

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep
Mechanische Constructie en Productie
Voorzitter: Prof. Dr. Ir. Joris Degrieck

Springingsverschijnsel bij Estuaire Vaart

door

Jeroen VERWILLIGEN

Promotor: Prof. Dr. Ir. M. VANTORRE

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk
elektrotechnisch-werktuigkundig ingenieur - optie Maritieme Techniek.

Academiejaar 2005-2006

Woord Vooraf

Hierbij wil ik graag volgende personen bedanken:

Prof. Dr Ir. M. Vantorre voor het begeleiden van dit eindwerk en de vlotte communicatie.

Prof Dr Ir. P. Truijens voor de begeleiding tijdens het eerste semester.

Ir B. Vandevoorde voor de instapbegeleiding.

Ellen Christiaens en Florent Maes voor de correcties bij het Engelstalig abstract.

Zij die mij het nauwst aan het hart liggen: mijn ouders, zussen en vriendin.

De auteur geeft de toelating dit afstudeerwerk voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van het afstudeerwerk te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van de resultaten van dit afstudeerwerk.

Het computerprogramma horend bij deze thesis is op eenvoudige aanvraag verkrijgbaar bij de auteur.

Juni 2006

Jeroen Verwilligen

Springingsverschijnsel bij Estuaire Vaart

door Jeroen VERWILLIGEN

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk elektrotechnisch-werktuigkundig ingenieur met optie Maritieme Techniek.

Academiejaar 2005-2006

Promotor: Prof. Dr. Ir. M. Vantorre
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Universiteit Gent

Vakgroep Mechanische Constructie en Productie, richting Maritieme Techniek
Voorzitter: Prof. Dr. Ir. Joris Degrieck

Samenvatting

In dit eindwerk wordt de invloed van springing onderzocht bij estuaire containerschepen. Springing treedt op als de ontmoetingsfrequentie de natuurlijke frequentie van het schip benadert.

In het eerste hoofdstuk wordt de technische en economische achtergrond van het probleem geschetst.

Het tweede hoofdstuk vat de eigenschappen van de besproken testschepen samen. Hier worden de basisconfiguraties neergeschreven die verder onderzocht worden.

Het derde hoofdstuk behandelt de berekeningsmethode die gevolgd werd. Deze kan in 4 delen opgesplitst worden.

- Berekening van de natuurlijke frequentie
- Bepaling dynamische versterkingsfunctie
- RAO-berekening van een schip
- Berekening overschrijdingskans, met de uiteindelijke vergelijking tussen statische en dynamische responsie.

In het vierde hoofdstuk wordt de berekening uitgelegd aan de hand van een computerprogramma dat te vinden is op de Cd-rom bij deze thesis. Dit programma bevat de uitwerking van de berekeningsmethode uit hoofdstuk 3.

Uiteindelijk worden de resultaten en hun bespreking in het vijfde hoofdstuk ondergebracht. Naast de natuurlijke frequentie zijn dit de springingsgevoeligheid van de verschillende configuraties bij één standaardconditie net als van één basisconfiguratie (D1) bij verschillende condities. De springingsgevoeligheid is een maat voor het verschil in responsie wanneer wel of niet rekening gehouden wordt met de dynamische versterker (of springing).

In een afsluitende samenvatting worden de belangrijkste resultaten en conclusies herhaald.

Trefwoorden: estuaire, natuurlijke frequentie, dynamische versterking, overschrijdingskans, springingsgevoeligheid.

Springing in Estuary Containerships

Jeroen VERWILLIGEN

Supervisor: Prof. Dr. Ir. Marc Vantorre

Abstract: This article sets forth the effect of springing in estuary container ships on bending moments in the beam of the ship. The result is an influence factor for springing.

Keywords: two-node vertical frequency, springing, estuary.

I. INTRODUCTION

The Belgian economy is evolving more and more from a manufacturing economy to a transporting economy. As a result of this transformation many logistic problems arise.

One of these problems concerns the harbour of Zeebrugge where a huge container terminal has been build.

Due to economic, social and environmental reasons road traffic or railways cannot transport more containers as they already do. Building a new canal between Zeebrugge and Gent seems to be an alternative but is considered too expensive

The ultimate solution to container transportation is the use of estuary container ships. These ships must be capable of sailing the estuary area between Zeebrugge and Vlissingen.

For this new traffic, ships should be designed and investigated. In design springing is not taken into account. The purpose of this abstract is to evaluate whether this assumption is correct.

II. SPRINGING

The design of estuary container ships is based on existing ships that sail on the river Rhine and the Scheldt. These ships are long and have an open structure, which is typical of container ships. For these reasons it might be that the ships have a low two-node vertical frequency.

The waves in the estuary area have much higher energy than those in the rivers and canals. Even waves with a very high frequency (up to 3 rad/s) can contain sufficient energy.

When the frequency of encounter¹ approximates the two-node vertical frequency of the ship resonance is reached. Severe bending moments will occur.

Waves introducing resonance in a ship is called springing.

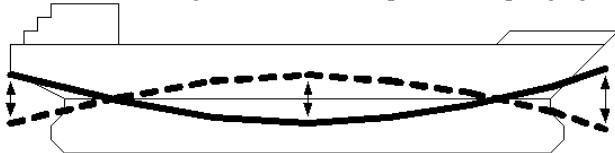


Figure 1: Two-node vibration of the shipbeam

J. Verwilligen, Ghent University, Ghent, Belgium.
E-mail: Jeroen.Verwilligen@ugent.be

¹ The frequency of encounter is the relative frequency between ship and wave. This value depends on speed, wave frequency, heading and water depth.

III. CALCULATIONS

A. Method

Evaluating springing for a ship requires 6 steps

- Calculation of the natural frequency
- Calculation of the dynamic magnifier
- RAO without springing
- RAO multiplied with dynamic magnifier
- Multiplication of the static and dynamic RAO with wave spectrum
- Statistic evaluation of the influence of springing

B. Configurations

At this moment there are 4 proposals for estuary container ships. These 4 basic configurations will be called A, B, C & D. The dimensions are shown in the following grid.

Table 1: Basic configurations estuary container ships

Ship	Load	L [m]	B [m]	D [m]	T ₀ [m]	T _L [m]
A	Full	109,5	11,4	5,5	3	3
	Ballast	109,5	11,4	5,5	2,75	2
B	Full	109,5	17,1	6	3,5	3,5
	Ballast	109,5	17,1	6	2,75	2
C	Full	134,7	17,1	6	3,5	3,5
	Ballast	134,7	17,1	6	2,75	2
D	Full	134,7	22,8	6,5	3,5	3,5
	Ballast	134,7	22,8	6,5	2,75	2

Each basic configuration is evaluated in full and ballasted condition. As a result 8 situations will be examined.

C. Natural frequency ω_n

The calculation of the two-node vertical frequency is based on the following algorithm [1]. The inputs of this algorithm are the dimension, the moment of inertia and the mass distribution.

1. Approximate the two-node vibration of the ship (for example by the vibration of a free-free-beam).
2. Multiply the current vibration with the mass distribution. Because of the harmonic vibration, this multiplication is linear to the vertical forces in the ship beam.
3. Integrate the solution of (2) 4 times and divide it by the moment of inertia and the elastic modulus. In this manner the amplitude of the vibration over the length of the ship is found.

- The deflection of this vibration-profile leads to the natural frequency.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{y_{\max}}} \quad (1)$$

- Iterate the algorithm by introducing the new vibration-profile (3) in the first step (1). The iteration stops when the difference in natural frequency becomes very small.

D. Dynamic magnifier

When resonance is reached, bending moments in the ship beam will reach much higher values than those in static conditions.

The multiplication factor depends on the damping coefficient of the ship and the frequency of encounter. The multiplication factor can be derived from the following transfer function. This transfer function represents the normal mode deflection due to a normal mode excitation [1].

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{b}{b_{\text{krit}}}\right)^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (2)$$

The value of b/b_{krit} is obtained by empirical formulas depending on ω_n and L [2].

E. RAO

The static RAO (Response Amplitude Operator) is a 2-dimensional matrix that contains the static values of the bending moment in the mid ship of the ship beam. The 2 parameters are the frequency of encounter and the relative wave heading.

The calculation of the static RAO is done by the computer program Seaway for WINDOWS. The static RAO must be multiplied by the dynamic magnifier to achieve the dynamic RAO.

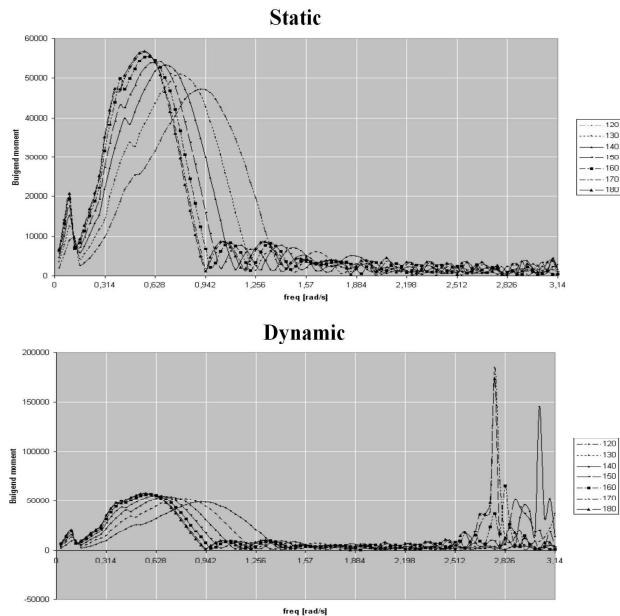


Figure 2: Static and Dynamic RAO of a full A-ship with speed 10 kn, waterdepth 10 m and in head waves $\phi = 120^\circ-180^\circ$

The illustration above shows the dynamic and static RAO in head (frontal) waves. In head waves it is possible that the frequencies of encounter equals the natural frequency. This results in peaks in the dynamic RAO.

The static and dynamic RAO have to be multiplied with the wave spectrum in the estuary area, to achieve the experienced bending moments in the ship beam.

If the evaluation is made for a large number of wave spectra (measured every 30 minutes during one year) a statistic evaluation can be made.

F. Statistic evaluation

With the results of different wave spectra, the **maximum bending moment** a ship will meet **during its lifetime** when the **significant wave height is limited** to a certain value (1.7 –2 m) can be calculated.

Comparing this value in static and dynamic conditions, the influence of springing can be evaluated by the relative augmentation (%) of the critical bending moment in static and dynamic conditions. This relative augmentation (%) will be called the springing influence (SI)

IV. RESULTS

In the following table the most important results are shown.

Table 2: Results: Natural frequency, b/b_{crit} , SI

Ship	Load	ω_n [rad/s]	b/b_{crit}	SI [%]
A	Full	6,718	0,0036	0,14
	Ballast	6,655	0,0035	1,01
B	Full	6,413	0,0035	3,24
	Ballast	6,492	0,0035	5,09
C	Full	5,042	0,0029	4,75
	Ballast	5,271	0,0030	6,10
D	Full	4,830	0,0028	6,55
	Ballast	5,018	0,0029	10,00

V. CONCLUSION

The following conclusions can be drawn from the results.

- The SI increases with the dimensions
- Ballast conditions are more sensitive to springing than a ship at full load.
- Although the SI is higher in ballast, the absolute value of the dynamic response of a ship at ballast condition will be lower than that of a ship at full load.
- Springing should not be taken into account when designing the basic configurations. The max. SI is 6.55 %, which is far below the safety factor.

REFERENCES

- F.H. Todd, Ship Hull Vibration, Edward Arnold (Publishers) LTD, London, 1961.
- R. Wereldsma, Statistical approach to the analysis of longitudinal stresses in a simplified ship's girder due to a long crested irregular oblique sealoading, Delft, 1972
- Jelena Vidiv Perunovic, Springing response due to bidirectional wave excitation, Technical University of Denmark, Lyngby, 2005

Inhoudsopgave

<i>Woord Vooraf</i>	<i>i</i>
<i>Samenvatting</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Inhoudsopgave</i>	<i>vi</i>
<i>Symbolen en afkortingen</i>	<i>xi</i>
Romeinse letters	xi
Griekse Letters	xii
Extensies computerbestanden	xiii
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Estuaire Vaart	2
1.3 Springing	2
1.4 Doel van de thesis	3
2 Onderzochte configuraties	5
2.1 Hoofdafmetingen	5
2.2 Basiskarakteristieken	5
3 Berekeningen	7
3.1 Afmetingen en gegevens	7
3.2 Methode ω_n -berekening	8
3.3 Massaverdeling	9
3.3.1 Statische massa	9
3.3.2 Verandering massaverdeling voor krachterevenwicht	11
3.3.3 Verandering massaverdeling voor momentenevenwicht	12
3.3.4 Aangepaste massaverdeling	15
3.3.5 Toegevoegde massa	18
3.4 Trillingen	23
3.4.1 Trillingsamplitude	23

3.4.2	Trillingsamplitude van een uniforme balk	24
3.4.3	Aanpassen trillingsprofiel voor dynamisch evenwicht	27
3.4.3.1	Dwarskracht	28
3.4.3.2	Moment	30
3.4.3.3	methode van schadlovsky	31
3.4.3.4	Praktische uitvoering	34
3.4.4	Bepaling van het trillingsprofiel uitgaande van dwarskracht en buigend moment.	35
3.4.4.1	Berekening van krommingen	36
3.5	Natuurlijke frequentie	39
3.6	Iteratie	41
3.7	Bepaling van $V(h,\omega,\mu)$ waarvoor $\omega_e=\omega_n$	42
3.7.1	Algemeen.	42
3.7.2	Numerieke iteratie voor k-bepaling	43
3.7.2.1	Bepalen van de iteratiebetrekking $f(k)$	43
3.7.2.2	Vooropstellen van een beginwaarde voor k	44
3.7.2.3	Functie afleiden naar k	44
3.7.2.4	Eigenlijke iteratie.	45
3.7.2.5	Opmerking	45
3.7.3	$V(\omega,\mu,h)$	46
3.7.4	Resultaten uit de tabellen.	47
3.7.5	Resonerende golfcomponenten	49
3.7.6	Herleiden resultaten naar aardvaste assensteels	50
3.7.7	Praktisch uitvoering	50
3.8	Frequentie-responsie-functie	52
3.8.1	Dynamische versterking	52
3.8.2	Bepalen van de dempingfactor bij springing	54
3.9	Bepaling frequentiekaracteristiek	57
3.9.1	Frequentiekaracteristiek en spectra (theorie)	57
3.9.1.1	Frequentiekaracterisitek	57
3.9.1.2	Golfspectrum	57
3.9.1.3	Responsie	58
3.9.2	Input RAO	59
3.9.3	Begroting RAO	60
3.9.3.1	Spantenplan *.hul	61
3.9.3.2	Ladingscondities	62
3.9.3.3	Numerieke methode	63
3.9.3.4	Dempingsfactoren	64
3.9.3.5	Omgevingsfactoren	64

3.9.3.6	Te onderzoeken dwarssecties	65
3.9.3.7	printopties	66
3.9.4	RAO vermenigvuldigen met dynamische versterker	67
3.9.5	Visualisatie dynamische RAO	68
3.9.5.1	Dynamisch	70
3.9.5.2	Statisch	71
3.9.6	Opstellen *.S1 en *.ENC	72
3.10	Responsiegegevensbestand	73
3.10.1	Directioneel Golfspectrum	73
3.10.2	Genereren Responsiegegevensbestand	74
3.10.3	Responsiegegevensbestand, *.res	76
3.11	Statistische studie	77
3.11.1	Overschrijdingskans ifv karakteristieke golfhoogte	78
3.11.2	Overschrijdingskansbestand	79
3.11.3	Reis-, jaar- & levensduuroverschrijding	80
3.11.3.1	Reis	80
3.11.3.2	jaar	81
3.11.3.3	levensduur	81
3.11.4	Verschillende kritische waarden	81
3.12	Berekening statische overschrijdingskansen	82
3.13	Vergelijking Statisch en Dynamisch	83
4	Praktische Berekeningen	84
4.1	Installatie formulier	86
4.2	Gebruik van het formulier	86
4.3	Aanpassen geometrie	87
4.3.1	Bonjeankrommen	88
4.3.2	De breedteverdeling	90
4.3.3	Hoofdafmetingen	90
4.3.4	Toegevoegde massa	91
4.4	Berekening natuurlijke frequentie	92
4.4.1	Langsscheepse verdeling	92
4.4.2	Toegevoegde massa	93
4.4.3	Massaverdeling	93
4.4.4	Trillingsprofiel	93
4.4.5	X-, V-, M-waarden	94
4.4.6	Traagheidsmoment	94

4.4.7	Integratie M/I	94
4.4.8	Aangepaste Trilling	94
4.4.9	Berekening natuurlijke frequentie	95
4.4.10	Iteratie	95
4.5	RAO	95
4.5.1	Berekening dempingsverhouding	95
4.5.2	Eigengolven	96
4.5.3	Berekening RAO	96
4.5.4	Grafiek RAO	98
4.6	Overschrijdingskans	98
4.6.1	Berekening overschrijdingskans	98
4.6.2	Vergelijking Statisch/Dynamisch	99
4.6.3	Afwijkende condities	100
5	Resultaten	101
5.1	Natuurlijke frequenties	101
5.2	Resultaten standaardconditie	103
5.2.1	A1-schip, Ladingsconditie: Vol (A1).	104
5.2.1.1	V = 10 kn, x = 55 m, h = 10	104
5.2.2	A1-schip, Ladingsconditie: Ballast (A3).	106
5.2.2.1	V = 10 kn, x = 55 m, h = 10	106
5.2.3	A2-schip, Ladingsconditie: Vol (A2).	108
5.2.3.1	V = 10, x = 55, h = 10	108
5.2.4	B1-schip, Ladingsconditie: Vol (B1).	110
5.2.4.1	V = 10, x = 55, h = 10	110
5.2.5	B1-schip, Ladingsconditie: Ballast (B3).	112
5.2.5.1	V = 10, x = 55, h = 10	112
5.2.6	B2-schip, Ladingsconditie: Vol (B2).	114
5.2.6.1	V = 10, x = 55, h = 10	114
5.2.7	C1-schip, Ladingsconditie: Vol (C1).	116
5.2.7.1	V = 10, x = 65, h = 10	116
5.2.8	C1-schip, Ladingsconditie: Ballast (C3)	118
5.2.8.1	V = 10, x = 65, h = 10	118
5.2.9	C2-schip, Ladingsconditie: Vol (C2).	120
5.2.9.1	V = 10, x = 65, h = 10	120
5.2.10	D1-schip, Ladingsconditie: Vol (D1).	122
5.2.10.1	V = 10, x = 65, h = 10	122
5.2.11	D1-schip, ladingsconditie: Ballast (D3)	124
5.2.11.1	V = 10, x = 65, h = 10	124

5.2.12	D2-schip, Ladingsconditie: Vol (D2).	126
5.2.12.1	$V = 10$, $x = 65$, $h = 10$	126
5.3	Bespreking standaardconditie	128
5.4	Resultaten Aangepaste Conditie	131
5.4.1	Aangepaste condities	131
5.4.2	Variaties op de koershoek	133
5.4.2.1	koers Heen: 60°	135
5.4.2.2	koers Heen: 80°	136
5.4.2.3	koers Terug: 240°	137
5.4.2.4	koers Terug: 260°	138
5.4.3	Variaties op de snelheid	139
5.4.3.1	Snelheid: 8 kn	140
5.4.3.2	Snelheid: 12 kn	142
5.4.4	Variaties van de diepgang	144
5.4.4.1	Waterdiepte = 8 m	145
5.4.4.2	Waterdiepte = 12 m	146
5.5	Samenvatting aangepaste condities	147
5.5.1	Bespreking afwijkende condities	150
5.5.1.1	Koersafwijking	150
5.5.1.2	Snelheidsverandering	150
5.5.1.3	Diepteveranderingen	151
6	Besluit	152
7	Referenties	153

Symbolen en afkortingen

Romeinse letters

A	Dwarsoppervlak
a	Toegevoegde massa
B	Breedte schip
b	Demping
b_{krit}	Kritische demping
BM	Buigend Moment
C_x	Tweedimensionale toegevoegde massacoëfficiënt
E	Elasticiteitsmodulus Energie
f	Frequentie
g	Gravitatieconstante
H	Transferfunctie, Dynamische versterker
h	Waterdiepte
L	Lengte schip
LCB	Langsscheeps coördinaat drukingspunt
LCG	Langsscheepse coördinaat zwaartepunt
M	Buigend moment
m	Massa
m_a	Toegevoegde massa
m_{tot}	Totale massa
q	Belasting
R	Kromtestraal
RAO	Response Amplitude Operator
RM	Residueel moment
RS	Residuele dwarskracht
I	Traagheidsmoment
J_2	Lewisfactor 2-knoopstrilling
J_G	Traagheidsmoment van de massaverdeling
K	evenredigheidsfactor

k	Golfgetal
k_{xx}	Giratiestraal
S	Spectrale densiteit
SC	Standaardconditie
SI	Springingsgevoeligheid
T	Diepgang schip
t	tijd
V	Snelheid
	Dwarskracht
v	Verplaatsing
W	Gewicht
x	Langsscheepse coördinaat
x_G	Langsscheepse coördinaat zwaartepunt (=LCG)
y	Amplitude
$Y_{M\zeta}$	Frequentiekaracterisitek

Griekse Letters

α	Hoekverdraaiing
χ	Kromming
δ	Logaritmisch decrement
$\epsilon_{M\zeta}$	Fasehoek
γ	Demping
ζ	Golfhoogte
λ	Golfenlge
μ	Koershoek
ρ	Dichtheid
σ	Oppervlaktecoëfficiënt
ω	Golffrequentie
ω_e	Ontmoetingsfrequentie
ω_n	Natuurlijke frequentie

Extensies computerbestanden

DOC	MS Word-bestand
ENC	Ontmoetingsfrequentie-bestand
INP	Inputbestand Seaway
HUL	Spantanplan-bestand Seaway
OUT	Outputbestand Seaway
OV	Overschrijdingskans-bestand
RES	Responsiegegevens-bestand
S1	RAO bestand
XLS	Excel-bestand

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

België is een doorvoerland. In dit economisch systeem hebben zijn havens bijgevolg een grote economische waarde.

De haven van Zeebrugge is een groeiende haven waar jaarlijks 30 miljoen ton goederen verscheept worden. Hiervan bestaat het grootste deel uit containers. Om die containers op hun eindbestemming te brengen is echter een goede hinterlandverbinding nodig.

Net daar knelt het schoentje.

Momenteel wordt 65 procent van de goederen afgevoerd door vrachtwagens, 20 procent per trein en de overige 15 procent wordt overgeladen op binnenschepen (richting binnenland) of kleine schepen (richting Groot-Brittannië).

Overvolle wegen nopen om meer containers via schip of trein te vervoeren.

