4	REGELBUNDEN ANALYS – VERIFIERING AV MODELL	49
9.4.1	Allmänt	49
9.4.2	Verifieringskriterier.....	50
9.4.3	Verifiering på öppet vatten	52
9.4.4	Verifiering vid 1 kaj.....	59
9.4.5	Verifiering med två kajer	62
9.4.6	Slutsats av verifieringen	63
9.5	OREGELBUNDEN ANALYS – FARTYGETS VERKLIGA RÖRELSE.....	64
9.5.1	Resultat oregelbunden analys.....	64
9.5.2	Translationer	65
9.5.3	Jämförelse av translationer, befintligt vågskydd – utbyggt vågskydd	67
9.5.4	Jämförelse av translationer med rekommendationer.....	67
9.5.5	Rotationer	68
9.5.6	Jämförelse av rotationer, befintligt vågskydd– utbyggt vågskydd	69
9.5.7	Jämförelse av rotationer med rekommendationer	69
9.5.8	Hastigheter & accelerationer	70
9.5.9	Slutsatser från den oregelbundna analysen.....	70
10	SLUTSATS	71
10.1	FÖRDELAR MED METODEN	71
10.2	NACKDELAR MED METODEN	71
10.3	FORTSATT ARBETE	71
	REFERENSER.....	72
	APPENDIX A – BERÄKNING AV EGENPERIODER OCH GM	74
	APPENDIX B – RESULTAT, HASTIGHETER	76
	APPENDIX C – RESULTAT, ACCELERATIONER	80

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

För att slippa problem med höga vågor vid hårt väder har hamnar traditionellt anlagts vid skyddade kuster. Sverige är väldigt förskonat från besvärliga förhållanden med mycket skärgård och många vikar där det är möjligt att lägga till i lä.

Trots relativt hårt och blåsigt väder så är vågorna ofta begränsade när de når fastlandet. Öarna i skärgårdarna fungerar som tidiga vågbrytare och gör att de stora vågorna som bildas ute till havs inte når kusten.

En ytterligare faktor som gör det lättare för hamnbyggnationer i Sverige är de förhållandevis korta sträcklängderna som finns runt Sveriges kuster. Danmark och Norge ligger som en skydd för Nordsjöns vredgade vågor. Vid kusten i Östersjön är ofta de förhärskande vindriktningarna västliga vilket gör att de är frånlandsvindar och inte genererar några vågor.

Problem för hamnbyggnationer uppstår framför allt vid långa släta kuster eller på öar långt ute i skärgården eller utan skyddande vikar. Oftast finns det ett skyddat alternativ för nya hamnbyggnationer, men inte alltid.

Ett exempel där det är svårt att finna en skyddad plats kommer ifrån Sten Munthe på Scandia Consult i Göteborg och berör östra Brasilien. I dessa områden finns stora träodlingar för virkes- och pappersmassaindustrin vilket givetvis kräver omfattande virkestransporter från dessa platser. Eftersom det gäller stora mängder last som ska transporteras blir det mest ekonomiskt lönsamt att använda sig av vattnet som transportled. Dessutom är övrig infrastruktur i det närmaste obefintlig vilket gör att alternativen till vattentransport är ytterst begränsade om inte en järnväg till närmaste pappersfabrik byggs. Det enda som måste byggas för att använda sig av vattnet som transportväg är en mindre hamn med plats för en eller ett par pråmar. Problemet med att bygga en hamn här är att kusten är i stort sett helt rak vilket medför att det krävs stora vågbrytare för att gardera sig helt för vågor från alla riktningar. Det skulle medföra stora kostnader. Eftersom kusten är en rak kust bestående av sandstrand finns också oro för att pirerna, särskilt de som är vinkelräta mot kusten, kan fungera som ett stort sandfång (Bruun, 1989:1 samt Bruun, 1989:2). Samlas en stor mängd sand i form av vallar runt och kanske i hamnen kan det medföra stora kostnader för löpande muddringsarbeten. Byggs däremot för få och för små pirer uppstår istället problem med att fartygen (i detta fall pråmar) rör sig för mycket. För stora rörelser medför att lastning och lossning inte kan bedrivas i den omfattning som är tänkt, vilket medför kostnader i form av produktionsbortfall. För att optimera de totala kostnaderna kan det då vara lämpligt att utgå från hur kraftigt fartygen kränger och rör sig vid olika typer av vågbrytare och pirer. Detta medför att hamnutformningen kan optimeras utgående ifrån fartygens rörelser och hur de påverkar kostnaderna. Den totala kostnaden blir summan av kostnaden för anläggning av hamnen, underhåll, skador och produktionsbortfall.

Ett annat exempel är en eventuell utbyggnad av Stockholms hamn som kan komma att ske vid Norvik i Nynäshamn. Trots att hamnen egentligen ligger väl skyddad för de flesta vågriktningar är finns risken att djuphavsvågor ska ta sig ända in i Norviksfjärden och orsaka problem för fartyg som kommer att ligga förtöjda i hamnen. Även här borde det kunna löna sig att göra en utvärdering av hur olika hamnutformningar skulle påverka fartygens rörelser och därmed den totala kostnaden där anläggningskostnad, produktionsbortfall och eventuella skador summeras.

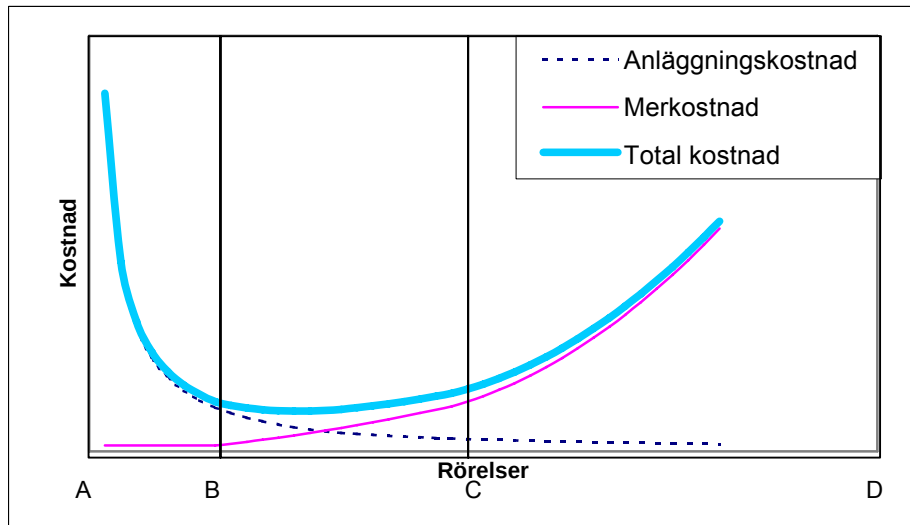
Exemplet som kommer tas upp i den här rapporten är Visby hamn. Hamnen ligger vid en förhållandevis slät kust på Gotland och med mycket öppet vatten utanför. Detta tillsammans med korta pিরer medför problemet att färjan M/S Visby kränger för mycket när den ligger förtöjd vid kaj. Detta verkar vara ett årligen återkommande problem som allt som oftast dyker upp under de hårda stormarna under höstarna.

Hamnen är byggd med sin öppning mot sydväst. Det är inte helt optimalt eftersom de hårdaste vindarna och därmed även de största vågorna kommer från detta håll. Tanken när hamnen byggdes var att den yttre piren skulle ha blivit något längre och därmed kunnat skydda bra mot dessa vågor, men pengarna räckte inte riktigt till och därför finns idag dessa problem.

Sydvästliga vågor kommer alltså in relativt odämpade i hamnen och får M/S Visby att börja kränga. De kraftiga rörelserna gör att lastnings- och lossningsarbetet tar längre tid eller till och med omöjliggörs. I extrema fall kan ramper knäckas och skador kan uppstå på kaj och skrov när fartyget slår mot kajen. För att undvika alltför omfattande skador får då M/S Visby lägga sig vid en annan kaj där snabbfärjan HSC Gotland brukar ligga förtöjd. Detta gör istället att hamnen inte utnyttjas optimalt eftersom logistiken i hamnen är ordnad efter att fartygen ligger vid sina respektive kajplatser. Detta medför betydligt besvärligare lastning och lossning, kanske även inställd trafik.

Den yttre vågbrytaren i Visby hamn har byggts ut i flera omgångar. Tanken var att den skulle bli längre och gå i en större båge än vad den slutligen blev. Kostnaderna ansågs nämligen för stora.

I Figur 1-1 visas ett principiellt diagram över kostnaderna för hamnen beroende på hur fartyget rör sig. Accepteras att fartyget rör sig mycket blir anläggningskostnaderna inte stora, men risken finns att merkostnaderna ökar på grund av att hamnen blir obrukbar delar av året och att skador uppstår. Ställs krav att fartyget ska röra sig väldigt lite krävs en väldigt omfattande anläggning vilket kostar mycket. Den mest optimala hamnen kostnadsmissigt sett är någonstans där emellan.



Figur 1-1 - Principiellt diagram över kostnader för en hamn beroende hur mycket fartyget rör sig. Mellan A och B rör sig fartyget väldigt lite och driftsstörningar uppstår aldrig på grund av vågorna. Mellan B och C går lastning och lossning iland långsammare p g a för kraftiga rörelser, ibland får arbetet avbrytas. Går rörelserna över C rör sig fartyget väldigt mycket vilket gör att skador uppstår och att fartyget ibland måste flyttas.

För mer detaljerade beskrivningar av hamnplanering och byggnation av hamnar hänvisas till "Port Design" (Thoresen, 1988), Port Engineering (Bruun, 1973). För djupare genomgång av byggnation av vågskydd och dess effekter hänvisas till "Shore Protection Manual" (US Army, 1984).

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att visa med ett exempel hur vågskyddet för en hamn kan dimensioneras med hjälp av en metod som utgår från fartygets rörelser. I exemplet används en befintlig hamn och exemplet ska också visa hur vågskyddet kan förbättras.

1.3 Metod

Problemet kommer att angripas genom att bygga upp modeller i dataprogram med vilkas hjälp sedan händelseförloppen simuleras.

Det första steget är att ta reda på hur stora rörelser ett fartyg kan ha vid en kaj utan att problem uppstår. Det finns två brytpunkter som är intressanta. Den första då rörelserna når upp till punkten B, alltså vilka rörelser som tillåts innan problem med lastning och lossning uppstår. Den andra brytpunkten är vid C, vilka rörelser som tillåts innan fartyget inte längre ligger säkert vid kajen.

Sedan tar arbetet vid med att ta reda på vilka egentliga rörelser som fartyget har när det ligger vid kajen. Det börjar med att ta reda på vilken vågkaraktäristik som kan förväntas direkt utanför hamnen, så kallade miljödata. Nästa steg är att med utgångspunkt från vågorna utanför hamnen beräkna hur vågor och vågmönster kan komma att se ut inne i

hamnen. Detta görs genom att en modell av hamnen byggs upp, i detta fall i programmet HWAVE. Utifrån framtagna miljödata för vattnet utanför hamnen beräknas sedan våghöjd, vågperiod och riktning på vågorna inne i hamnen fram.

Nästa steg är att simulera fartygsrörelserna för framräknade vågkaraktistika. Den geometriska modellen av fartyget byggs upp i preprocessorn ANSA och rörelseberäkningarna görs i Wamit och Postwam.

För att verifiera modellen görs rörelseberäkningarna först på öppet vatten. Resultaten från dessa körningar kontrolleras med en rad teoretiska antaganden och beräkningar. Viss verifiering fås även vid modellering med en kaj.

Efter verifiering görs beräkning av rörelser då fartyget ligger fritt vid en oändligt lång kaj följt av beräkning då fartyget ligger fritt i ett hörn av två oändligt långa kajer. Sedan följer beräkning av de verkliga rörelserna för förtöjt fartyg vid kaj.

Slutligen görs en studie för en hamn med modifierat vågskydd för att se om fartygsrörelserna kan reduceras. För detta fall körs enbart verkliga fall med fartyget som förtöjt vid en oändligt lång kaj.

1.4 Begränsningar

Eftersom korrekta väderdata inte har varit tillgängliga kan det inte göras någon bedömning av sannolikheten för en viss typ av väder och inte då heller för av sannolikheten att fartygsrörelserna blir för stora.

Inte heller kommer några ekonomiska bedömningar att göras i denna rapport.

2 TEORIAVSNITT

2.1 Vågteori

2.1.1 Regelbundna vågor

En regelbunden våg brukar beskrivas med ekvationen:

$$\zeta = \zeta_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x)$$

där ζ är vattenytans nivå

ζ_0 vågamplituden

ω vinkelfrekvensen, $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$

k vågtalet, $k = \frac{2 \cdot \pi}{L}$

t tiden

x positionen

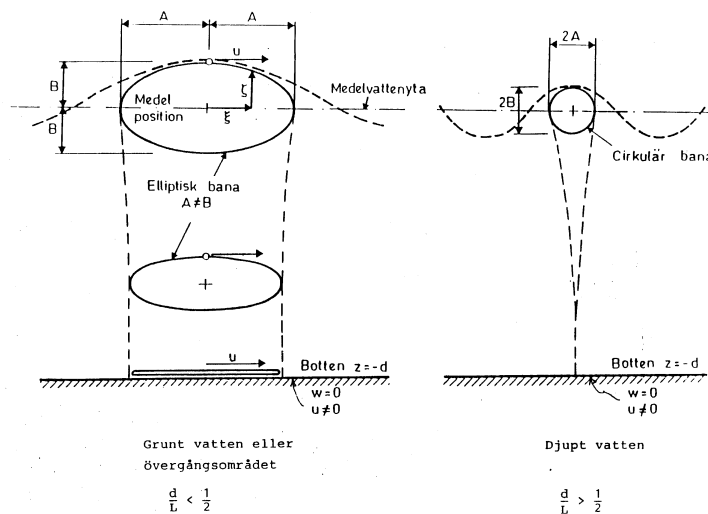
L våglängden, $L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$

T vågperioden

d vattendjupet

Vågformen kan alltså skrivas om till en funktion av tiden, positionen, vågperioden och vattendjupet.

För djupt vatten rör sig vattenpartiklarna i cirkulära banor och för grunt vatten rör sig vattenpartiklarna i elliptiska banor (se Figur 2-1).



Figur 2-1 Vattenpartiklarnas rörelse under en sinusformad våg enligt linjär teori, d =vattendjupet, L =våglängden (Sjöberg & Häggström, 1998)

Vattendjupet kan delas in i tre zoner, djupt vatten, övergångszon och grunt vatten.

Det som är av intresse i kommande beräkningar är våglängdens beroende av vattendjupet och även vattenpartiklarnas horisontella förskjutning. De kan förenklat skrivas för de olika zonerna enligt Tabell 2-1.

	Grunt vatten	Övergångszon	Djupt vatten
	$\frac{L}{25} > d$	$\frac{L}{25} > d > \frac{L}{2}$	$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
Våglängd, L	$T \cdot (g \cdot d)^{0.5}$	$\frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(k \cdot d)$	$\frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$
Horisontell partikel-förskjutning, ξ	$\frac{\zeta_0}{\omega} \left(\frac{g}{d} \right)^{0.5} \cdot \cos(\theta)$	$\zeta_0 \cdot \frac{\cosh(k \cdot (d + z))}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(\theta)$	$\zeta_0 \cdot e^{k \cdot z} \cdot \cos(\theta)$

Tabell 2-1 Vågkaraktistika för fortskridande enligt linjär teori, definitioner enligt ovan med tillägget att z är avståndet från vattenytan, samt att $\theta = k \cdot x - \omega \cdot t$ (Sjöberg & Häggström, 1998).

2.1.2 Ytvattenvågor

Naturliga ytvattenvågor är oregelbundna. Man kan säga att de är en sammansättning av många regelbundna vågor. För att kunna beskriva dessa brukar man använda Fourierserier som är en summa av cosinus och sinusfunktioner. En vågrörelse med perioden T_H kan då skrivas:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(\omega_n \cdot t) + B_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t))$$

där $\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{T_H}$ med $n = 1, 2, 3 \dots \infty$

$$A_n = \frac{2}{T_H} \int_0^{\infty} \zeta(t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T_H} \cdot \int_0^{\infty} \zeta(t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t) dt$$

Uttömmande beskrivningar av användandet och härledning av Fourierserier kan ses i "Sea Loads on Ships and Offshore Structures" (Faltinsen, 1990) eller "Hydrodynamic of Offshore Structures" (Chakrabarti, 1987).

När man pratar om naturliga ytvattenvågor inför man även begrepp som signifikant våghöjd (H_s) och nollkryssningsperiod (T_z). Den signifikanta våghöjden är medelvärde av de N/3 största våghöjderna i en serie om N vågor. Nollkryssningsperioden är tiden mellan två på varandra följande skärningar av medelvattenytans nivå.

För att räkna ut den signifikanta våghöjden och nollkryssningsperioden behöver man veta den effektiva stryklängden (F), vindhastigheten (U) och vindens varaktighet ($t_{\min}$). Förslag på hur dessa kan räknas ut redovisas i Oceanografi (Sjöberg & Häggström, 1998).

2.1.3 Vågspektrum

För att visa fördelningen av de regelbundna vågornas spridning över frekvenserna i ett verkligt sjötillstånd används vågspektrum. Ett vågspektrum beskriver energifördelningen över vågperioderna för ett visst sjötillstånd.

Vågspektrum kan bestämmas genom mätning av vågtåg och fourieranalys eller fouriertransformering av dessa. En annan metod är att använda standardspektra vilka kan beräknas med hjälp av uppgift om vindstyrka, stryklängd och vindens varaktighet. Även dessa spektra är empiriska men bygger på medelvärden från många vågtåg.

Det finns många olika typer av spektra. För att kunna använda valfri kombination av H_s och T_z (se vidare under Hwave) används ISSC-spektrum vilket är ett tvåparameterspektrum till skillnad från exempelvis PM och JONSWAP.

För vindvågor kan ett ISSC-spektrum skrivas som:

$$S(f) = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{H_s}{T_z^2} \right)^2 \cdot f^{-5} \cdot e^{-\frac{1}{\pi} (T_z \cdot f)^{-4}}$$

där f är frekvensen för en i spektret förekommande våg.

2.1.4 Vågspredning

I strykområdet, området där vågor genereras av vinden, har man momentana hastighetskomponenter inom en sektor $\pm 90^\circ$ om vindens medelriktning. Det gör att vinden genererar vågor i alla dessa riktningar. Långt ifrån strykområdet där vågorna är dyningar kan man dock säga att vågorna har en och samma riktning.

Vågorna kan därför delas upp i långkammig och kortkammig sjö. Långkammig sjö innebär att alla vågor i ett väder har samma riktning, kortkammig innebär att vågorna har en viss spridning i riktning kring ett medelvärde.

Vågor in i en hamn bör kunna ses som långkammig sjö eftersom de vågor som kommer in genom hamninloppet borde ha ungefär samma riktning.

2.2 Potentialteori

2.2.1 *Hastighetspotentialen och Laplace differentialekvation*

Vid hydrodynamiska beräkningar brukar man införa ett begrepp som kallas hastighetspotential. Hastighetspotentialen används för att beskriva vattnets hastighetsvektor $\mathbf{V}(x,y,z,t)=(u,v,w)$, där u , v , och w är strömningshastigheten i riktningarna x , y respektive z . Hastighetspotentialen väljs som en funktion $\phi(x,y,z)$ som har följande egenskaper:

$$\begin{aligned}u &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} \\v &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} \\w &= -\frac{\partial \phi}{\partial z}\end{aligned}$$

Hastighetsvektorn blir då

$$\mathbf{V}(x,y,z,t) = \nabla \phi = \left(\frac{d\phi}{dx}, \frac{d\phi}{dy}, \frac{d\phi}{dz} \right)^T$$

Hastighetspotentialen har ingen fysikalisk betydelse men är lämplig att använda vid matematisk analys av rotationsfri vätska.

Den så kallade vorticitetsvektorn:

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{V}$$

skall vid rotationsfri vätska vara noll för vätskan. För att hastighetspotentialen skall existera krävs att vätskan antas rotationsfri. Vidare är vatten inkompressibelt vilket medför att:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Dessa villkor gör tillsammans att hastighetspotentialen uppfyller Laplace ekvation:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Laplace differentialekvation löses sedan för relevanta randvillkor.

Då hastighetsvektorn är definierad kan man teckna trycket med hjälp av denna enligt Bernoullis ekvation. Trycket blir då:

$$p + \rho \cdot g \cdot z + \rho \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\rho}{2} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} = C$$

där C är en godtycklig funktion beroende av tiden. Tidsberoendet kan dock tas med i hastighetspotentialen och C därför sättas till en konstant (Faltinsen, 1990).

För vågutbredning i x-riktningen och med nedan visade randvillkor är följande en lösning till Laplace differentialekvation:

$$\phi = e^{kz} \cdot (A \cdot \cos kx + B \cdot \sin kx) \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad \text{där } A, B \text{ och } \alpha \text{ är godtyckliga konstanter.}$$

I y-riktningen löses Laplace differentialekvation på liknande sätt.

2.2.2 **Randvillkor**

För att lösa Laplace differentialekvation krävs minst två randvillkor. Det första randvillkoret är den vertikala hastigheten i vattenytan som är lika med derivatan på vågfunktionen:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{då } z = 0 \quad \text{där } 0 \text{ ligger i vattenytan.}$$

Man har ytterligare ett randvillkor för vattenytan och det är att trycket är konstant, det vill säga trycket är lika med atmosfärstrycket. Från Bernoullis ekvation och faktumet att trycket är konstant kan man få fram att:

$$g\zeta + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad \text{då } z = 0$$

Nästa randvillkor är den vertikala hastigheten vid botten som är lika med noll:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{då } z = -d \text{ där } d \text{ är vattendjupet.}$$

Innehåller modellen vertikala väggar får man följaktligen randvillkor i väggytan att hastigheten i normalens riktning är noll enligt:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{där } \mathbf{n} \text{ är normalen till ytan.}$$

På liknande sätt kan man skriva randvillkoret för ytorna på en flytande kropp med tillägget att kroppen kan ha en hastighet i vilken riktning som helst. Randvillkoret blir då:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} \quad \text{där } \mathbf{U} \text{ är kroppens/ytans hastighet, observera att hastigheten kan vara olika i olika punkter på kroppen på grund av att kroppen kan rotera.}$$

2.3 Vågberäkning

I vågberäkningen löses Laplace differentialekvation, se 2.2 Potentialteori. Förutsatt att alla ränder är vertikala och går från botten upp till vattenytan och att vattendjupet är konstant kan en komplex hastighetspotential som satisfierar denna ekvation skrivas:

$$\Phi(x, y, z, t) = -\frac{igH_0}{2\omega} \phi(x, y) \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} e^{-i\omega t}$$

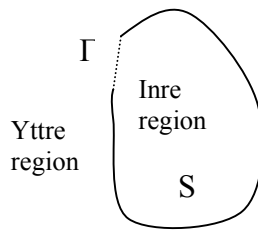
H_0 = inkommande våghöjd

g = tyngdaccelerationen

där $\phi(x, y)$ betecknar en tvådimensionell potentialfunktion som ska bestämmas. Denna funktion beskriver potentialen i en godtycklig punkt inne i hamnen.