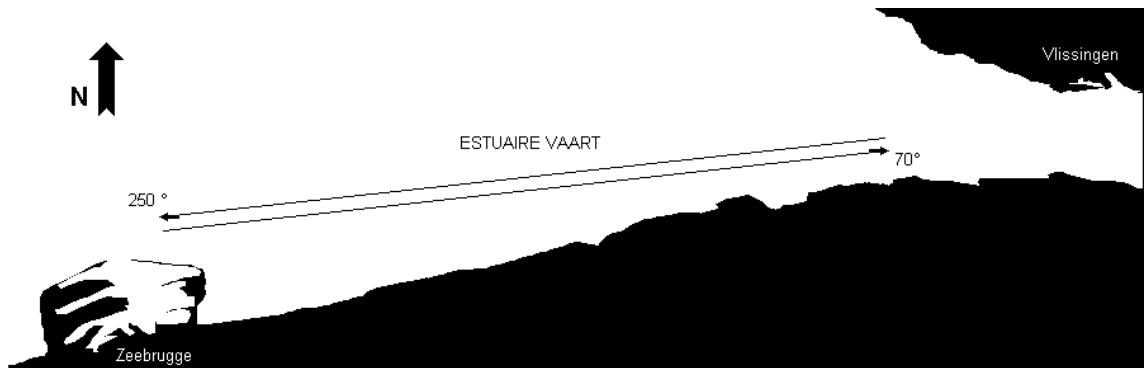
De ontsluitingspolitiek van Zeebrugge is er dan ook op gericht het vervoer per schip te promoten.

De kanalen rond Zeebrugge zijn niet uitgerust om een groot aantal binnenschepen te ontvangen. Bovendien zijn de plannen voor de aanleg van een nieuw kanaal dat Zeebrugge met Gent zou verbinden opgeborgen¹.

Een andere manier om de containers uit Zeebrugge weg te krijgen is het gebruik van de Noordzee als verbindingskanaal tussen Zeebrugge en Antwerpen. Dit houdt in dat een binnenschip waaraan enkele verstevigingen ingebouwd worden, de goederen via de Noordzee en de Westerschelde naar Antwerpen verscheept. Deze transportformule wordt aangeduid met **estuaire vaart**.

¹ De redenen hiervoor waren de hoge kostprijs, de lange wachttijd en bezwaren van omwonenden.

1.2 Estuaire Vaart



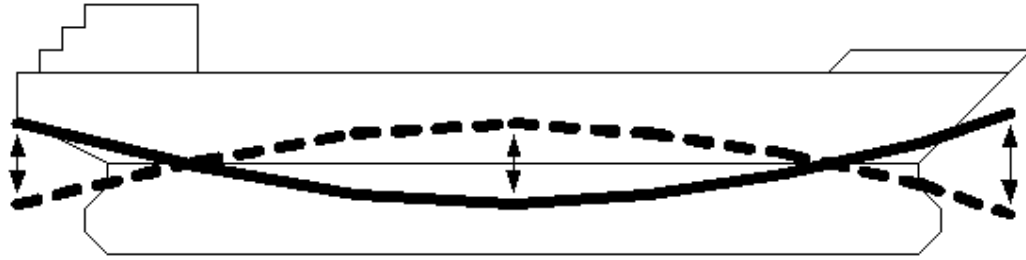
Figuur 1.1: Estuaire vaart

Binnenschepen mogen vandaag de dag enkel bij beperkte weercondities op de Noordzee uitvaren. Deze beperkingen zorgen ervoor dat een gewoon binnenschip gemiddeld 40 dagen per jaar niet kan uitvaren in het estuaire gebied. Om dit getal te verlagen is het noodzakelijk de binnenschepen zo aan te passen dat ze ook bij zwaardere zeetoestanden veilig kunnen varen.

Eén van de problemen die zich kunnen stellen als een binnenschip op de Noordzee vaart is **springing**. Het springingsverschijnsel bij estuaire (test)schepen vormt het onderwerp van deze thesis.

1.3 Springing

Wanneer een containerschip door korte, hoogfrequente golven vaart, is het mogelijk dat de ontmoetingsfrequentie van de golven in de buurt komt te liggen van de eigenfrequentie van de verticale scheepsbewegingen (resonantie). In dat geval ontstaat er een geëxciteerde 2-knoopstrilling van de scheepsbalk die aanleiding geeft tot grote spanningen.



Figuur 1.2: 2-knoopstrilling van de scheepsbalk

1.4 Doel van de thesis

De testschepen die in deze thesis besproken worden, hebben allemaal een open structuur (als containerschip). Hun veerstijfheid is bijgevolg gering.

Dit impliceert dat hun natuurlijke frequentie een relatief lage waarde zal hebben. Mogelijks vallen de hoogfrequente delen van het golfspectrum samen met de natuurlijke frequentie van de testschepen².

Concreet heeft deze thesis als doel om de volgende zaken te berekenen, te vergelijken en te bespreken:

- Natuurlijke frequentie van de testschepen berekenen
- Dynamische versterking bij resonantie bepalen
- Voor verschillende invalshoeken en ontmoetingsfrequenties de buigende momenten in de scheepsbalk begroten.
- Deze waarden aanpassen aan de dynamische versterking
- De excitatie van het schip bij verschillende golffrequenties en koershoeken vergelijken met het directioneel golfspectrum opgemeten aan “de Bol van Heist”. (onderzoeken of de gevaarlijke golven een hoge energie hebben)
- Statistische studie met betrekking tot overschrijdingskansen.

² Merk op dat niet de golffrequentie maar de ontmoetingsfrequentie gelijk moet zijn aan de natuurlijke frequentie om resonantie te bekomen. Zoals later uitgelegd wordt, zal resonantie niet alleen afhangen van de golffrequentie, maar ook van de scheepssnelheid, koersrichting en waterdiepte.

- Dezelfde statistische studie uitvoeren op RAO's zonder dynamische versterking, om op die manier de invloed van springing te beoordelen.
- Evaluatie voor verschillende vaarsituaties bij één basisconfiguratie

2 Onderzochte configuraties

2.1 Hoofdafmetingen

In het kader van de estuaire studie werden 4 basisconfiguraties vastgelegd. Daarbij werd rekening gehouden met de bestaande vloot. Een bespreking van deze basisconfiguraties kan men nalezen in de “Haalbaarheidsstudie Estuair Containervervoer” [1.]

Het onderzoek concentreert zich op 4 basisconfiguraties. Deze bevatten zowel de uiterste configuraties (minimaal en maximaal displacement) als 2 tussenvormen.

	L [m]	B [m]
A	110	11,4
B	110	17,1
C	135	17,1
D	135	22,8

Figuur 2.1: Hoofdafmetingen basisconfiguraties

Merk op dat de breedte gekozen wordt als een geheel aantal containerbreedtes. Zo zal een A-schip 4, een B- of C-schip 6 en een D-schip 8 containers naast elkaar kunnen voeren.

Momenteel varen er 5 schepen die een certificaat voor estuaire vaart ontvangen hebben. Deze hebben allen afmetingen overeenkomstig met configuratie A.

Schepen met configuratie C worden momenteel ingezet op de Rijn.

2.2 Basiskarakteristieken

Voor de 4 configuraties, worden telkens 2 vormen geëvalueerd. Deze kunnen gekarakteriseerd worden door hun holte en weerstandsmoment. Bij elk van deze vormen hoort uiteraard een aparte massaverdeling.

De 2 vormen van elke configuratie worden in volle toestand onderzocht (**X1 & X2**). Bovendien wordt de ballastconditie onderzocht van de lichtste vorm (deze met kleinste holte, **X3**).

Om het weerstandsmoment om te rekenen naar een traagheidsmoment, dient de hoogte van de neutrale lijn (HNL) bekend te zijn. Een waarde voor HNL wordt ingelezen uit een thesis van Benoit Vandevorde en Stefan Paprocki [2.].

In deze thesis werd het grootspantontwerp ontworpen voor een estuair schip met een holte van 6.5 m. HNL wordt lineair verondersteld met de holte. Op die manier bekomt men de hoogte van de neutrale lijn voor alle configuraties.

$$HNL = \frac{2.09}{6.5} \cdot D \quad (2.1)$$

De basiskarakteristieken worden samengevat in onderstaande tabel.

	L	B	T	F	D	HNL	W	Depl	KG
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³]	[ton]	[m]
A1	109,5	11,4	3	2,5	5,5	1,77	0,58	3591	3,75
A2	109,5	11,4	4	3	7	2,25	0,67	4788	4
A3	109,5	11,4	2,375	3,125	5,5	1,77	0,58	2845	2,36
B1	109,5	17,1	3,5	2,5	6	1,93	0,92	5977	4
B2	109,5	17,1	5	3,5	8,5	2,73	1,06	8539	5,5
B3	109,5	17,1	2,375	3,625	6	1,93	0,92	4058	3,05
C1	134,7	17,1	3,5	2,5	6	1,93	1,44	7350	4,5
C2	134,7	17,1	5	3,5	8,5	2,73	1,68	10501	5,5
C3	134,7	17,1	2,375	3,625	6	1,93	1,44	4990	3,05
D1	134,7	22,8	3,5	3	6,5	2,09	1,85	9548	4,5
D2	134,7	22,8	5	4	9	2,89	2,17	13641	5,5
D3	134,7	22,8	2,375	4,125	6,5	2,09	1,85	6482	3,46

Figuur 2.2: Karakteristieken basisconfiguraties

Het verschil in lengte tussen de onderzochte basiskarakteristieken en de vooropgestelde waarden is te wijten aan een schaalfactor in Seaway die slechts op 2 cijfers na de komma aangepast kan worden.

3 Berekeningen

In dit onderdeel zal voor één van de basisconfiguraties de volledige berekening overlopen worden. De beschouwde configuratie is die van een A-schip met holte 5.5 m, in volgeladen toestand.

3.1 Afmetingen en gegevens

Het A1-schip komt in afmetingen en vorm³ overeen met het schip dat in het academiejaar '04-'05 ontworpen werd door Benoit Vandevoorde en Stefan Paprocki [2.].

De massaverdeling over de lengte heeft een rechtstreeks gevolg voor de diepgang en de trim. Deze waarden bedragen respectievelijk 3 m en 0°⁴.

De basiskarakteristieken zijn af te lezen in het voorgaande hoofdstuk (zie “2.2 Basiskarakteristieken”).

De waterdiepte wordt 10 m verondersteld, zijnde de gebruikelijke waterdiepte in het estuaire gebied tussen Vlissingen en Zeebrugge⁵.

De hoogte van het zwaartepunt (KG) en de giratiestraal k_{xx} werden in overeenstemming met de vooropgestelde waarde gekozen⁶.

De andere giratiestralen werden bekomen door toepassing van onderstaand vuistregelkje:

$$k_{yy} = k_{zz} = 0.25 \cdot L \quad (3.1)$$

³ Op schaalfactoren na

⁴ De massaverdeling wordt later aangepast op eventuele tegenstrijdigheden tussen massaverdeling, diepgang en trim.

⁵ De Bol van Heist voert metingen uit bij h=9.5 m

⁶ De verdeling van de massa, KG en k_{xx} zijn terug te vinden op de Cd-om op de locatie: “formulier\Berekening natuurlijke frequentie\massaverdelingen\Ladingsverdelingen_corrMV27022006.xls”.

De 3 giratiestralen zijn:

k_{xx} [m]	3,99
k_{yy} [m]	27,38
k_{zz} [m]	27,38

Figuur 3.1: Giratiestralen

3.2 Methode ω_n -berekening

Voor de berekening van de natuurlijke frequentie bij een bepaalde ladingstoestand, maakt men gebruik van de methode van Todd [3.].

Deze gaat uit van de totale massa (dynamisch + statisch) en de traagheidsmomenten i.f.v. de langsscheepse coördinaat. Hieruit worden de dwarskrachten, de buigende momenten, de krommingen, de hoekverdraaiingen, de verplaatsingen en uiteindelijk de natuurlijke frequentie berekend.

Samengevat werkt de methode van Todd volgens volgend principe. Wanneer de massaverdeling en de versnellingsverdeling over de lengte van een schip bekend zijn, kan men door beide te vermenigvuldigen de verticale krachtwerking bekomen.

Doordat de trillingsbeweging op een vaste langsscheepse afstand harmonisch verondersteld wordt, is de versnelling aldaar evenredig met de verplaatsing van de balk.

De verplaatsing wordt in eerste instantie benaderd door een theoretische trillingsprofiel. Uitgaande van dit trillingsprofiel worden de verticale krachten berekend, die door integratie over de lengte, respectievelijk de dwarskracht, buigend moment, hoekverdraaiingen en verplaatsingen leveren.

Deze verplaatsingen bieden een nieuw trillingsprofiel aan. De deviatie van het uiteindelijke trillingsprofiel is een maat voor de natuurlijke frequentie.

Het algoritme kan als volgt samengevat worden:

- Massaverdeling aanpassen aan statische evenwichtscondities
- Berekenen toegevoegde massa
- Berekenen totale massa
- Benadering Trillingsprofiel
- Aanpassen trillingsprofiel aan dynamisch evenwicht
- Door 4 maal integratie van de verticale krachtwerking over de lengte, een nieuw trillingsprofiel berekenen
- Uit de deflectie van dit trillingsprofiel de natuurlijke frequentie berekenen.
- Iteratief herhalen van de berekening, waarbij uitgegaan wordt van het trillingsprofiel bekomen in de vorige stap.

Bovenstaande stappen komen hieronder uitgebreid aan bod.

3.3 Massaverdeling

Een eerste stap in de berekening van de natuurlijke frequentie is het bepalen van de verticale krachtwerking op het schip.

De massa van een bewegend schip bestaat uit een statische en een dynamische massa. De statische massa dient te voldoen aan de evenwichtscondities van een stilliggend schip.

3.3.1 Statische massa

De opgegeven statische massaverdeling wordt aangepast, zodat deze overeenstemt met de eigenschappen van het onderwaterschip. De eigenschappen die hier van tel zijn, zijn het **deplacement** en de **langsrichting van het zwaartepunt (LCB)**, die bij een voorop gegeven diepgang en trim bereikt worden.

De berekening van het deplacement uitgaande van de bonjeankrommen is een koud kunstje. Deze berekening is een numerieke integratie van de dwarsoppervlakken voorgesteld in deze krommen.

Aangezien het interval Δx niet constant is, zijn de benaderingsformules van Simpson niet eenvoudig toe te passen. Daarom zal de integratie gebeuren door een combinatie van de trapeziumregel en de methode van Simpson.

Eerst wordt gecontroleerd of twee opeenvolgende intervallen dezelfde lengte hebben. Is dit het geval dan kan de methode van Simpson uitgeoefend worden over deze **beide** intervallen.

$$V_{n \rightarrow n+2} = \frac{2}{3} \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot A_n + 2 \cdot A_{n+1} + \frac{1}{2} \cdot A_{n+2} \right) \quad (3.2)$$

Indien de lengte van de 2 intervallen verschillend was, wordt voor het **eerste** interval de bijdrage tot het displacement berekend.

$$V_{n \rightarrow n+1} = \frac{1}{2} \cdot \Delta x \cdot (A_n + A_{n+1}) \quad (3.3)$$

Wanneer het displacement aan de hand van bovenstaande methode begroot werd, kan ook de langsafstand van het drukkingspunt berekend worden. Dit gebeurt door te stellen dat LCB overeenkomt met een x-waarde waarvoor gemeten vanaf de achterpiek, de helft van het displacement bereikt wordt.

$$\int_0^{LCB} dV = \frac{V}{2} \quad (3.4)$$

Met dit in het achterhoofd, kan eenvoudig de juiste x-waarde berekend worden.

- Bereken de eerste x-waarde x_L waarvoor het displacement tussen die waarde en de achterpiek groter is dan $V/2$.
- De waarde van LCB bevindt zich zeker tussen x_L en x_{L-1} en kan benaderd worden door een lineaire interpolatie, met het plaatselijke displacement als gewichtsfactor

$$V_L = \int_0^{x_L} dV \quad (3.5)$$

$$V_{L-1} = \int_0^{x_{L-1}} dV \quad (3.6)$$

$$LCB = x_{L-1} + \frac{\frac{V}{2} - V_{L-1}}{V_L - V_{L-1}} \cdot (x_L - x_{L-1}) \quad (3.7)$$

Nu zowel het volumedeplacement als de langsrichting van het drukingspunt⁷ bekend zijn, dient nagegaan te worden of deze waarden conform zijn met de opgegeven massaverdeling.

3.3.2 Verandering massaverdeling voor krachtenevenwicht

Allereerst wordt de massaverdeling van het schip ingegeven. Zoals hierboven al aangehaald, zijn de standaard massaverdelingen al bekend, en kunnen deze waarden hier overgenomen worden.

Uitgaande van deze massaverdeling kan de totale massa berekenen worden door de massaverdeling over de lengte te integreren. De waarde die hiermee overeenstemt bedraagt 3295 ton voor het A1-schip. Deze waarde benadert de waarde van het onderwaterschip, het verschil tussen wordt de sluitfout genoemd.

De sluitfout kan eenvoudig weggewerkt worden door de ingevoerde massaverdeling in de hoogte aan te passen. Als alle ordinaten van de massaverdeling met een bepaald bedrag vergroot/verkleind worden zal de sluitfout verdwijnen.

Het correctiebedrag voor de massaverdeling is afhankelijk van de optredende sluitfout en de lengte van het schip. Ze wordt gegeven door:

$$\Delta m = \frac{\text{sluitfout}}{L} \text{ ton/m} \quad (3.8)$$

Bij de aangepaste massaverdeling zal een bedrag Δm [ton/m] afgetrokken moeten worden.

⁷ Voor het A1-schip met diepgang 3 m en trim 0°, wordt het displacement 3591 ton en LCB 52.44 m.

Naast de sluitfout voor de dwarskrachten, dient ook de sluitfout voor de momenten nul te zijn. Deze voorwaarde stelt dat het drukkingspunt (zwaartepunt van het onderwaterschip) en het zwaartepunt van het schip op dezelfde verticale moeten liggen.

3.3.3 Verandering massaverdeling voor momentenevenwicht

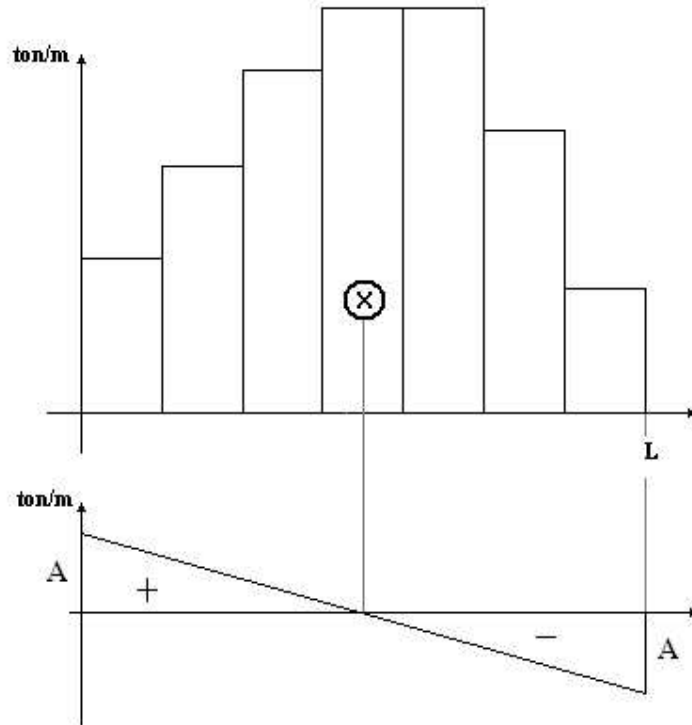
Om te voldoen aan het momentenevenwicht van een drijvende constructie is het noodzakelijk dat het drukkingspunt en zwaartepunt van deze constructie op dezelfde verticale liggen. Wanneer beide waarden uitgerekend werden, bleken LCB en LCG⁸ echter verschillend.

Om dit verschil weg te werken zal de massaverdeling opnieuw aangepast worden.

Een aangepaste massaverdeling waarvoor $LCB = LCG$, wordt bekomen door bij de oorspronkelijke distributie een lineair veranderende massadistributie op te tellen. Deze lineair veranderende massadistributie wordt midscheeps nul verondersteld.

Eén en ander wordt grafisch verduidelijkt:

⁸ De berekening van de statische massa en LCG uit de massaverdeling verloopt volledig analoog aan de berekening van het volumedeplacement en LCB uit de bonjeankrommen.

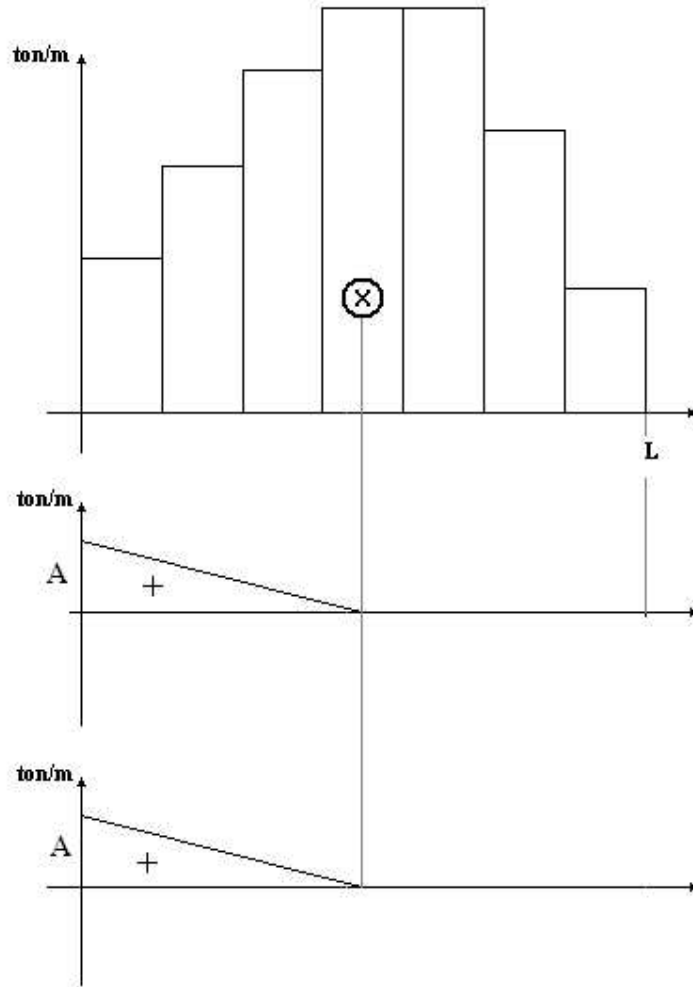


Figuur 3.2: Aanpassen massaverdeling

Door deze twee massaverdelingen bij elkaar op te tellen zal de langscoördinaat van het zwaartepunt verschuiven. De grootte van de verschuiving is afhankelijk van de ordinaatwaarde van A.

In bovenstaande grafiek is sprake van een negatieve massa. Omdat negatieve massa's fysisch moeilijker te interpreteren zijn, wordt het negatieve deel van de grafiek gepuntspiegeld rond het punt $x=L/2$.

Een equivalente situatie (althans voor de ligging van het zwaartepunt) wordt bijgevolg gegeven door:



Figuur 3.3: Aanpassen masseverdeling II

Het zwaartepunt van de driehoekige massaverdeling volgt onmiddellijk uit hun driehoekvorm, en bevindt zich op een derde van de abscis. Bijgevolg geldt dat $x_G = \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{2}$ voor beide driehoekige massaverdelingen.