2.3.1 Ränder

Hamnen avgränsas geometriskt av ränder, för vilka randvillkor måste specificeras. Randen kan indelas i två typer, hamnväggarna S och hamnöppningen Γ , Figur 2-2. Ränderna skiljer den inre regionen från den yttre.



Figur 2-2 Ränder, inre och yttre region

För att beskriva de begränsande ytornas reflektionsegenskaper kan en komplex transmissionskoefficient $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$ användas.

$$\alpha_1 = 2K_r \sin\beta \cos\gamma / (1 + K_r^2 + 2K_r \cos\beta)$$

$$\alpha_2 = ((1 - K_r^2) \cos\gamma) / (1 + K_r^2 + 2K_r \cos\beta)$$

K_r är reflektionskoefficienten för materialet

β är fasvinkeln för reflektionen

γ är infallande vågriktning

För att ovanstående uttryck ska bli praktiskt användbara måste de förenklas. Fasvinkeln β och vinkeln för den infallande vågen γ , sätts till noll varvid formlerna för α_1 och α_2 förenklas till följande uttryck:

$$\alpha_1=0$$

$$\alpha_2=(1-K_r)/(1+K_r)$$

2.3.2 Tillämpning av Greens funktion

Att bestämma $\phi(x, y)$ är ett gränsvärdesproblem som löses genom att uttrycka den spridda potentialen i den yttre regionen $\phi_s^{(e)}$, som beroende på ett antal punktkällor på tillhörande rand Γ , och den spridda potentialen $\phi_s^{(i)}$, i den inre regionen som beroende av punktkällor längs Γ och S . Då fås:

$$\phi_s^{(e)}(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} f^{(e)}(\xi) G(x; \xi) dS$$

$$\phi_s^{(i)}(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma+S} f^{(i)}(\xi) G(x; \xi) dS$$

G i ekvationerna ovan står för en Greens-funktion, f beskriver fördelningen mellan de olika punktkällorna hos en potential.

Genom att diskretisera randen i flera raka små element kan ekvationerna lösas numeriskt. Kvoten av våghöjden i en godtycklig punkt inne i hamnen och inkommande våghöjd kallas diffraktionskoefficient, K_d . Den definieras:

$$K_d(x, y) = |\phi_s^{(i)}(x, y)|$$

eftersom

$$H = H_0 |\phi|$$

Där H_0 är den inkommande våghöjden och H våghöjden i en godtycklig punkt.

2.4 Rörelseberäkning

2.4.1 Rörelseekvationen

Rörelseekvationen som skall lösas kan kortfattat skrivas:

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = F$$

där

- M är den (generaliserade) massmatrisen
- A matrisen för den hydrodynamiska massan
- B dämpmatrisen
- C styvhetsmatrisen för de återförande hydrostatiska krafterna och förankringssystemet
- F den exciterande kraften i sex frihetsgrader
- η de tillhörande förskjutningarna

2.4.1.1 Kraftvektorn

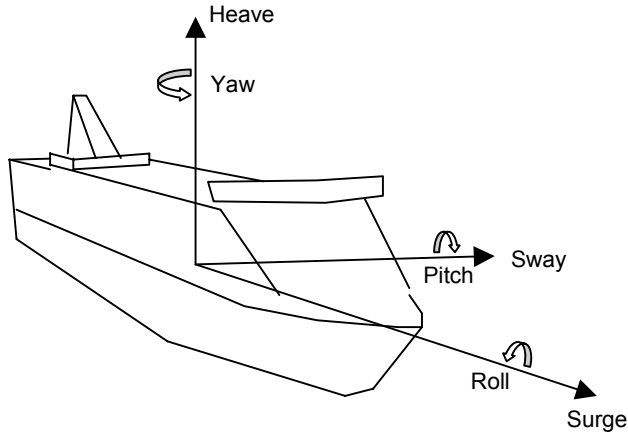
De krafter som verkar på en i vattnet flytande kropp kommer främst från vågor, ström och vind, alla beroende av kroppens form och storlek. De krafter som är intressanta vid denna analys är endast de oscillerande krafterna som uppstår av de enskilda vågorna.

Vind, strömnings- och vågdriftskrafter är jämförelsevis väldigt låga och kan oftast ses som konstanta då deras periodtid är lång jämfört med vågens oscillerande kraft. Dessa krafter ger så kallade lågfrekventa rörelser och de är intressanta endast om man vill få fram belastning på förtöjningar, inte då man vill få fram de högfrekventa rörelserna.

Kraftvektorn F är en funktion av vattnets acceleration ($\ddot{u}$), vattnets hastighet ($\dot{u}$) och vattenytans nivå (ζ). Eftersom den infallande vågen kan beskrivas av en fourierserie kan även den exciterande kraften beskrivas av en fourierserie.

2.4.1.2 Förskjutningsvektorn

Fartygskroppen kommer att betraktas som stel men rörlig. Det innebär att deformationer av fartygskroppen kommer att försummas. Kvar blir då sex frihetsgrader varav tre är translationer och tre är rotationer. Dessa är surge, sway, heave, pitch, roll och yaw. I vår modell är de definierade som på Figur 2-3 nedan. Motsvarande svenska uttryck för frihetsgraderna bör undvikas då dessa uttryck inte är klart definierade och därmed kan misstolkas.



Figur 2-3 Definition av frihetsgraderna hos ett fartyg

2.4.1.3 Styvhetsmatrisen

I den totala styvhetsmatrisen ingår den hydrostatiska styvheten och styvheten från förankringen.

Fartyget har inte någon hydrostatisk styvhet i de horisontella frihetsgraderna surge, sway och yaw. Det finns alltså inga återförande krafter från vattnet om fartyget rör sig i horisontalplanet.

Däremot finns det återförande krafter om fartyget rör sig i de vertikala frihetsgraderna heave, pitch och roll. Dessa återförande krafter beror i princip på massfördelning hos fartyget och vattenlinjearean. För ett fartyg som är symmetriskt kring xz-planet kan då styvhetsmatrisens komponenter skrivas:

$$C_{33} = \rho \cdot g \cdot A_{vp}$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho \cdot g \iint_{A_{vp}} x \cdot ds$$

$$C_{44} = \rho \cdot g \cdot V \cdot GM_T$$

$$C_{55} = \rho \cdot g \cdot V \cdot GM_L$$

Där A_{vp} är vattenlinjearean, V är det undanträngda vattnets volym, GM_T är transversella metacentriska höjden och GM_L är longitudinella metacentriska höjden.

Styvheten från förankringen har relativt liten påverkan på de våginducerade rörelserna. Ett förankringssystem har i regel ingen påverkan på dessa rörelser förrän våglängden blir stor.

Vill man ändå ha med styvheten från förankringarna måste man, för att få en helt linjär differentialekvation, linjärisera förankringarna. Styvheten får alltså inte bero på förskjutningen.

2.4.1.4 Massmatrisen

Den generaliserade massmatrisen beskriver fartygets massfördelning. Det gör den genom att innehålla skeppets massa, tröghetsmomenten kring axlarna samt deviationströghetsmomentet. Massmatrisens komponenter kan då skrivas för ett fartyg med symmetri kring xz-planet enligt:

$M_{11} = M_{22} = M_{33} = M$	där M är fartygets massa
$M_{35} = M_{53} = M \cdot z_g$	där z_g är tyngdpunkten i z-led
$M_{24} = M_{42} = -M \cdot z_g$	där z_g är tyngdpunkten i z-led
$M_{44} = I_4$	där I_4 är tröghetsmomentet kring y-axeln
$M_{55} = I_5$	där I_5 är tröghetsmomentet kring x-axeln
$M_{66} = I_6$	där I_6 är tröghetsmomentet kring z-axeln
$M_{46} = M_{64} = D$	där D är deviationströghetsmomentet

M är fartygets totala massa. Övriga komponenter i massmatrisen är lika med noll under förutsättning att tyngdpunkten ligger i punkten $(0,0,z_g)$.

2.4.1.5 Hydrodynamisk massa

Den hydrodynamiska massan kan ses som massan av det medsvängande vattnet. För att få fartyget att röra på sig krävs även att vattnet i dess omedelbara närhet rör på sig, alltså krävs en slags tilläggskraft för att vattnet ska svänga med. Fartyget beter sig alltså som att det har en större massa än vad det egentligen har.

Den hydrodynamiska massan är beroende på frekvensen.

2.4.1.6 Dämpning

Då en flytande kropp svänger bildas utgående vågor från kroppen. Dessa kan ses som energiförluster och därmed en slags dämpning.

Dämpningen är beroende av frekvensen. För väldigt snabba rörelser bildas mycket små vågor, vilket ger liten energiförlust och därmed liten dämpning. Det samma gäller för långsamma rörelser, dessa ger heller inga utgående vågor.

2.4.1.7 Lösning av rörelseekvationen

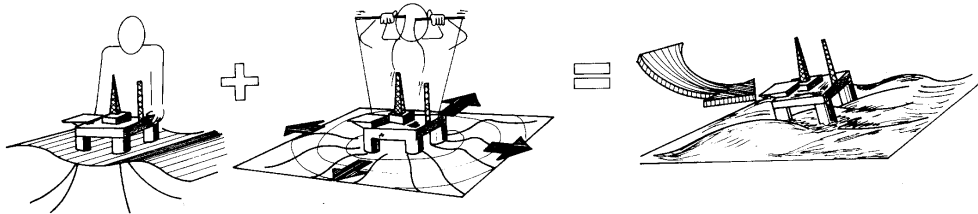
Rörelseekvationen kan antingen lösas i tidsplanet eller i frekvensplanet. Dock är den hydrodynamiska massan och dämpningen beroende av frekvensen på vågorna och rörelserna för flytande konstruktioner med stor utbredning. Det gör att man inte på ett enkelt sätt kan använda sig av tidsintegration, kvar blir lösningen i frekvensplanet.

Eftersom det är möjligt att få rörelserna i oregelbundna vågor genom att superponera resultaten från regelbundna vågor börjar man med att lösa ekvationen för regelbundna vågor med vågperioder som ingår i vågspektret som analysen skall göras för.

Det hydrodynamiska problemet brukar delas upp i två delar enligt följande (se även Figur 2-4):

- 1: Lasterna på kroppen från infallande vågor då kroppen är låst i alla frihetsgrader (det vill säga hindrad att röra sig). Krafterna som fås fram kallas vågexcitationskrafter.
- 2: Lasterna på kroppen då kroppen är tvingad att röra sig i respektive frihetsgrad med vågexcitationskraftens frekvens. Inga infallande vågor är närvarande. Lasterna som fås fram är den hydrodynamiska massan, dämpningen och återförande krafterna (styvheten).

Den totala lösningen för konstruktionen består då av ett system av differentialekvationer där en lösning fås för varje frekvens.

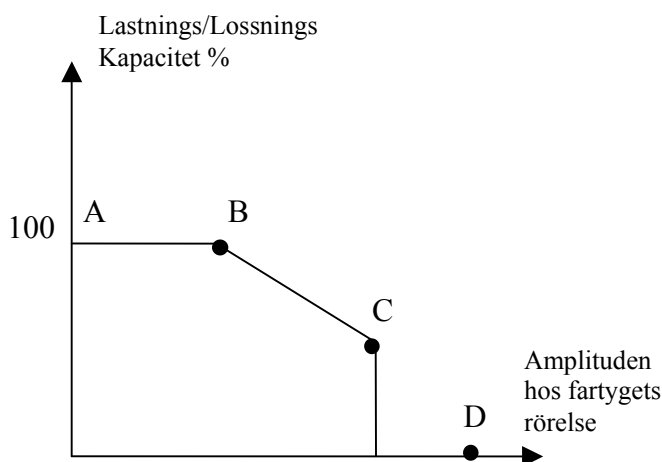


Figur 2-4 Superpositionering av vågexcitation, added mass, dämpning och återförande krafter ger den totala lösningen (Faltinsen, 1990).

3 REKOMMENDERADE VÄRDEN PÅ RÖRELSE FÖR FÖRTÖJDA FARTYG

Rörelser på förtöjda fartyg i en hamn kan vara antingen horisontella (surge, sway och yaw) eller vertikala (roll, pitch och heave). Vertikala rörelser är i stort sett oberoende av förtöjningssystemet medan de horisontella beror på förtöjningarnas styvhet och placering, på fendrarna och även kajens utformning.

För stora rörelser gör att arbete med lastning och lossning av last blir riskabelt och slutligen även att gränsen för säker förtöjning nås. Detta illustreras i Figur 3-1, där lastning och lossningskapaciteten är en funktion av fartygsrörelserna. Då fartygsrörelserna är mellan A och B är effektiviteten 100 %. Mellan B och C minskar effektiviteten med fartygsrörelserna. När rörelserna överstiger C måste lastningen/lossningen avbrytas, men fartyget kan ligga kvar vid kajen. Överskrids även D ligger fartyget inte längre säkert vid kajen.



Figur 3-1 Lastnings/lossningskapacitet som funktion av fartygets rörelse

I fallet med M/S Visby består lasten främst av passagerare och fordon. Överskridelse av D inträffar vanligen ett antal gånger varje år under höst och vintermånaderna. Detta gör att färjan måste byta kaj.

Färjor hör till gruppen Ro-Ro fartyg (roll on-roll off). Det innebär att lastning och lossning sker horisontellt via ramper och gångbroar. Förtöjningarna är för den här typen av fartyg främst till för att reducera fartygets horisontella rörelser. Rekommenderade maxvärden för fartygsrörelserna för säker lastning och lossning redovisas i Tabell 3-1. De värden som presenteras är rekommendationer från Pianc (Pianc, 1995) och Nordisk ministerråds embedsmandskomite for transports (vidare kallad NMET) rekommendationer, (NMET, 1986). Rörelserna gäller vid ramper förutom de som är markerade *, som är globala rörelser.

Frihetsgrad		Surge	Sway	Heave	Pitch	Roll	Yaw
Förskjutning	NMET	-	0,8*	1,0	1,0	2,0	1,0
(m resp °)	Pienc	0,6	0,6	0,6	1,0	2,0	1,0
Hastighet	NMET	-	0,6*	-	-	-	-
(m/s)	Pienc	-	-	0,2	-	-	-
Acceleration	NMET	-	-	0,5	-	-	-
(m/s ²)	Pienc	-	-	-	-	-	-

Tabell 3-1 Begränsande rörelser vid ramper för säker lastning och lossning av last från ett fartyg vid kaj. Rörelser markerade med * är dock rörelser i tyngdpunkten. Alla rörelser är enkelamplituder.

När det gäller att ligga säkert förtöjt, där de begränsande faktorerna är skador på fartyget och kajen, är det främst energin i rörelsen som är intressant. Energin är en direkt funktion av fartygets storlek och hastighet och det gäller främst att begränsa fartygets hastighet med förtöjningarna. Maxvärden på rörelser och hastigheter för säker förtöjning redovisas i Tabell 3-2.

Frihetsgrad		Surge	Sway	Heave	Pitch	Roll	Yaw
Förskjutning	NMET	1,0-2,0	1,5-2,0	1,0-1,5	2,0-3,0	6,0	3,0-5,0
(m resp °)	Pienc	-	-	-	-	-	-
Hastighet	NMET	-	-	-	-	-	-
(m/s)	Pienc ¹	0,3	0,3	-	-	1,0	1,0

Tabell 3-2 Begränsande rörelser för säker förtöjning av ett fartyg vid kaj. Alla rörelser är enkelamplituder.

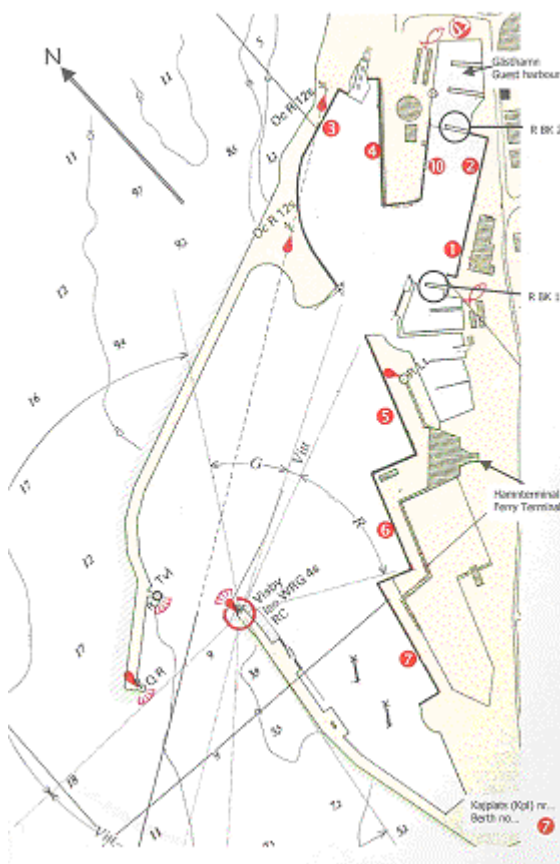
¹ Gäller för fartyg med en vikt av 8000 DWT

4 HAMNBESKRIVNING

Hamnen är uppbyggd av en inre och en yttre hamnbassäng. I den inre tas fraktfartyg och kryssare som tillfälligt anlöper Visby hamn emot. Här återfinns kajplats 1 till 4 och vattendjupet är cirka 6 meter. Den yttre bassängens tre kajplatser är framför allt avsedda för Destination Gotlands tre färjor, M/S Visby, M/S Thjelvar och HSC Gotland, men det finns även en oljekaj där hela Gotlands behov av olja tas emot. Vattendjupet vid kajplats 5 är cirka 7 meter. Vid kajplats 6, 7 och vid oljekajen är djupet 8 meter.

Den yttre hamnen är skyddad med två vågbrytare. En som löper i nord-sydlig riktning och en som har en sydväst-nordöstlig sträckning. Hamninloppet, som är riktat mot sydväst, är 9 meter djupt.

Kajplats 8 är den som är mest skyddad mot vågor eftersom den ligger längst in bakom den nord-sydliga vågbrytaren. De vågor som går in i hamnen reflekteras så många gånger att de reduceras mycket kraftigt innan de når hit. Mest utsatta är kaj 5 i den yttre hamnen och kaj 2 i den inre hamnen eftersom vågorna kan gå nästan ostörda rakt mot dessa kajplatser.



Figur 4-1 – Utformningen av den nuvarande hamnen i Visby. Siffror markerade med rött är kajernas numrering.

5 FÄRJAN M/S VISBY

M/S Visby ägs av Rederi AB Gotland och ingår i den flotta som trafikerar sträckorna Oskarshamn - Visby och Nynäshamn – Visby. Övriga färjor i flottan är Thjelvar och snabbfärjan Gotland. Trafiken sköts emellertid av rederiet Destination Gotland som är ett helägt dotterbolag till Rederi AB Gotland.

Färjan byggdes 1979 på Öresundsvarvet i Landskrona och hette då Stena Felicity innan den såldes till Rederi AB Gotland och fick sitt nuvarande namn.

Färjan är avsedd att transportera både fordon och passagerare och får ta högst 1832 personer och lasta 2609 ton. Med denna maximala last får färjan ett displacement på 13482 ton.

Färjan har under 90-talet försetts med en 2-3 meter hög och 0,7 meter bred utbyggnad i aktern, en så kallad sponson. Denna utbyggnad som placerats i vattenlinjen har gjorts för att förbättra stabiliteten då färjan går till havs. Även bulben i stäven är något modifierad sedan färjan en gång byggdes.



Figur 5-1 – Fotografi på M/S Visby.

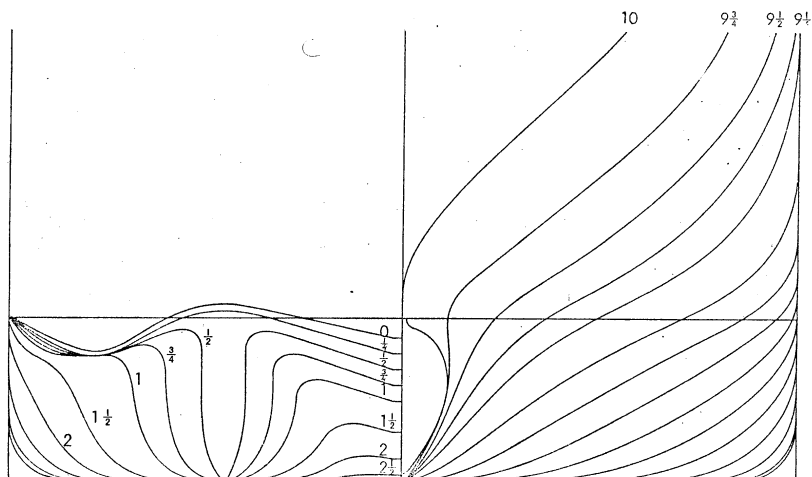
M/S Visby	
Max antal passagerare	1 832 personer
Vikt lightship	10 873 ton
Maxlast	2 609 ton
Max displacement	13 482 ton
Total längd	142 m
Längd i vattenytan	135.1 m
Bredd	24 m
Djupgående	4,9 – 5,7 m
Normal hastighet	19,5 knop (36 km/h)
Tyngdpunkt, x-led*	59,95 m
Tyngdpunkt, y-led*	0,0 m
Tyngdpunkt, z-led*	5,45 m
GM transversellt	4,2 m
GM longitudinellt	353,7 m
Egenperiod, heave	6,8 sek
Egenperiod, roll	10.9 sek
Egenperiod, pitch	6,8 sek
Vattenlinjearean	3166 m ²

Tabell 5-1 – Tekniska data för M/S Visby. *Tyngdpunktens koordinater är definierade från aktern där baslinjen, centerlinjen och hjärtstocken möts.

GM och egenperioder är beräknade enligt Faltinsen (Faltinsen 1990). Resultaten stämmer med rekommendationerna att heave och pitch ska ha ungefär samma egenperioder medan egenperioden i roll ska ligga någonstans kring 10 sekunder för ett fartyg av denna storlek. För den fullständiga beräkningen se Appendix A. För en något djupare genomgång av stabilitetsbegreppet hänvisas till Hydraulik för V-teknologer (Häggström, 1988) eller Hydraulik för väg- och vattenbyggare (Cederwall & Larsen, 1981).

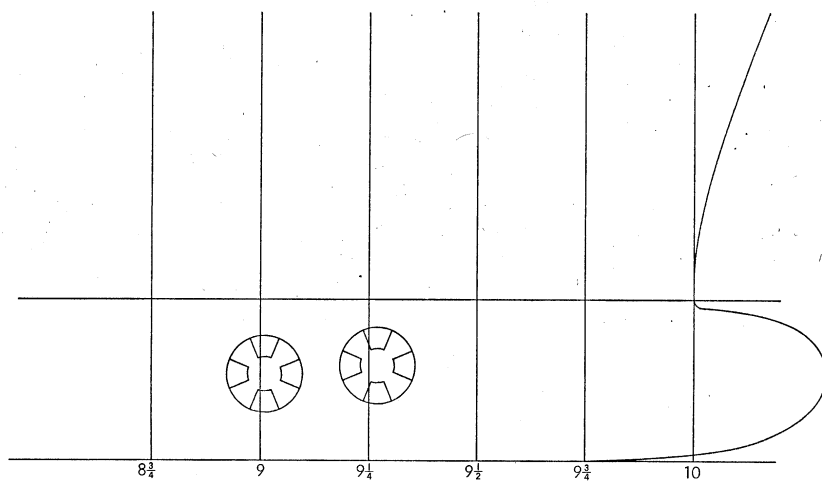
För att skapa den geometriska modellen har vi utgått från de få linjeritningar och spantritningar som finns tillgängliga. Eftersom färjan är byggd i slutet på 1970-talet finns det inga digitala ritningar utan alla koordinater är utmätta från analoga ritningar.

I Figur 5-2 visas en spantritning av M/S Visby. Med hjälp av den kan man få upp en tredimensionell bild av skrovet på fartyget. Fartyget är indelat i 10 spant vilket betyder att avståndet mellan varje helspant är 13,2 meter.



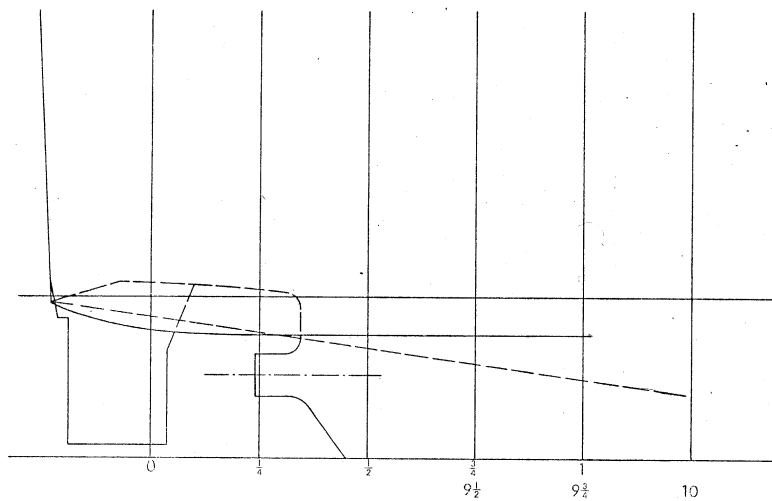
Figur 5-2 Spantriting av M/S Visby

För att få en mer detaljerad bild av aktern och fören har konturritningar av dessa använts. I Figur 5-3 visas en konturritning av fören på M/S Visby och Figur 5-4 visar konturritning av aktern. Med hjälp av dels dessa tre ritningar går det skapa en fungerande tredimensionell geometrisk modell över fartyget.



Figur 5-3 Konturritning av fören på M/S Visby

Informationen från dessa ritningar är dock kompletterad med generalarrangemangsritningar från ombyggnationen av bulben i stäven och sponsonen i aktern.



Figur 5-4 **Konturritning av aktern på M/S Visby**

6 FÖRANKRINGSSYSTEM

När fartyget ligger vid kaj är det vid hårt väder förtöjt med 8 förtöjningslinor enligt systemet i Figur 6-4. När fartyget lägger till spänns linorna med hjälp av vinschar ombord.

Linorna är av typen stålvastrar och är cirka 25 mm tjocka med en E-modul på 70 GPa. I ändarna av förtöjningslinorna sitter några meter syntetlina för att linorna ska kunna gå att hantera med händerna. Eventuell påverkan på linornas egenskaper på grund av dessa syntetändar tas inte hänsyn till. Linornas placering, längd och riktning i horisontalplanet presenteras i Tabell 6-1. Eftersom den vertikala styvheten från förankringssystemet är försumbar jämfört med den vertikala hydrostatiska styvheten är det inte intressant vilken riktning som linorna har i vertikalplanet. I Figur 6-1 och i Figur 6-2 kan man se förtöjningslinornas arrangemang.



Figur 6-1 Bilden visar de främre förtöjningslinornas arrangemang. Man kan även skymta fendrarnas placering längs med kajen.



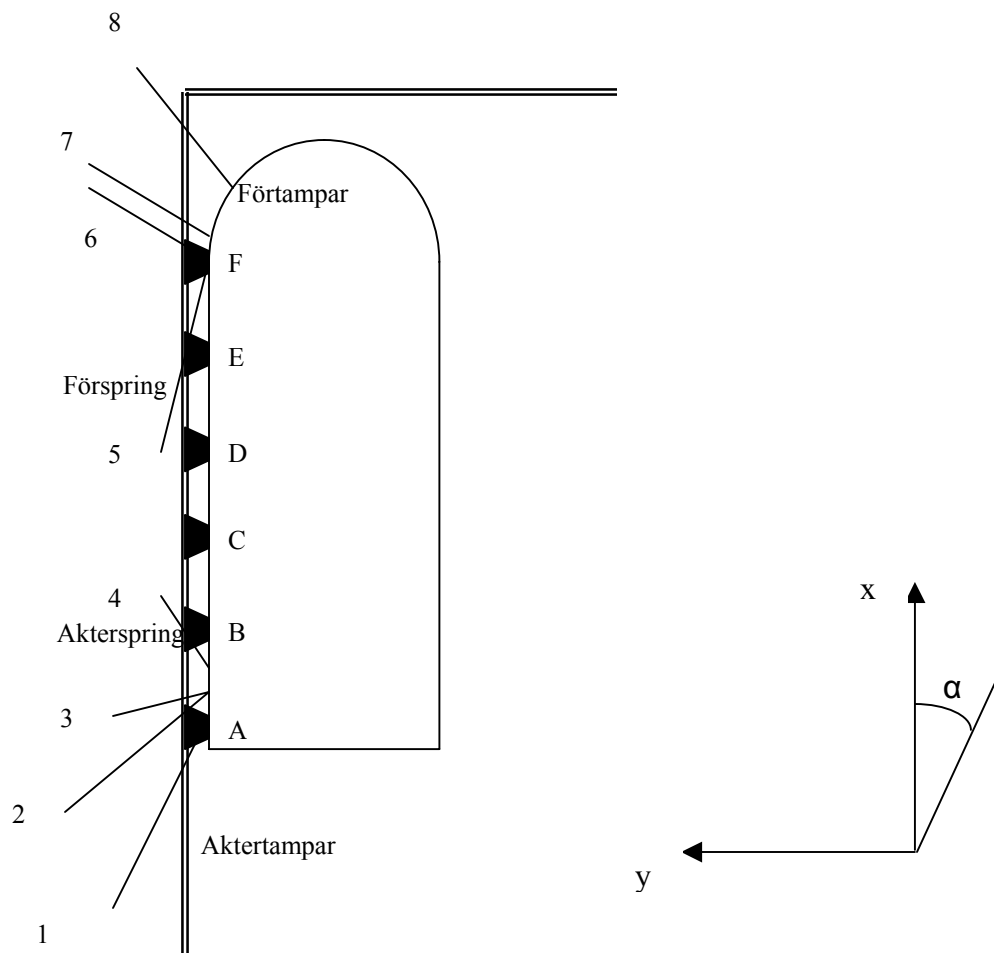
Figur 6-2 Bilden visar de bakre förtöjningarna på M/S Visby. På bilden kan man även se fendrarnas placering.

Färjan hålls ut från kajen av 6 fendrar som är placerade på kajväggen enligt Figur 6-4. Fendrarna är 1.45 meter djupa vilket gör att färjan i normalläget ligger 1.45 meter från kajen. Fendrarnas angreppspunkt mot fartyget redovisas i Tabell 6-2.

Varje fenderelement har en energiupptagning på 144 kNm och reaktionskraften kan vara upp till 423 kN. I Figur 6-3 visas hur fender C ser ut.



Figur 6-3 Bild visar fender C. Fendern är placerad strax för om mitten på fartyget.



Figur 6-4 – Principskiss över förankringssystemet och det tillhörande koordinatsystemet. Origo är definierat i centrum på båten, i vattenytan med z-axeln positiv uppåt. Tabell 6-1 innehåller de verkliga längderna på förankringslinorna, deras riktning och angreppspunkt på färjan. I Tabell 6-2 redovisas fendrarnas angreppspunkter på färjan.

Beteckning	α (grader)	Längd (m)	x-koordinat för angreppspunkt (m)	y-koordinat för angreppspunkt (m)	z-koordinat för angreppspunkt (m)
1	215	52,9	-49,45	12,0	8,7
2	230	39,5	-47,45	12,0	8,7
3	260	19,5	-47,45	12,0	8,7
4	345	13,1	-45,05	12,0	8,7
5	187	41,0	73,55	12,0	11,7
6	310	31,9	73,55	12,0	11,7
7	305	30,4	75,55	10,8	11,7
8	320	42,5	80,55	7,0	11,7

Tabell 6-1 Förtöjningslinornas längd, angreppspunkt på färjan och deras horisontella riktning, koordinatsystem enligt Figur 1-1.

Beteckning	x-koordinat för angreppspunkt (m)	y-koordinat för angreppspunkt (m)	z-koordinat för angreppspunkt (m)
A	-53,95	11,3	1,8
B	-28,45	12,0	1,8
C	-4,55	12,0	1,8
D	21,65	12,0	1,8
E	40,95	12,0	1,8
F	61,45	12,0	1,8

Tabell 6-2 Fendrarnas angreppspunkt på färjan, koordinatsystem enligt Figur 1-1.

7 MILJÖDATA

7.1 Signifikanta våghöjder och perioder

De signifikanta våghöjder (H_s) och tillhörande nollkorsningsperioder (T_z) som kommer att användas i beräkningarna har tagits fram med hjälp av färdiga diagram enligt Oceanografi (Sjöberg & Häggström, 1988). Vågorna förutsätts vara långkammiga i alla beräkningar.

De värden som tagits fram bygger på antaganden att stryklängden är 100 kilometer och vattendjupet 50 meter uppskattat från sjökort. Med stryklängd menas den sträcka där vågen kan växa till utan hinder. I detta fall är det hela sträckan från fastlandet på Sveriges östkust ut till Gotlands västkust där Visby ligger. Vattendjupet i detta område varierar naturligtvis men har alltså satts till 50 meter som verkar vara ett rimligt medeldjup.

I brist på korrekta väderdata kommer beräkningarna göras för ett antal olika vindhastigheter som får motsvara ett antal olika väder. Vindhastigheterna antas vara 15, 20, 25 och 30 meter per sekund. De vindhastigheter som används i beräkningarna är stora och motsvarar storm till orkanstyrka och det beror på att det är vid höga vindhastigheter som problem med för stora fartygsrörelser uppstår.

En faktor som kan påverka vågornas utseende men som inte tagits hänsyn till är uppgrundningen utanför hamnen. Uppgrundningen påverkar inte vågperioden men däremot våghöjden (Sjöberg 1998). Vid de djupförhållanden som gäller i detta fall kommer våghöjden att reduceras cirka 10 procent på grund av uppgrundningen.

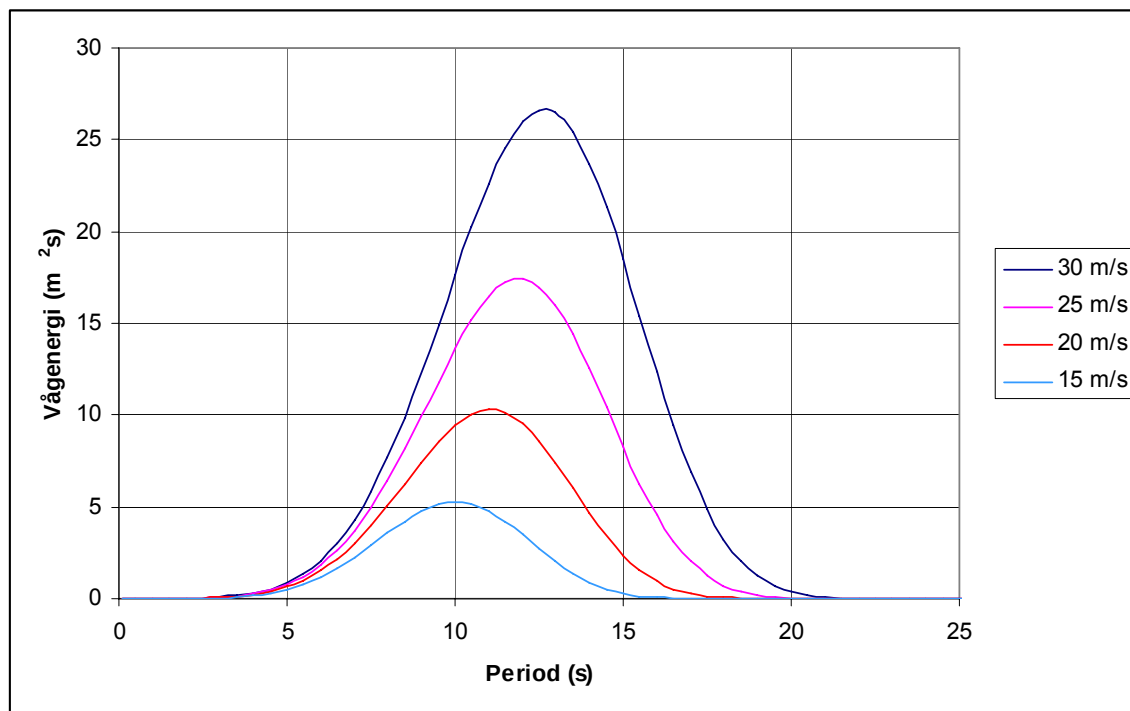
Följande värden på H_s och T_z har använts som ingångsdata.

Väder	1	2	3	4
Vindhastighet (m/s)	15	20	25	30
H_s (m)	2,42	3,23	4,04	4,85
T_z (s)	7,14	7,85	8,46	8,99

Tabell 7-1 Tabellen visar egenskaperna hos de vågor som går in i hamnen.

7.2 Vågspektrum

Vid vågberäkningarna i HWAVE har ISSC-spektrum använts. För utförligare beskrivning av spektrum hänvisas till teoriavsnittet. I Figur 7-1 visas vågspektrumen för de olika vädren i Tabell 7-1. Ur diagrammet kan man utläsa att vågor med perioder över 20 sekunder i stort sett inte återfinns i vågor som når hamnen. Inte heller vågor med period under 5 sekunder innehåller särskilt mycket energi.



Figur 7-1 Vågspektrum för sjöstillstånden i Tabell 7-1, ISSC-spektrum.

För att se hur vågspektrumen påverkas när de kommer in i hamnen hänvisas till kapitlet för vågmodelleringar.

8 VÅGMODELLERING

8.1 Programvara

HWAVE är ett program som används för att analysera vågor i hamnar (Dynomar, 1995). Programmet, som kan användas för att analysera både regelbundna och oregelbundna vågor, består av två olika moduler, Hsolv och Hwave. Programmet baseras på potentialteori som beskrivits i teoriavsnittet.

8.1.1 Hsolvmodulen

I modulen Hsolv löses Laplace' differentialekvation för de randelement som definieras i indatafilen. Hsolv arbetar enbart med regelbundna vågor. Varje angiven våglängd ger en unik lösning. Detta ger varje element en potential för varje våglängd.

8.1.2 Hwavemodulen

I modulen Hwave sammanställs resultaten från Hsolv. För att få ut våghöjd och vågperiod i en viss punkt adderas potentialerna från de olika elementen i denna givna punkt.

Här utförs även den oregelbundna analysen som baseras på resultaten från den regelbundna analysen. Vågor med olika våglängd tas från den regelbundna analysen och kombineras för att skapa oregelbundna vågor, se teoriavsnitt.

8.2 Indata

8.2.1 Vågdata

Vågorna som går in i hamnen är de som redovisas i kapitel 7 Miljödata.

8.2.2 Geometri

I indatafilen till Hsolv definieras hamnens geometri. Geometrin redovisas genom punkter som binds ihop till den rand som begränsar hamnen. Avståndet mellan två punkter kan delas in i mindre element för vilka randvillkor slutligen anges.

Beräkningarna har gjorts för två geometrier. Den ena beräkningen med det nuvarande vågskyddet som är i hamnen och den andra beräkningen då den yttre vågbrytaren är något förlängd. Förlängningen har ungefär den sträckning som Visby hamn från början tänkte sig då de planerade att bygga ut vågskyddet i hamnen

8.2.3 Randvillkor

Randvillkoren, som anges i anslutning till geometrin i indatafilen till Hsolv, har beräknats enligt den metod som visas i teoriavsnittet. Hamnen är begränsad av kajer och vågbrytare. Kajerna är uppbyggda av spontad korrugerad plåt och vågbrytarna består främst av sprängsten. Den korrugerade plåten reflekterar nästan all inkommande vågenergi medan sprängstenen dämpar stor del av de inkommande vågorna.

	α_1	α_2
--	------------	------------

Tabell 8-1 Reflektionskoefficienterna för kajerna i Visby hamn

Fördelningen av materialet i kajerna är inte helt känd, men Figur 8-1 visar vilket material de olika kajerna antas bestå av.



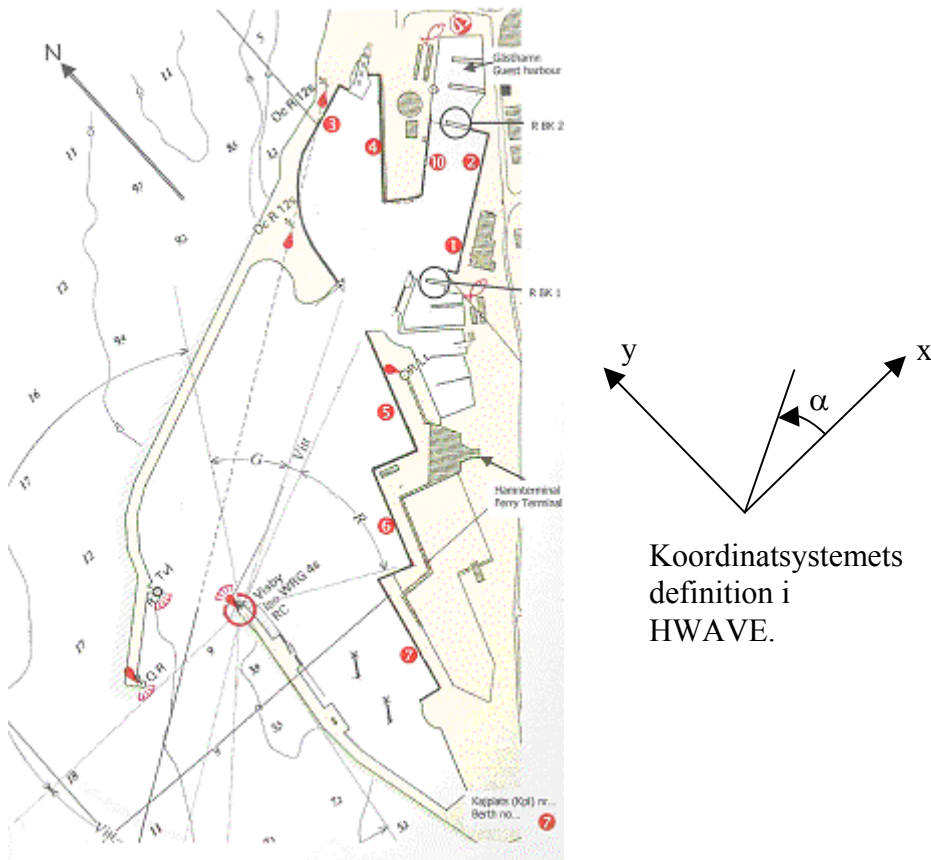
definieras på detta sätt beror på att kajen finns med i Wamit där hänsyn tas till reflektion från dessa.

8.2.4 Vågriktningar

Vågriktningar anges som indata till Hsolv. Alla vågriktningar kommer inte att gå in i hamnen. Hamninloppets utformning och kustlinjens form medför att vågor med västlig till sydvästlig riktning är de enda som går in i hamnen och är därför de enda som behöver tas med i modelleringen. I det koordinatsystem som gäller för HWAVE kommer de vågor som blir aktuella att ligga från 0 till 40 grader med den nuvarande utformningen.

Vågornas riktning anges som en vinkel från X-axeln enligt Figur 8-2. X-axeln ligger i rakt väst-östlig riktning.

Efter en eventuell utbyggnad av vågskyddet, där den norra vågbrytaren förlängs, kommer de möjliga vågriktningarna att ligga mellan 20 och 40 grader.