De langascoördinaat van het zwaartepunt van de volledige massaverdeling wordt dan gevonden door een gewogen gemiddelde te nemen van de afzonderlijke zwaartepunten.

$$LCG = \frac{2 \cdot \frac{L}{6} \cdot \frac{A \cdot L}{4} + LCG_{origineel} \cdot M_{origineel}}{2 \cdot \frac{A \cdot L}{4} + M_{origineel}} \quad (3.9)$$

Gezocht echter wordt de waarde van A waarvoor LCG gelijk is aan LCB.

Uitgaande van bovenstaande formule kan een uitdrukking opgesteld worden voor A.

$$A = \frac{2 \cdot M_{\text{origineel}}}{L} \cdot \frac{LCG_{\text{origineel}} - LCB}{LCB - \frac{L}{6}} \quad (3.10)$$

Met de gevonden waarde wordt de massaverdeling aangepast.

3.3.4 Aangepaste massaverdeling

Uit bovenstaande redenering is duidelijk dat de oorspronkelijk aanvaarde massaverdeling, aangepast dient te worden aan zowel krachten- als momentenevenwicht.

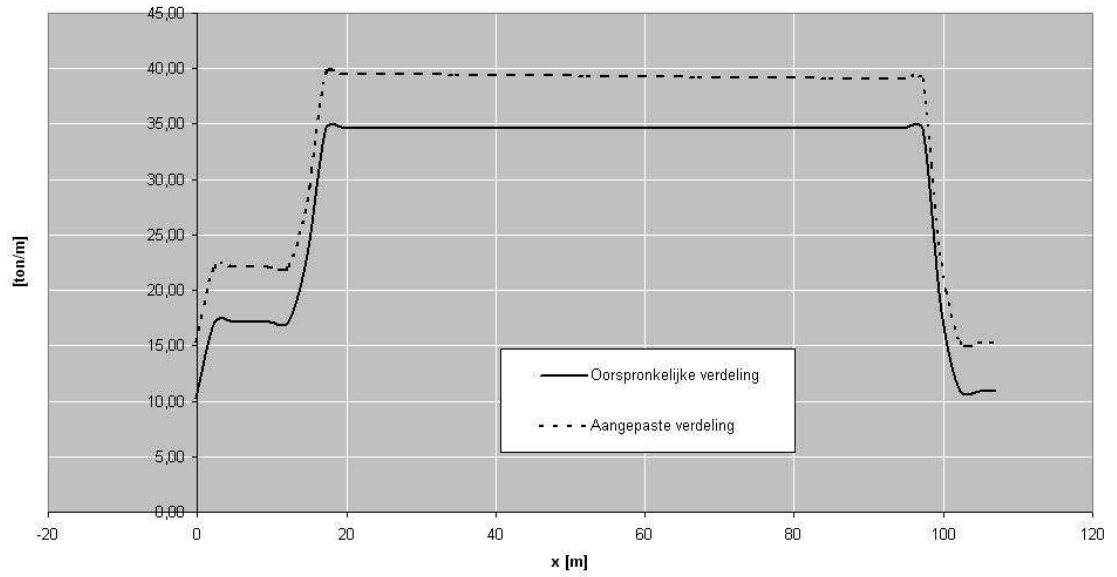
Een moeilijkheid hierbij is dat wanneer de massaverdeling eerst aangepast wordt voor het momentenevenwicht (zodat $LCB = LCG$) en vervolgens voor het krachtenevenwicht. De aanpassing voor het krachtenevenwicht ervoor kan zorgen dat LCB en LCG niet meer aan elkaar gelijk zijn.

Er zal dus een iteratieve berekening uitgevoerd moeten worden. De maximale afwijking tussen displacement en totale massa wordt 0.1 kg gekozen. Voor LCB en LCG wordt opgegeven dat hun waarden maximaal 0.1 mm mogen verschillen⁹.

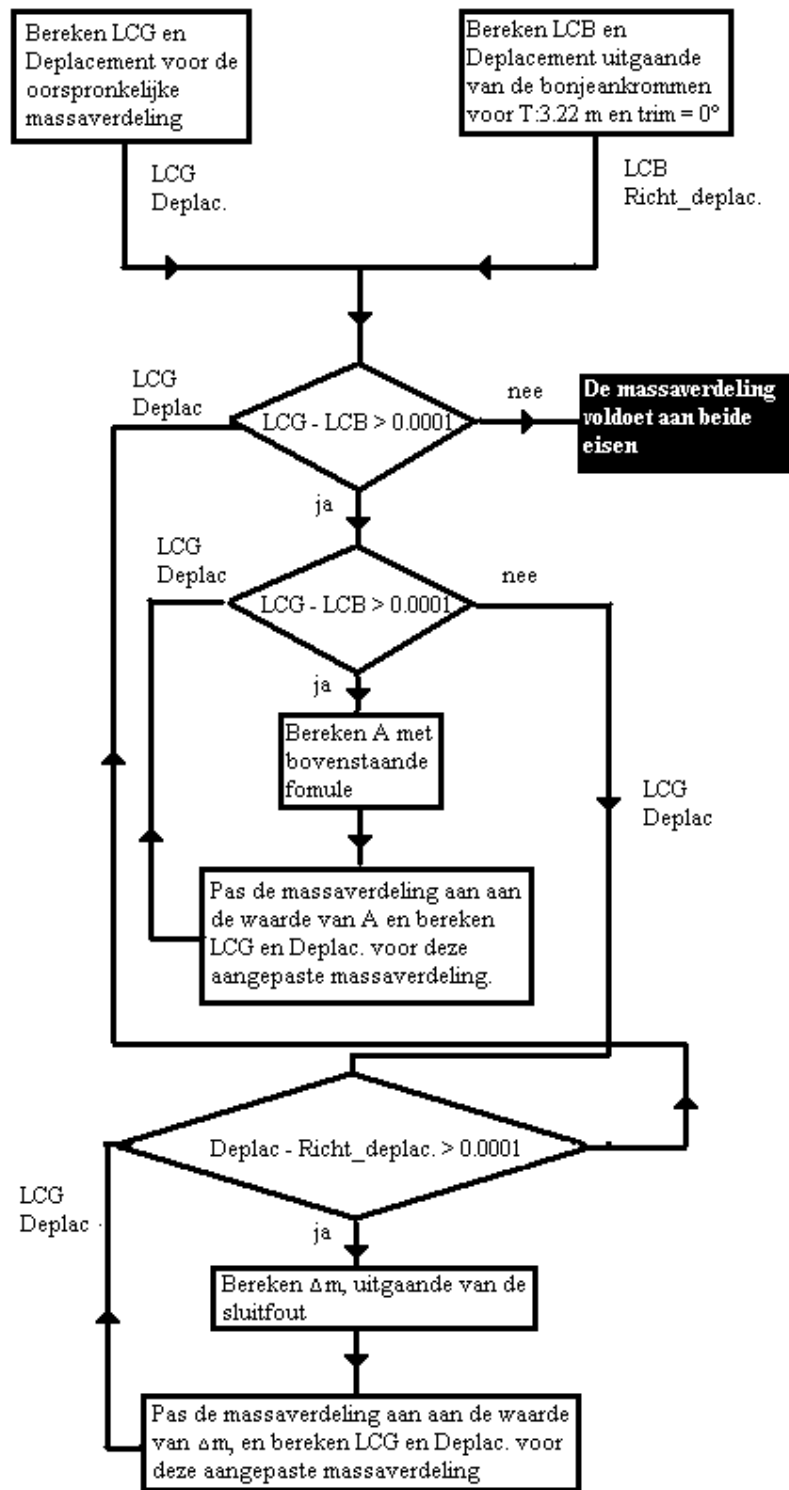
Hieronder wordt na de grafische voorstelling van de oorspronkelijke en aangepaste massaverdeling een principeschets van de berekening weergegeven.

⁹ De programmacode van de bijhorende macro kan teruggevonden worden op de Cd-rom op locatie `macro's\excel\aanpassen_massa`

Massaverdelingen



Figuur 3.4: Statische massaverdeling



Figuur 3.5: Principeschets voor het aanpassen van de massaverdeling

3.3.5 Toegevoegde massa

Wanneer het schip een beweging maakt door het water, zal de **omringende watermassa** de traagheid van het schip vergroten.

De scheepsbeweging zal aanleiding geven tot hydrodynamische drukken die het water rond het schip doen meebewegen. Deze drukken zullen gepaard gaan met krachten (integratie) die wegens de wet van Newton geschreven kunnen worden als het product van de versnellingen en de toegevoegde massa. De toegevoegde massa is m.a.w. een maat voor de inertievergroting.

De toegevoegde massa is de virtuele massa die de scheepsbewegingen perfect volgt en eenzelfde effect op de traagheid heeft als de totale omringende watermassa.

Omdat het omringende water met een verschillende versnelling beweegt dan het schip, kan de toegevoegde massa niet zomaar de meebewegend watermassa rond het schip genoemd worden.

De toegevoegde massa wordt meestal berekend door de Lewis-methode, onderstaande bespreking is gebaseerd op de cursus “Trillingen in Scheepsconstructies” door Prof. Dr. Ir. P. Truyens [4].

Lewis stelde een verband op tussen de oppervlakteverhouding (σ_D), de breedte-diepgang verhouding (B/T) en de tweedimensionale toegevoegde massa-coëfficiënt (C(x)).

De waarde van C(x) is de verhouding van twee waarden. In de teller staat de toegevoegde massa van een oneindig voortgezet prismatisch figuur met dwarsdoorsnede gelijk aan de plaatselijke dwarsdoorsnede van het schip. In de noemer staat de watermassa die vervat zit in een oneindig lange halve cilinder, waarvan de straal overeenstemt met de halve breedte op de waterlijn van de beschouwde dwarsdoorsnede.

Om de invloed van driedimensionale effecten te begroten wordt gebruik gemaakt van een Lewisfactor (J_n) die afhankelijk is van de trillingsmode (springing $n=2$).

De toegevoegde massa (a) wordt uiteindelijk gegeven door onderstaande formule:

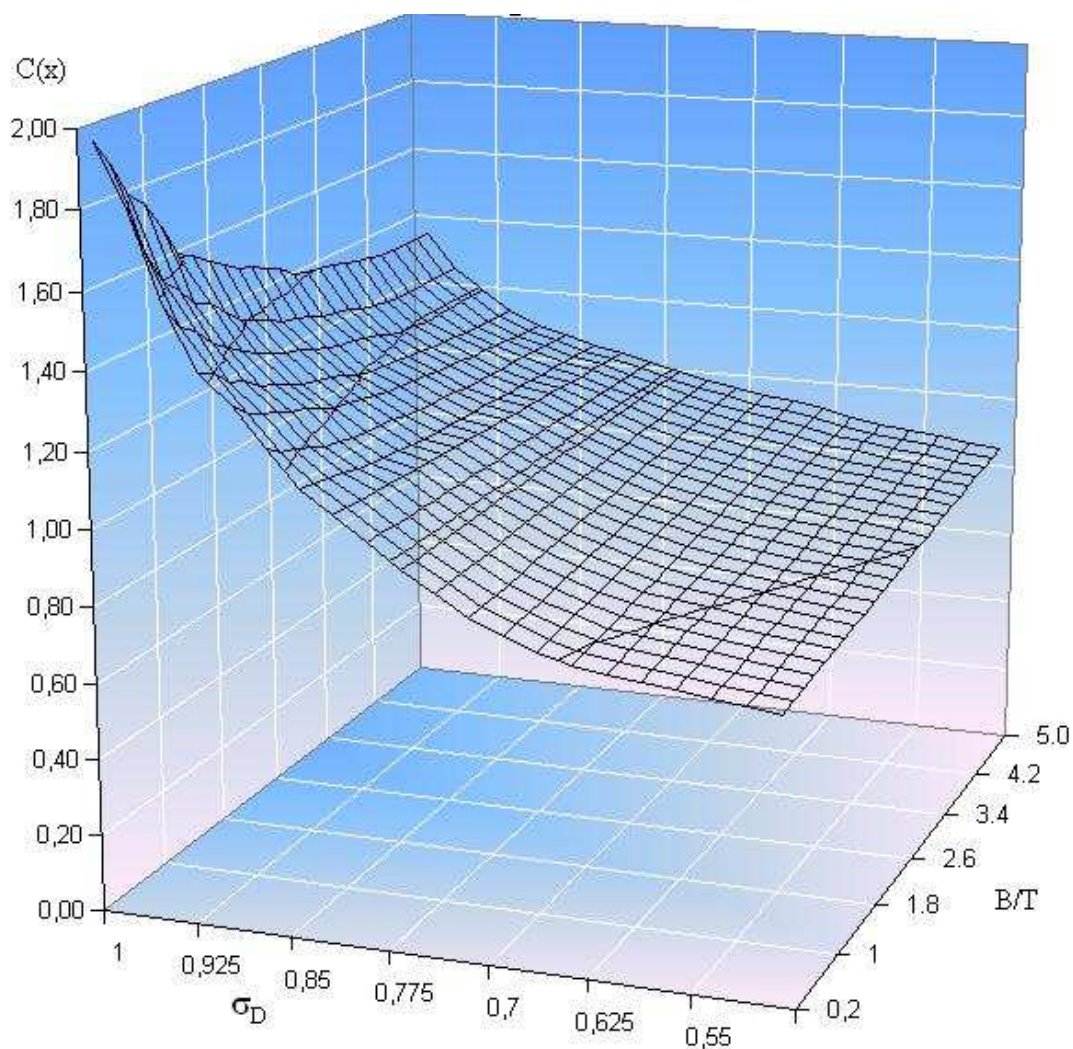
$$a(x) = \frac{\pi}{8} \cdot \rho \cdot B^2(x) \cdot C(x) \cdot J_2 \quad (3.11)$$

De waarden voor $C(x)$ kunnen bepaald worden uit tabellen en figuren (zie Figuur 3.6: 2- Dimensionale grafiek van Cx). Hierin worden de waarden voor C uitgezet in functie van enerzijds de sectionele oppervlakte coëfficiënt, en anderzijds de verhouding van de breedte op de diepgang. Het spreekt voor zich dat beide waarden zullen variëren met de langsscheepse coördinaat x .

De waarde voor de sectionele oppervlaktecoëfficiënt wordt bepaald als de verhouding van de natte oppervlakte gedeeld door de plaatselijke diepgang en breedte. Deze 3 waarden zijn allen veranderlijk met de lengte en worden opgenomen in de outputfile van Seaway.

$$\sigma_D = \frac{A(x)}{B(x) \cdot T(x)} \quad (3.12)$$

Als de sectionele oppervlaktecoëfficiënt en B/T berekend werden, kunnen de bijhorende $C(x)$ waarden afgelezen worden op de grafiek. Aan de uiteinden valt B/T buiten het bereik van de grafiek en zal er een extrapolatie nodig zijn. Wegens de veelvuldige toepassing van deze grafiek werd deze gedigitaliseerd in een tweedimensionale tabel.



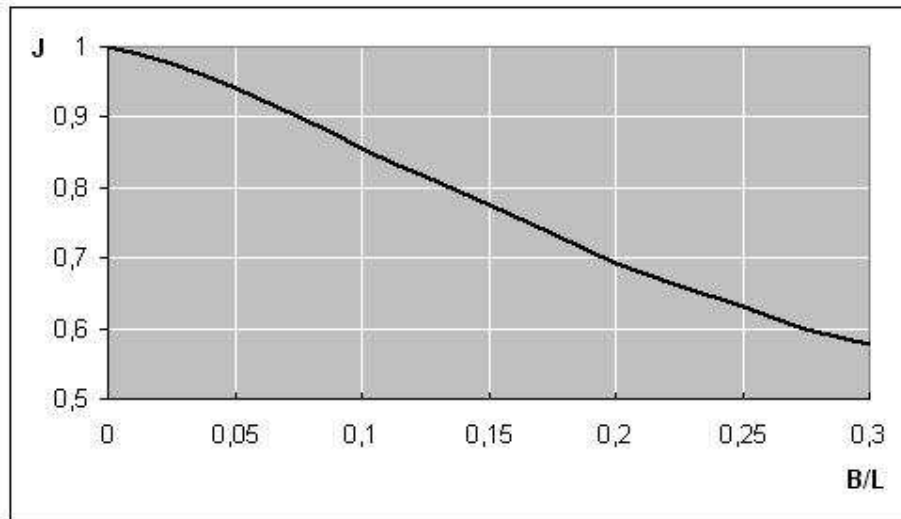
Figuur 3.6: 2-Dimensionale grafiek van C_x

Door middel van de macro Bereken_Cx¹⁰ worden dan automatisch de waarde voor C berekend uitgaande van een σ_D en B/T .

De berekening van C_x gaat uit van een tweedimensionale stroming rond de scheepsromp. In werkelijkheid heeft een schip een eindige lengte en een veranderende vorm van het onderwaterschip met de langsscoördinaat. Bijgevolg zal de werkelijke stroming rond de romp een driedimensionaal karakter hebben. Door een correctiefactor J_2 , wordt hiermee rekening gehouden.

¹⁰ De programmacode van deze macro kan teruggevonden worden op de Cd-rom, op de locatie macro's\excel\bereken_Cx

De waarde van $J_2 (<1)$ kan afgelezen worden uit onderstaande grafiek.



Figuur 3.7: Correctiefactor J_2 i.f.v. L/B

De waarden voor J_2 i.f.v. B/L worden opnieuw gedigitaliseerd in een ééndimensionale tabel. Haar waarde is constant over de lengte.

De resultaten van de hierboven vermelde berekeningen worden hieronder weergegeven:

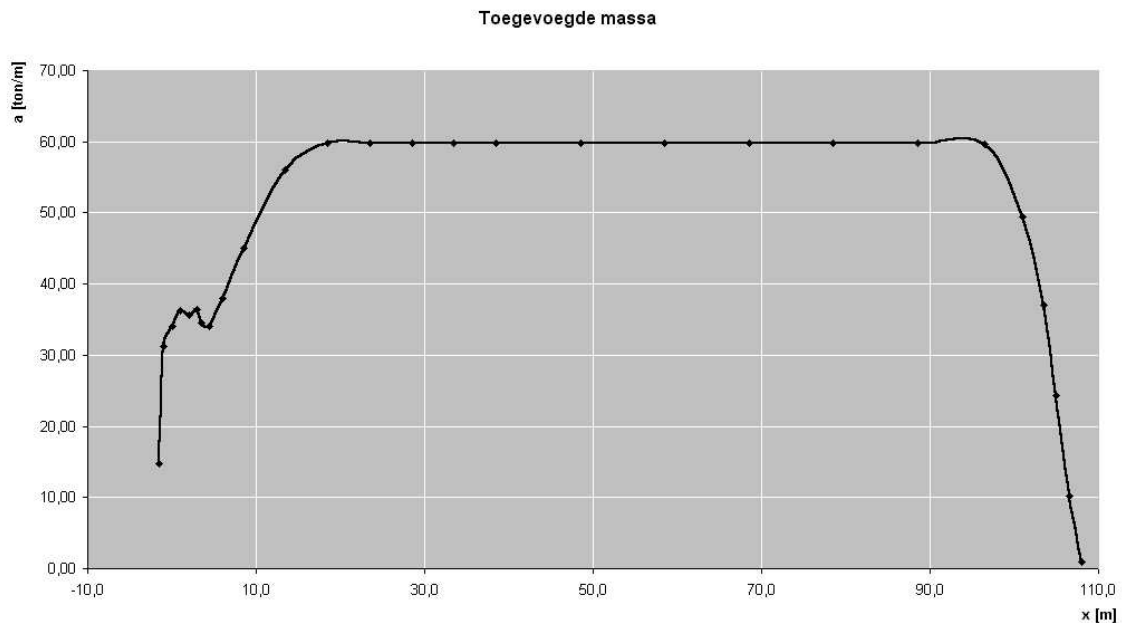
x [m]	σ_d	B/T	C	J_2	a [ton/m]
-1,5	0,5994	11,09	0,89	0,8378	14,70
-1,0	0,8256	7,83	1,04	0,8378	31,23
0,0	0,8294	6,99	1,04	0,8378	34,13
1,0	0,8250	6,34	1,04	0,8378	36,30
2,0	0,7351	4,89	0,96	0,8378	35,56
3,0	0,7150	4,69	0,95	0,8378	36,37
3,5	0,6381	4,08	0,89	0,8378	34,57
4,5	0,5944	3,39	0,85	0,8378	34,06
6,0	0,6986	3,45	0,91	0,8378	37,92
8,5	0,8161	3,51	1,04	0,8378	45,05
13,5	0,9775	3,54	1,28	0,8378	56,08
18,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
23,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
28,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
33,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
38,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
48,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
58,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
68,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
78,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
88,5	0,9956	3,54	1,36	0,8378	59,72
96,5	0,9950	3,54	1,36	0,8378	59,60

101,0	0,9253	3,49	1,16	0,8378	49,40
103,5	0,8336	3,15	1,07	0,8378	37,06
105,0	0,7578	2,68	0,96	0,8378	24,27
106,5	0,6350	1,88	0,83	0,8378	10,22
108,0	0,5970	1,40	0,80	0,8378	0,99

Figuur 3.8: Toegevoegde massa

Het ongewone verloop van de oppervlaktecoëfficiënt (ter hoogte van $x = 2$ m) kan verklaard worden door de aanwezigheid van tunnels in het achterschip. De oorspronkelijke vergroting van σ_D zal teruggedrongen worden doordat B en T sneller gaan stijgen dan de oppervlakte (De vorm wordt minder vol). Dit kan eveneens geverifieerd worden op het spantenplan: “Figuur 3.21: Spantenplan estuair containerschip”.

De toegevoegde massa in functie van de lengte wordt grafisch weergegeven door onderstaande grafiek.



Figuur 3.9: Toegevoegde massa (grafisch)

3.4 Trillingen

3.4.1 Trillingsamplitude

Nu de toegevoegde massa en de massaverdeling van het schip begroot zijn, zal de plaatselijke trillingsamplitude van het schip te bepaald worden.

Onderstaande theorie is gebaseerd op deze in het boek “Ship Hull Vibrations” van F. H. Todd [3.].

Aan de hand van de trillingsamplitude kan een maat voor de dynamische belasting berekend worden.

$$q = -(m + m_a) \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = \omega_n^2 \cdot (m + m_a) \cdot \frac{y}{y_{\max}} \cdot y_{\max} \quad (3.13)$$

In bovenstaande uitdrukking stelt y de uitwijking van de (scheeps)balk voor en q de dynamische belasting

In eerste instantie zal de trillingsamplitude van een 2-knoopstrilling in een schip benaderd worden door een 2-knoopstrilling van een uniforme balk ondersteund in zijn knooppunten (free-free-beam).

Met de trillingsamplitude van zo een balk kan dan de waarde q op een factor¹¹ na bepaal worden.

$$q = K \cdot (m + m_a) \cdot g \cdot \frac{y}{y_{\max}} \quad (3.14)$$

$$K = \frac{\omega_n^2 \cdot y_{\max}}{g} \quad (3.15)$$

Hierbij kan K ¹² als een schaalfactor geïnterpreteerd worden.