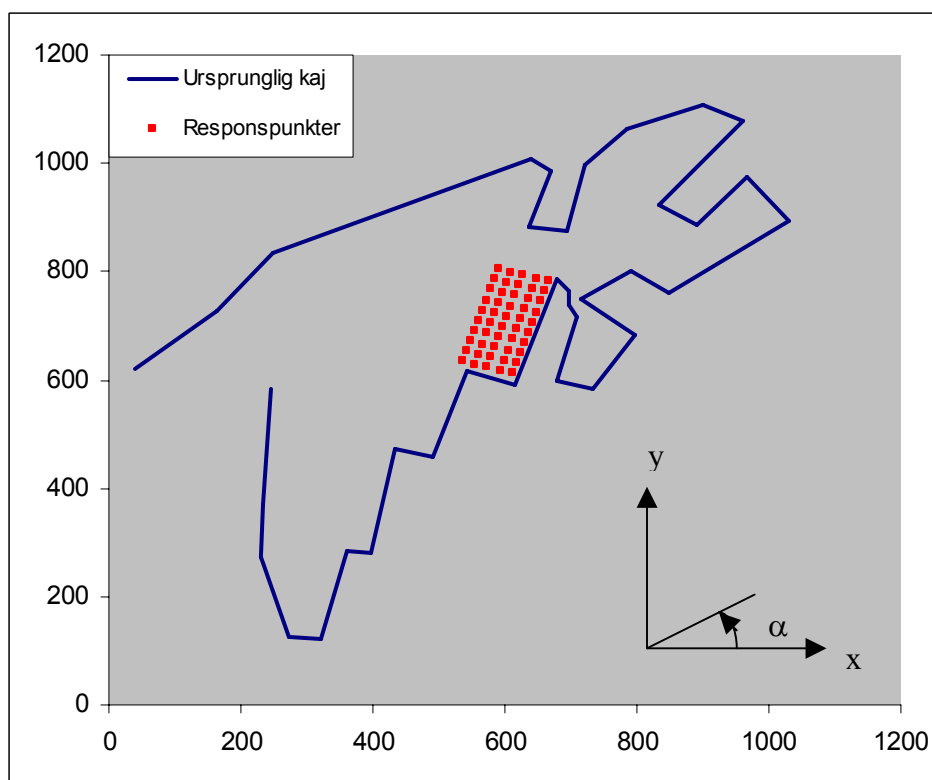
Figur 8-2 Hamnen och det gällande koordinatsystemet för beräkning i HWAVE.

8.3 Beräkningar i HWAVE

HWAVE har körts för två olika utformningar på hamnen. Den ena utformningen är den nuvarande och den andra är med en liten utbyggnad av en vågbrytare.

8.3.1 Beräkning med nuvarande geometri

I den första modelleringen är målet att få en uppfattning om våghöjderna i hamnen med den nuvarande utformningen. Resultatet härifrån kommer att användas för att ta fram fartygsrörelserna i Postwam.



Figur 8-3 Geometri över den ursprungliga hamnen.

8.3.2 Resultat med nuvarande geometri

Resultaten presenteras i Tabell 8-2. H_{s1} och T_{z1} beskriver egenskaper hos de vågor som erhålls vid kajen.

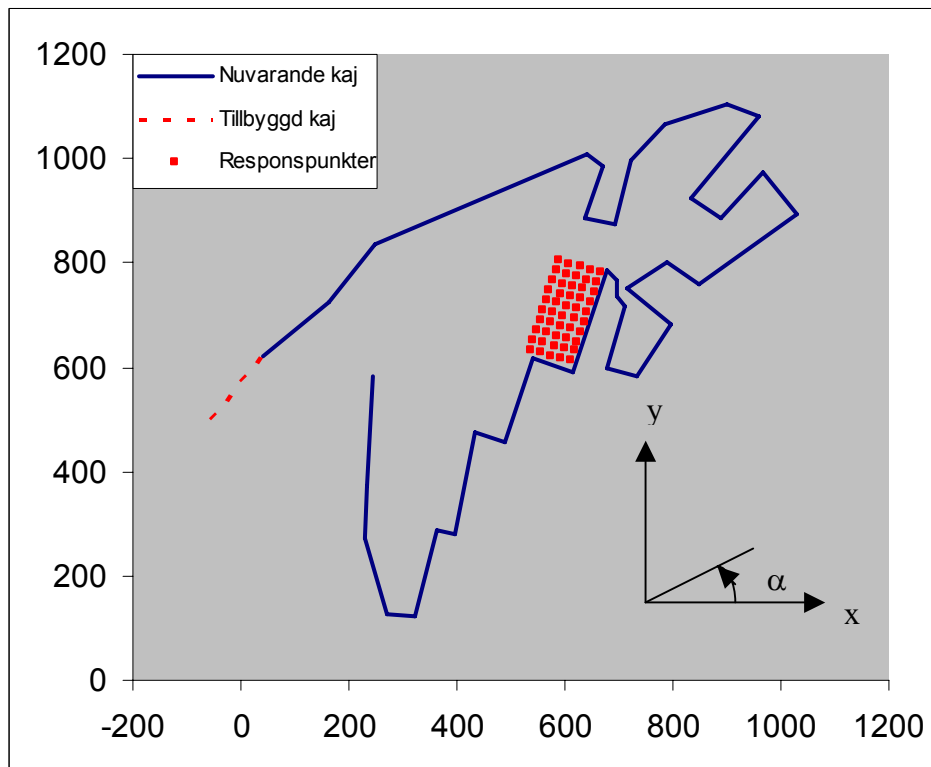
Resultaten är ett medelvärde av 50 responspunkter i det område av hamnen där fartyget ligger. Detta har gjorts för att få ett representativt värde. Tabellen innehåller även de värden som använts för de vågor som kommer in i hamnen, $H_{s,in}$ och $T_{z,in}$.

Infallsvinkel	$H_{s,in}$ [m]	$T_{z,in}$ [s]	H_{s1} [m]	T_{z1} [s]	$H_{s1}/H_{s,in}$
5	2,42	7,1	1,21	3,17	0,50
	3,23	7,8	1,40	3,53	0,43
	4,04	8,5	1,55	3,84	0,38
	4,85	9,0	1,69	4,12	0,35
15	2,42	7,1	1,54	3,66	0,64
	3,23	7,8	1,81	4,02	0,56
	4,04	8,5	2,02	4,31	0,50
	4,85	9,0	2,21	4,56	0,46
25	2,42	7,1	1,38	4,03	0,57
	3,23	7,8	1,68	4,59	0,52
	4,04	8,5	1,91	5,03	0,47
	4,85	9,0	2,11	5,41	0,44
35	2,42	7,1	1,01	3,77	0,42
	3,23	7,8	1,24	4,58	0,38
	4,04	8,5	1,43	5,30	0,35
	4,85	9,0	1,59	5,98	0,33
40	2,42	7,1	0,76	3,80	0,31
	3,23	7,8	0,95	4,53	0,29
	4,04	8,5	1,11	5,13	0,27
	4,85	9,0	1,24	5,66	0,26

Tabell 8-2 Resultat för nuvarande geometri för olika infallsvinklar och för olika våghöjder in i hamnen.

8.3.3 Beräkning efter ombyggnad av vågskyddet

Här är syftet att undersöka om en utbyggnad av hamnen där vågbrytaren förlängs ger någon reducering av våghöjderna inne i hamnen och därmed också mindre fartygsrörelser. Utbyggnaden innebär att den norra vågbrytaren förlängs i sydvästlig riktning. Detta medför att vågor från väst och väst sydväst inte kan gå rakt in i hamnen. Med denna förlängning kommer hamnen att få det utseende som var avsikten när den byggdes. Anledningen till att piren inte byggdes ut till sin fulla längd var att de ekonomiska medlen sinade.



Figur 8-4 Geometri för hamnen efter utbyggnad av vågskyddet.

8.3.4 Resultat efter ombyggnad av vågskyddet

Resultatet från vågberäkningarna för den utbyggda hamnen presenteras i Tabell 8-3. H_{s2} och T_{z2} beskriver vågorna vid kajen.

Infallsvinkel	$H_{s,in}$ [m]	$T_{z,in}$ [s]	H_{s2} [m]	T_{z2} [s]	$H_{s2}/H_{s,in}$
20	2,42	7,1	0,71	2,71	0,29
	3,23	7,8	0,8	3,11	0,25
	4,04	8,5	0,87	3,50	0,22
	4,85	9,0	0,93	3,88	0,19
25	2,42	7,1	0,85	3,13	0,35
	3,23	7,8	0,99	3,45	0,31
	4,04	8,5	1,10	3,73	0,27
	4,85	9,0	1,19	3,96	0,25
30	2,42	7,1	0,96	2,78	0,40
	3,23	7,8	1,08	3,26	0,33
	4,04	8,5	1,18	3,73	0,29
	4,85	9,0	1,26	4,21	0,26
35	2,42	7,1	0,85	3,89	0,35
	3,23	7,8	1,02	4,49	0,32
	4,04	8,5	1,16	4,99	0,29
	4,85	9,0	1,27	5,41	0,26
40	2,42	7,1	0,77	4,41	0,32
	3,23	7,8	0,95	5,08	0,29
	4,04	8,5	1,09	5,60	0,27
	4,85	9,0	1,22	6,03	0,25

Tabell 8-3 Resultat med ombyggt vågskydd för olika infallsriktningar i hamnen och för olika våghöjder in i hamnen.

8.3.5 Jämförelse av resultat

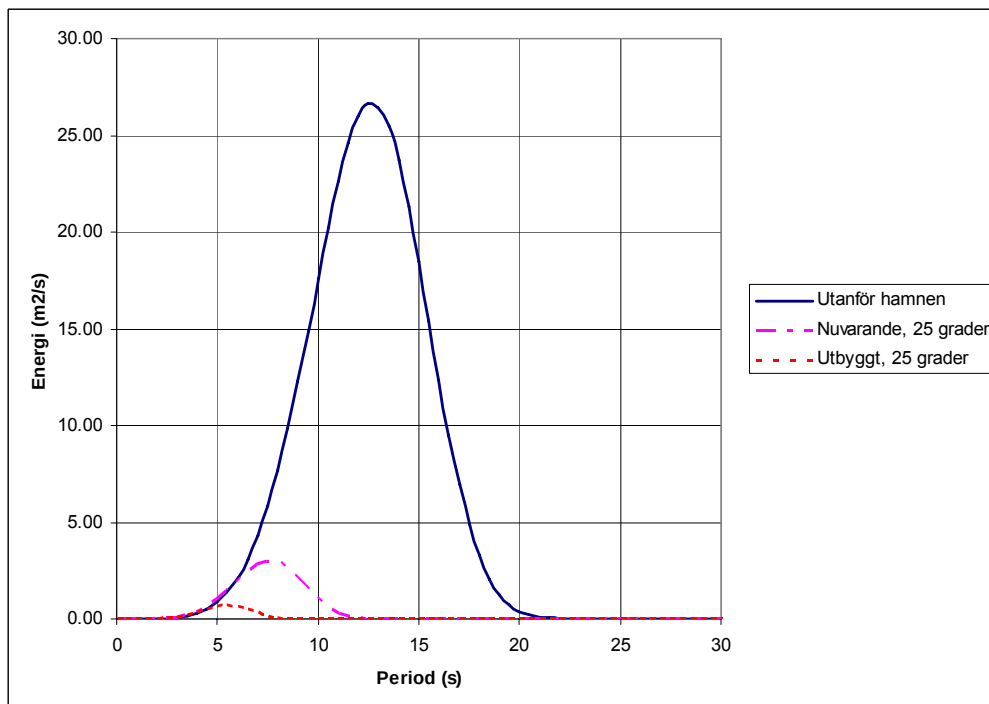
Det är naturligtvis intressant att jämföra resultaten från de båda beräkningarna. Det finns tre vågriktningar som är gemensamma för de båda körningarna. Det visar sig att en utbyggnad av vågbrytaren generellt sett ger lägre våghöjder i hamnen. Särskilt stora är skillnaderna när vågriktningen in i hamnen är 25 grader. Det beror på att endast ett väldigt smalt band med vågor kan ta sig in med det utbyggda vågskyddet vid denna infallsvinkel. Med det nuvarande vågskyddet tillåts ett bredare band och därmed också mer energi att ta sig in i hamnen. När infallsvinkeln växer blir skillnaden på vågbanden mindre. Detta återspeglas också i våghöjderna som närmar sig varandra för de båda utformningarna.

Infallsvinkel	$H_{s,in}$ [m]	$T_{z,in}$ [s]	H_{s1} [m]	T_{z1} [s]	H_{s2} [m]	T_{z2} [s]
25	2,42	7,1	1,38	4,03	0,85	3,13
	3,23	7,8	1,68	4,59	0,99	3,45
	4,04	8,5	1,91	5,03	1,10	3,73
	4,85	9,0	2,11	5,41	1,19	3,96
35	2,42	7,1	1,01	3,77	0,85	3,89
	3,23	7,8	1,24	4,58	1,02	4,49
	4,04	8,5	1,43	5,30	1,16	4,99
	4,85	9,0	1,59	5,98	1,27	5,41
40	2,42	7,1	0,76	3,80	0,77	4,41
	3,23	7,8	0,95	4,53	0,95	5,08
	4,04	8,5	1,11	5,13	1,09	5,60
	4,85	9,0	1,24	5,66	1,22	6,03

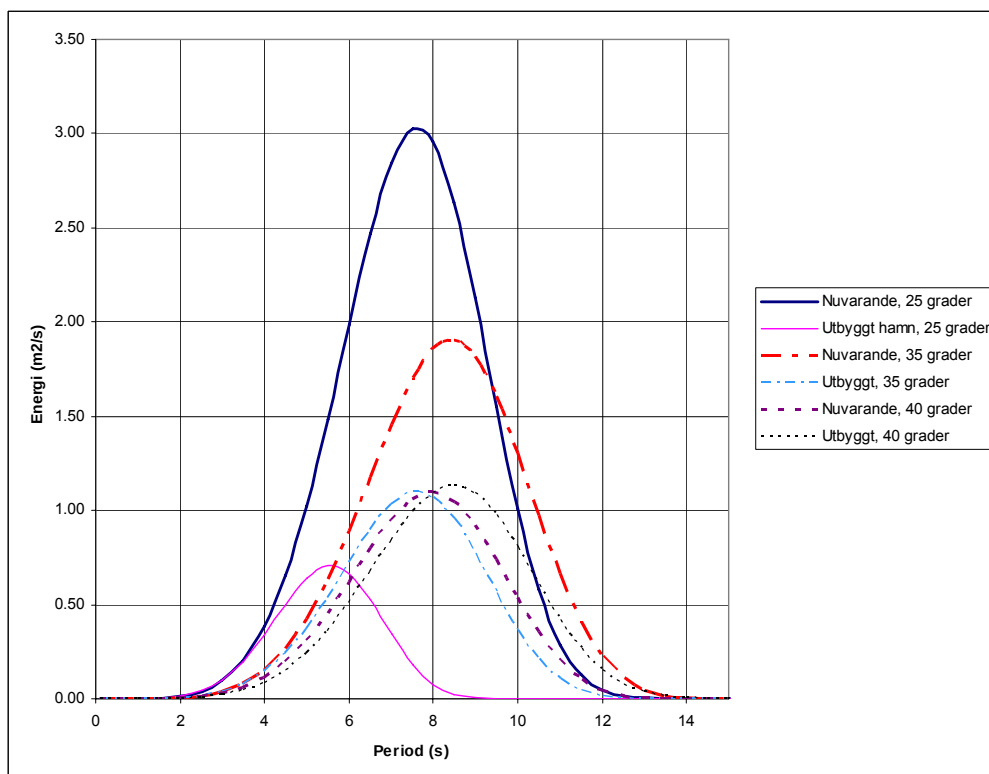
Tabell 8-4 Jämförelse av vågberäkningar

Det är även intressant att jämföra vågspektrum för vågorna som kommer in i hamnen med vågorna vid kaj 5, både före och efter utbyggnad. Figur 8-5 visar den markanta skillnad i energi som vågorna visar utanför hamnen och den energi vågorna har när de kommer in till kaj 5.

En jämförelse av vågspektrumen före och efter utbyggnad av vågskyddet visar tydligt på effekterna av ökat vågskydd. I Figur 8-6 ser man hur energin i vågorna minskar med infallsvinkeln för den befintliga hamnen, för den utbyggda ökar energin med infallsvinkeln. Energin är lägre för den utbyggda hamnen för alla riktningar förutom för 40 grader då energin är i princip samma för de två alternativen.



Figur 8-5 Vågspektrum för vågorna utanför hamnen och inne vid kaj 5, före respektive efter utbyggt vågskydd. Exemplet är för ett väder med en vindhastighet på 30 m/s.



Figur 8-6 Vågspektrum för vågorna inne i hamnen vid kaj 5, före respektive efter utbyggnad vågskydd. Exemplet är för ett väder med en vindhastighet på 30 m/s.

8.4 Slutsats från vågberäkningarna

För 25° och 35° kommer mindre energi kommer att ta sig in i hamnen. Detta yttrar sig i lägre våghöjder. När det gäller 40° är energin som tar sig in i hamnen nästan lika för de båda alternativen. Därför kommer inte heller våghöjderna att skilja sig så mycket från varandra.

9 RÖRELSEBERÄKNING

9.1 Programvara

9.1.1 WAMIT

För beräkning av responsen på fartyget används radiations- och diffraktionsprogrammet WAMIT (MIT, 2001). Programmet används för linjär analys av förhållandet mellan ytvågor och flytande strukturers rörelser i vågor. För beräkningarna kräver WAMIT en panelmodell.

I WAMIT kan man utnyttja symmetri hos den flytande kroppen, det vill säga i vårt fall med ett enkelsymmetriskt fartyg behöver panelmodellen bara visa ena halvan av båten, eftersom man för den andra halvan kommer få samma potentialer. Följden blir en optimering av användandet av lagrings- och minnesmöjligheter och en förkortning av beräkningsförfarandet. Detta gäller dock bara för beräkningarna ute på öppet vatten, vid beräkningarna intill kajen blir den totala modellen inte symmetrisk eftersom det då ingår en kaj på babord sida.

WAMIT består av två subprogram, FORCE och POTEN. POTEN löser ut hastighetspotentialerna på fartygskroppen och ränderna för angivna moder, frekvenser och infallsvinklar på vågorna. POTEN beräknar även den hydrodynamiska matrisen och dämpningsmatrisen.

FORCE beräknar globala kvantiteter inklusive hydrodynamiska koefficienter, rörelser samt första och andra ordningens krafter.

I FORCE görs den regelbundna analysen. Beräkningen görs för en period i taget vilket gör att responskurvor kan fås fram, så kallade RAO-kurvor, se vidare under regelbunden analys.

Ekvationerna löses för 7 fall – ett för infallande vågor på kropp som ligger stilla och vardera ett då båten rör sig i respektive frihetsgrad, se vidare kapitel 2 Teoriavsnitt.

9.1.1.1 POSTWAM

POSTWAM är ett efterbehandlingsprogram till WAMIT framtaget av Caran. Resultaten från WAMIT används som indata tillsammans med vågspektrum.

I POSTWAM utförs den oregelbundna analysen, alltså analysen för verkliga sjöstillstånd, genom att multiplicera vågspektrum med transferfunktionerna från den regelbundna analysen.

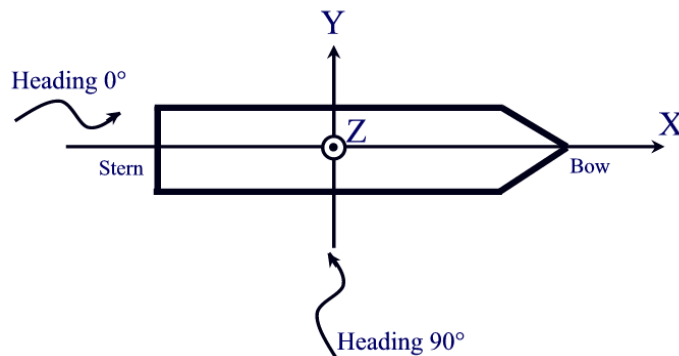
9.1.2 MIMOSA

Förankringssystemets bidrag till rörelserna hos fartyget i form av en styvhetsmatris beräknas i programmet MIMOSA (MARINTEK, 1995). MIMOSA har möjligheten att

även beräkna rörelserna hos fartyget, men den funktionen är inte använd i den här analysen.

9.2 Koordinatsystem

I WAMIT är koordinatsystemet definierat med origo i vattenytan i centrum av fartyget. Axlarna är definierade som i Figur 9-1, det vill säga x är positiv framåt, y positiv åt babord sida och z är positiv uppåt. RAO:n och globala rörelser är alltid redovisade för origo.



Figur 9-1 Definition av koordinatsystemet i rörelseberäkningen.

9.3 Indata

WAMIT kan hantera vertikala väggar, dock kan de inte göras med begränsad utbredning utan måste ses som oändligt långa. Detta medför att det kan vara svårt att få korrekta värden med korta kajer.

9.3.1 Förankring

MIMOSA har använts för att ta fram en styvhetsmatris som beskriver förankringarna. Antalet förankringar varierar beroende på vädersituationen. Här har beräkningarna i MIMOSA gjorts för åtta förankringspunkter, alla på babord sida om fartyget.

Förtöjningarna sitter med varierande vinkel mot kajen. Fartyget hålls ut från kajen med hjälp av sex stycken fendrar på babord sida. Dessa har modellerats som linor riktade ut från kajen. Varken linorna eller fendrarna uppvisar i verkligheten linjära egenskaper. För att kunna använda styvheten från förtöjningarna i WAMIT krävs dock att de antas vara linjärt elastiska.

Förtöjningslinorna är av stål och har en diameter på 25 mm. Änden på förtöjningslinorna är i verkligheten av polyester men antas ha försumbar inverkan på systemets styvhet.

Fendrarna approximeras med långa linor så att styvheten i x-led blir så liten som möjligt. Förtöjningssystemet har i verkligheten olika styvheter i positiv och negativ y-riktning. Detta kan inte heller hanteras i Wamit vilket gör att ett medelvärde på styvheten hos fendrarna och styvheten hos förankringslinorna måste användas.