¹¹ Om geen rekening te hoeven houden met de eenheden wordt het rechterlid van de betrekking vermenigvuldigd en gedeeld worden door de gravitatieconstante g . Deze zet de massaverdeling om in de gewichtsverdeling. Voor de factor K is g van groot belang. Voor de berekening van het genormeerde trillingsprofiel kan men de gravitatieconstante al op voorhand wegdelen.

¹² De bepaling van de schaalfactor gebeurt hier op basis van de massaverdeling (uitgedrukt in kg/ton). De hierna volgende theorie kan natuurlijk ook uitgevoerd worden uitgaande van de gewichtsverdeling (uitgedrukt in N/kN).

Merk op dat K de natuurlijke frequentie (het gevraagde van dit onderdeel) bevat. Later zal van deze formule gebruik gemaakt worden om uitgaande van y_{\max} de natuurlijke frequentie te berekenen.

3.4.2 Trillingsamplitude van een uniforme balk

De onderzochte balk heeft een constante dwarsdoorsnede en een gelijkmatig verdeelde massaverdeling.

De balk voert een 2-knoops trilling uit. De frequentie waarbij dit gebeurt is per definitie de natuurlijke frequentie (ω_n) van de balk.

Door het harmonische karakter van de trilling wordt het verband tussen de trillingsversnelling en de trillingsverplaatsing gegeven door¹³:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega_n^2 \cdot y(t) \quad (3.16)$$

De traagheidskrachten die op de balk werken kunnen dan voorgesteld worden door:

$$q = m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega_n^2 \cdot m \cdot y(t) \quad (3.17)$$

De differentiaalvergelijking van een continu belaste balk wordt gegeven door:

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = \omega_n^2 \cdot m \cdot y \quad (3.18)$$

Deze vergelijking wordt teruggevonden in de cursus “Mechanische Trillingen” gedoceerd door Prof. Dr. Ir. N. Noldus [5].

¹³ Voor bepaling van de resonantie wordt de demping verwaarloosd.

Als de factor $\mu^4 = \frac{m}{EI} \cdot \omega_n^2$ ingevoerd wordt, herleidt de differentiaalvergelijking zich tot:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \mu^4 \cdot y \quad (3.19)$$

De oplossing van deze vergelijking is

$$y = A \cdot \cos(\mu \cdot x) + B \cdot \sin(\mu \cdot x) + C \cdot \cosh(\mu \cdot x) + D \cdot \sinh(\mu \cdot x) \quad (3.20)$$

De waarden van de coëfficiënten volgen uit de randvoorwaarden van de vergelijking.

In het onderstelde geval van een uniforme balk opgelegd in zijn knopen worden deze gegeven door te stellen dat dwarskracht en buigend moment aan de uiteinden nul zijn.

Men bekomt 4 vergelijkingen:

$$\left\{ \begin{array}{l} EI \cdot \left[\frac{d^3 y}{dx^3} \right]_{x=0} = 0 \\ EI \cdot \left[\frac{d^3 y}{dx^3} \right]_{x=L} = 0 \\ EI \cdot \left[\frac{d^4 y}{dx^4} \right]_{x=0} = 0 \\ EI \cdot \left[\frac{d^4 y}{dx^4} \right]_{x=L} = 0 \end{array} \right. \quad (3.21)$$

De eerste en derde vergelijking hiervan leiden tot volgende vergelijkingen in A,B, C en D:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\mu^2 \cdot A + \mu^2 \cdot C = 0 \\ -\mu^3 \cdot B + \mu^3 \cdot D = 0 \end{array} \right. \quad (3.22)$$

Waaruit volgt dat:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = C \\ B = D \end{array} \right. \quad (3.23)$$

De uitdrukking van de dwarskracht en het buigend moment over de lengte worden gegeven door:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \mu^2 \cdot A \cdot (-\cos(\mu \cdot x) + \cosh(\mu \cdot x)) + \mu^2 \cdot B \cdot (-\sin(\mu \cdot x) + \sinh(\mu \cdot x)) \quad (3.24)$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = \mu^3 \cdot A \cdot (\sin(\mu \cdot x) + \sinh(\mu \cdot x)) + \mu^3 \cdot B \cdot (-\cos(\mu \cdot x) + \cosh(\mu \cdot x)) \quad (3.25)$$

De overige twee vergelijkingen die het uitblijven van dwarskrachten en buigende momenten aan het uiteinde ($x=L$) voorstellen, herleiden zich tot:

$$A \cdot (-\cos(\mu \cdot l) + \cosh(\mu \cdot l)) = -B \cdot (-\sin(\mu \cdot l) + \sinh(\mu \cdot l)) \quad (3.26)$$

$$A \cdot (\sin(\mu \cdot l) + \sinh(\mu \cdot l)) = -B \cdot (-\cos(\mu \cdot l) + \cosh(\mu \cdot l)) \quad (3.27)$$

Deze vergelijking geven een verband tussen A en B enerzijds, en leggen anderzijds een restrictie op aan μ . Om enkel deze laatste te evalueren, zullen A en B geëlimineerd worden uit bovenstaande vergelijking. Dit kan door beide leden door elkaar te delen.

Op die manier bekomt men:

$$\frac{-\cos(\mu \cdot l) + \cosh(\mu \cdot l)}{\sin(\mu \cdot l) + \sinh(\mu \cdot l)} = \frac{-\sin(\mu \cdot l) + \sinh(\mu \cdot l)}{-\cos(\mu \cdot l) + \cosh(\mu \cdot l)} \quad (3.28)$$

Wat vereenvoudigd wordt tot:

$$\cos(\mu \cdot l) \cdot \cosh(\mu \cdot l) = 1 \quad (3.29)$$

De laagste oplossing van deze vergelijking stel de grondvorm voor van de trilling, met de opgelegde randvoorwaarde.

Haar waarde bedraagt:

$$\boxed{\mu \cdot l = 4.73} \quad (3.30)$$

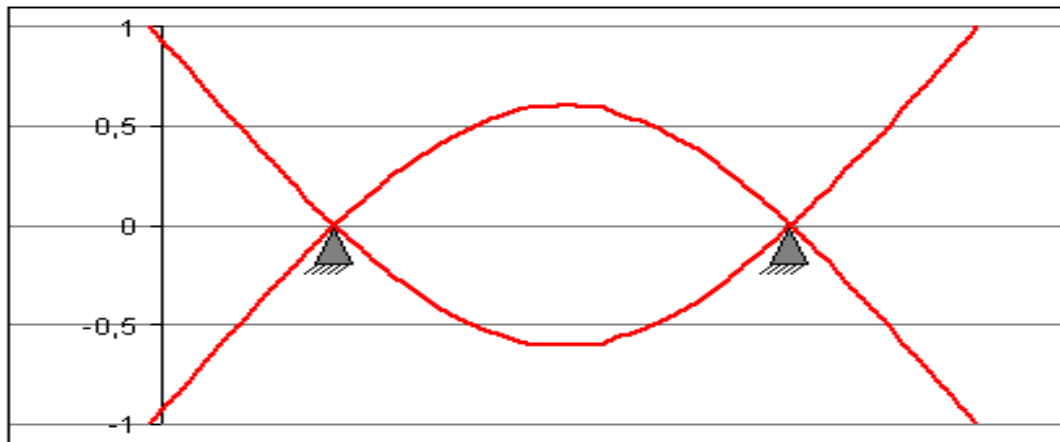
Uit de uitdrukking van μ kan ook de bijhorende eigenfrequentie berekend worden:

$$\mu^4 = \frac{m}{EI} \cdot \omega_n^2 \quad (3.31)$$

$$\omega_n^2 = \frac{4.73^4}{l^4} \cdot \frac{E \cdot I}{m} \quad (3.32)$$

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{4.73^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \quad (3.33)$$

De grondvorm van dit trillingsprofiel (zijnde de gezochte 2-knoopstrilling) is nu op een factor na bekend. Haar vorm kan genormeerd worden en wordt hieronder grafisch voorgesteld:



Figuur 3.10: Trillingsprofiel theoretische 2-knoopstrilling

Zoals hierboven al aangehaald zal in eerste instantie verondersteld worden dat het trillingsprofiel van het schip gelijk is aan dit van een uniforme balk opgelegd in zijn knooppunten.

3.4.3 Aanpassen trillingsprofiel voor dynamisch evenwicht

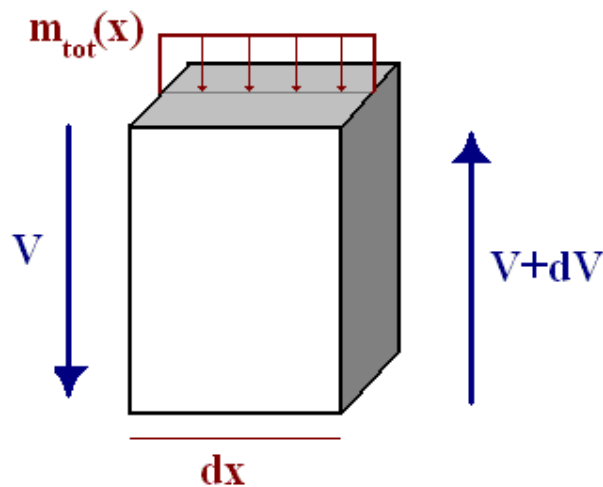
Het theoretische trillingsprofiel dat hierboven aangenomen werd zal slechts in zeer uitzonderlijke (toevallige) gevallen gelijk zijn aan het werkelijke trillingsprofiel.

Om het werkelijke trillingsprofiel te berekenen zal de theoretische trilling zodanig aangepast worden, dat de dwarskrachten en buigende momenten die in de scheepsbalk optreden, nul zijn aan

de uiteinden (deze voorwaarden werden vroeger ook al opgelegd, maar toen betrof het een statisch evenwicht, terwijl nu een trilling, dus dynamisch evenwicht beschouwd wordt.)

Om het trillingsprofiel dusdanig aan te passen dienen er uitdrukkingen gezocht te worden, die de dwarskracht en het buigend moment voorstellen in functie van de massaverdeling en het trillingsprofiel.

3.4.3.1 DWARSKRACHT



Figuur 3.11: Dwarskrachtenevenwicht

Wanneer een mootje van de scheepsbalk met lengte dx beschouwd wordt, dan dienen voor het dwarskrachtenevenwicht, de krachten beschouwd te worden wiens werklijn in verticale richting gelegen is. Deze krachten zijn enerzijds de dwarskrachten (V en $V+dV$) op de eindvlakken van het mootje, en anderzijds de traagheidskracht te wijten aan de plaatselijke totale massa bij langskoördinaat x .

Het verticale krachten evenwicht luidt:

$$V + g \cdot m_{tot}(x) \cdot dx \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = V + dV \quad (3.34)$$

$$g \cdot m_{tot}(x) \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dV}{dx} \quad (3.35)$$

Hoger in dit hoofdstuk werd reeds een uitdrukking voor de tweede afgeleide van y gevonden.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega_n^2 \cdot y(t) \quad (3.36)$$

$$-m_{tot}(x) \cdot g \cdot \omega_n^2 \cdot y(t) = \frac{dV}{dx} \quad (3.37)$$

In dit onderdeel wordt niet gezocht naar de precieze waarde van de dwarskracht, maar naar de nulpunten van de dwarskracht. Bijgevolg is het voldoende als de dwarskracht op een evenredigheidsconstante na gekend is.

In plaats van verder te rekenen met de werkelijke waarde van de verplaatsing, wordt er gebruik gemaakt van een evenredige¹⁴ vorm. De evenredigheid wordt in onderstaande betrekking door het \approx -teken benadrukt.

$$\frac{dV}{dx} \approx m_{tot}(x) \cdot \frac{y(t)}{y_{max}} \quad (3.38)$$

Om de waarde van de dwarskracht in de eindpunten te evalueren volstaat het het trillingsprofiel, vermenigvuldigd met de totale massa, te integreren over de lengte.

In de volgende onderdelen van dit hoofdstuk zullen de termen dwarskracht, V SF en RF staan voor termen die evenredig zijn met hun werkelijke waarde. Zij hebben natuurlijk allemaal dezelfde evenredigheidsfactor!

Een eerste voorwaarde voor het trillingsprofiel is:

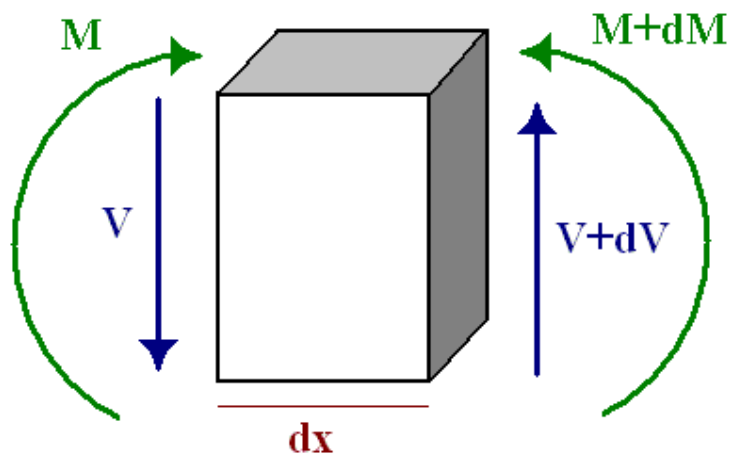
$$\int_0^L m_{tot}(x) \cdot y \cdot dx = 0 \quad (3.39)$$

¹⁴ Deze evenredigheid is inderdaad niet van belang voor de bepaling van het genormeerde trillingsprofiel. Als later uit dit genormeerde profiel de werkelijke verplaatsingen berekend zullen worden dient men er wel rekening mee te houden dat er gebruik gemaakt werd van een evenredigheidsfactor.

Merk op dat hierin de tijdsafhankelijkheid van $y(x,t)$ niet meer opgenomen is (er wordt gewerkt met de plaatselijke amplitude van de trilling ($y(x)$)).

Dat dit geschreven mag worden volgt onmiddellijk uit het verband tussen dwarskracht en trillingsprofiel, waarin het trillingsprofiel, de enige factor is die tijdsafhankelijk is. Bijgevolg zal ook de dwarskracht een harmonische functie zijn, waarvan de amplitude gevonden wordt door bovenstaande integraal.

3.4.3.2 MOMENT



Figuur 3.12: Momentenevenwicht

Analoog aan het dwarskrachtevenwicht kan ook het momentenevenwicht op een elementair mootje scheepsbalk geëvalueerd worden.

Het verband tussen dwarskrachten en momenten in de scheepsbalk wordt gegeven door:

$$M = (V + dV) \cdot dx + M + dM \quad (3.40)$$

In deze uitdrukking wordt de tweedeorde-term verwaarloosd. Bijgevolg volgt de waarde van het buigend moment in de balk uit de integratie van de dwarskrachten over de lengte

$$V = -\frac{dM}{dx} \quad (3.41)$$

Om te evalueren of het moment bij $x=L$ nul wordt heeft het minteken in bovenstaande uitdrukking geen invloed.

Analoog als voor de dwarskracht zullen de termen moment, M, BM, en RM staan voor termen die evenredig zijn met hun werkelijke waarde. Zij hebben allemaal dezelfde evenredigheidsfactor.

Een tweede voorwaarde waaraan het trillingsprofiel zal moeten voldoen wordt gegeven door:

$$\int_0^L V \cdot dx = 0 \quad (3.42)$$

In deze uitdrukking kan V gesubstitueerd worden door de hierboven gevonden formule:

$$\int_0^L \int_0^x m_{tot}(x) \cdot y \cdot dx \cdot dx = 0 \quad (3.43)$$

Deze uitdrukking kan nog vereenvoudigd worden door partiële integratie:

$$\boxed{\int_0^L m_{tot}(x) \cdot y \cdot x \cdot dx = 0} \quad (3.44)$$

3.4.3.3 METHODE VAN SCHADLOVSKY

In het voorgaande werden twee voorwaarden afgeleid waaraan het trillingsprofiel moet voldoen. De methode van Schadlovsky levert een algoritme om het trillingsprofiel zodanig aan te passen opdat beide voorwaarden vervuld worden.

Zoals al veelvuldig aangehaald wordt initieel verondersteld dat het trillingsprofiel van de scheepsbalk overeenstemt met het trillingsprofiel van een uniform balk opgelegd in zijn knooppunten. Dit trillingsprofiel zal aangeduid worden met y_1 .

Opdat dit trillingsprofiel zou voldoen aan de dwarskrachten-voorwaarde dient volgende integraal gelijk te zijn aan nul.

$$V_L = \int_0^L m_{tot}(x) \cdot y_1 \cdot dx \quad (3.45)$$

Wanneer deze integraal verschillend is van nul, moet de basislijn van het trillingsprofiel verschoven worden.

Deze verschuiving wordt gegeven door:

$$\Delta y = \frac{\int_0^L m_{tot}(x) \cdot y_1 \cdot dx}{M} = \frac{\text{Dwarskracht}_{\text{aan de voorpiek}}}{\text{Totale}_{\text{massa}}} \quad (3.46)$$

Aangezien een schip meestal zwaarder geladen is in het middenschip dan aan de uiteinden (negatieve kromming \cup), zal de basislijn lager komen te liggen ($\Delta y < 0$). Hierdoor wordt de nieuwe waarde van y_1 groter.

$$y_2 = y_1 - \Delta y \quad (3.47)$$

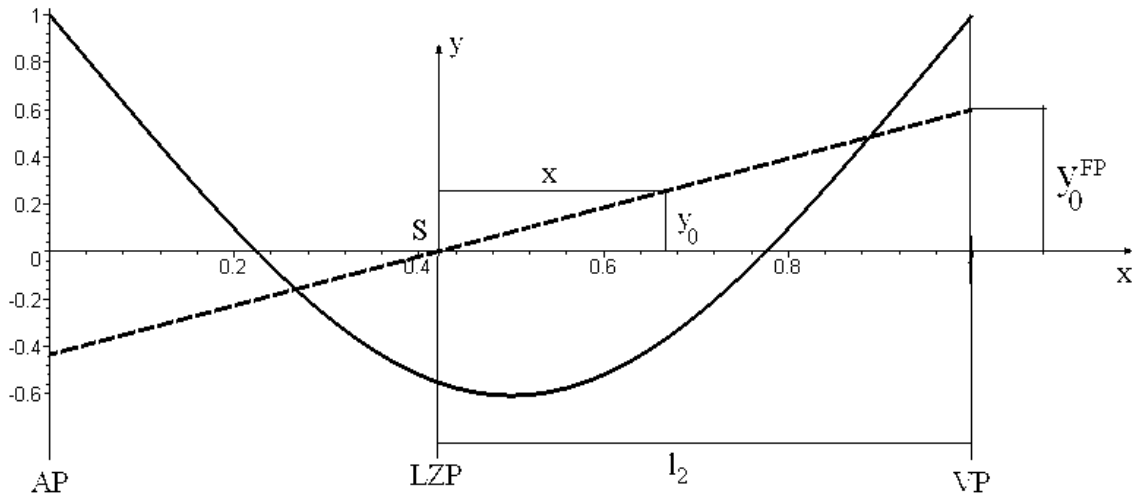
Met dit aangepast trillingsprofiel is nu voldaan aan het dwarskrachtenevenwicht van de scheepsbalk (de sluitfout van de dwarskracht is nul). Vervolgens wordt het buigende moment beschouwd.

Om het buigende moment over de lengte te veranderen kan men de basislijn draaien rond het zwaartepunt. Dit omdat het zwaartepunt op dezelfde longitudinaal moet blijven liggen om het evenwicht der dwarskrachten te garanderen.

Er wordt verondersteld dat het LCG (longitudinale positie van het zwaartepunt) op een afstand l_2 van de voorpiek ligt). Er wordt een nieuwe basislijn getekend die de principiële traagheidsas genoemd wordt.

De vergelijking van de nieuwe basislijn luidt:

$$y_0 = y_0^{FP} \cdot \frac{x}{l_2} \quad (3.48)$$



Figuur 3.13: Methode van Schadlovski

Rekening houdend met de verdraaiing van de basislijn wordt de tweede voorwaarde:

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot y \cdot dx = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot (y_2 - y_0) \cdot dx$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot y \cdot dx = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot \left(y_2 - \frac{x}{l_2} \cdot y_0^{FP} \right) \cdot dx \quad (3.49)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot y \cdot dx = 0$$

Bovendien geldt dat:

$$\begin{aligned}
 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot y_2 \cdot dx &= + \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x^2 \cdot \frac{y_0^{FP}}{l_2} \cdot dx \\
 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x \cdot y_2 \cdot dx &= \frac{y_0^{FP}}{l_2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_{tot} \cdot x^2 \cdot dx \\
 \int_0^L m_{tot} \cdot x \cdot y_2 \cdot dx &= \frac{y_0^{FP}}{l_2} J_G
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Hierbij is J_G het traagheidsmoment van de massaverdeling om S.

De linkerterm in bovenstaande gelijkheid is niets anders dan de sluitfout van het buigende moment bij trillingsprofiel y_2 en wordt ook het residuele buigende moment genoemd.

De uitdrukking voor y_0^{FP} wordt bijgevolg gegeven door:

$$y_0^{FP} = \frac{l_2 \cdot RM_{FP}}{J_G} \tag{3.51}$$

Het uiteindelijke trillingsprofiel wordt bekomen door de rekening te houden met bovenstaande waarde en de functie te normeren op zijn uiteinde.

$$y_3 = \frac{y_2 - y_0}{y_2^{FP} - y_0^{FP}} \tag{3.52}$$

De methode maakt het mogelijk de het trillingsprofiel te bekomen in twee stappen. Waarbij deze achtereenvolgens aangepast wordt naar de dwarskracht en het buigend moment.

3.4.3.4 PRAKTISCHE UITVOERING

Bovenstaande theorie werd gebruikt om uitgaande van de totale massaverdeling en het trillingsprofiel een aangepast trillingsprofiel te berekenen.

De integraties werden (wegens de discrete omgeving) vervangen door sommen. Om het trillingsprofiel aan te passen werd gebruik gemaakt van de 2-staps-methode van Schadlovsky. Die zich goed leent tot programmatie¹⁵.

Aangezien de sluitfouten voor dwarskracht en moment na één enkele uitvoering van de methode te groot bleken, werd de methode meermaals toegepast op een iteratieve werkwijze.

Hiervoor werd gebruik gemaakt van hetzelfde principe als beschreven in het onderdeel “3.3.4 Aangepaste massaverdeling”.

Een belangrijke opmerking bij de hierboven beschreven methode is dat de het verband tussen y_0^{FP} en RM_{FP} gegeven wordt in absolute waarden. De formule die gebruikt dient te worden in de berekeningen is

:

$$y_0^{FP} = -\frac{l_2 \cdot RM_{FP}}{J_G} \quad (3.53)$$

Voorts is het niet onbelangrijk te vermelden dat bij de praktische uitvoering gebruikgemaakt werd van de gewichtsverdeling in plaats van de massaverdeling. Aangezien dwarskrachten en buigend momenten enkel op een evenredigheidsconstante na bepaald werden, heeft dit geen gevolgen voor het resultaat. Massa- en gewichtsverdeling zijn immers zelf, op de evenredigheidsfactor g ($=9.81$ m/s²) na, aan elkaar gelijk.

3.4.4 Bepaling van het trillingsprofiel uitgaande van dwarskracht en buigend moment.

In het vorige onderdeel werd een trillingsprofiel bepaald dat van vorm overeenkomt met de trilling van een uniforme balk opgelegd in zijn knooppunten, maar achtereenvolgens verschoven en verdraaid werd. Hierdoor is zowel aan het dwarskrachten- als het momentenevenwicht voldaan.

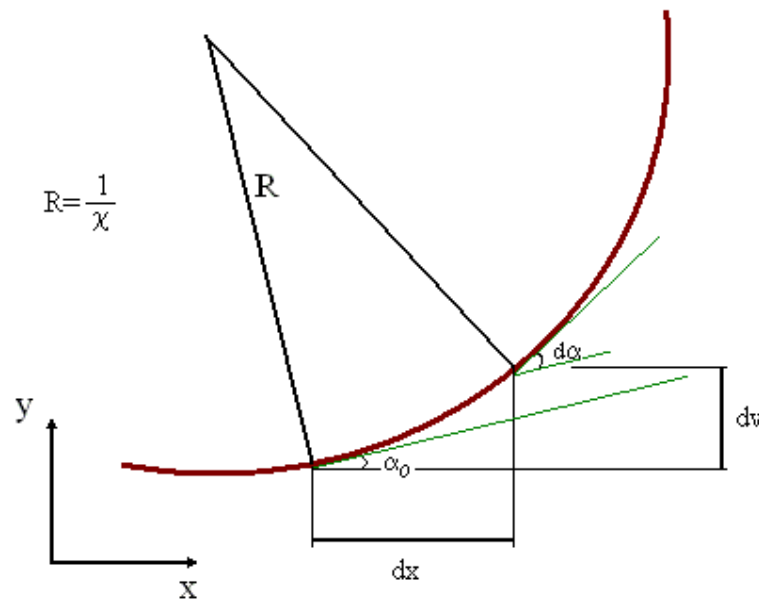
¹⁵ De programmacode kan teruggevonden op de Cd-rom op locatie “macro’s\excel\Aanpassen_Trilling”

De dwarskrachten en momenten die uitgaande van dit aangepaste trillingsprofiel berekend zijn, kunnen gebruikt worden om het werkelijke trillingsprofiel van het schip te beschouwen onder invloed van deze dwarskrachten en buigende momenten.

Omgekeerd aan het vorige zal nu het trillingsprofiel bepaald worden uitgaande van de inwendige belastingen.

Vanzelfsprekend zal voor een uniforme balk het op deze manier bekomen trillingsprofiel identiek zijn aan het vooropgestelde trillingsprofiel. Veranderingen tussen trillingsprofiel dat nu berekend wordt en het oorspronkelijke trillingsprofiel, zijn m.a.w. te wijten aan het niet-uniforme karakter van het schip.

3.4.4.1 BEREKENING VAN KROMMINGEN



Figuur 3.14:Krommingen

De ronding van een willekeurige kromme kunnen plaatselijk bepaald worden door de kromming of de kromtestraal (deze zijn het inverse van elkaar). De kromtestraal is zo gedefinieerd dat een cirkel met straal gelijk aan de kromtestraal eenzelfde kromming zal vertonen als de beschouwde kromming.

Een schip zal onder invloed van de buigende momenten een kromming ondergaan. De kromming is variabel met de lengteafstand x . Bij enkelvoudige buiging (het belastingsgeval dat bij schepen steeds verondersteld wordt) bestaat er een rechtstreeks verband tussen de buigende momenten aanwezig in de scheepsbalk en de krommingen die hierdoor veroorzaakt worden.

De bespreking is geënt op de leerstof beschreven in de cursus “Berekening van Bouwkundige Constructies I” gedoceerd door Prof. Dr. Ir. R. Van Impe [6.].

De krommingen worden gegeven door:

$$\chi = \frac{M}{EI} \quad (3.54)$$

In deze formule stelt M het buigend moment voor, E en I stellen respectievelijk de elasticiteitsmodulus en het traagheidsmoment I_z van de dwarsdoorsnede.

Aangezien het genormeerde trillingsprofiel gezocht wordt, kunnen analoog als in het vorige alle evenredigheidsfactoren die niet lengteafhankelijk zijn buiten beschouwing gelaten worden.

De elasticiteitsmodulus (E) is zo'n term die constant is over de lengte en waarmee alle termen vermenigvuldigd worden. Voor de evaluatie van het genormeerde trillingsprofiel zal met de fictieve kromming gerekend worden.

$$\chi_{fictief} = \frac{M}{I} \quad (3.55)$$

De hoekverdraaiing die de kromme maakt ten opzicht van de x -as wordt verkregen door de kromming (er wordt niet steeds herhaald dat deze fictief is) te integreren. Dit kan men gemakkelijk inzien aan de hand van bijgesloten tekening

Als kleine hoekverdraaiingen verondersteld worden dan geldt:

$$dx = R \cdot d\alpha \quad (3.56)$$

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{1}{R} = \chi = \frac{M}{I} \quad (3.57)$$

Als uitdrukking voor α vindt men:

$$\alpha(x) = \alpha_0 + \int_0^x \frac{M}{I} \cdot dx \quad (3.58)$$

De waarde van α_0 wordt bekomen door uit te drukken dat de gemiddelde hoekverdraaiing nul moet zijn.

Uiteindelijk kunnen uit de verdeling van de hoekverdraaiingen over de lengte ook de verticale verplaatsingen $v(x)$ berekend worden.

$$\frac{2 \cdot \alpha(x) + d\alpha}{2} \cdot dx = dv \quad (3.59)$$

Opnieuw zullen de tweedeorde termen verwaarloosd worden

$$v = v_0 + \int_0^x \alpha(x) \cdot dx \quad (3.60)$$

De waarde van v_0 hoeft nu niet precies berekend te worden. Het is voldoende als het verplaatsingsprofiel op een constante na gekend is.

Om dit trillingsprofiel te vergelijken met het oorspronkelijke, moet de functie $v(x)$ genormeerd worden zodat de deflectie van het berekende trillingsprofiel¹⁶ gelijk is aan de deflectie van het oorspronkelijke trillingsprofiel. Bovendien worden de laagste waarden van y aan elkaar gelijk gesteld.

¹⁶ met de deflectie wordt hier $y_{\max} - y_{\min}$ bedoeld

Als het oorspronkelijk gekozen trillingsprofiel het berekende trillingsprofiel sterk benaderd, kan men aannemen dat er een correct trillingsprofiel gevonden werd. Wijken beide functies te veel af dan moet men iteratief de geziene berekening herhalen, maar door nu uit te gaan van het berekende profiel.

3.5 Natuurlijke frequentie

Nu de genormeerde vorm van het trillingsprofiel bekend is, zal gebruik gemaakt worden van de verschillende evenredigheidsconstanten om de exacte trillingsamplitude te bepalen.

Bij de bespreking van de trillingsamplitude (“3.4 Trillingen“) werd aan de hand van een genormeed trillingsprofiel de belasting op een evenredigheidsconstante na bepaald. Dit gebeurde aan de hand van onderstaande formules.

$$q = K \cdot (m + m_a) \cdot g \cdot \frac{y}{y_{\max}} \quad (3.61)$$

$$K = \frac{\omega_n^2 \cdot y_{\max}}{g} \quad (3.62)$$

In de berekeningen werd K gelijk gesteld aan 1. Bijgevolg kan de natuurlijke frequentie uitgedrukt worden i.f.v g en y_{\max} .

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{y_{\max}}} \quad (3.63)$$

Om de natuurlijke frequentie te berekenen hoeft dus enkel uit de berekende verplaatsingen de werkelijke totale deflectie berekend worden.

$$Deflectie = \frac{1}{E} \int \int \frac{M}{I} \cdot dl \cdot dl \quad (3.64)$$

De elasticiteitsmodulus E van staal bedraagt 210000 MPa en de deflectie dient uitgedrukt te worden in m. Bovendien is de bovenstaande integraal bij ons niet berekend aan de hand van de gewichtsverdeling, maar aan de hand van de massaverdeling.

Om rekening te houden met de afwijkende dimensie van de integraal, zal de elasticiteitsmodulus herschreven worden naar de gepaste eenheden

$$E = 210000 \text{ MPa} = 21 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 21 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 21 \cdot 10^7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = \frac{21}{\text{g}} \cdot 10^7 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \quad (3.65)$$

$$\boxed{E = 21,406 \cdot 10^6 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}} \quad (3.66)$$

Hiermee kan de deflectie berekend worden uitgaande van de maximale waarde van de integraal

$\iint \frac{M}{I} \cdot dl \cdot dl$ en de hierboven omkaderde elasticiteitsmodulus.

De deflectie drukt het verschil uit van de maximale en de minimale verplaatsing van de scheepsbalk. De verhouding van de trillingsamplitude aan het uiteinde en de deflectie van het genormeerde profiel laten toe om de werkelijke trillingsamplitude aan de uiteinden te berekenen.

$$y_{\max} = \text{Deflectie} \cdot \frac{1}{\text{Deflectie}_{\text{genormeerd}}} \quad (3.67)$$

Nu ook y_{\max} berekend werd kan de natuurlijke frequentie becijferd worden uit de gekozen schaalfactor.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{y_{\max}}} \quad (3.68)$$

3.6 Iteratie

In het voorgaande werd eenmaal de procedure doorlopen om de natuurlijke frequentie te bepalen van een schip.

In vele gevallen zal een eerste berekening van de trilling, nog teveel afwijken van de oorspronkelijke veronderstelde trilling.

Om hieraan te verhelpen kan bovenstaande berekening herhaald worden. Bij de eerste iteratie wordt er dan uitgegaan van het uiteindelijke trillingsprofiel van de eerste berekening. Deze vervangt de theoretische 2-knoopstrilling.

Een goede maatstaf voor het aantal nodige iteraties is vanzelfsprekend de verandering van de natuurlijke frequentie.

Hieronder worden de natuurlijke frequenties van de eerste 5 berekeningen weergegeven.

	ω_n [rad/s]
1	6,670905
2	6,72022
3	6,717735
4	6,717611
5	6,717589

Figuur 3.15: Iteratieoplossingen ω_n

Deze laatste waarde wordt aangenomen als definitieve waarde:

$$\omega_n = 6.7176 \text{ rad / s} \quad (3.69)$$

3.7 Bepaling van $V(h,\omega,\mu)$ waarvoor $\omega_e=\omega_n$

3.7.1 Algemeen.

Wanneer een schip zonder snelheid op de oceaan ronddobbert zal de frequentie ervaren door het schip gelijk zijn aan de absolute waargenomen golffrequentie. In het meervoorkomende geval waarbij het schip een bepaalde snelheid heeft, zal de snelheid van het schip en de koershoek (hoek t.o.v. de voortplantingsrichting van de golven) een invloed hebben op de ervaren frequentie op het schip (ontmoetingsfrequentie ω_e).

Uit de inleiding blijkt dat de ontmoetingsfrequentie (ω_e) tussen golf en schip afhankelijk is van 4 parameters:

- Scheepssnelheid (V)
- Koershoek (μ)
- Waterdiepte (h)
- Golffrequentie (ω)

De ontmoetingsfrequentie kan uit deze parameters berekend worden door volgende betrekking:

$$\omega_e = \omega - k \cdot V \cdot \cos(\mu) \quad (3.70)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (3.71)$$

Deze betrekking wordt overgenomen uit de cursus “Manoeuvrer- en zeegangsgedrag van maritieme constructies” gedoceerd door Prof. Dr. Ir M. Vantorre [7.].

Hierin stelt k het golfgetal voor en λ de golflengte. Doordat k een functie is van ω en h, komen alle 4 de parameters voor in de betrekking van ω_e .

Om nu te bepalen welke golfcomponenten grote spanningen zullen induceren, wordt er gezocht naar die combinaties van parameters waarvoor $\omega_e=\omega_n$.

Anders gezegd zal één parameter uitgedrukt worden in functie van de andere drie, waarbij de bekomen situatie leidt tot resonantie.

Er wordt gekozen om de snelheid als onafhankelijk te beschouwen. Het opstellen van de resonerende combinaties komt dan neer op het bepalen van de snelheden waarvoor:

$$V = \frac{\omega - \omega_n}{k(\omega, h) \cdot \cos(\mu)} \quad (3.72)$$

Omdat k een niet-lineaire functie is van de golffrequentie en de waterdiepte, zal er een numerieke iteratieberekening nodig zijn om tot de juiste k -waarde te komen. De methode die hiervoor gebruikt wordt, wordt besproken in onderstaand onderdeel.

3.7.2 Numerieke iteratie voor k -bepaling

Het golfgetal (k) kan uitgedrukt worden in functie van de waterdiepte en de golffrequentie. De dispersiebetrekking die het verband tussen beide termen geeft luidt:

$$k \cdot \tanh(k \cdot h) = \frac{\omega^2}{g} \quad (3.73)$$

Dit is een niet-lineaire vergelijking. Deze vergelijking wordt opgelost aan de hand van de methode van Newton. De achterliggende theorie is opgenomen in de cursus “Inleiding tot de numerieke wiskunde” door Prof. Dr. Ir. R. Van Keer [8.].

Deze iteratieve methode, steunt op de afgeleide van de functie in het onderzochte punt om een nieuwe waarde te bekomen die dichterbij de oplossing ligt.

3.7.2.1 BEPALEN VAN DE ITERATIEBETREKKING F(K)

Het algoritme van Newton maakt gebruik van een iteratiebetrekking, die als belangrijkste eigenschap heeft dat ze nul wordt, als k de gezocht waarde bereikt. De dispersiebetrekking kan eenvoudig omgezet worden in een iteratiebetrekking door alle termen in hetzelfde lid te zetten.

$$f(k) = k \cdot \tanh(k \cdot h) - \frac{\omega^2}{g} \quad (3.74)$$

3.7.2.2 VOOROPSTELLEN VAN EEN BEGINWAARDE VOOR K

Allereerst dient een beginwaarde gezocht te worden, vanwaar de iteratie kan vertrekken. Om het aantal iteraties te beperken is het handig om voor de vertrekwaarde k_0 een waarde te kiezen die niet veel afwijkt van de vermoedelijke oplossing.

Als verondersteld wordt dat er een oneindige waterdiepte optreedt, dan herleidt de dispersiebetrekking zich tot een lineaire vergelijking van k .

Immers:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \tanh(k \cdot h) = 1 \quad (3.75)$$

$$k_0 = \frac{\omega^2}{g} \quad (3.76)$$

Het golfgetal bij oneindige diepgang lijkt een goede keuze voor de vertrekwaarde

3.7.2.3 FUNCTIE AFLEIDEN NAAR K

Om de methode van Newton toe te passen dient de afgeleide van de dispersiebetrekking bepaald te worden. De afgeleide geeft de richting van de raaklijn in de kromme aan, en levert een voorkeursrichting waarin de iteratie gebeurt.

Afleiding van de dispersiebetrekking naar k levert:

$$\frac{df}{dk} = \tanh(k \cdot h) + k \cdot h \cdot [1 - \tanh^2(k \cdot h)] \quad (3.77)$$

3.7.2.4 EIGENLIJKE ITERATIE.

Als de iteratiefunctie en zijn afgeleide bekend zijn, en er een beginwaarde gekozen is, kan de iteratie gestart worden. Uitgaande van de beginwaarde worden de opeenvolgende waarden bekomen door:

$$k_{n+1} = k_n - \frac{f(k_n)}{f'(k_n)} \quad (3.78)$$

Voor elke nieuwe k_n kan opnieuw de iteratiefunctie berekend worden. Deze is een maat voor de afwijking van het eindresultaat.

Een goede voorwaarde om de iteratie te stoppen is wanneer $f(k_n)$ kleiner wordt dan een maximale afwijking.

Bovenstaande uitdrukking leent zich erg goed voor programmatie. In Excel werd dan ook een functie aangemaakt, die het golfgetal berekend uitgaande van de golffrequentie en de diepte¹⁷.

3.7.2.5 OPMERKING

De methode van Newton heeft als nadeel dat in erg uitzonderlijke gevallen een lus kan ontstaan die niet convergeert¹⁸. Om te voorkomen dat dit optreedt, zal het een aantal iteraties beperkt worden tot een aantal (200) dat ruim voldoende moeten zijn voor het eindresultaat.

Als na 200 iteraties nog steeds geen oplossing gevonden werd zal de berekening opnieuw gestart worden, maar nu met een vertrekwaarde k_0 die optreedt bij een oneindig kleine waterdiepte.

Als h erg klein wordt geldt er:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \tanh(k \cdot h) = k \cdot h \quad (3.79)$$

¹⁷ De programmacode van deze functie wordt teruggevonden op de Cd-rom, op locatie "maxro's\excel\dispersie"

¹⁸ Dit kan doordat er voortdurend tussen twee dezelfde punten gesprongen wordt.

Hierdoor wordt de dispersiebetrekking analoog als bij oneindige diepgang rechtstreeks oplosbaar naar k .

$$k_0 = \omega \cdot \frac{1}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3.80)$$

Als met deze vertrekwaarde er na opnieuw 200 iteraties geen oplossing gevonden wordt verschijnt er een foutboodschap¹⁹.

3.7.3 $V(\omega, \mu, h)$

Nu er een functie gedeclareerd is die k berekend uitgaande van ω en h , kan voor verschillende waarden van ω, μ en h de overeenkomstige resonantie-scheepssnelheid (V) berekend worden.

V is afhankelijk van 3 parameters en kan dus maar heel moeilijk visueel voorgesteld worden²⁰. Daarom zal de waarden van V voorgesteld worden voor verschillende discrete combinaties van de andere parameters.

De opbouw van de tabellen waarin V uitgedrukt wordt, wordt zo gekozen dat voor 9 verschillende waterdieptes (4,6,8,10,12,14,16,18,20 m) een werkblad aangemaakt wordt.

In elk van deze werkbladen wordt V berekend bij constante waterdiepte. Bijgevolg is binnen zo een werkblad V afhankelijk van 2 parameters: $V(\omega, \mu)$.

Deze waarde kunnen in een tweedimensionale tabel gegoten worden.

In zo'n tabel wordt ω geëvalueerd van $\pi/100$ rad/s tot π rad/s met discrete stappen van $\pi/100$ rad/s. (0.005 Hz tot 0.5 Hz met stappen van 0.005 Hz). Dit levert 100 waarden.

De roerhoek μ wordt uitgedrukt in $^\circ$ en als representatieve waarden werden 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 en 180 gekozen.

¹⁹ Deze foutboodschap is tijdens het gebruik geen enkele keer verschenen. Dit omdat het falen van de methode van Newton bij niet-puntsymmetrische functies bijna nooit voorkomt.

²⁰ Men zou V visueel kunnen voorstellen door een driedimensionale curve van $V(\omega, \mu)$ op te stellen voor verschillende waarden van h , en dan h laten variëren in de tijd. Op deze manier bekomt men een vierdimensionale grafiek die beweegt met de tijd.

De berekening van de tabellen gebeurt door middel van een macro in Excel²¹.

3.7.4 Resultaten uit de tabellen.

Voor het volgeladen schip werd een natuurlijke frequentie van 6.72 rad/s gevonden. Uitgaande van deze waarde werd de resonantiesnelheid berekend voor de situaties beschreven in de vorige paragraaf.

De natuurlijke frequentie is groter dan de hoogste golffrequentie die geëvalueerd werd (namelijk 3.14 rad/s). Het spreekt vanzelf dat de ontmoetingsfrequentie dan enkel bereikt kan worden als de snelheid van het schip de ontmoetingsfrequentie vergroot.

De ontmoetingsfrequentie wordt vergroot in twee gevallen.

- Bij **kopgolven** zal een toenemende snelheid steeds leiden tot hogere ontmoetingsfrequenties. Als de golven meer frontaal georiënteerd zijn, zal een kleinere snelheid nodig zijn om resonantie te bereiken
- Bij **achteraankomende golven** zal in eerste instantie de ontmoetingsfrequentie dalen als de snelheid verhoogt. Wanneer de ontmoetingsfrequentie nul wordt en de snelheid verder opgevoerd wordt, zal de ontmoetingsfrequentie weer stijgen. De snelheden waarbij de natuurlijke frequentie dan bereikt wordt zullen echter erg hoog zijn. Hierdoor kan gesteld worden dat bij achteraan komende golven geen gevaar voor resonantie optreedt²².

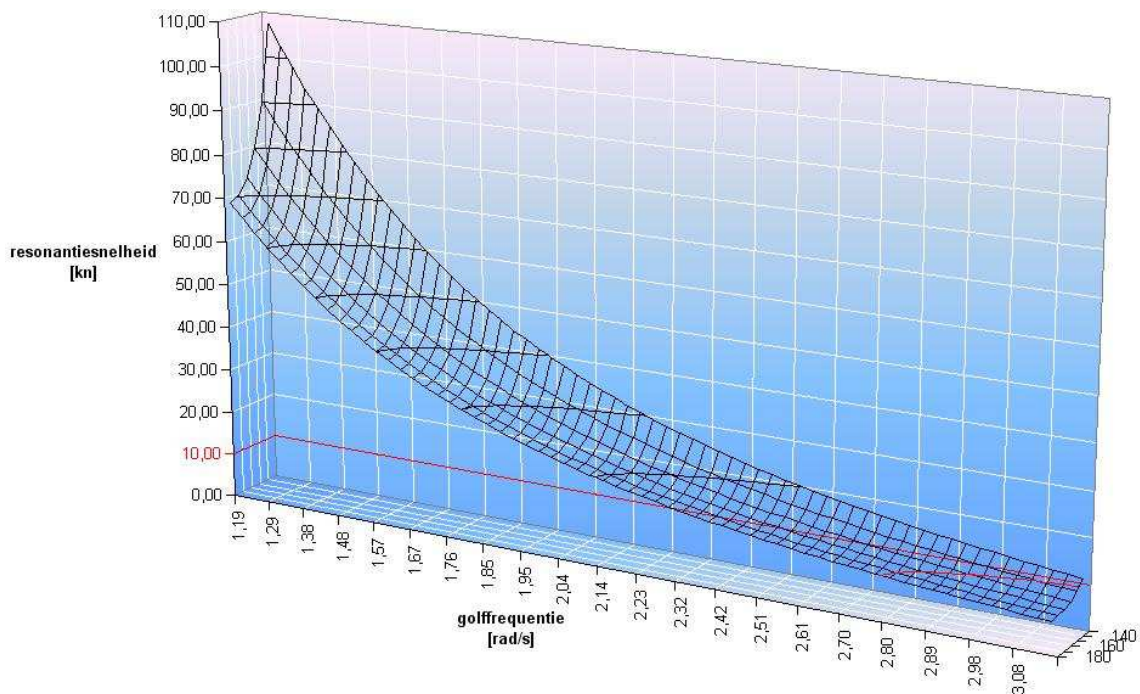
Uit bovenstaande uitleg kunnen een aantal tendensen besproken worden voor de resonerende golfcomponenten horend bij een bepaalde snelheid en waterdiepte.

- Als de scheepssnelheid vergroot zullen meer golfcomponenten aanleiding geven tot resonantie

²¹ Programmacode op de Cd-rom: Macro's\excel\Resonantiesnelheid

- De gevaarlijke golfcomponenten zijn symmetrisch rond de hartlijn. Bovendien is de symmetrische distributie van de golffrequentie i.f.v. de golfhoek monotoon dalend (bijgevolg wordt de kleinste en meest voorkomende gevaarlijke golffrequentie bereikt bij kopgolven.)