9.3.2 *Massdata*

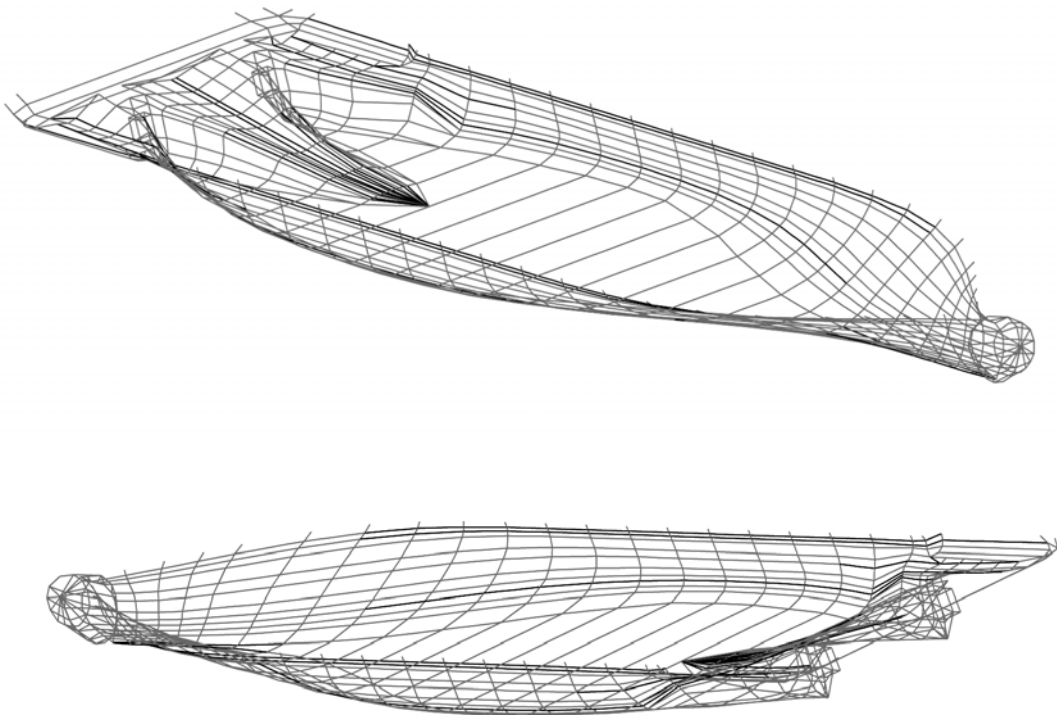
Massmatrisen beräknas för hand utifrån massfördelning på fartyget. Massfördelningen har tagits fram från data för light-ship, det vill säga olastat fartyg. Det har sedan kombinerats med data från lastfördelning, ballasttankar, bränsletankar och övriga tankar för vanlig operationskondition.

9.3.3 *Geometri*

Fartygets undervattensskropp definieras i programmet ANSA. Programmet bygger upp en panelmodell utifrån de punkter på skrovet som lagts in. Punkter på skrovet läggs in manuellt från spantschema över fartyget. Punkterna binds ihop till linjer och sedan ytor. Resultatet blir en tredimensionell struktur. I ANSA delas geometrin in i paneler.

Panelernas diagonal bör enligt Chang-Ho Lee på Massachusetts Institutet of Technology vara mindre än dubbla avståndet till närmsta rand (botten, kajväggen) i modelleringen för att få resultaten ska kunna uppnå konvergens.

Ett visst fel för fartygets volym kan uppstå då fartygets böjda skrov approximeras med raka linjer. Vid beräkningarna är det dock viktigt att volymen på displacementet är korrekt, annars får man en resulterande kraft och en förskjutning i z-led redan från start. För att få helt korrekta volymer är därför längd- och breddskalan något justerade manuellt tills rätt volym har uppnåtts.



Figur 9-2 Den panelindelade fartygskroppen. Endast skrovet under vattenytan.

9.3.4 Vågspektrum

Responsen hos fartyget beräknas för ett antal regelbundna vågor vilka sedan kombineras för beräkning av oregelbundna vågor i ett ISSC-spektrum (se vidare under teoridelen). Perioder upp till 33 sekunder har tagits med i beräkningarna. Vågperioderna i hamnen varierar mellan 2 och 6 sekunder vid de väder som valts. Till varje medelvågperiod korresponderar även en signifikant våghöjd (se vidare under hamnberäkningen).

Medelvågperioden har här antagits vara samma som nolluppkryssningsperioden vilken används med den beräknade signifikanta våghöjden för att ta fram ISSC-spektrumet. Spektrumet tas fram för fyra valda väder.

9.3.5 Vågornas infallsvinkel mot fartyget

Eftersom det i programmet Hwave inte går att få fram vågornas riktning måste istället en ingenjörsmässig bedömning göras av dessa. Utifrån möjliga infallsvinklar i hamnen kan man förutse hur de huvudsakliga infallsriktningarna mot båten kommer att bli. Vågorna antas sprida sig från öppningen av hamnen (US Army, 1984). De största vågorna som träffar fartyget är de som kommer direkt från hamninloppet utan att reflekteras mot någon kaj.

För aktuella infallsvinklar i hamnen redogörs i kapitlet om Vågberäkning.

9.3.6 Randvillkor

Fartyget ligger i verkligheten i ett hörn mellan två kajer. I Wamit kan man dock endast lägga in dessa randvillkor i form av oändligt långa vertikala väggar. Beräkningar har gjorts då fartyget ligger vid en respektive två kajer. Problem med resultaten uppstod för två kajer vilket gjorde att vi förlitade oss mer på resultat från en kaj (kapitel 9.4.5 Verifiering med två kajer).

9.3.6.1 Placering vid kaj

Fendrarna placerade längs kajen håller fartyget på ett avstånd av ca 1,5 meter från kajen. Fartyget ligger med babord sida in mot kaj. I de körningar där båten ligger i ett hörn av två kajer ligger fartyget med en kaj 1,5 meter framför stäven. Se Figur 6-4.

9.3.6.2 Vattendjup

WAMIT kräver konstant vattendjup för att kunna räkna. Vattendjupet är approximerat till att vara konstant. I hamnen varierar vattendjupet egentligen mellan 5 och 9 meter. Vid kajplats 5 där M/S Visby ligger är vattendjupet 7 m.

Verifieringskörningar är även gjorda vid kaj och för öppet vatten där vattendjupet är 100 meter. Verifieringen görs genom att köra fall där responsen kan förutspås och sedan jämföras med resultaten från körningarna.

9.4 Regelbunden analys – verifiering av modell

9.4.1 Allmänt

Den regelbundna analysen görs för att verifiera att modellen är korrekt. Det är i den senare oregelbundna analysen som de verkliga resultaten erhålls. Det är endast i den regelbundna analysen som man kan göra några korrekta jämförelser av responser med andra modellerade fartyg. Räknar man på oregelbundna vågor får man olika responser beroende på vilka miljödata som man använder och en vettig jämförelse blir därför svår.

Att verifiera modellen utifrån den regelbundna analysen är även lämpligt eftersom det är relativt enkelt att göra en del kontrollberäkningar för hand som ska stämma med RAO-kurvorna, exempelvis egenperioder (se vidare kapitel 9.4.3 Verifiering på öppet vatten).

Från den regelbundna analysen erhålles så kallade RAO:n (Response Amplitude Operators) för varje enskild period T_z . RAO är en transferfunktion, vilken beskriver förhållandet mellan vågamplituden och responsamplituden hos fartyget för respektive frihetsgrad. För att få den verkliga rörelsen i ett visst sjöstillstånd multipliceras RAO:n alltså med den infallande våghöjden. Responserna har följande enheter:

Surge, sway, heave: m/m

Roll, pitch, yaw: grader/m

Verifieringen görs med ett antal olika körningar. De körningar som är gjorda redovisas i Tabell 9-1.

Nummer	Placering av fartyg	Vattendjup (m)	Förankring
1	Fritt på öppet vatten	100	Nej
2	Fritt på öppet vatten	10	Nej
3	Längs med 1 kaj	100	Nej
4	Längs med 1 kaj	7	Nej
5	I ett hörn av 2 kajer	100	Nej
6	I ett hörn av 2 kajer	7	Nej

Tabell 9-1 Sammanställning av verifieringskörningar

Vid samtliga placeringar av fartyget görs 2 modelleringar, den ena med stort vattendjup, 100 meter och den andra med grunt vattendjup, 10 meter eller 7 meter. Vertikala hastigheten vid botten är noll, vilket är ett randvillkor. Detta kommer att medföra att vattendjupet spela stor roll för de RAO-kurvor som man får fram. Därför är det av största vikt att prova flera vattendjup för att se hur stor påverkan vattendjupet egentligen har.

Vid oändligt stort vattendjup fås ingen påverkan från botten och vattnet kommer i princip att röra sig i cirkulära rörelser. Vid ett litet vattendjup kommer botten påverka vågorna så att vattnet kommer få mer elliptiska rörelser, alltså kommer vattnet röra sig mer i sidled än i vertikalled och därmed kommer även fartyget att röra sig mera i horisontalled. Vid körning på 100 meters erhålls inga störningar från botten upp till perioder på 8 sekunder, därför ska resultaten från perioder över denna betraktas med viss försiktighet. Dock går

det att med linjär vågteori räkna om rörelserna från djupt vatten till grundare vatten (se 2.1.1 Regelbundna vågor).

Till att börja med görs beräkningar på öppet vatten utan några vertikala ränder närvarande, det vill säga utan några kajer. I det andra steget införs en vägg i modellen som symboliserar kajen på färjans babordsida. Det tredje steget blir att lägga till ännu en kaj, vinkelrät mot den första, som placeras framför fartyget. I beräkningarna går det endast att lägga in oändligt långa kajer, därför är det viktigt att undersöka rimligheten i resultaten med dessa närvarande, särskilt när man lägger fartyget i ett hörn av två oändligt långa kajer. I verkligheten ligger M/S Visby med en lång kaj på babord sida och med en kaj något bredare än färjan framför stäven. Utifrån resultaten från beräkningarna med regelbundna vågor bestäms sedan vilken av varianterna som anses ge de resultat som bäst överensstämmer med verkligheten och därmed vilken variant som ska användas i beräkningarna med oregelbundna vågor.

Körningarna vid kajen har gjorts vid flera avstånd från kajerna. Detta för att kontrollera att inga orimliga randeffekter från de vertikala väggarna uppstår.

Alla regelbundna beräkningar görs utan förtöjningar.

De vinklar som förekommer i diagrammen (headings) är baserade på det koordinatsystem som presenteras på Figur 9-1 och representerar vågornas infallsvinkel mot fartyget.

9.4.2 Verifieringskriterier

Från resultaten av den regelbundna analysen kan man göra en rad rimlighetsbedömningar.

Till att börja med kan egenperioderna kontrolleras. På RAO-kurvorna bör man få en peak vid respektive egenperiod. Rörelserna i surge och sway bör bli störst när vågorna faller in rakt akterifrån respektive rakt från sidan. Detta gäller modelleringar med en kaj eller helt utan kajer. Att förutspå vilka infallsvinklar som ger de största rörelserna i modelleringar med två vinkelräta kajer är betydligt svårare.

Eftersom RAO-kurvorna beskriver förhållandet mellan infallande vågs amplitud och responsamplituden för fartyget bör RAO-kurvan gå mot 1 i surge, sway och heave för långa perioder på öppet vatten, det vill säga att fartyget följer med rörelsen hos vågen. Då fartyget ligger vid en kaj får man stående vågor mot kajen vilket betyder att den egentliga vågamplituden vid kajen blir dubbelt så stor som den infallande vågens amplitud. Detta bör även avspglas i responsen hos fartyget och RAO-kurvan i heave bör därför gå mot 2 för långa perioder då fartyget ligger vid kaj.

Vågens längd i skeppets längsriktning styr var pitchkurvan ligger någonstans. För vågor rakt framifrån blir denna våglängd samma som den infallande vågens våglängd och för en våg med infallsvinkeln α blir denna våglängd $L \cdot \cos(\alpha)$. Man kan säga att den våglängden fartyget upplever blir kortare än den infallande vågens våglängd. Detta gör att pitchkurvan blir förskjuten åt höger ju större infallsvinkel α man har. Heavekurvan

stys av vågens längd i den riktning där fartyget är smalast, vilket ger ett omvänt förhållande gentemot pitchkurvan.

Rörelserna i roll och pitch bör gå mot noll för långa perioder, eftersom brantheten (lutningen per våghöjd) på vågorna avtar.

Yaw-rörelsen bör vara minimal för vågor som kommer rakt akterifrån eller rakt framifrån eftersom fartyget är symmetriskt kring längsaxeln. Yaw-rörelsen kommer inte heller vara speciellt stor för vågor som kommer rakt från sidan eftersom båten i stort sett är symmetrisk i denna riktning.

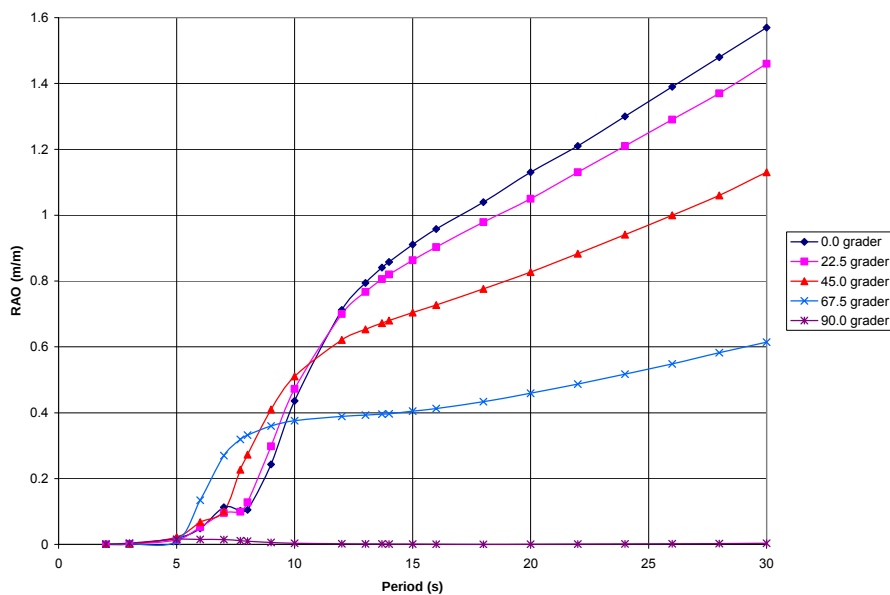
9.4.3 Verifiering på öppet vatten

I den första modellen ligger M/S Visby oförtöjd på öppet vatten. Målet med denna beräkning är att få en så ostörd modell som möjligt där det går att förutse fartygets beteende för olika perioder.

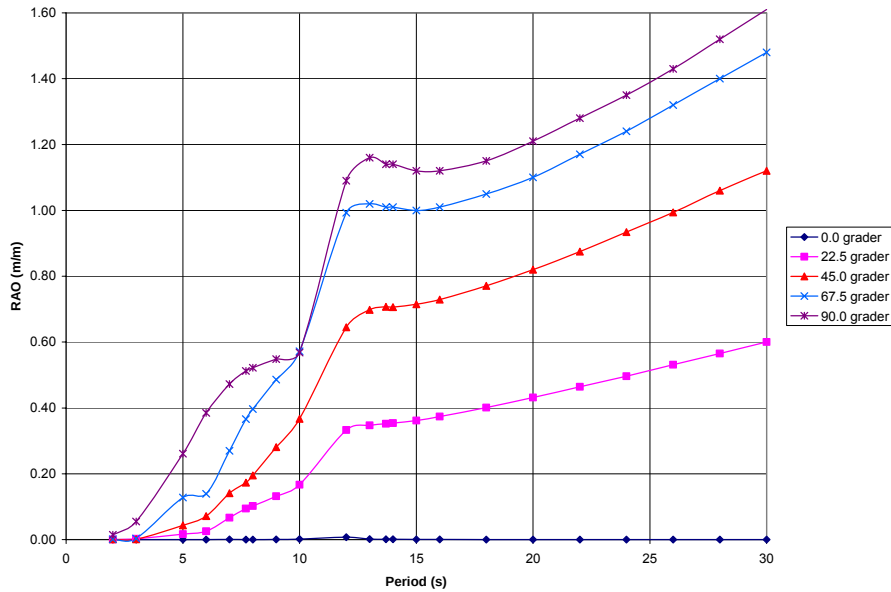
9.4.3.1 Vattendjup 100 meter

RAO i surge och sway (se Figur 9-3 och Figur 9-4) blir som mest 1,6, detta för långa perioder. Att surge och sway rörelserna inte går mot 1 som var förväntat antas bero på att vattendjupet är för grunt. Vattnet går alltså i elliptiska banor för långa perioder vilket ger utslag i de horisontella frihetsgraderna. En överslagsberäkning på hur vattnet rör sig i horisontalled enligt vågteorin för regelbundna vågor på sidan 11 för ett vattendjup på 100 meter och en period på 30 sekunder visar att den horisontella amplituden blir 1,6 meter om våghöjden är 1,0 meter, vilket visar att resultaten är korrekta.

Surge blir störst när vågorna kommer rakt framifrån (0 grader) och sway antar sina största värden när vågorna kommer rakt från sidan (90 grader) vilket är korrekt.



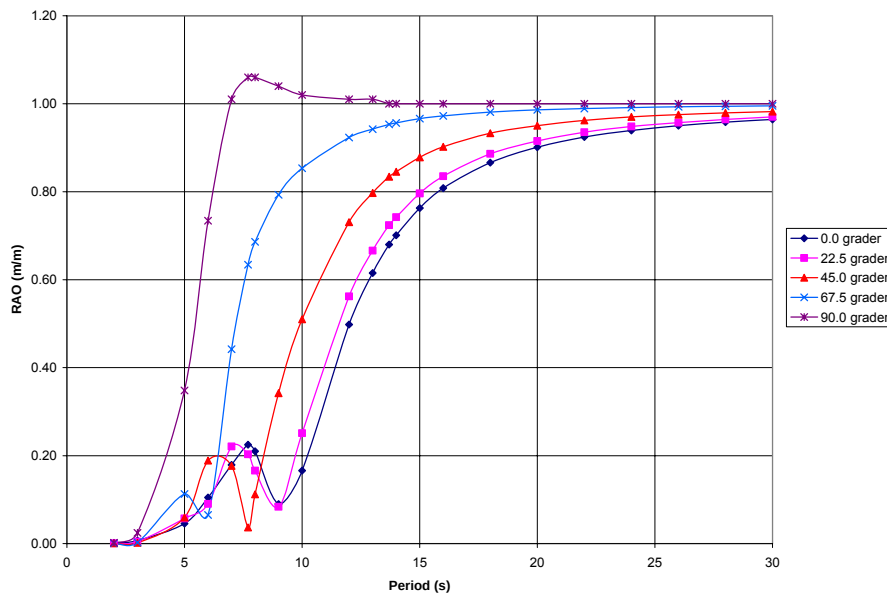
Figur 9-3 RAO för surge, öppet vatten, vattendjup 100 meter.



Figur 9-4 RAO för sway, öppet vatten, vattendjup 100 meter

Den vertikala responsen, heave, närmar sig 1 när vågperioden växer för samtliga infallsvinklar (se Figur 9-5). Detta kan förväntas eftersom det innebär att fartyget följer med i vågrörelsen och kan alltså ses som en verifikation på att modellen fungerar. För vågor med större infallsvinkel går responsen snabbare mot 1 vilket stämmer med teorin om våglängderna som fartyget upplever (se kapitlet Verifikationskriterier).

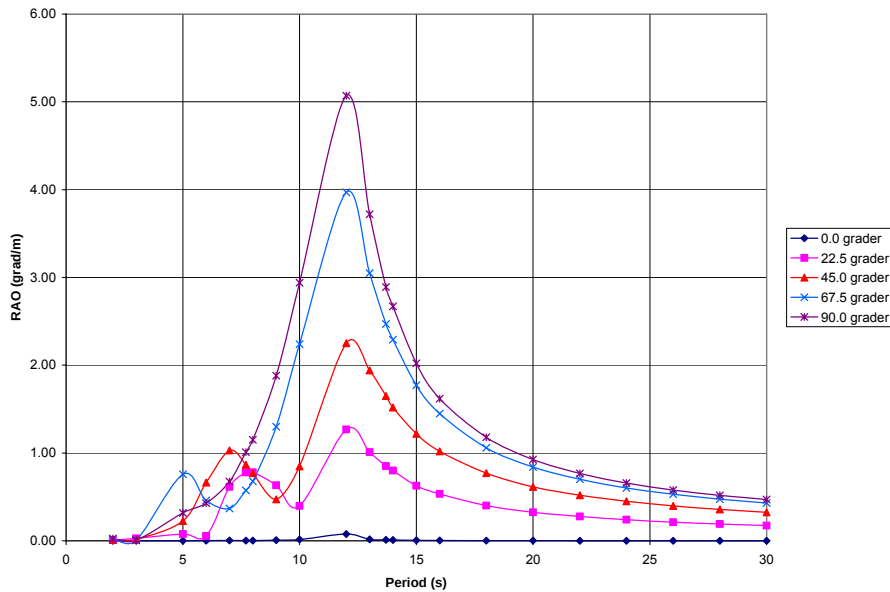
Egenperioden (6,8 sekunder) syns i responserna då heavekurvan får en peak i närheten av denna period.



Figur 9-5 RAO för heave, öppet vatten, vattendjup 100 meter

RAO-kurvan för roll (se Figur 9-6) indikerar att vi har resonans ungefär vid perioden 12 sekunder. Den tidigare framräknade egenperioden är 10,9 sekunder, vilket stämmer ganska bra. Skulle man täta upp RAO-beräkningarna mellan 10 och 12 sekunder skulle man troligen få ett ännu bättre värde från RAO-kurvorna.