De resultaten kunnen grafisch voorgesteld worden²³. Zoals al aangehaald werd, worden er enkel aanvaardbare resonantiesnelheden bekomen bij kopgolven, en natuurlijk ook wanneer de golffrequentie al een zekere waarde heeft. Om deze redenen wordt de grafische voorstelling beperkt tot koershoeken tussen 140° en 180° en golffrequenties tussen 1.19 rad/s en 3.14 rad/s.



Figuur 3.16: resonantiesnelheid bij h=10 m

In bovenstaande grafiek kunnen de voorspelde resultaten geverifieerd worden. De donkere horizontale lijn in de grafiek duidt aan in welke toestand resonantie optreedt bij een schip dat vaart met een snelheid van 10 kn.

²² In de tabel zal voor $\mu \in [0^\circ - 80^\circ]$ de resonantiesnelheid negatief zijn voor alle golffrequenties. Dit impliceert dat voor geen enkele golffrequentie resonantie bekomen wordt bij een realistische snelheid

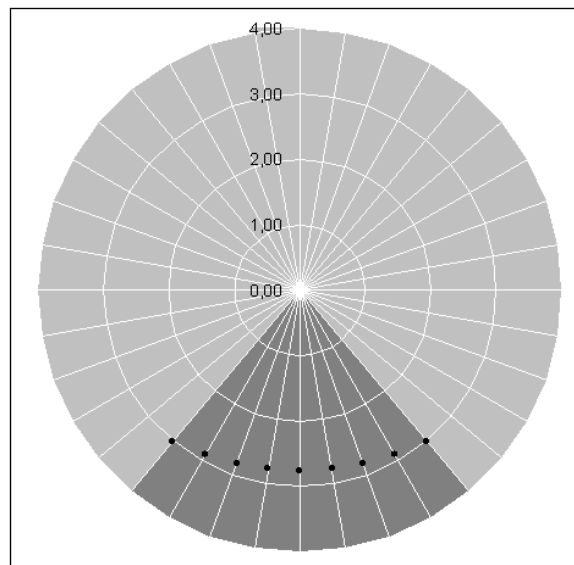
²³ waterdiepte wordt in de grafiek 10 m verondersteld

Merk op dat bij kopgolven (180°) resonantie bereikt wordt bij de een golffrequentie van ca. 2.8 rad/s. Bij 140° lijkt een golffrequentie van 3.14 rad/s noodzakelijk om resonantie te bereiken²⁴. De evaluatie van resonerende golfcomponenten wordt nu op een overzichtelijkere manier weergegeven.

3.7.5 Resonerende golfcomponenten²⁵

Zoals hierboven al aangehaald, is men meestal geïnteresseerd in de resonerende golfcomponenten die optreden bij een vooropgestelde snelheid en waterdiepte. Omdat dit ook in het vervolg van de studie handig zal blijken werd een macro²⁶ geschreven die uitgaande van snelheid en diepte de gevaarlijke golfcomponenten berekend. De resultaten van dit programma kunnen visueel voorgesteld worden.

Hieronder worden grafisch de bewuste golfcomponenten gegeven., voor een schip dat aan 10 knopen in 10 m diep water vaart. Deze voorstelling gaat uit van een kompasoriëntatie, waarbij kopgolven het onderste deel van de grafiek voorstellen. De straal tot het middelpunt geeft de waarde van de gevaarlijke golffrequentie (deze is minimaal voor $\mu=180$).



Figuur 3.17: resonerende golfcomponenten uitgedrukt in relatieve koershoek

²⁴ In volgende voorbeelden zal steeds de situatie $h=10\text{m}$, $V=10\text{ kn}$ besproken worden. Op die manier kan men gemakkelijk verbanden leggen tussen de verschillende voorstellingen.

²⁵ Als synoniem voor resonerende golven wordt ook het woord **eigengolven** gebruikt worden

²⁶ De programmacode van deze macro kan teruggevonden worden op de Cd-rom op locatie macro's\excel\Eigengolven.

3.7.6 Herleiden resultaten naar aardvaste assensteels

In het voorgaande werd steeds gebruik gemaakt van de relatieve hoek tussen de hartlijn van het schip en de golfrichting. Wanneer het de bedoeling is om de resonerende golven te onderzoeken in een dimensioneel golfspectrum (meting i.f.v. van golfrichting (t.o.v het noorden) en golffrequentie). Zullen de golfhoeken naar aardvaste golfrichtingen gerefereerd moeten worden.

Het verband tussen beide hoeken (relatief en absoluut) is heel eenvoudig te bepalen aan de hand van de koershoek van het schip²⁷.

Het verband luidt:

$$\mu_{\text{absoluut}} = (\text{koershoek} \pm \mu_{\text{relatief}}) \text{ mod } 360 \quad (3.81)$$

Met elke resonerende golfhoek uit de oorspronkelijke tabellen ($\mu=0-180$), corresponderen twee absolute golfrichtingen, behalve voor $\mu=180^\circ$. Dit heeft natuurlijk alles te maken met de symmetrische vorm van de resonerende golfcombinaties.

3.7.7 Praktisch uitvoering

Met de macro die uitgaande van snelheid en diepte de resonerende golfcombinaties berekend, kunnen voor verschillende situaties deze golven weergegeven worden.

De situatie wordt onderzocht bij 3 dieptes (8.10 en 12 m) en bij 7 snelheden (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 kn).

Voor elk van deze combinaties worden de relatieve golfcomponenten omgerekend naar absolute voor 6 koershoeken (250, 70, 260, 240, 80, 60°). Hierbij stellen de eerste 2 koershoeken de rechte koers tussen Vlissingen en Zeebrugge voor. De andere waarden laten ons toe sporadische afwijkingen van de richtkoersen te onderzoeken.

²⁷ de koershoek is de hoek die de rechtlijnige scheepsbeweging maakt ten opzichte van het noorden, gemeten in wijzerzin

Ter illustratie worden hieronder de resultaten getoond voor de eerste 5 snelheden bij een diepgang van 10m en een koershoek van 250°. De waarde voor V=10 en h=10 zijn op de koershoek na identiek aan deze in de kompasoriëntatie hierboven.

h: 10 V: 8		h: 10 V: 9		h: 10 V: 10		h: 10 V: 11		h: 10 V: 12	
phi [°]	w [rad/s]	phi [°]	w [rad/s]	phi [°]	w [rad/s]	phi [°]	w [rad/s]	phi [°]	w [rad/s]
50	3,0813	40	3,0420	30	3,0608	30	2,9580	20	3,0533
60	3,0304	50	2,9540	40	2,9288	40	2,8282	30	2,8657
70	3,0137	60	2,9042	50	2,8426	50	2,7438	40	2,7382
80	3,0304	70	2,8879	60	2,7936	60	2,6958	50	2,6553
90	3,0813	80	2,9042	70	2,7779	70	2,6803	60	2,6082
		90	2,9540	80	2,7936	80	2,6958	70	2,5931
		100	3,0420	90	2,8426	90	2,7438	80	2,6082
				100	2,9288	100	2,8282	90	2,6553
				110	3,0608	110	2,9580	100	2,7382
								110	2,8657
								120	3,0533

Figuur 3.18: resonantie golfcomponenten uitgedrukt in absolute koershoek

3.8 Frequentie-responsie-functie

3.8.1 Dynamische versterking

Bij de voorgaande berekening van de natuurlijke frequentie, werd geen rekening gehouden met demping. In dat geval zullen in resonantie de buigende momenten oneindige waarden bereiken.

De werkelijke vergroting van het buigend moment bij resonantie is natuurlijk eindig. Dit is een gevolg van de demping.

Bij resonantie zal er een evenwicht ontstaan tussen de toenemende energie die gepaard gaat met resonantie, en de dempingenergie die groter wordt naarmate de amplitudes groter worden (lineaire demping wordt verondersteld).

De frequentie-responsie-functie of kortweg transferfunctie $H(\omega)$ is een functie die de vergroting van de buigende momenten geeft i.f.v. de ontmoetingsfrequentie. Deze functie zal een piek vertonen bij de natuurlijke frequentie van het schip. De grote van deze piek is omgekeerd evenredig met de demping.

In een bijdrage van R. Wereldsma tot het symposium “Development in Merchant Shipbuilding”[9.] wordt een schatting van de transferfunctie gemaakt. Hierin wordt aangetoond dat de transferfunctie $H(\omega)$ van de buigende momenten gelijk is aan de transferfunctie van de amplitude (y/y_{stat}) van een 2-knoopstrilling te wijten aan een 2-knoopsexcitatie.

Uit deze definitie kan intuïtief aangevoeld worden dat haar waarde 1 zal zijn voor zeer kleine frequenties (de scheepsbeweging volgt de golfbeweging) en 0 voor zeer grote frequenties (de golfbeweging heeft geen invloed op de beweging van het schip).

De transferfunctie $H(\omega)$ wordt ook wel de **dynamische versterker** genoemd [3.] [5.].

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{b}{2 \cdot m}\right)^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_n^4}}} \quad (3.82)$$

In deze functie wordt de versterking uitgedrukt in functie van de demping b .

In tabellen en empirische formules wordt echter meestal de verhouding opgegeven van de demping tot de kritische demping. Het zou bijgevolg handig zijn om de dynamische versterker rechtstreeks uit te drukken in deze verhouding.

Voor de kritische demping geldt dat uitgaande van onderstaande vergelijking $\gamma_{krit} = \omega_n$.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \cdot \gamma \cdot \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 \cdot y = 0 \quad (3.83)$$

Door deze uitdrukking te vergelijken met de oorspronkelijke, wordt een verband gevonden tussen γ en b .

$$b = 2 \cdot \gamma \cdot m \quad (3.84)$$

$$b_{krit} = 2 \cdot \gamma_{krit} \cdot m = 2 \cdot \omega_n \cdot m \quad (3.85)$$

Als deze laatste betrekking ingevuld wordt in de vergelijking voor de dynamische versterker, komt er:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{b}{b_{krit}} \cdot \omega_n\right)^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_n^4}}} \quad (3.86)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{b}{b_{krit}}\right)^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (3.87)$$

3.8.2 Bepalen van de dempingfactor bij springing

Voor het bepalen van de dempingverhouding, wordt gebruik gemaakt van empirische regeltjes, die hiervoor opgesteld werden. De meeste van die regeltjes geven de dempingverhouding in functie van de lengte en de natuurlijke frequentie.

Een eerste indicatie wordt gegeven in een publicatie van ir F.F. van Gunsteren [10.].

In dit werk wordt er een schatting gegeven van de grootte van de demping uitgaande van de natuurlijke frequentie voor de 2-knoopstrilling.

Voor een natuurlijke frequentie $\omega_n = 6.72$ rad/sec wordt gevonden dat de demping 0.295 % à 0.5 % van de kritische demping bedraagt.

$$\frac{b}{b_{krit}} \in [0.00295 - 0.005] \quad (3.88)$$

Een tweede referentie die een uitdrukking levert voor de dempingverhouding is het meermaals aangehaalde boek van Todd [3.]. Hierin wordt een empirische formule gegeven voor γ .

Door de evenredigheid van γ en b geldt echter dat $\frac{b}{b_{krit}} = \frac{\gamma}{\gamma_{krit}} = \frac{\gamma}{\omega_n}$.

De tweede benaderingsformule luidt:

$$\frac{b}{b_{krit}} = \frac{10^{-5}}{\omega_n} \cdot \left(\omega_n \cdot \frac{30}{\pi} \right)^{1.76} = 0.002264 \quad (3.89)$$

Als laatste wordt gebruik gemaakt van een doctoraatsthesis [11.] geschreven door Jelena Vidiv Perunovic, waarin een aantal empirische formules van andere auteurs samengevat staan.

Deze formules maken gebruik van het logaritmisches decrement²⁸. De omrekening van het logaritmisches decrement naar de dempingsverhouding, gebeurt als volgt.

$$\delta \approx -\pi \cdot \frac{b}{\sqrt{c \cdot m}} = -\pi \cdot \frac{b}{\omega_n \cdot m} = -2 \cdot \pi \cdot \frac{b}{b_{krit}} \quad (3.90)$$

Voor de laatste gelijkheid in deze formule werd gebruik gemaakt van $b_{krit} = 2 \cdot m \cdot \omega_n$

Hieronder worden 3 van deze formules uitgewerkt:

- Kumai (1958): $\delta = \frac{3.5}{L} = 0.032 \frac{b}{b_{krit}} = 0.005064$ (3.91)

- Tomita (1964): $\delta = 0.0024 \cdot \omega_n = 0.0164 \frac{b}{b_{krit}} = 0.002578$ (3.92)

- Hirowatari (1963) $\delta = 0.01065 \cdot \sqrt{\omega_n} = 0.0278 \frac{b}{b_{krit}} = 0.00440$ (3.93)

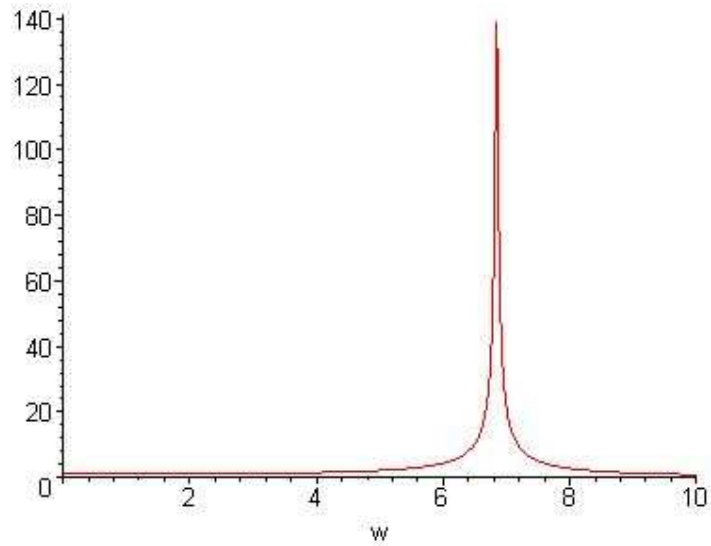
Bovenstaande waarden tonen aan dat de empirische formules nogal wat spreiding vertonen. Een exacte waarde schatten voor de dempingsverhouding is bijgevolg niet zo evident.

Uitgaande van de resultaten wordt volgende waarde gekozen voor de dempingverhouding:

$$\frac{b}{b_{krit}} = 0.00355 \quad 29 \quad (3.94)$$

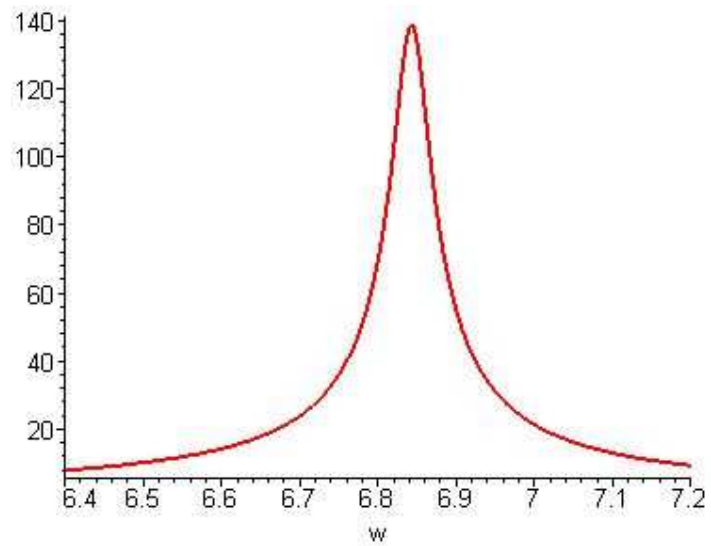
²⁸ Het logaritmisches decrement stelt de afname voor van de trillingspieken, en wordt gedefinieerd als de logaritme van de verhouding van twee opeenvolgende maxima.

Deze waarde stemt overeen met een transferfunctie met volgend uitzicht:



Figuur 3.19: Transferfunctie

Een meer gedetailleerde voorstelling van de resonantietop:



Figuur 3.20: Transferfunctie (detail)

²⁹ Dit is het gemiddelde van de laatste 4 resultaten. Het wordt aanvaardbaar geacht, omdat dit gemiddelde ook voldoet aan het eerste criterium.

3.9 Bepaling frequentiekaracteristiek

In dit onderdeel worden de buigende momenten begroot die bij verschillende ontmoetingsfrequenties en koershoeken optreden. De methode gaat uit van een lineaire benadering.

3.9.1 Frequentiekaracteristiek en spectra (theorie)

3.9.1.1 FREQUENTIEKARAKTERISITEK

Het **frequentiekaracteristiek** $Y_{X\zeta}(\omega)$ van een schip kan berekend worden m.b.v. het computerprogramma Seaway³⁰.

Deze frequentiekaracteristiek is de verhouding van de amplitude van het buigende moment en de golfamplitude uitgezet voor verschillende frequenties. Het buigend moment kan op verschillende langsscheepse afstanden berekend worden. Aangezien de buigende momenten het grootst zijn in het middenschip, zullen in eerste instantie de frequentiekaracteristieken in het midden onderzocht worden.

De frequentiekaracteristiek voor de buigende momenten ($Y_{M\zeta}(\omega, \mu)$) wordt gegeven door [7.]:

$$\bar{Y}_{M\zeta}(\omega, \mu_{rel}) = \frac{\bar{M}}{\bar{\zeta}} = \frac{M_A}{\zeta_A}(\omega, \mu_{rel}) \cdot e^{i \cdot \varepsilon_{M\zeta}(\omega)} = Y_{M\zeta}(\omega, \mu_{rel}) \cdot e^{i \cdot \varepsilon_{M\zeta}(\omega)} \quad (3.95)$$

Hiermee kan voor elke frequentie aanwezig in het golfspectrum de overeenkomstige responsie berekend worden.

3.9.1.2 GOLFSPECTRUM

De som van oneindig veel harmonische golven met verschillende frequentie en berekende/gemeten amplitude geven de werkelijke zeetoestand.

³⁰ Een uitgebreide bespreking van dit programma volgt in “3.9.3 Begroting RAO”.

$$\zeta(\mu, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \zeta_{Ai}(\mu) \cdot (\cos(\omega_i \cdot t) + \varepsilon_i) \quad (3.96)$$

Een golfspectrum splits een onregelmatige zee op in harmonische golven waaraan een bepaalde energie-inhoud gehecht wordt. De energie horend bij een bepaalde frequentie wordt uitgedrukt als de spectrale dichtheid S_ζ . Deze stelt een geschaalde energie per frequentie voor.

$$E_i(\mu) = \delta E_\mu(\omega_i) = \rho \cdot g \cdot S_\zeta(\omega_i, \mu) \cdot \delta\omega \quad (3.97)$$

Ook de energie-inhoud van een harmonische golf is bekend en wordt gegeven door:

$$E_i(\mu) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot [\zeta_{Ai}(\mu)]^2 \quad (3.98)$$

Door de energie-inhoud E_i berekend op beide manieren aan elkaar gelijk te stellen, bekomt men een verband tussen de amplitude en de spectrale dichtheid:

$$\zeta_{Ai}(\mu) = \sqrt{2 \cdot S_\zeta(\omega_i, \mu) \cdot \delta\omega} \quad (3.99)$$

Het golf-energie-spectrum dat hier gebruikt wordt is opgemeten voor de Belgische kust (op de locatie Bol van Heist) bij een diepgang van 9.5m. De meetgegevens leveren een directioneel golfspectrum representatief voor de estuaire vaarroute.

3.9.1.3 RESPONSIE

De totale responsie wordt gegeven door de som (superpositie) van de responsies van de afzonderlijke frequenties.

Aangezien de frequentieresponsie gekend is, kan uitgaande van haar definitie de amplitude van de buigende momenten M_{Ai} uitgedrukt worden:

$$M_{Ai}(\mu_{abs}) = \zeta_{Ai}(\mu_{abs}) \cdot Y_{M_\zeta}(\omega_i, \mu_{abs}) = \sqrt{2 \cdot S_\zeta(\omega_i, \mu_{abs}) \cdot d\omega} \cdot Y_{M_\zeta}(\omega_i, \mu_{rel}) \quad (3.100)$$

Analoog aan de spectrale densiteit van het golfspectrum kan er een spectrale densiteit van de buigende momenten gedefinieerd worden:

$$M_{Ai}^2(\mu) = 2 \cdot S_M(\omega, \mu) \cdot d\omega \quad (3.101)$$

Deze betrekking levert een uitdrukking voor het **amplitudespectrum** S_M als product van het **golfamplitudespectrum** en het kwadraat van de frequentiekarakteristiek (zijnde de RAO: Response Amplitude Operator).

$$2 \cdot S_M(\omega, \mu) = 2 \cdot S_\zeta(\omega, \mu) \cdot Y_{M\zeta}^2(\omega, \mu) \quad (3.102)$$

3.9.2 Input RAO

Voor eenzelfde schip kan de RAO bepaald worden bij verschillende omstandigheden. Deze omstandigheden, hebben niet allemaal een even grote invloed op de resultaten, maar zijn wel nuttig om te onderzoeken.

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de verschillende variërende inputwaarden:

- **Snelheid:** Een schip dat bij variërende snelheid vaart, zal bij elke snelheid verschillende buigende momenten ervaren. In eerste instantie wordt de kruissnelheid 10 kn verondersteld. Verandering van de snelheid vergt geen aanpassing van de natuurlijke frequentie of dempingsverhouding.
- **Waterdiepte:** De waterdiepte voor estuaire vaart bedraagt gemiddeld 10m. Door getijdenwerking (deflectie 5m), treedt er een variatie van de waterdiepte op. Bijgevolg zullen naast de gemiddelde waterdiepte ook berekeningen met waterdiepte 8 en 12 m uitgevoerd worden.
- **Langsafstand:** Bij verschillende langsposities op het schip, zullen verschillende buigende momenten ervaren worden. De grootste buigende momenten treden op in het midden van het schip. Als standaardwaarde wordt dan ook gekozen $x=L/2$. Andere waarden in de buurt van het middenschip kunnen eventueel hogere buigende momenten ervaren dan het

binnenschip.

- **Beladingstoestand:** De beladingstoestand - en de massaverdeling die hieruit volgt - worden gebruikt voor de berekening van de natuurlijke frequentie (en bijgevolg ook voor de dempingsverhouding). Een nieuwe beladingstoestand vereist dus een volledig nieuwe berekening van het hierboven beschreven algoritme van Todd.

Voor de RAO-berekeningen zal in eerste instantie uitgegaan worden van de standaard situatie $V = 10$ kn, $h = 10$ m, $x \approx 55$ m. Deze standaardconditie wordt onderzocht voor de schepen met kleine holte in volgeladen toestand en ballastconditie. Voor de schepen met grote holte wordt enkel de volle conditie onderzocht.

Eenmaal de resultaten bekend zijn voor deze standaardconditie, zal één scheepsconfiguratie geëvalueerd worden bij afwijkende condities.