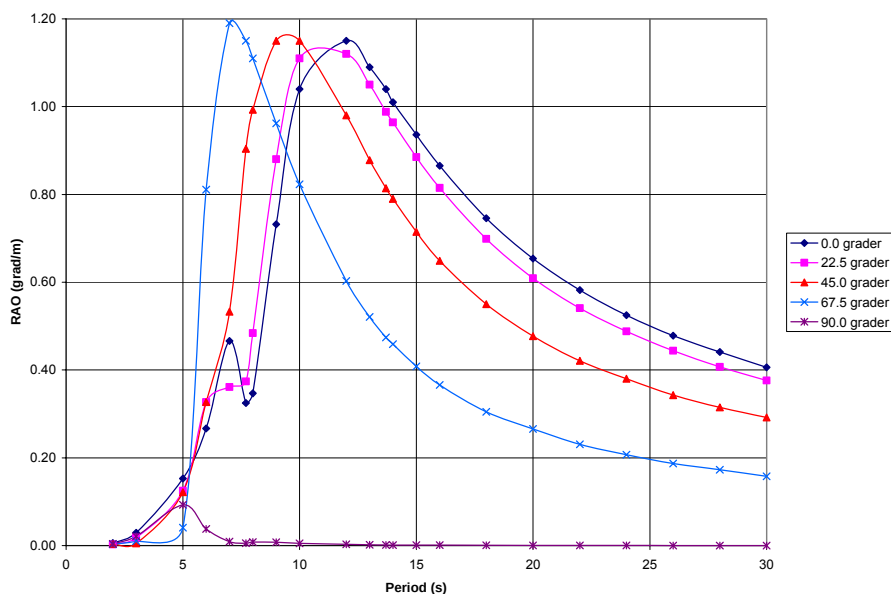
Roll blir störst när vågorna kommer in mot fartyget rakt från sidan, vilket är korrekt. För vågor med längre period sjunker responsen och verkar gå mot 0, vilket är korrekt.



Figur 9-6 RAO för roll, öppet vatten, vattendjup 100 meter

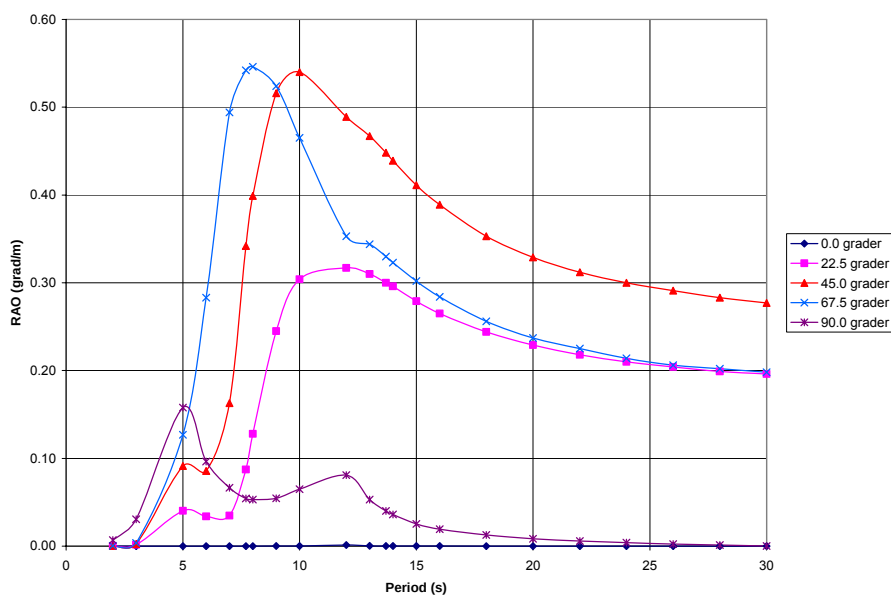
Rörelserna i pitch är ganska små (se Figur 9-7). Man kan ana en resonansperiod omkring 7 sekunder för infallsvinkeln 0 grader vilket stämmer bra med den framräknade som var 6,8 sekunder.

I pitch ser responskurvorna för olika infallsvinklar nästan likadana ut fast de är förskjutna i förhållande till varandra, vilket stämmer med teorierna. När vågorna kommer in från 90 grader, det vill säga när vågorna kommer in vinkelrätt mot fartyget, då pitchar den i princip inte alls, vilket även det är korrekt.



Figur 9-7 RAO för pitch, öppet vatten, vattendjup 100 meter

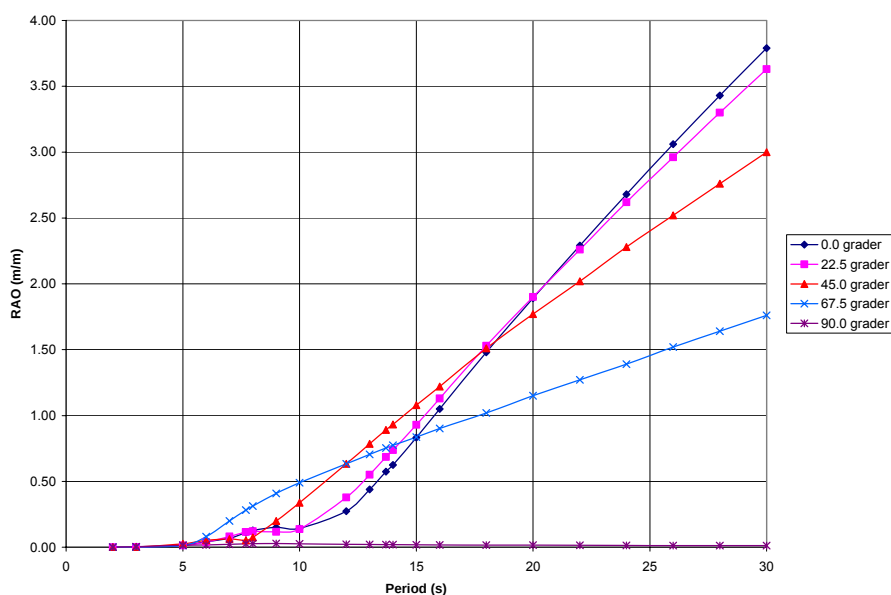
Rörelserna i yaw är små för samtliga infallsvinklar (se Figur 9-8). För 0 grader är yaw i princip 0 vilket stämmer bra eftersom fartyget är symmetriskt kring axeln som går i riktningen 0 grader. Även för 90 grader är fartyget i stort sett symmetrisk vilket gör att rörelserna även för denna vinkel blir ytterst små.



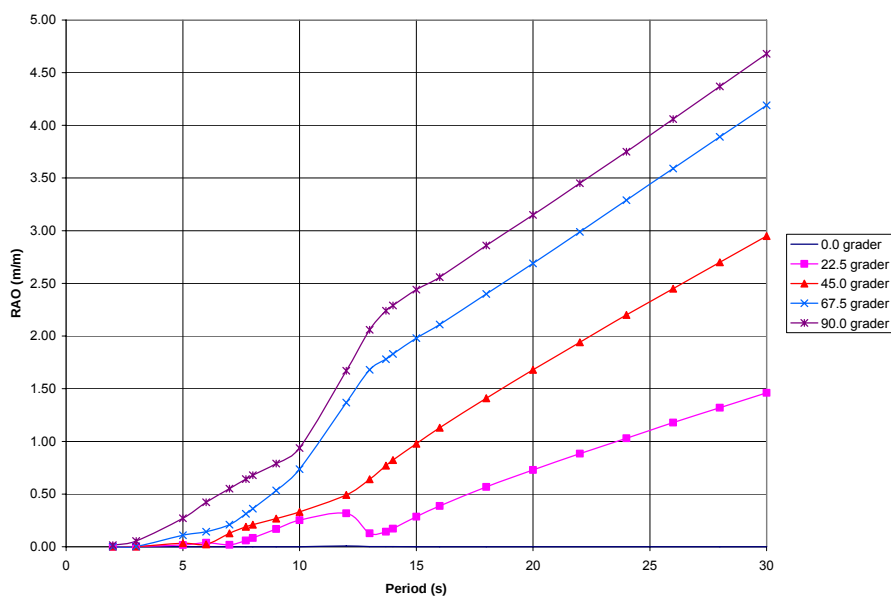
Figur 9-8 RAO för yaw, öppet vatten, vattendjup 100 meter

9.4.3.2 Vattendjup 10 meter

När djupet minskas blir rörelserna i surge och sway betydligt större (se Figur 9-9 och Figur 9-10), vilket är i enlighet med teorierna. Responserna växer med perioden och för perioden 30 sekunder blir de cirka 4. Det stämmer rätt bra med vågteorier för grunt vatten, vilket skulle ge en horisontell amplitud för vattnet på cirka 4,7 meter om våghöjden är 1 meter.

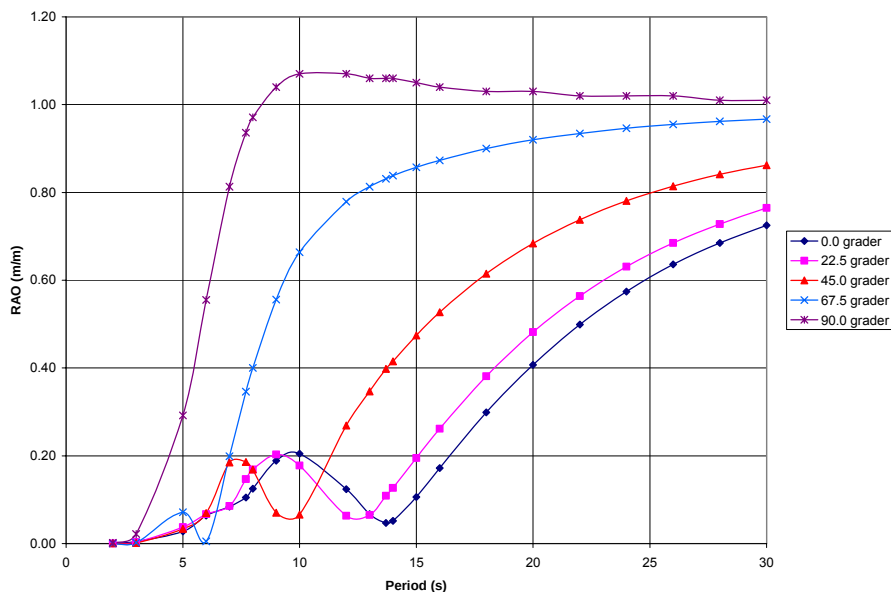


Figur 9-9 RAO för surge, öppet vatten, vattendjup 10 meter



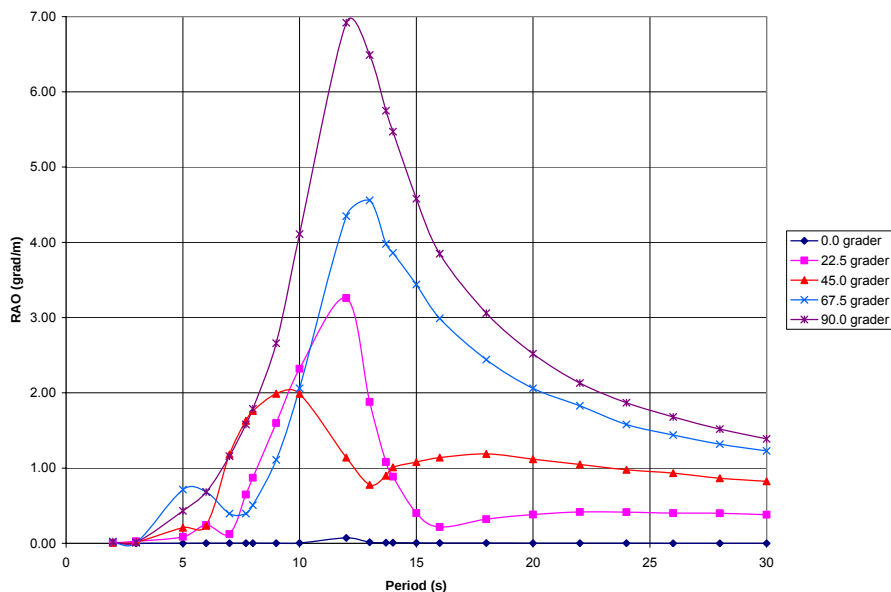
Figur 9-10 RAO för sway, öppet vatten, vattendjup 10 meter

Heave (se Figur 9-11) närmar sig även här 1 när periodtiden ökar men inte alls lika snabbt som när vattendjupet är 100 meter. Detta beror på att våglängden inte blir alls lika lång för 10 meters vattendjup som för 100 meter. Våglängden blir 300 meter för perioden 30 sekunder och vattendjupet 10 meter istället för 870 meter med vattendjupet 100 meter.



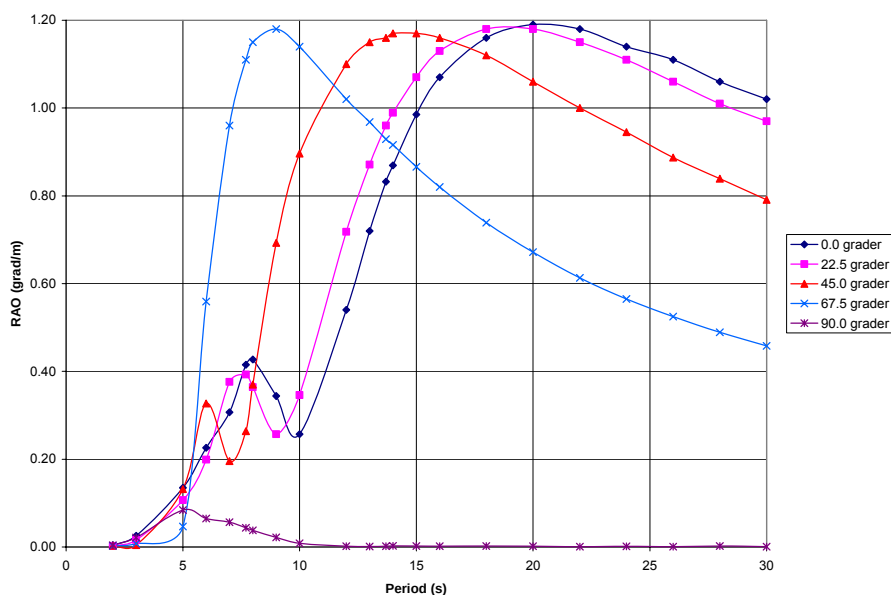
Figur 9-11 RAO för heave, öppet vatten, vattendjup 10 meter

RAO-kurvan för roll (se Figur 9-12) för 10 meters vattendjup skiljer sig väldigt lite från den med 100 meters vattendjup. Dock får man något högre toppvärden vilket borde bero på att man har kortare våglängd men samma våghöjd, vilket ger brantare vågor.



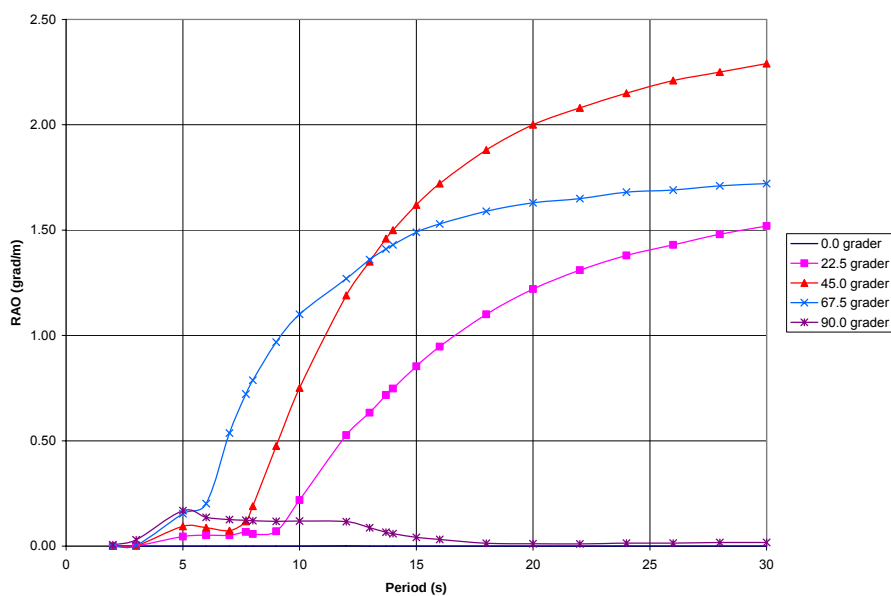
Figur 9-12 RAO för roll, öppet vatten, vattendjup 10 meter

Responskurvorna i pitch (se Figur 9-13) påminner mycket om de i förra fallet och antar ungefär lika stora värden.



Figur 9-13 RAO för pitch, öppet vatten, vattendjup 10 meter

Utseendet på responsen i yaw (se Figur 9-14) ändras och växer här med perioden istället för att som tidigare få toppvärden någonstans mellan 5-15 sekunder.



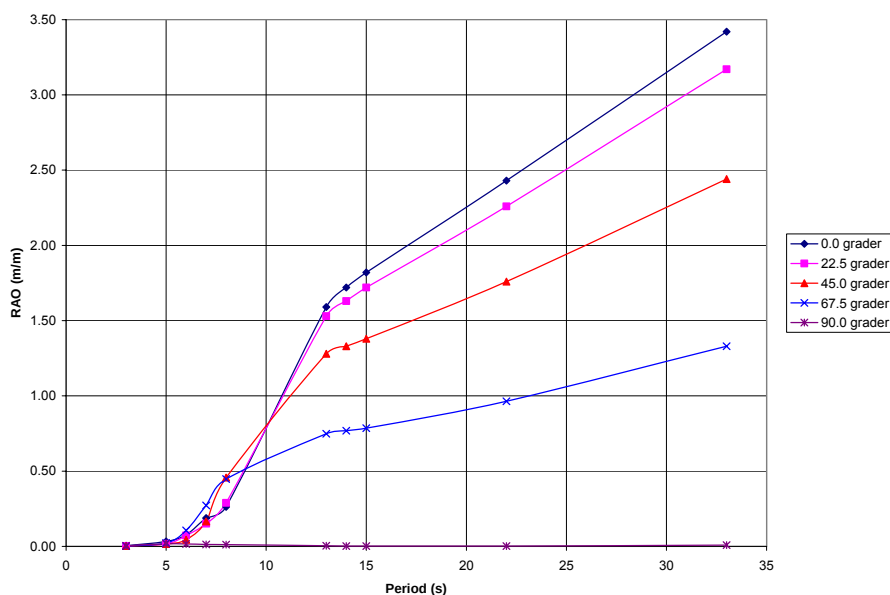
Figur 9-14 RAO för yaw, öppet vatten, vattendjup 10 meter

9.4.4 Verifiering vid 1 kaj

I de här körningarna finns bara kajen på babord sida om fartyget med i modellen. Beräkningar med ett randvillkor så nära fartygskroppen tar väldigt lång tid innan de konvergerar, så för att spara beräkningstid är denna körning gjord för endast ett fåtal perioder, mycket färre än för öppet vatten. Det gör att man kan missa detaljer på kurvorna, men tendenserna går ändå att se tydligt.

9.4.4.1 Vattendjup 100 meter

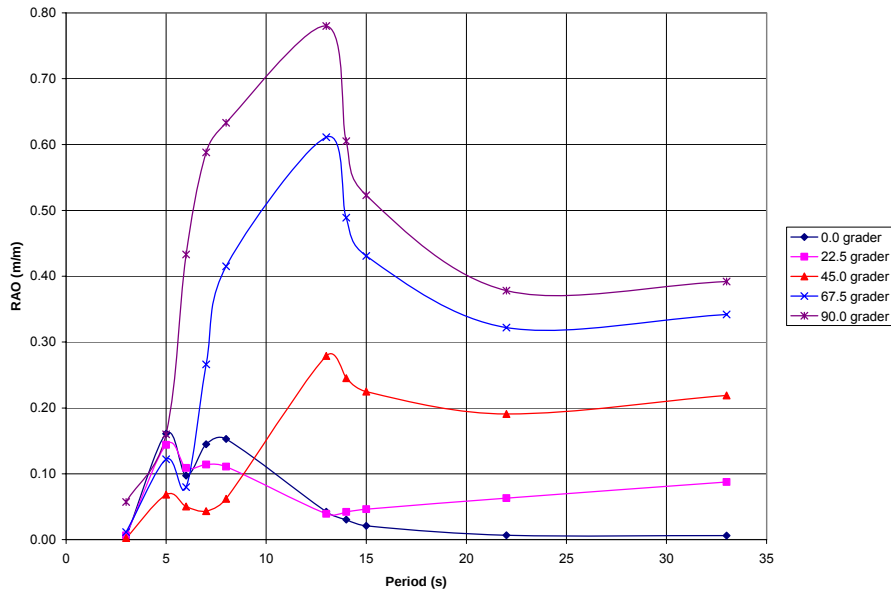
Rörelsen i surge (se Figur 9-15) går mot höga värden för långa perioder. Det stämmer inte med teorin för regelbundna vågor på öppet vatten och borde tyda på nåt fel i beräkningen.



Figur 9-15 RAO för surge, 1 kaj, vattendjup 100 meter

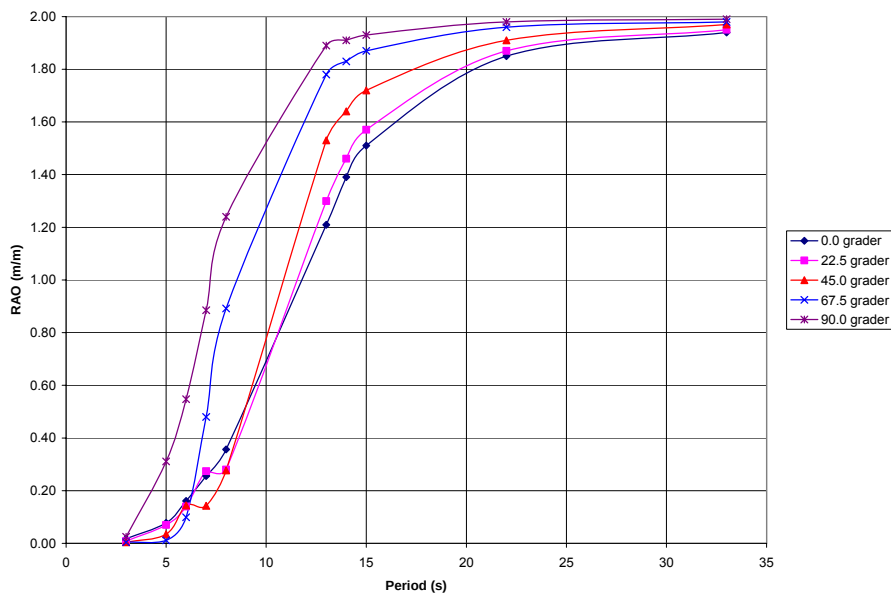
Rörelsen i sway (se Figur 9-16) får en liten topp vid perioden 5 sekunder, vilket motsvarar en våglängd på cirka 40 meter. Det är rimligt att anta eftersom den halva våglängden då blir ungefär som båtens bredd (24 meter), vilket medför att man då får maximal tryckskillnad på fartygets styrbord respektive babord sida.

För längre våglängder får man relativt låga responser vilket beror på att vattnet inte rör sig så mycket tvärs kajen eftersom man får stående vågor som rör sig mest i vertikalled. Toppen som sannolikt inträffar för en period någonstans mellan 10 och 12 sekunder kan bero på att vattnet som är mellan fartyget och kajen kommer i egensvängning vid dessa perioder.



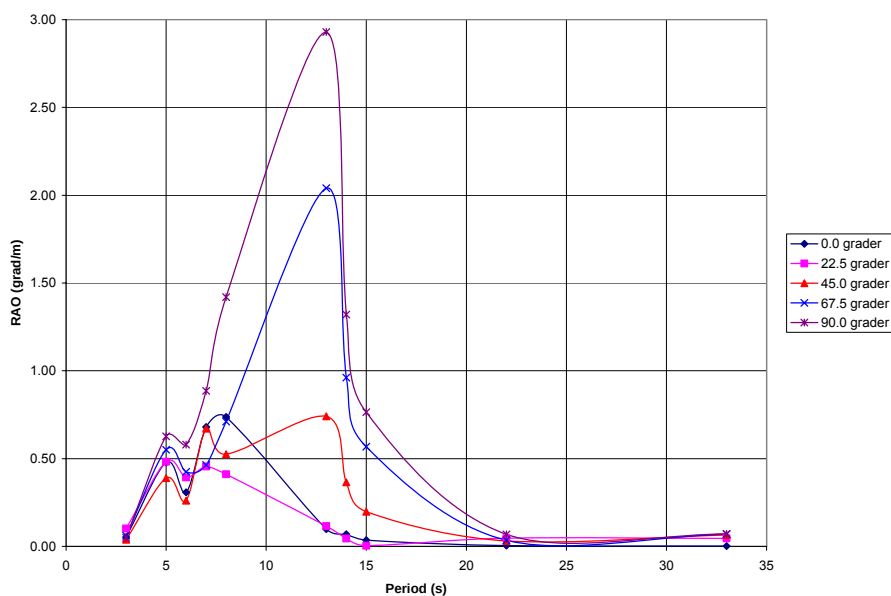
Figur 9-16 RAO för sway, 1 kaj, vattendjup 100 meter

Precis som önskats visar det sig att responsen i heave närmar sig 2 när vågperioderna blir stora (se Figur 9-17), vilket beror på att vi får stående vågor vid kajen med dubbelt så stor amplitud som den infallande vågens amplitud.



Figur 9-17 RAO för heave, 1 kaj, vattendjup 100 meter

I RAO-kurvan för roll (se Figur 9-18) missar vi troligen egenperioden som är beräknad till 10,9 sekunder. Här verkar den vara något högre, men det beror troligen på den låga upplösningen i RAO-beräkningarna.

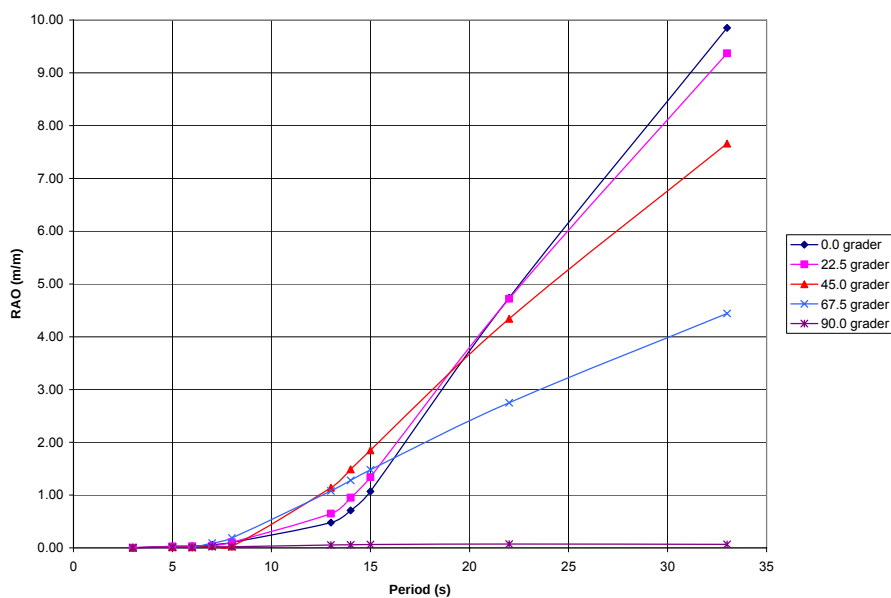


Figur 9-18 RAO för roll, 1 kaj, vattendjup 100 meter

RAO-kurvorna för pitch och yaw påverkas inte mycket av att fartyget ligger vid 1 kaj.

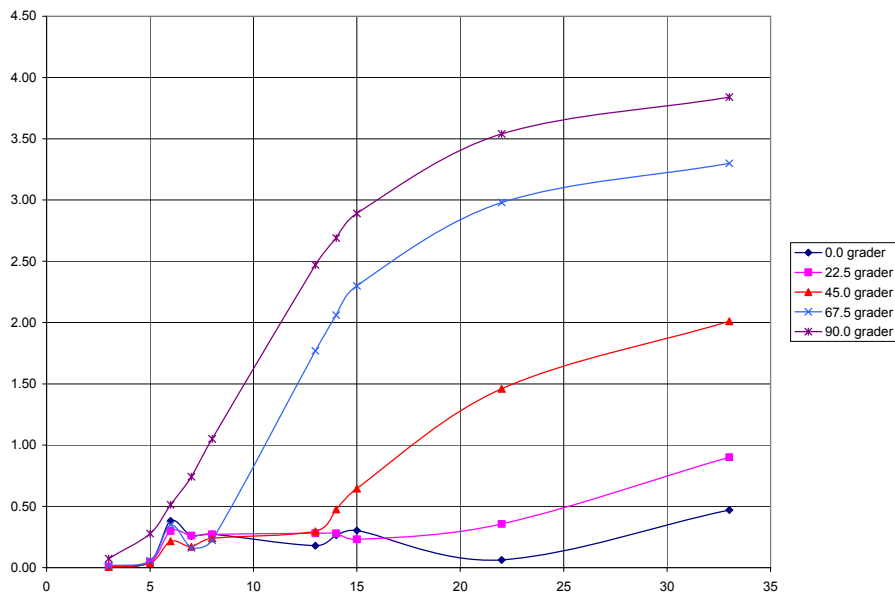
9.4.4.2 Vattendjup 7 meter

Rörelserna längs med kajen, surge, blir väldigt stora för långa perioder (se Figur 9-19). Det kan eventuellt förklaras på samma sätt som för 100 meters vattendjup, alltså att vattnet tvingas röra sig längs med kajen.



Figur 9-19 RAO för surge, 1 kaj, vattendjup 7 meter

Även rörelserna vinkelrät kajen växer fort när perioderna bli stora.



Figur 9-20 RAO för sway, 1 kaj, vattendjup 7 meter

I likhet med det förra fallet med 100 meters vattendjup går de vertikala rörelserna mot två när vågperioden växer. De tre rotationsfrihetsgraderna har liknande utseende som i tidigare körningar.

9.4.5 Verifiering med två kajer

9.4.5.1 Vattendjup 100 meter

Rörelserna i surge och i sway blir i huvudsak samma som de för beräkningen vid 1 kaj.

Det visar sig att rörelserna i heave blir orimligt stora. För långa vågor går responsen upp mot fyra vilket innebär att om våghöjden är en meter kommer fartyget att röra sig fyra meter i höjdlid. Det verkar som man får en dubbel stående våg inne i hörnet av de två oändligt långa väggarna. Det är inte rimligt att man får en sådan effekt med de kajer som är i den verkliga hamnen.

9.4.5.2 Vattendjup 7 meter

När vattendjupet minskas till det verkliga djupet inne i hamnen börjar responserna anta underliga värden. Bland annat börjar responsen längs med kajen skena iväg uppåt 20 för långa vågor. Responsen i heave närmar sig fyra för vågor med lång period precis som i fallet med 100 meters vattendjup. Fartyget rör sig även mycket in och ut från kajen, sway.

Rotationsfrihetsgraderna antar också höga värden jämfört med de rörelser som uppkommer i de övriga körningarna.

9.4.6 *Slutsats av verifieringen*

Verifieringskörningarna för öppet vatten stämde bra med teorin. Fartygsmodellen kan därmed antas vara korrekt.

För körningarna med 1 kaj stämde de flesta resultaten med teorin. Den kraftiga responsen i surge för långa perioder är dock svår att förklara.

För körningarna med 2 kajer stämmer resultaten sämre med teorin. Responserna får orimligt höga värden för långa perioder.

Eftersom körningarna med 2 kajer ger orimligt höga responser kommer de inte att användas i körningarna för oregelbundna vågor. Körningarna vid 1 kaj kan anses som en god approximering till det verkliga fallet eftersom kajen för om fartyget har begränsad utsträckning. Läger man en oändligt lång kaj här omöjliggör man dessutom vågriktningar från detta håll.

9.5 Oregelbunden analys – fartygets verkliga rörelser

9.5.1 Resultat oregelbunden analys

Nedan följer resultaten från den oregelbundna analysen. Rörelser, hastigheter och accelerationer för varje väder (se kapitel 7 Miljödata) presenteras för de båda hamnalternativen. Presentationen är upplagd så att responser av samma slag som hör till samma väder men olika hamnalternativ (nuvarande eller utbyggt vågskydd) presenteras tillsammans. Exempel: De accelerationer som alstras i den befintliga hamnen under väder 1 presenteras ihop med de accelerationer för den utbyggda hamnen som alstras av väder 1.

Första kolumnen i varje resultattabell talar om vilken punkt på fartyget som resultatet härrör till. Punkterna redovisas i Tabell 9-2. Andra kolumnen beskriver headingen, det vill säga vågriktningen in i hamnen enligt Figur 8-2. Sedan följer värdet på varje frihetsgrad.

Punkt	Nummer	x-koordinat (m)	y-koordinat (m)	z-koordinat (m)
Tyngdpunkt	1	0,8	0,0	5,5
Bogramp	2	74,6	0,0	1,5
Landgång	3	42,2	12,0	13,8

Tabell 9-2 Punkterna där responserna är beräknade. Koordinaterna är i koordinatsystemet presenterat i Figur 9-1.

Resultaten för de båda alternativen har jämförts med varandra och med de rekommendationer som presenterades i kapitel 3 Rekommenderade värden på rörelser för förtöjda fartyg. Rekommendationerna gäller egentligen vid ramper men värden i tyngdpunkten har inkluderats i jämförelsen.

9.5.2 Translationer

I Tabell 9-3 - Tabell 9-6 presenteras translationerna i x-, y- och z-led.

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
1	5	0.02	0.11	0.82	-	-	-
1	15	0.06	0.22	0.11	-	-	-
1	20	-	-	-	0.01	0.04	0.04
1	25	0.09	0.26	0.11	0.01	0.07	0.06
1	35	0.05	0.16	0.07	0.05	0.15	0.06
1	40	0.04	0.12	0.06	0.09	0.19	0.09
2	5	0.03	0.59	0.36	-	-	-
2	15	0.06	0.75	0.41	-	-	-
2	20	-	-	-	0.01	0.22	0.16
2	25	0.12	1.34	0.62	0.02	0.40	0.25
2	35	0.06	0.82	0.40	0.06	0.75	0.36
2	40	0.05	0.63	0.31	0.11	0.94	0.41
3	5	0.07	0.23	0.29	-	-	-
3	15	0.17	0.61	0.47	-	-	-
3	20	-	-	-	0.05	0.13	0.14
3	25	0.17	0.70	0.55	0.07	0.22	0.20
3	35	0.12	0.43	0.33	0.10	0.40	0.31
3	40	0.09	0.33	0.26	0.11	0.48	0.40

Tabell 9-3 Translationer Väder 1

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
1	5	0.04	0.18	0.10	-	-	-
1	15	0.12	0.34	0.15	-	-	-
1	20	-	-	-	0.01	0.07	0.05
1	25	0.25	0.47	0.22	0.03	0.12	0.07
1	35	0.18	0.35	0.16	0.13	0.27	0.12
1	40	0.13	0.26	0.12	0.29	0.35	0.17
2	5	0.06	0.94	0.50	-	-	-
2	15	0.13	1.22	0.59	-	-	-
2	20	-	-	-	0.02	0.37	0.23
2	25	0.29	2.25	0.97	0.04	0.62	0.34
2	35	0.21	1.65	0.71	0.16	1.30	0.56
2	40	0.15	1.23	0.54	0.31	1.58	0.68
3	5	0.09	0.38	0.38	-	-	-
3	15	0.23	0.91	0.71	-	-	-
3	20	-	-	-	0.07	0.21	0.19
3	25	0.25	1.13	1.00	0.10	0.34	0.26
3	35	0.18	0.83	0.73	0.15	0.66	0.57
3	40	0.14	0.62	0.54	0.20	0.79	0.77

Tabell 9-4 Translationer Väder 2

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
1	5	0.08	0.26	0.12	-	-	-
1	15	0.21	0.47	0.21	-	-	-
1	20	-	-	-	0.03	0.11	0.06
1	25	0.53	0.68	0.33	0.05	0.17	0.08
1	35	0.59	0.57	0.28	0.31	0.41	0.19
1	40	0.36	0.41	0.20	0.67	0.49	0.25
2	5	0.10	1.32	0.63	-	-	-
2	15	0.22	1.71	0.79	-	-	-
2	20	-	-	-	0.04	0.57	0.30
2	25	0.58	3.11	1.33	0.06	0.86	0.43
2	35	0.63	2.57	1.10	0.33	1.86	0.80
2	40	0.39	1.88	0.80	0.70	2.15	0.93
3	5	0.11	0.54	0.47			
3	15	0.27	1.19	0.98			
3	20				0.09	0.31	0.24
3	25	0.39	1.55	1.50	0.12	0.46	0.35
3	35	0.42	1.29	1.29	0.23	0.93	0.89
3	40	0.25	0.94	0.92	0.50	1.10	1.13

Tabell 9-5 Translationer Väder 3

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggd vågskydd		
		x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
1	5	0.13	0.35	0.15	-	-	-
1	15	0.32	0.61	0.28	-	-	-
1	20	-	-	-	0.05	0.16	0.07
1	25	1.01	0.88	0.44	0.07	0.22	0.09
1	35	1.47	0.81	0.43	0.61	0.53	0.27
1	40	0.82	0.57	0.29	1.19	0.63	0.34
2	5	0.16	1.73	0.79	-	-	-
2	15	0.35	2.22	1.01	-	-	-
2	20	-	-	-	0.06	0.81	0.39
2	25	1.07	3.93	1.69	0.09	1.10	0.52
2	35	1.53	3.45	1.51	0.65	2.37	1.02
2	40	0.85	2.49	1.08	1.23	2.67	1.17
3	5	0.15	0.72	0.56	-	-	-
3	15	0.33	1.47	1.29	-	-	-
3	20	-	-	-	0.11	0.43	0.33
3	25	0.74	1.99	2.01	0.15	0.58	0.45
3	35	1.16	1.84	1.88	0.44	1.19	1.21
3	40	0.62	1.28	1.31	0.94	1.44	1.47

Tabell 9-6 Translationer Väder 4

9.5.3 Jämförelse av translationer, befintligt vågskydd – utbyggt vågskydd

Tre vågriktningar in i hamnen är samma för de båda fallen, så dessa går att jämföra. De tre riktningarna är 25°, 35° och 40°.

9.5.3.1 Vågriktning 25°

Här blir rörelserna generellt betydligt mindre i den utbyggda hamnen. Rörelserna med nuvarande vågskydd är flera gånger större än med utbyggt vågskydd.

9.5.3.2 Vågriktning 35°

I det här fallet är rörelserna betydligt mer lika varandra för de två alternativen, även om rörelserna med utbyggt vågskydd fortfarande är mindre.

9.5.3.3 Vågriktning 40°

Här visar det sig att rörelserna blir större med utbyggt vågskydd än med nuvarande. Skillnaderna är emellertid inte alls lika stora som när vågriktningen är 25°.

9.5.4 Jämförelse av translationer med rekommendationer

9.5.4.1 Befintligt vågskydd

Rekommendationerna från både Nordisk ministerråds embedsmandskomite for transports och Pianc för säker lastning överskrids för flera sjötillstånd. Värst är situationen i y-led där gränsvärden överskrids cirka hälften av de sjötillstånd som simulerats. Eftersom Pianc's rekommendationer är lite snävare kommer de att brytas oftare än NMET:s rekommendationer. Även gränsvärden för z-rörelsen överskrids ofta, särskilt jämfört med Pianc. Rörelsen i x-led är den frihetsgrad som bäst svarar upp mot de givna rekommendationerna.

Rekommendationerna för säker förtöjning överskrids vid ett fåtal tillfällen. Vid bogrampen (punkt 2) blir rörelsen in och ut från kajen för stor, vilket i och för sig inte borde medföra några problem med rampen, då lastning redan borde vara avbruten och rampen uppfälld. Problemet är snarare att båten kommer att slå i kajen med eventuella skador som följd. Även rörelsen i höjdlid antar ibland för höga värden.

Att y-rörelsen skulle bli värst kunde med lite fantasi förutses. Vågornas infallsvinkel mot fartyget kommer att ligga inom en sektor snett bakifrån till vinkelrätt mot fartyget.

9.5.4.2 Utbyggt vågskydd

Även för det utbyggda alternativet är det rörelsen i y-led som blir värst. Gränsen för säker lastning överskrids för flera sjötillstånd, både jämfört med NMET och Pianc. Gränsen för säker förtöjning bryts i punkt 2 vid ett fåtal tillfällen.

I z-led är situationen lite bättre. Jämfört med NMET:s krav för säker lastning är det bara vid en handfull tillfällen som rekommendationen överskrids, jämfört med Pianc är det några fler. Den övre gränsen för säker lastning överskrids inte.

Translationen i x-led är den som ser bäst ut jämfört med rekommendationerna. Den överskrider gränsen för säker lastning endast vid ett litet antal tillfällen.

9.5.5 Rotationer

I Tabell 9-7 - Tabell 9-10 presenteras rotationerna runt x-, y- och z-axeln. Rotationerna i de olika punkterna blir lika stora. Detta beror på att alla delar av fartyget roterar som en enhet, vrids fören så följer aktern med.

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		roll [°]	pitch [°]	yaw [°]	roll [°]	pitch [°]	yaw [°]
1,2,3	5	0.38	0.25	0.38	-	-	-
1,2,3	15	1.26	0.41	0.71	-	-	-
1,2,3	20	-	-	-	0.27	0.11	0.15
1,2,3	25	1.34	0.44	0.83	0.45	0.17	0.26
1,2,3	35	0.88	0.28	0.51	0.78	0.25	0.47
1,2,3	40	0.67	0.22	0.39	0.94	0.29	0.58

Tabell 9-7 Rotationer Väder 1

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		roll [°]	pitch [°]	yaw [°]	roll [°]	pitch [°]	yaw [°]
1,2,3	5	1.04	0.35	0.59	-	-	-
1,2,3	15	1.75	0.57	1.08	-	-	-
1,2,3	20	-	-	-	0.42	0.16	0.24
1,2,3	25	2.48	0.68	1.37	0.70	0.24	0.39
1,2,3	35	1.81	0.50	1.01	1.35	0.39	0.79
1,2,3	40	1.32	0.37	0.75	2.22	0.47	0.94

Tabell 9-8 Rotationer Väder 2

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		roll [°]	pitch [°]	yaw [°]	roll [°]	pitch [°]	yaw [°]
1,2,3	5	1.35	0.45	0.82	-	-	-
1,2,3	15	2.19	0.72	1.43	-	-	-
1,2,3	20	-	-	-	0.64	0.21	0.36
1,2,3	25	4.28	0.92	1.86	0.94	0.30	0.54
1,2,3	35	3.96	0.76	1.53	2.51	0.55	1.12
1,2,3	40	2.70	0.56	1.12	3.68	0.65	1.27

Tabell 9-9 Rotationer Väder 3

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		roll [°]	pitch [°]	yaw [°]	roll [°]	pitch [°]	yaw [°]
1,2,3	5	1.70	0.56	1.07			
1,2,3	15	2.58	0.88	1.78			
1,2,3	20				0.85	0.27	0.51
1,2,3	25	6.31	1.17	2.33	1.12	0.36	0.68
1,2,3	35	6.60	1.08	2.04	3.80	0.71	1.40
1,2,3	40	4.34	0.75	1.47	5.19	0.85	1.58

Tabell 9-10

Rotationer Väder 4

9.5.6 Jämförelse av rotationer, befintligt vågskydd– utbyggt vågskydd

9.5.6.1 Heading 25°

Rotationerna med utbyggt vågskydd är betydligt lägre än med nuvarande. Bland annat kan läggas märke till att rotationen runt x-axeln växer till värden över 6° med det nuvarande för väder 4. Med utbyggt vågskydd ligger motsvarande värde strax över 1°.

9.5.6.2 Heading 35°

Här ligger rotationerna betydligt närmare varandra för de båda alternativen. Fortfarande är det rotationen runt x-axeln som antar störst värden.

9.5.6.3 Heading 40°

Vid denna heading har rotationerna med utbyggt vågskydd vuxit och blivit större än med nuvarande. Även här är rotationen runt x-axeln störst.

9.5.7 Jämförelse av rotationer med rekommendationer

När det gäller rotationer har NMET och Pianc samma rekommendationer.

9.5.7.1 Befintligt vågskydd

Rotationen kring x-axeln överskrider gränsen för säker lastning vid ett flertal tillfällen för väder 2-4. Gränsen för säker förtöjning bryts för väder 4.

Rotationerna kring y- och z-axeln överskrider gränsen för säker lastning men inte gränsen för säker förtöjning.

9.5.7.2 Utbyggt vågskydd

Rekommendationen för säker lastning överskrider ett antal gånger av rotationerna runt x- och z-axeln. Detta sker för heading 35° och 40°. Gränsen för säker förtöjning överskrider inte i någon frihetsgrad.

9.5.8 *Hastigheter & accelerationer*

Hastigheter och accelerationer följer samma mönster som rörelserna och presenteras därför inte fullständigt här. Maxvärden på hastigheter och accelerationer i varje punkt presenteras i Tabell 9-11 - Tabell 9-12. Fullständiga resultat för hastigheter återfinns i och för accelerationer i Appendix B respektive Appendix C.