3.9.3 Begroting RAO

Om de RAO te begroten wordt gebruik gemaakt van het computerprogramma Seaway ontwikkeld door Prof. Ir. J.J.W. Journée. Dit programma dat eerder gebruikt werd om de bonjeankrommen te bepalen, laat toe om uitgaande van weloverwogen aannames de responsie van schepen in zeegang te bepalen.

Voor deze thesis werd de versie “SEAWAY for WINDOWS” gebruikt, waarvoor een licentie toegekend is aan de Universiteit Gent.

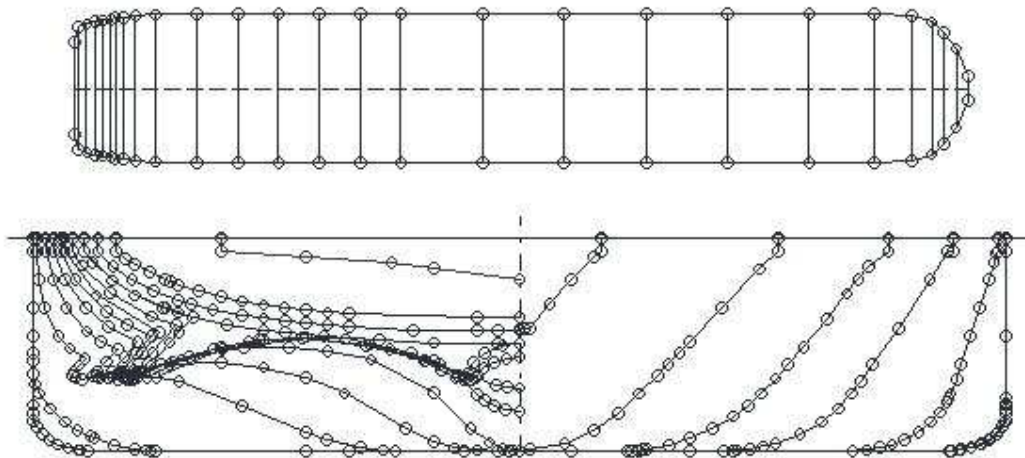
Het programma steunt op de striptheorie en gaat - net als de bovenstaande theorie - uit van een lineaire superpositie van golven. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de benaderingstheorieën gebruikt voor de evaluatie van de verticale buigende momenten (M_y in Seaway).

3.9.3.1 SPANTENPLAN *.HUL

De vorm van het onderwaterschip, wordt gedefinieerd door een Hul-bestand dat het spantenplan bevat. Het spantenplan levert de geometrische vorm van de dwarsoppervlakken (spanten) op verschillende langsscheepse afstanden.

Het spantenplan van een estuair containerschip werd in het verleden reeds opgesteld. Door middel van 3 geometrische schaalfactoren kan dit omgezet worden naar de juiste afmetingen voor lengte, breedte en diepgang.

Het gebruikte spantenplan wordt hieronder grafisch voorgesteld³¹. Het bijhorende hul-bestand kan gevonden worden op de Cd-rom³².



Figuur 3.21: Spantenplan estuair containerschip

Naast het Hul-bestand, maakt seaway gebruik van een INP-bestand. In dit bestand worden eigenschappen, aannames en situaties van het schip beschreven die belangrijk zijn voor de berekeningen.

³¹ Het spantenplan werd opgesteld voor een oudere versie van Seaway. In die versie was het mogelijk om bij plotse langsscheepse verandering in de rompgeometrie, voor eenzelfde langsafstand twee verschillende spantvormen te definiëren. In de huidige Seaway-versie is dit echter niet meer het geval. Om dit probleem op te lossen werden de spanten op eenzelfde langsafstand enkele dm van elkaar gescheiden. Dit was o.a. het geval bij de tunnel in het achterschip.

³² Locatie: Seaway\A1\A1.hul. Op dezelfde locatie kan ook een voorbeeld gevonden worden van een input- en output-bestand

3.9.3.2 LADINGSCONDITIONS

De massaverdeling over de lengte van het schip werd reeds gebruikt bij de bepaling van de natuurlijke frequentie. In dat onderdeel werd de massaverdeling aangepast naar krachten- en momentenevenwicht. De massaverdeling die in Seaway ingevuld wordt is dan ook de aangepaste massaverdeling.

Verschillende eigenschappen eigen aan de massaverdeling hebben een analogum in de geometrische eigenschappen (denk maar aan LCB en LCG). Voor de meest eigenschappen kan men de waarde gebruiken uit de geometrische berekeningen, of uit de massaverdeling. Een en ander wordt verduidelijkt door onderstaand screenshot:

Hull form	
Hull form file:	S:\Seaway\Jeroen_vrwillgn\D2\D2.hul
Draft amidship (m):	5.00
Trim by stern (m):	0.00
Displacement (ton):	14451
LCB (m):	66.76

Mass balance tuning settings			
	Global mass properties	Mass distribution properties	
Displacement (ton):	14451	13693	
LCB = LCG (m):	66.76	67.18	
YCG (m):	0	0.00	
KG (m):	5.50	5.52	GM (m): 6.02
Roll radius of gyration (m):	8.05	8.05	Roll period (s): N/A
Pitch radius of gyration (m):	33.75	37.68	
Yaw radius of gyration (m):	33.75	37.68	
GG' (m):	0	0	

Figuur 3.22: Loadig condition (Screenshot Seaway)

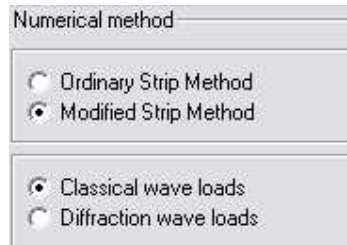
In dit screenshot worden enkele waarden berekend uit de geometrie van het onderwaterschip. De waarden die door de gebruiker ingevuld werden, komen overeen met de waarden in het werkblad

“hoofdafmetingen” van de betreffende configuratie. In de rechterkolom worden de eigenschappen berekend uitgaande van de massaverdeling zoals die ingegeven werd³³.

Door respectievelijk waarden in de linker- of rechterkolom aan te vinken wordt een van de twee waarden gebruikt.

3.9.3.3 NUMERIEKE METHODE

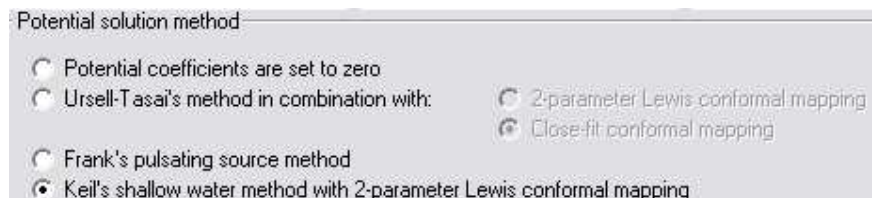
Eenmaal de hoofdafmetingen en de belangrijkste eigenschappen bekend zijn, kan men een keuze maken uit de verschillende numerieke berekeningsmethodes.



Figuur 3.23: Numerieke berekeningsmethode (Screenshot Seaway)

Allereerst dient een keuze gemaakt te worden tussen de klassieke of aangepast striptheorie. Er wordt gekozen voor de aangepaste theorie, daar deze onnauwkeurigheden aan de grenzen beperkt.

De golven worden klassieke golven ondersteld.



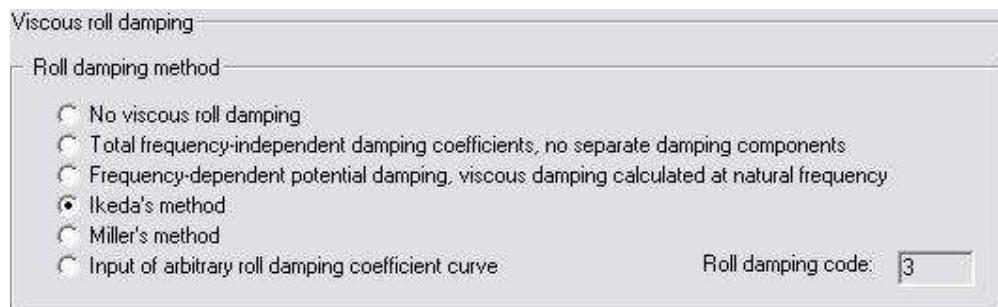
Figuur 3.24: Numerieke berekeningsmethode II (Screenshot Seaway)

³³ Naast de aangepaste massaverdeling wordt ook de langsscheepse verdeling van de hoogte van het zwaartepunt (KG) en de giratiestraal k_{xx} ingevoerd. Deze zijn in overeenstemming met de voorgestelde waarden die men terugvindt op de Cd-rom (locatie: formulier\berekening natuurlijke frequentie_massaverdelingen\Ladingsverdelingen_corrMV27022006.xls)

Omdat het kustgebied een beperkte diepgang heeft zullen de tweedimensionale potentiële coëfficiënten van de dwarsdoorsneden berekend worden met de *Keil's shallow water method*.

Verder dienen het aantal vrijheidsgraden (6) en de maximale ontmoetingsfrequentie (0) ingegeven worden. Door de maximale ontmoetingsfrequentie nul te kiezen, wordt deze waarde door het programma zelf bepaald.

3.9.3.4 DEMPINGSFACTOREN



Figuur 3.25: Dempingsfactoren (Screenshot Seaway)

Bij de demping wordt afwezigheid van kimkielen verondersteld. De dempingscoëfficiënten worden berekend met de methode van Ikeda.

3.9.3.5 OMGEVINGSFACTOREN

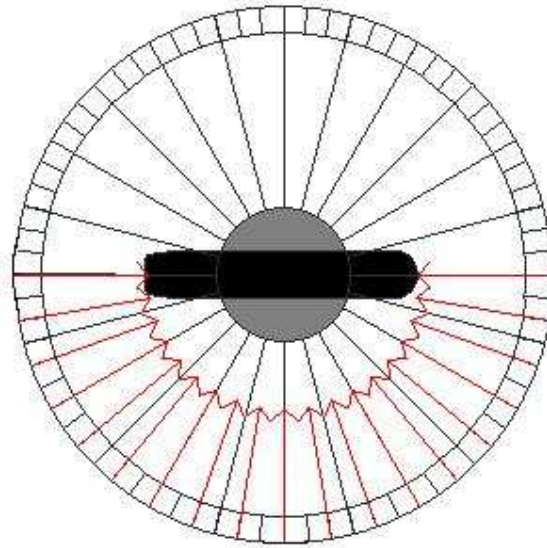
Onder de verschillende omgevingsfactoren worden volgende invoegwaarden verstaan

- Snelheden
- Relatieve koershoeken
- Golfrequentie regelmatige golven.

De snelheden kunnen opgegeven worden in knopen, of aan de hand van het Froude-getal. In een eerste berekening wordt een snelheid van 10 kn onderzocht.

Wegens de symmetrie van het schip en de verticale buigende momenten, dienen de berekeningen enkel uitgevoerd worden voor één symmetriehelft van het schip.

Er wordt een koershoek-interval van 10° vooropgesteld. Bijgevolg dienen 19 koershoeken onderzocht te worden. Deze worden hieronder grafisch voorgesteld.



Figuur 3.26: Relatieve koershoeken

De onderzochte golffrequenties zijn 0.005 Hz tot 0.5 Hz, met een interval van 0.005 Hz. Dit komt overeen met 0.0314 rad/s tot 3.14 rad/s en een interval van 0.0314 rad/s. Op die manier worden 100 verschillende frequenties bekomen.

3.9.3.6 TE ONDERZOEKEN DWARSSECTIES

Uiteindelijk dient nog aangeduid te worden op welke langsafstand de buigende momenten onderzocht zullen worden. Aangezien de grootste buigende momenten optreden in het middenschip worden de onderzochte dwarssecties daar gekozen.

De langsscheepse afstanden worden in onderstaande tabel samengevat. Deze tabel bevat in de eerste kolom het rangnummer van de dwarssectie. Dit rangnummer zal gebruikt worden voor het bepalen van de naam (zie verder).

	A-B	C-D
	[m]	[m]
1	45	55
2	55	65
3	65	75

Figuur 3.27: Onderzochte dwarssecties

3.9.3.7 PRINTOPTIES

Tot slot wordt aangegeven op welke manier de resultaten weggeschreven dienen te worden. Het onderstaande screenshot vereist geen extra uitleg.

Figuur 3.28: Print options (Screenshot Seaway)

3.9.4 RAO vermenigvuldigen met dynamische versterker

De RAO berekend door Seaway houdt geen rekening met dynamische effecten. Om de RAO dynamisch aan te passen maakt men gebruik van de dynamische versterkersfunctie die opgesteld werd in het onderdeel “3.8 Frequentie-responsie-functie”.

Deze functie geeft voor elke waarde van de ontmoetingsfrequentie een vermenigvuldigingsfactor. De oorspronkelijke waarde uit de statische RAO-berekening dient dan vermenigvuldigd te worden met deze factor om de dynamische responsie te bekomen.

De oorspronkelijke RAO is uitgedrukt in golffrequenties. Bijgevolg dienen deze frequenties eerst omgerekend te worden naar ontmoetingsfrequenties, vooraleer ze ingevuld kunnen worden in de transferfunctie $H(\omega)$.

De omrekening van de golffrequenties naar de ontmoetingsfrequenties, gebeurt analoog als de omgekeerde berekening die uitgevoerd werd in “3.7 Bepaling van $V(h,\omega,\mu)$ waarvoor $\omega_e = \omega_n$ ”.

Ontmoetingsfrequenties worden uitgerekend door onderstaande formule [7.]:

$$\omega_e = \omega - k \cdot V \cdot \cos(\mu)$$

De berekening van het golfgetal uitgaande van de golffrequentie en de waterdiepte, werd reeds beschreven. Voor de programmatie, kan dezelfde functie gebruikt worden.

De scheepssnelheid en de waterdiepte zijn parameters die ook gebruikt worden om de statische RAO te berekenen. Hun waarden zijn dus eigenschappen van de RAO.

De relatieve koershoek en de golffrequentie staan vermeld in de directionele RAO. Uitgaande van bovenstaande formule, kan een directionele tabel opgebouwd worden, waarin voor elke golffrequentie en koershoek de ontmoetingsfrequentie berekend wordt.

De ontmoetingsfrequentie-tabel dient ook ingevoerd te worden bij de latere verwerking van de RAO, en krijgt dan de extensie *.ENC.

Eenmaal de ontmoetingsfrequentie-tabel bekend is, kan voor elke waarden de dynamische versterking berekend worden. Op die manier wordt een versterkingstabel opgesteld.

Door in de statische RAO-tabel elke waarde te vermenigvuldigen met de overeenkomstige waarde in de versterkingstabel, bekomt men de gevraagde dynamische RAO.

3.9.5 Visualisatie dynamische RAO

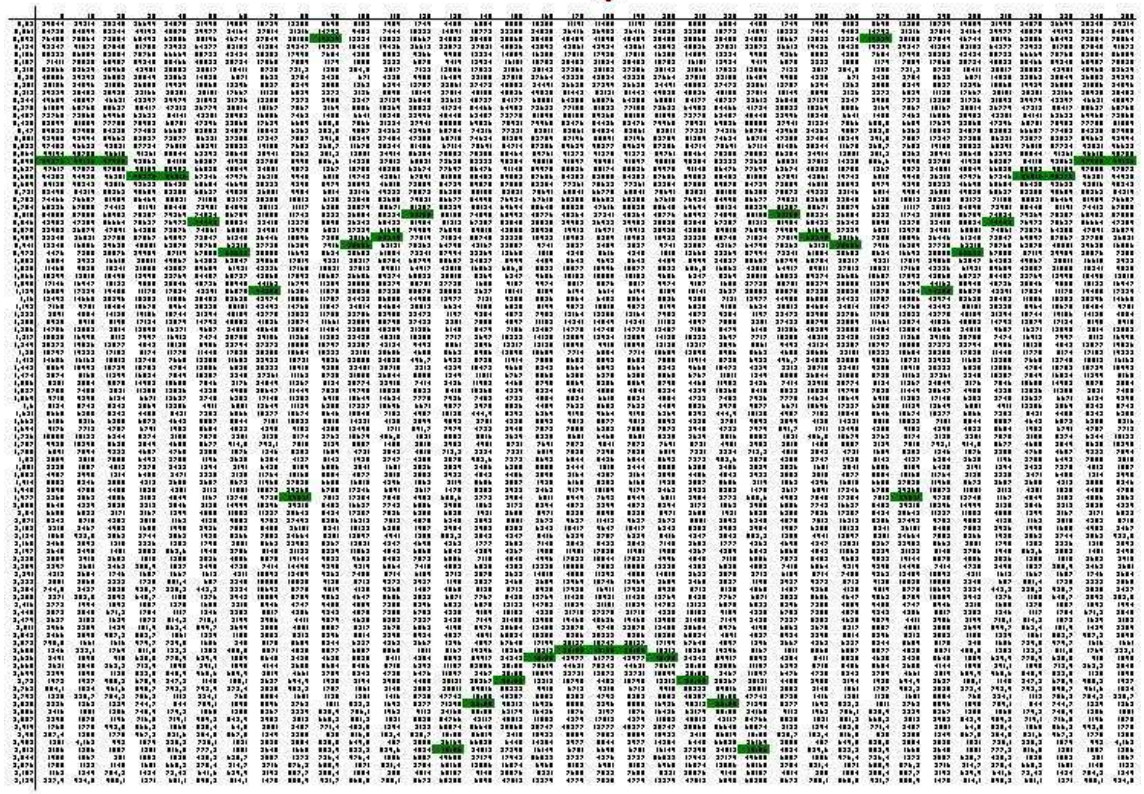
Om de invloed van de dynamische versterking op de RAO te verduidelijken, zal in de dynamische RAO-tabel bij elke koershoek (horizontale as) het maximale buigende moment aangeduid worden.

Door de tabel uit te zoomen wordt een beeld gegeven van de invloed van resonantie bij kopgolven.

De RAO waarvan hier sprake heeft als eigenschappen:

- Sheepstype: A1
- Snelheid: 10 kn
- Waterdiepte: 10 m
- Langsafstand: 55 m
- Beladingstoestand: Vol

KOPGOLVEN



Figuur 3.29: Dynamische RAO met aangeduide maxima

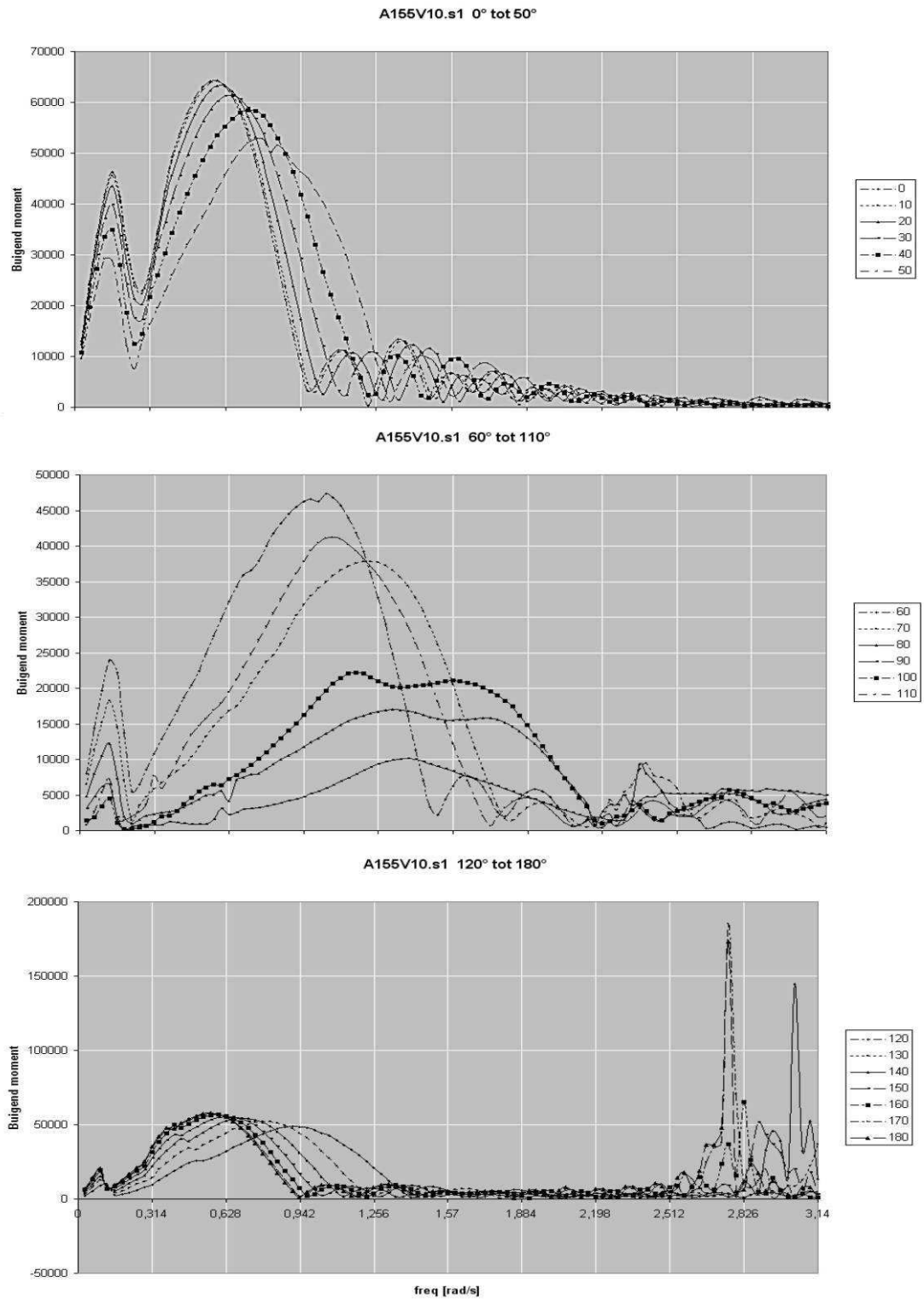
Uit bovenstaande tabel valt op dat bij de koersen rond koppelgolven de maximale buigende momenten optreden bij hogere frequenties als bij andere koershoeken.

Dit heeft alles te maken met het feit dat voor de beschouwde situatie bij dergelijke frequenties resonantie bereikt wordt. Hierdoor wordt de dynamische versterking groot. De oorspronkelijk kleine statische waarden worden in het dynamische geval net erg groot.

Om een idee te krijgen van de grootte van de waarden wordt in bijlage de dynamische RAO grafisch voorgesteld. Om de grafieken niet te overladen worden de koersen per 6 gekoppeld.