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]	x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]
1	40	0.46	0.43	0.21	0.64	0.45	0.23
2	40	0.48	1.93	0.84	0.67	1.99	0.87
3	40	0.34	0.98	0.96	0.49	1.03	1.03

Tabell 9-11 **Maximala hastigheter i punkt 1,2,3**

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]	x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]
1	40	0.46	0.43	0.21	0.64	0.45	0.23
2	40	0.48	1.93	0.84	0.67	1.99	0.87
3	40	0.34	0.98	0.96	0.49	1.03	1.03

Tabell 9-12 **Maximala accelerationer i punkt 1,2,3**

9.5.9 *Slutsatser från den oregelbundna analysen*

Rörelser, hastigheter och accelerationer kommer att minska för heading 25° och 35° om hamnen byggs ut. För 25° är det fråga om drastiska förändringar, för 35° betydligt mindre. När det gäller heading 40° ser det annorlunda ut. Här kommer faktiskt rörelserna, hastigheterna och accelerationerna att gå upp, även om ökningarna är små.

Eftersom sydvästlig vind är den dominerande vindriktningen i området kan fördelarna med en utbyggnad av vågskyddet ifrågasättas. Heading 40° kommer nämligen nästan rakt från sydväst.

En utbyggnad av vågskyddet skulle emellertid medföra, som tidigare nämnts, att vissa vågriktningar inte längre kommer in i hamnen. Detta ger på lång sikt en fördel eftersom problemen troligtvis kommer att uppstå mera sällan.

10 SLUTSATS

Eftersom det inte finns några verkliga mätdata från Visby hamn är det väldigt svårt att uttala sig om hur bra metoden fungerar. Det har inte funnits någon möjlighet att jämföra de resultat som erhållits i de olika stegen av beräkningarna med uppmätta värden.

10.1 Fördelar med metoden

Att använda sig av denna metod borde inte medföra något större merarbete jämfört med det arbete man idag lägger ner vid en vågskyddsdimensionering. En utredning om hur vågmönstret i hamnen kommer att se ut görs redan idag. Vid byggande av större fartyg utförs alltid hydrodynamiska beräkningar. Detta innebär att det finns färdiga hydrodynamiska modeller för ett stort antal olika skepp. Merarbetet skulle i princip innebära att kombinera resultaten från beräkningen av vågmönstret och använda det till en rörelseberäkning på fartyget.

Dessa modeller skulle kunna utnyttjas när vågskyddet ska dimensioneras för en ny hamn eller en utbyggnad av en befintlig. Vågberäkningens resultat skulle gå att använda för flera fartyg beroende på vad hamnen är avsedd att användas till, det vill säga vilka fartyg som kommer att anlöpa hamnen.

Ett användande av denna metod skulle innebära att man kan bygga lagom omfattande vågskydd redan från början. Därmed undviks att bygga onödigt stora vågbrytare eller för den delen, bygga för små vågbrytare. Det skulle därmed kunna medföra stora kostnadsbesparingar.

10.2 Nackdelar med metoden

En svaghet i metoden är att de programvaror som finns för att beräkna fartygsrörelser är avsedda att användas för större vattendjup än de som vanligtvis förekommer i hamnar. De effekter som uppstår när avståndet mellan fartyget och botten blir väldigt litet eller avståndet mellan fartyg och kaj blir litet är inte tillräckligt utvärderade.

En annan nackdel kan vara att resultaten endast gäller för det beräknade fartyget. Läger man ett annat fartyg vid kajen riskerar man att få större rörelser. Man borde dock kunna anta att liknande fartyg kommer få i stort sett samma rörelser.

10.3 Fortsatt arbete

En rimlig start vore att studera vågkaraktistika och vågmönster inne i den verkliga hamnen vid olika vädersituationer. Detta skulle göras för att verifiera vågberäkningarna som utförts och för att få ut de verkliga vågriktningarna i hamnen. Samtidigt borde det göras mätningar på fartygets rörelser för att förstå hur ett fartyg verkligen rör sig då det ligger förtöjt nära en kaj. Undersökningen skulle ge en bra bild av hur de beräkningar som utförts överensstämmer med verkligheten.

REFERENSER

Bergdahl & Olsson, 1981, Konstruktioner i havet Vågkrafter- Rörelser, STU-Rapport 79-5536 Slutrapport, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Vattenbyggnad, Göteborg, ISSN 0348-1069

Bruun P, 1973, Port Engineering, Gulf Publishing Company, Houston Texas, 1973, ISBN 4-13-035137-6

Bruun P, 1989:1, Port Engineering, , fjärde upplagan volym1, Gulf Publishing Company, Houston Texas, ISBN 0-87201-843-1

Bruun P, 1989:2, Port Engineering, Per Bruun, fjärde upplagan volym2, Gulf Publishing Company, Houston Texas, ISBN 0-87201-843-1

Cederwall & Larsen, 1981, Hydraulik för väg- och vattenbyggare, Liber Läromedel, Lund, ISBN 91-40-54300-5

Cederwall & Sjöberg, 1969, Hydraulik, Intern skrift nr.6, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Vattenbyggnad, Göteborg

Chakrabarti SK, 1987, Hydrodynamics of Offshore Structures, Computational Mechanics Publications Southampton Boston, Springer-Verlag Berlin, London, ISBN 0-905451-66-X

Dynomar, 1995, HWAVER Version 1.0 A diffraction program for calculation of wave pattern inside a harbour, Dynomar AB, Hovås, Sverige

Faltinsen OM, 1990, Sea Loads on Ship and Offshore Structures, Cambridge University Press, ISBN 0-521-37285-2

Häggström S, 1988, Hydraulik för V-teknologer, Steffen Häggström, Undervisningsskrift nr. 1988:8, andra upplagan, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Vattenbyggnad, Göteborg

MIT, 2001, WAMIT – User manual, Wamit Inc., Massachusetts Institute of Technology, Chestnut Hill, Massachusetts, USA, www.wamit.com

MARINTEK, 1995, MIMOSA – User's documentation, Norwegian Marine Technology Research Institute, rapport nr: 519616.00.02, Trondheim, Norge

NMET, 1986, Skibsbevægelser i Havne, Nordisk ministerråds embedsmandskomite for transports

PIANC, 1995, Criteria for movements of moored ships in harbours, Working group no. 24 of the Permanent Technical Committee II, Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC), ISBN 2-87223-070-X, Bryssel

Sjöberg & Häggström, 1998, Oceanografi, Chalmers Tekniska Högskola, Undervisningsskrift 1998:7, Göteborg

Thoresen CA, 1988, Port Design – guidelines and recommendations, Tapir Publishers, Trondheim Norway, ISBN 82-519-0839-6

US Army, 1984, Shore protection manual, US Army Corps of Engineering, fjärde upplagan volym II, Vicksburg Mississippi USA

APPENDIX A – BERÄKNING AV EGENPERIODER OCH GM

Beräkning av egenperioder för M/S Visby. Beräkningarna är endast gjorda för oförtöjt fartyg. Eftersom styvhet då saknas i de horisontella frihetsgraderna görs enbart beräkningar av egenperioden för heave, roll och pitch.

Beräkningarna är gjorda enligt "Sea loads on ships and offshore structures" av O.M.Faltinsen (Faltinsen 1990).

Massdata och geometri

$\rho := 1025 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densitet på vatten
$M := 1.2839 \cdot 10^7 \cdot \text{kg}$	Massan av fartyget, displacementet
$B_w := 24 \cdot \text{m}$	Bredden på fartyget i vattenlinjen
$L_w := 135.1 \cdot \text{m}$	Längden på fartyget i vattenlinjen
$A_w := 3166 \cdot \text{m}^2$	Vattenlinjearean, fås från Wamit
$V := \frac{M}{\rho}$	Den deplacerade volymen $V = 1.253 \times 10^4 \text{ m}^3$

Added mass i de olika riktningarna, fås från Wamit

$A_{33} = 2.433 \times 10^7 \text{ kg}$	Added mass i heave
$A_{44} = 6.542 \times 10^8 \text{ kg m}^2$	Added mass i roll
$A_{55} = 3.763 \times 10^{10} \text{ kg m}^2$	Added mass i pitch

Hydrostatiska styvheten i de olika riktningarna, fås från Wamit

$C_{33} = 3.182 \times 10^9 \text{ kg ms}^{-2}$	Hydrostatiska styvheten i heave
$C_{44} = 5.231 \times 10^8 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$	Hydrostatiska styvheten i roll
$C_{55} = 4.453 \times 10^{10} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$	Hydrostatiska styvheten i pitch

Appendix A – Beräkning av egenperioder och GM

Egenperioderna i heave, roll och pitch kan då räknas ut enligt Faltinsen sidan 69-71

Egenperioden i heave

$$T_{n3} := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{M + A_{33}}{\rho \cdot g \cdot A_w} \right)^{0.5}$$

$$T_{n3} = 6.79s$$

Egenperioden i heave

Egenperioden i roll

$$r_{44} := 0.35 \cdot B_w$$

$$r_{44} = 8.4m$$

Rotationströghetsradien i roll kan enligt Faltinsen sättas till 0.35 ggr fartygets bredd.

$$GMT := \frac{C_{44}}{\rho \cdot g \cdot V}$$

$$GMT = 4.155m$$

Transversella metacenterhöjden

$$T_{n4} := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{M \cdot r_{44}^2 + A_{44}}{\rho \cdot g \cdot V \cdot GMT} \right)^{0.5}$$

$$T_{n4} = 10.851s$$

Egenperioden i roll, brukar vara mellan 8 och 12 s för vanliga fartyg i den här storleken

Egenperioden i pitch

$$r_{55} := L_w \cdot 0.25$$

$$r_{55} = 33.775m$$

Rotationströghetsradien i pitch kan enligt Faltinsen sättas till 0.25 ggr fartygets längd.

$$GML := \frac{C_{55}}{\rho \cdot g \cdot V}$$

$$GML = 353.673m$$

Longitudinella metacenterhöjden

$$T_{n5} := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{M \cdot r_{55}^2 + A_{55}}{\rho \cdot g \cdot V \cdot GML} \right)^{0.5}$$

$$T_{n5} = 6.808s$$

Egenperioden i pitch, brukar vara i samma storleksordning som egenperioden i heave

APPENDIX B – RESULTAT, HASTIGHETER

Appendix B innehåller de hastigheter som erhållits i den oregelbundna analysen. Resultaten är kompletterade med kommentarer.

Hastigheter

I Tabell 0-1 - Tabell 0-4 återfinns hastigheterna i befintlig och utbyggd hamn.

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]	x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]
1	5	0.03	0.12	0.10	-	-	-
1	15	0.06	0.23	0.14	-	-	-
1	20	-	-	-	0.01	0.05	0.05
1	25	0.08	0.26	0.12	0.02	0.08	0.07
1	35	0.04	0.16	0.09	0.04	0.15	0.08
1	40	0.03	0.12	0.07	0.07	0.17	0.08
2	5	0.04	0.68	0.44	-	-	-
2	15	0.08	1.21	0.66	-	-	-
2	20	-	-	-	0.02	0.28	0.20
2	25	0.10	1.31	0.65	0.03	0.47	0.30
2	35	0.06	0.84	0.44	0.05	0.76	0.39
2	40	0.04	0.64	0.34	0.08	0.86	0.40
3	5	0.13	0.39	0.36	-	-	-
3	15	0.19	0.66	0.51	-	-	-
3	20	-	-	-	0.06	0.16	0.18
3	25	0.19	0.70	0.54	0.09	0.26	0.25
3	35	0.13	0.46	0.35	0.11	0.41	0.31
3	40	0.10	0.35	0.27	0.11	0.45	0.36

Tabell 0-1

Hastigheter Väder 1

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]	x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]
1	5	0.04	0.19	0.13	-	-	-
1	15	0.10	0.33	0.16	-	-	-
1	20	-	-	-	0.02	0.08	0.07
1	25	0.19	0.41	0.18	0.03	0.13	0.09
1	35	0.14	0.30	0.13	0.10	0.24	0.11
1	40	0.10	0.23	0.10	0.18	0.28	0.13
2	5	0.06	1.01	0.57	-	-	-
2	15	0.13	1.72	0.85	-	-	-
2	20	-	-	-	0.02	0.43	0.28
2	25	0.22	2.01	0.91	0.04	0.68	0.40
2	35	0.16	1.48	0.67	0.12	1.18	0.54
2	40	0.12	1.11	0.51	0.20	1.32	0.58
3	5	0.17	0.56	0.45	-	-	-
3	15	0.24	0.91	0.71	-	-	-
3	20	-	-	-	0.08	0.25	0.24
3	25	0.25	1.03	0.86	0.12	0.38	0.31
3	35	0.18	0.76	0.63	0.15	0.61	0.50
3	40	0.14	0.57	0.47	0.16	0.66	0.60

Tabell 0-2 Hastigheter Väder 2

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]	x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]
1	5	0.07	0.26	0.14	-	-	-
1	15	0.16	0.43	0.19	-	-	-
1	20	-	-	-	0.03	0.12	0.08
1	25	0.35	0.55	0.26	0.04	0.17	0.10
1	35	0.35	0.45	0.21	0.20	0.33	0.15
1	40	0.22	0.33	0.16	0.38	0.37	0.18
2	5	0.09	1.34	0.69	-	-	-
2	15	0.20	2.18	1.02	-	-	-
2	20	-	-	-	0.04	0.62	0.35
2	25	0.39	2.61	1.15	0.06	0.90	0.48
2	35	0.38	2.08	0.91	0.23	1.57	0.69
2	40	0.25	1.56	0.68	0.40	1.68	0.73
3	5	0.20	0.72	0.56	-	-	-
3	15	0.28	1.14	0.91	-	-	-
3	20	-	-	-	0.04	0.62	0.35
3	25	0.31	1.32	1.19	0.14	0.49	0.38
3	35	0.27	1.05	0.99	0.19	0.79	0.71
3	40	0.19	0.78	0.72	0.27	0.85	0.83

Tabell 0-3 Hastigheter Väder 3

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]	x [m/s]	y [m/s]	z [m/s]
1	5	0.11	0.33	0.15	-	-	-
1	15	0.24	0.53	0.24	-	-	-
1	20	-	-	-	0.04	0.16	0.08
1	25	0.59	0.68	0.33	0.06	0.21	0.11
1	35	0.80	0.58	0.30	0.36	0.41	0.20
1	40	0.46	0.43	0.21	0.64	0.45	0.23
2	5	0.14	1.68	0.82	-	-	-
2	15	0.28	2.62	1.19	-	-	-
2	20	-	-	-	0.06	0.82	0.42
2	25	0.63	3.14	1.37	0.08	1.10	0.55
2	35	0.84	2.58	1.13	0.38	1.89	0.82
2	40	0.48	1.93	0.84	0.67	1.99	0.87
3	5	0.23	0.89	0.69	-	-	-
3	15	0.32	1.35	1.12	-	-	-
3	20	-	-	-	0.12	0.44	0.34
3	25	0.43	1.58	1.51	0.16	0.58	0.45
3	35	0.56	1.33	1.33	0.26	0.95	0.91
3	40	0.34	0.98	0.96	0.49	1.03	1.03

Tabell 0-4 Hastigheter Väder 4

Jämförelse av hastigheter, befintligt vågskydd – utbyggt vågskydd

Hastigheterna följer i stort sett samma mönster som upptäcktes hos translationerna och rotationerna.

Heading 25°

Hastigheterna med befintligt vågskydd är betydligt större än med utbyggt.

Heading 35°

Hastigheterna i med befintligt vågskydd fortfarande större men skillnaderna är inte lika markanta längre.

Heading 40°

Här blir hastigheterna med utbyggt vågskydd större. Skillnaden mot den befintliga är emellertid måttliga.

Jämförelse av hastigheter med rekommendationer.

Befintligt vågskydd

Hastigheterna är störst i punkt 2 vid bogrampen. Värst är heading 25°. Gränsen för säker förtöjning överskrids kraftigt i y-led vid ett flertal tillfällen. Även i x-led återfinns hastigheter över gränsvärden men inte alls lika frekvent.

Utbyggd vågskydd

Situationen liknar den med befintligt vågskydd. Även här överskrids gränserna för säker förtöjning. För heading 25° och heading 35° är situationen betydligt bättre än i den befintliga hamnen, för heading 40° något värre.

APPENDIX C – RESULTAT, ACCELERATIONER

Appendix C innehåller de accelerationer som erhållits i den oregelbundna analysen. Resultaten är kompletterade med kommentarer.

Accelerationer

I Tabell 0-1 - Tabell 0-4 presenteras accelerationerna.

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]	x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]
1	5	0.03	0.16	0.13	-	-	-
1	15	0.06	0.25	0.17	-	-	-
1	20	-	-	-	0.01	0.07	0.06
1	25	0.07	0.26	0.15	0.02	0.11	0.09
1	35	0.04	0.17	0.11	0.04	0.15	0.09
1	40	0.03	0.13	0.08	0.06	0.17	0.08
2	5	0.04	0.81	0.55	-	-	-
2	15	0.21	0.73	0.57	-	-	-
2	20	-	-	-	0.02	0.35	0.26
2	25	0.09	1.35	0.73	0.03	0.55	0.38
2	35	0.06	0.90	0.52	0.05	0.80	0.44
2	40	0.04	0.69	0.39	0.07	0.84	0.42
3	5	0.16	0.47	0.45	-	-	-
3	15	0.23	0.73	0.61	-	-	-
3	20	-	-	-	0.08	0.21	0.23
3	25	0.21	0.73	0.57	0.11	0.32	0.32
3	35	0.15	0.50	0.40	0.13	0.44	0.34
3	40	0.11	0.38	0.30	0.12	0.45	0.35

Tabell 0-1 Accelerationer Väder 1

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]	x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]
1	5	0.04	0.22	0.16	-	-	-
1	15	0.09	0.34	0.20	-	-	-
1	20	-	-	-	0.02	0.10	0.08
1	25	0.14	0.38	0.18	0.03	0.15	0.11
1	35	0.11	0.28	0.13	0.08	0.23	0.11
1	40	0.08	0.21	0.10	0.13	0.24	0.11
2	5	0.06	1.13	0.69	-	-	-
2	15	0.26	1.00	0.80	-	-	-
2	20	-	-	-	0.03	0.51	0.35
2	25	0.18	1.90	0.92	0.04	0.77	0.48
2	35	0.13	1.40	0.68	0.10	1.13	0.56
2	40	0.09	1.06	0.52	0.14	1.16	0.54
3	5	0.20	0.63	0.55	-	-	-
3	15	0.28	0.96	0.75	-	-	-
3	20	-	-	-	0.10	0.30	0.30
3	25	0.26	1.00	0.80	0.14	0.43	0.39
3	35	0.19	0.74	0.59	0.16	0.60	0.48
3	40	0.15	0.56	0.45	0.15	0.60	0.51

Tabell 0-2 Accelerationer Väder 2

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]	x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]
1	5	0.07	0.27	0.17	-	-	-
1	15	0.13	0.42	0.21	-	-	-
1	20	-	-	-	0.03	0.13	0.10
1	25	0.24	0.48	0.21	0.04	0.19	0.12
1	35	0.23	0.38	0.17	0.14	0.29	0.13
1	40	0.15	0.28	0.13	0.22	0.30	0.14
2	5	0.09	1.42	0.80	-	-	-
2	15	0.29	1.20	1.02	-	-	-
2	20	-	-	-	0.04	0.69	0.43
2	25	0.28	2.32	1.08	0.06	0.97	0.56
2	35	0.25	1.79	0.82	0.16	1.40	0.65
2	40	0.17	1.37	0.63	0.24	1.40	0.63
3	5	0.23	0.78	0.61	-	-	-
3	15	0.31	1.15	0.90	-	-	-
3	20	-	-	-	0.13	0.39	0.34
3	25	0.29	1.20	1.02	0.16	0.54	0.43
3	35	0.23	0.92	0.81	0.18	0.72	0.61
3	40	0.17	0.70	0.61	0.19	0.71	0.65

Tabell 0-3 Accelerationer Väder 3

Punkt	Heading	Befintligt vågskydd			Utbyggt vågskydd		
		x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]	x [m/s ²]	y [m/s ²]	z [m/s ²]
1	5	0.09	0.33	0.18	-	-	-
1	15	0.18	0.50	0.23	-	-	-
1	20	-	-	-	0.04	0.17	0.10
1	25	0.37	0.56	0.26	0.06	0.22	0.13
1	35	0.45	0.45	0.22	0.22	0.34	0.16
1	40	0.27	0.34	0.16	0.36	0.35	0.17
2	5	0.12	1.70	0.90	-	-	-
2	15	0.35	1.36	1.22	-	-	-
2	20	-	-	-	0.06	0.87	0.48
2	25	0.41	2.67	1.21	0.08	1.14	0.62
2	35	0.48	2.07	0.92	0.24	1.61	0.73
2	40	0.29	1.59	0.72	0.38	1.59	0.71
3	5	0.26	0.92	0.71	-	-	-
3	15	0.34	1.31	1.05	-	-	-
3	20	-	-	-	0.14	0.48	0.37
3	25	0.35	1.36	1.22	0.18	0.62	0.48
3	35	0.34	1.06	1.00	0.21	0.82	0.73
3	40	0.22	0.81	0.75	0.27	0.81	0.77

Tabell 0-4 Accelerationer Väder 4

Jämförelse av accelerationer, befintligt vågskydd – utbyggt vågskydd

Även accelerationerna uppvisar samma beteende som rörelserna och hastigheterna.

Heading 25°

Även när det gäller accelerationer så är situationen värst med befintligt vågskydd. Störst värden antar accelerationen i y-led.

Heading 35°

Här är värdena för de båda utformningarna väldigt lika varandra.

Heading 45°

Accelerationerna med utbyggt vågskydd är för denna heading större än med befintligt.

Jämförelse av accelerationer med rekommendationer

Här finns bara en rekommendation och det avser gränsvärdet i heave för säker lastning. Detta värde överskrider betydligt fler gånger i den befintliga hamnen än i den utbyggda. De största accelerationerna uppstår i y-led vid bogrampen. Det finns emellertid inget rekommenderat gränsvärde för accelerationer i denna riktning.