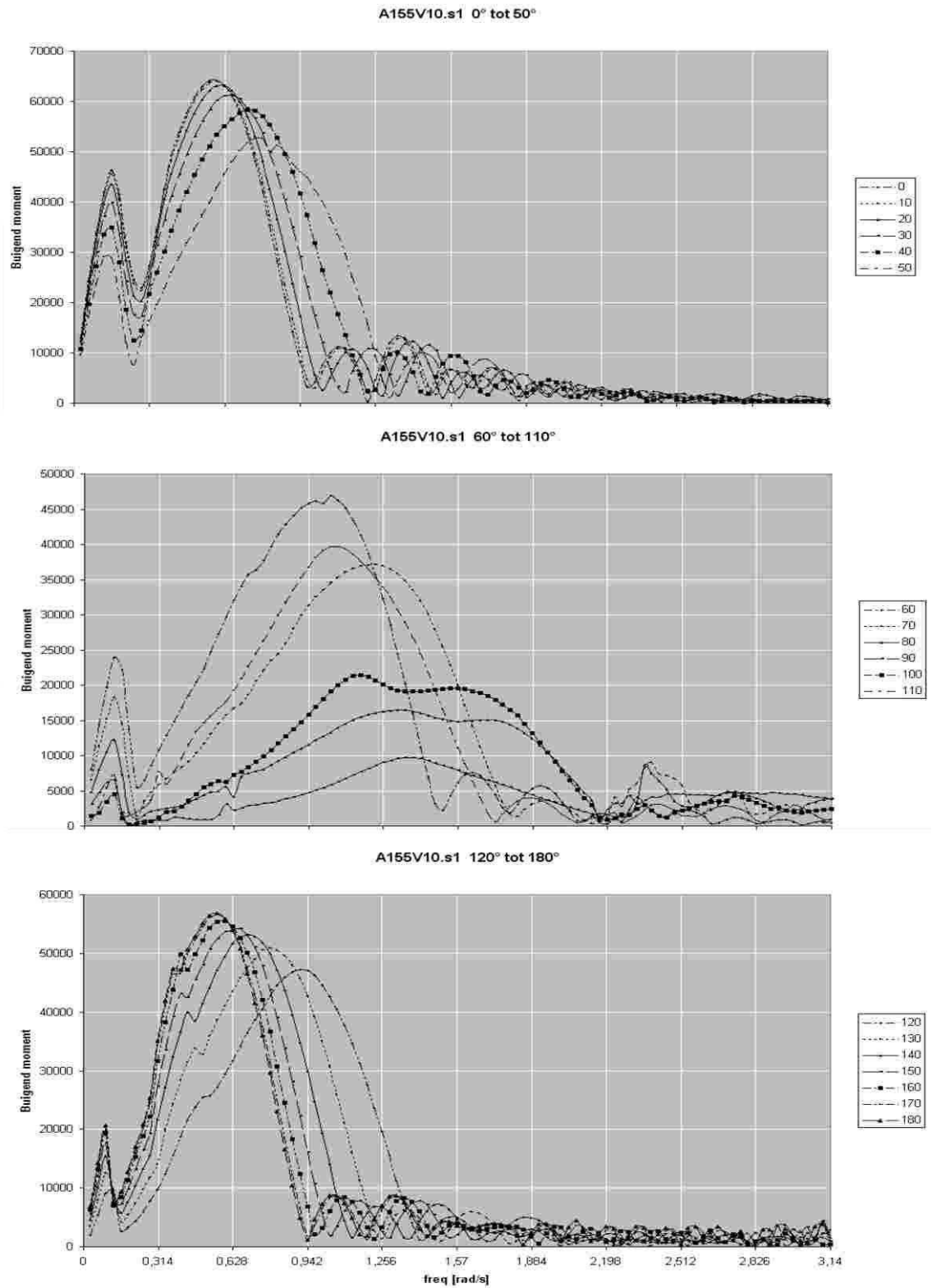
In het dynamische geval treden bij koppelgolven pieken op die zich niet manifesteren in het statische geval. Na bovenstaande uitzetting mag dit niet meer verwonderen.

3.9.5.1 DYNAMISCH



Figuur 3.30: Dynamische RAO A1 - V=10 kn, h=10 m, x = 55 m

3.9.5.2 STATISCH

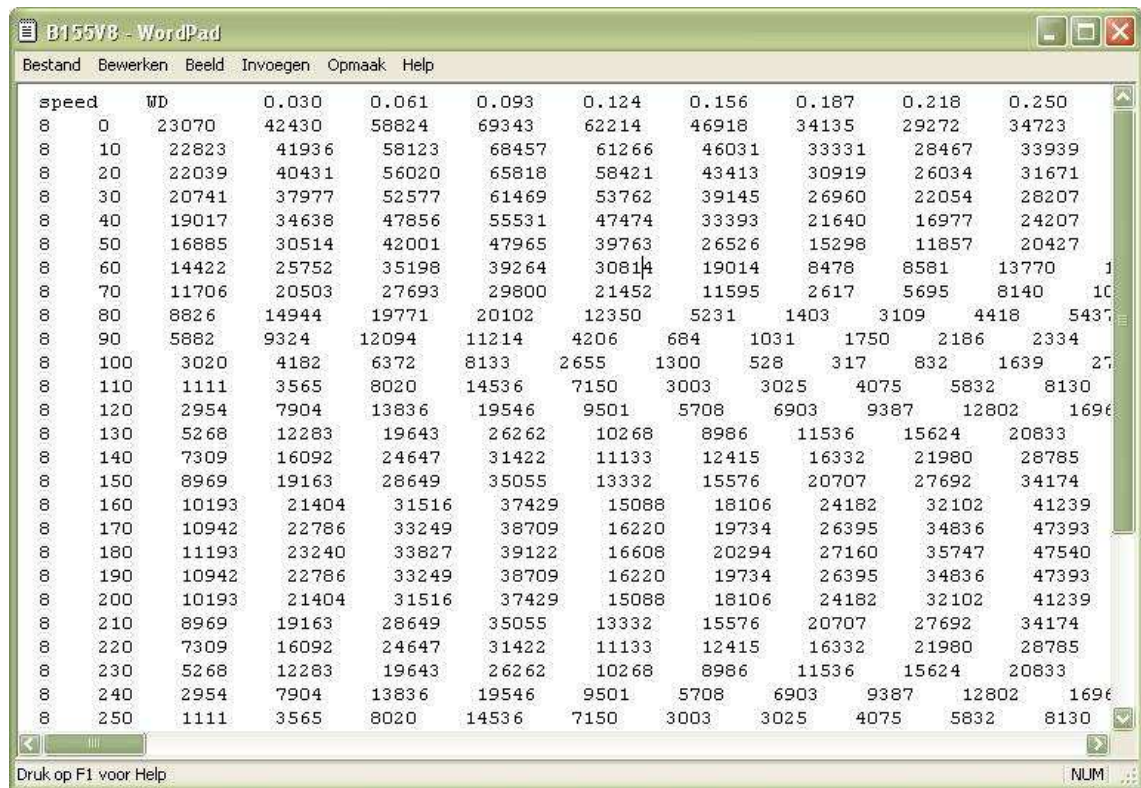


Figuur 3.31: Statische RAO A1 - V=10 kn, h=10 m, x = 55 m

3.9.6 Opstellen *.S1 en *.ENC

De verwerking van de dynamische RAO's gebeurt aan de hand van computerprogramma's geschreven door Prof. Dr. Ir. M. Vantorre. Deze computerprogramma's gebruiken echter inputbestanden die een eigen lay-out vereisen.

De RAO-tabellen worden in S1-bestanden gegoten, waarvan de opmaak – indien geopend met een tekstverwerkingsprogramma – volgend uitzicht heeft.



speed	WD	0.030	0.061	0.093	0.124	0.156	0.187	0.218	0.250
8 0	23070	42430	58824	69343	62214	46918	34135	29272	34723
8 10	22823	41936	58123	68457	61266	46031	33331	28467	33939
8 20	22039	40431	56020	65818	58421	43413	30919	26034	31671
8 30	20741	37977	52577	61469	53762	39145	26960	22054	28207
8 40	19017	34638	47856	55531	47474	33393	21640	16977	24207
8 50	16885	30514	42001	47965	39763	26526	15298	11857	20427
8 60	14422	25752	35198	39264	30814	19014	8478	8581	13770
8 70	11706	20503	27693	29800	21452	11595	2617	5695	8140
8 80	8826	14944	19771	20102	12350	5231	1403	3109	4418
8 90	5882	9324	12094	11214	4206	684	1031	1750	2186
8 100	3020	4182	6372	8133	2655	1300	528	317	832
8 110	1111	3565	8020	14536	7150	3003	3025	4075	5832
8 120	2954	7904	13836	19546	9501	5708	6903	9387	12802
8 130	5268	12283	19643	26262	10268	8986	11536	15624	20833
8 140	7309	16092	24647	31422	11133	12415	16332	21980	28785
8 150	8969	19163	28649	35055	13332	15576	20707	27692	34174
8 160	10193	21404	31516	37429	15088	18106	24182	32102	41239
8 170	10942	22786	33249	38709	16220	19734	26395	34836	47393
8 180	11193	23240	33827	39122	16608	20294	27160	35747	47540
8 190	10942	22786	33249	38709	16220	19734	26395	34836	47393
8 200	10193	21404	31516	37429	15088	18106	24182	32102	41239
8 210	8969	19163	28649	35055	13332	15576	20707	27692	34174
8 220	7309	16092	24647	31422	11133	12415	16332	21980	28785
8 230	5268	12283	19643	26262	10268	8986	11536	15624	20833
8 240	2954	7904	13836	19546	9501	5708	6903	9387	12802
8 250	1111	3565	8020	14536	7150	3003	3025	4075	5832

Figuur 3.32: Lay-out van een detail van een RAO

De eerste lijn geeft de golfpulsaties [rad/s] weer, de volgende lijnen de amplitudekarakteristiek (amplitude van het verticale buigende moment ten gevolge van golfwerking in kNm / golfamplitude in m).

Een laatste opgave voordat de RAO-tabellen gebruikt kunnen worden is de lay-out zodanig aanpassen dat de RAO herkenbaar is voor de verwerkingsprogramma's.

De omzetting van de RAO-tabel in Excel naar een S1-bestand gebeurt als volgt:

1. Genereer de RAO in Excel: maak een werkblad dat niets anders bevat dan de RAO-tabel, en waarvan de lay-out de bovenstaande zo goed mogelijk benaderd
2. In Excel kan je een werkblad exporteren naar een txt-bestand. Door deze optie te kiezen worden de oorspronkelijke kolommen van elkaar gescheiden door tab-teken en de rijen door enter-teken.
3. Het hiervoor gegenereerde tekstbestand wordt vervolgens geopend met het tekstverwerkingsprogramma MS Word. In dit programma kan een macro geschreven worden die alle tabs vervangt door het juiste aantal spaties.^{34 35}
4. Bovenvermelde macro slaat op het einde van de conversie het bestand op met de extensie S1.

De eerste 2 stappen worden uitgevoerd door een macro in Excel (zie ook “4.5.3 Berekening RAO”). Voor de laatste 2 stappen dient gebruik gemaakt te worden van macro’s in MS Word.

Voor de conversie van de ontmoetingsfrequentietabel naar een correct ENC-bestand wordt dezelfde methode gebruikt (maar een ander macro in MS Word).

3.10 Responsiegegevensbestand

3.10.1 Directioneel Golfspectrum

Zoals reeds vermeld wordt het directioneel golfspectrum gemeten door een directionele boei van het type Wavec. Deze boei bevindt zich op de locatie Bol Van Heist³⁶.

³⁴ Moeilijkheid hierbij is dat niet elke tab door evenveel spaties vervangen mag worden.

De programmacode staat beschreven op de Cd-rom. Ze is terug te vinden op de locatie Macro’s\Word\conversie S1

³⁵ Er wordt zowel een macro geschreven om een S1-bestand (omzetting) als een ENC-bestand (omzettingENC) te converteren.

³⁶ Locatie representatief voor het hele estuaire gebied tussen Zeebrugge en Vlissingen.

Om de 30 minuten wordt een meting uitgevoerd. Tijdens zo'n meting wordt voor 100 frequenties het directioneel spectrum gegeven:

De meting bestaat uit:

- Spectrale densiteit
- Gemiddelde voortplantingsrichting
- Standaardafwijking op de gemiddelde voortplantingssnelheid

Voorts wordt uitgaande van deze metingen de significante golfhoogte berekend, net als de hoog- en laagfrequente energie.

De resultaten worden ondergebracht in DSP-bestanden, die elk de meetgegevens van één meting bevatten.

3.10.2 Genereren Responsiegegevensbestand

Om uit de RAO en het directioneel golfspectrum het significante verticale buigend moment te bepalen wordt gebruik gemaakt van het programma SW_RESMX.EXE³⁷. Dit programma berekend naast het significante buigende moment ook diens periode.

De inputs van dit programma zijn:

- **Spectrumlijstbestand (*.LST):** dit bestand bevat een lijst van de meetgegevens (DSP-bestanden) die onderzocht zullen worden. De spectrumlijstbestanden groeperen de DSP-bestanden per maand. Er zullen 12 berekeningen nodig zijn om de resultaten van een jaar te bekomen
- **Naam** van de bestanden naam.S1 en naam.ENC. Deze bestanden werden hierboven gegenereerd. Het is belangrijk dat beide bestanden met dezelfde naam aanwezig zijn. De naam mag maximaal 8 tekens bevatten. Er wordt gekozen voor een inputnaam met 7 tekens.

Vb. B155V10

De inputnaam is als volgt opgebouwd:

1. De eerste 2 tekens duiden het type schip en diens ladingstoestand aan, zo zal A1 aanduiden dat het om een volgeladen A1-schip gaat. A2 stelt een volgeladen A2 schip voor. A3 stelt een A1-schip in ballast voor.
 2. De volgende 2 cijfers vormen een getal dat de langspitatie van het onderzochte punt weergeeft uitgedrukt in m.
 3. De daaropvolgende V vormt de scheiding tussen 3 & 5. Bovendien geeft deze kenletter aan dat het bestand de **dynamische** RAO bevat
 4. De cijfers na de V duiden de scheepssnelheid aan in kn
- **Koers:** In het voorgaande werd de RAO steeds uitgezet i.f.v. de relatieve koershoek. Het directioneel golfspectrum wordt uitgedrukt in absolute voortplantingshoeken. Bijgevolg dient de vaarkoers t.o.v. het noorden opgegeven te worden (in °).
In eerste instantie worden enkel de rechtstreekse koersen 70° en 250° besproken
 - **Aantal punten:** 1
 - **Doelnaam.res:** De doelnaam is de naam van het responsiegegevensbestand waarnaar de resultaten weggeschreven worden. Deze doelnaam is anders opgebouwd dan de inputnaam.
 1. Analooq aan naam inputbestanden.
 2. Het volgende cijfer vormt het rangnummer van de **langspitatie** van het onderzochte punt (zie Figuur 3.27: Onderzochte dwarssecties). De langspitatie wordt dus niet langer in meter uitgedrukt.
 3. De daaropvolgende letter duidt aan of gebruik gemaakt wordt van een **dynamische** RAO. Bovendien geeft deze aan of **heen (V) of terug (T)** gevaren wordt. Zoals later verder uitgelegd wordt zullen de kenletters O en R de heen- en terugreis van in statische conditie beschrijven.

³⁷ Alle computerprogramma's met extensie exe, zijn van de hand van Prof. Dr. Ir. M. Vantorre

Bij de heenreis wordt een koers van 70° gevaren. De terugkoers komt overeen met een koershoek van 250° .

4. Het eerste cijfer na de kenletter duidt de **kritische waarde van het buigend moment** aan. Voorlopig is deze van geen belang en wordt ze gewoon 1 verondersteld.
5. Het volgende cijfer duidt de **scheepsnelheid** aan (0 = 10 kn, 2 = 12 kn, 8 = 8 kn).
6. De laatste 2 cijfers duiden de **maand** aan. Januari zal als laatste 2 cijfers 01 dragen terwijl december 12 zal bevatten.

Een volgeladen B1-schip varend bij een koers van 70° en 10 kn, zal op een langsafstand $x=55$ m, na berekening in de maand april volgenden outputfile genereren:

B12V1004.res

Een volgeladen C2-schip varend bij een koers van 250° en 8 kn, zal op een langsafstand $x=55$ m, na berekening in de maand maart volgenden outputfile genereren:

B21T1803.res

3.10.3 Responsiegegevensbestand, *.res

Het responsiegegevensbestand waarvan hierboven sprake heeft onderstaande inhoud:

1	1/04/1998	0:00	22,7	4,311	2,898	6,340	2,859
2	1/04/1998	0:30	0,0	4,311	2,898	0,000	2,859
3	1/04/1998	1:00	0,0	4,311	2,898	0,000	2,859
4	1/04/1998	1:30	28,3	4,210	3,362	9,419	3,373
5	1/04/1998	2:00	25,7	4,479	3,223	7,402	2,605
6	1/04/1998	2:30	25,2	3,846	2,687	8,150	2,705
7	1/04/1998	3:00	0,0	3,846	2,687	0,000	2,705
8	1/04/1998	3:30	22,7	4,189	3,567	6,241	3,621
9	1/04/1998	4:00	0,0	4,189	3,567	0,000	3,621
10	1/04/1998	4:30	23,8	4,275	3,850	6,273	3,938
11	1/04/1998	5:00	21,5	4,086	3,480	6,256	4,991

12	1/04/1998	5:30	26,0	4,073	3,122	6,168	2,812
13	1/04/1998	6:00	28,4	3,672	2,905	6,304	4,374
14	1/04/1998	6:30	0,0	3,672	2,905	0,000	4,374
15	1/04/1998	7:00	0,0	3,672	2,905	0,000	4,374
16	1/04/1998	7:30	0,0	3,672	2,905	0,000	4,374
17	1/04/1998	8:00	0,0	3,672	2,905	0,000	4,374
18	1/04/1998	8:30	23,8	4,029	3,194	6,238	3,177
19	1/04/1998	9:00	22,3	4,551	3,580	4,513	3,458
20	1/04/1998	9:30	23,5	4,579	3,795	4,677	3,706
21	1/04/1998	10:00	24,1	4,446	3,336	5,581	3,305
22	1/04/1998	10:30	25,1	3,941	2,836	7,253	2,859
23	1/04/1998	11:00	25,0	4,009	3,012	6,505	3,016
24	1/04/1998	11:30	24,4	3,845	2,730	6,746	2,727
25	1/04/1998	12:00	27,2	3,976	2,920	7,667	2,934

Figuur 3.33: Eerste 25 data van B55V10D

In dit bestand bevatten de kolommen respectievelijk:

1. rangnummer
2. datum
3. uur
4. De significante golfhoogte in cm. Voor sommige metingen blijkt deze nul te zijn. Dit heeft te maken met een defect aan de boei.
5. gemiddelde periode [s] tussen twee opeenvolgende nuldoorgangen
6. gemiddelde ontmoetingsperiode [s]
7. **significante waarde van het buigend moment** [100 MNm]. Bij defecten aan de boei is deze waarde vanzelfsprekend eveneens nul.
8. gemiddelde periode [s] van het buigend moment

3.11 Statistische studie

Uiteindelijk wordt gezocht naar de kans dat gedurende een reis een kritieke waarde van het buigend moment overschreden wordt. (de kritieke waarden per basisconfiguratie staan samengevat in “Figuur 3.34: kencijfer van de kritieke waarde buigende moment voor de verschillende basisconfiguraties”).

Om deze kans te begroten zal een tabel gegenereerd worden. Deze tabel zal uitgaande van de **karakteristieke golfhoogte**, de kans bepalen dat bij deze golfhoogte de kritieke waarde van het buigend moment overschreden wordt.

3.11.1 Overschrijdingskans ivf karakterisiteke golfhoogte

Het aantal overschrijdingen van een kritieke waarde van het buigende moment horend bij een zekere significante golfhoogte wordt bekomen door het programma MND_RESP.exe. Door dit programma wordt het aantal overschrijdingen per maand berekend..

De inputwaarden van dit programma zijn:

- Een **responsiegegevensbestand** zoals bepaald in bovenstaande onderdeel
- Naam van het bestand naar waar de resultaten weggeschreven dienen te worden.
De opbouw van de naam is dezelfde als deze van het responsiegegevensbestand. Het eerste cijfer na de reis-kenletter wordt nu bepaald door de kritische waarde.

Kritische waarde [MNm]	Schip	Schip	Schip	Schip
	A	B	C	D
1	40	40	100	125
2	60	60	125	150
3	80	80	150	175
4	100	100	175	200

Figuur 3.34: kencijfer van de kritieke waarde buigende moment voor de verschillende basisconfiguraties

Er wordt gebruik gemaakt van de extensie OV.

- De kritische waarde uitgedrukt in 100 MNm en in overeenstemming met bovenstaande tabel. (Deze waarden bedragen voor een A1-schip bijgevolg respectievelijk (0.4, 0.6, 0.8 & 1)
- Te onderzoeken punt (1)

De 12 OV-bestanden die voor een jaar bekomen worden kunnen gecombineerde worden tot het overschrijdingskansbestand voor het hele jaar. Dit bestand wordt bekomen door gebruik te maken van volgend commando:

JR_RESP referentiernaam OV

In dit commando stelt de referentiernaam het gemeenschappelijk deel van de 12 maandresponsies weer. Aangezien de laatste 2 cijfers de maand aanduiden, zullen de eerste 6 tekens de referentiernaam vormen.

De jaarresponsie wordt dan opgeslagen als *refentiernaamAL.OV*

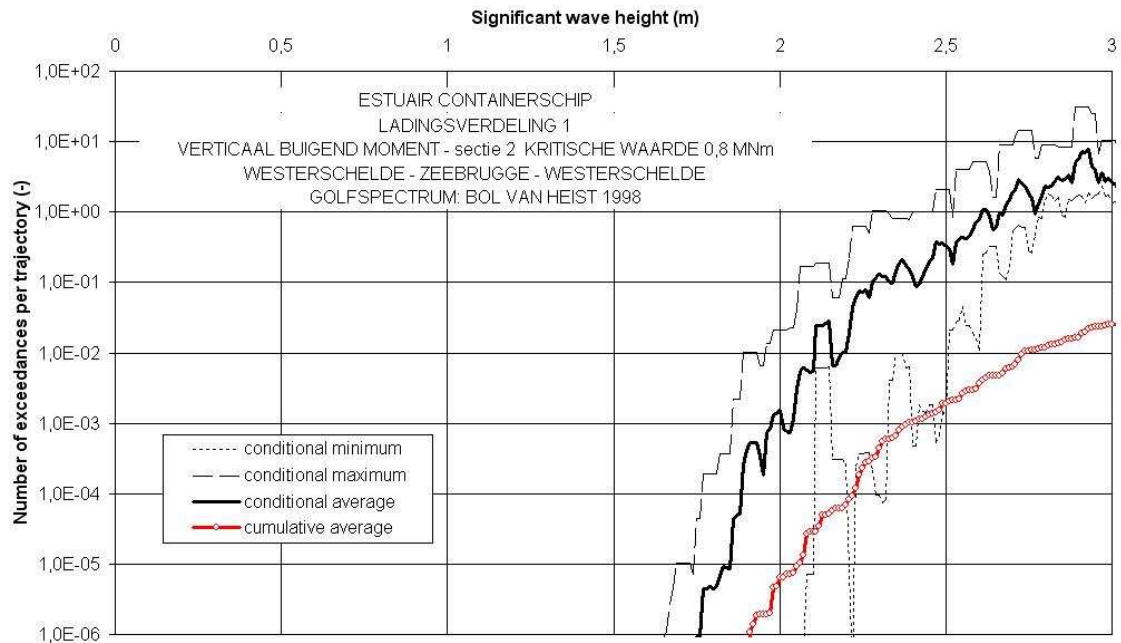
3.11.2 Overschrijdingskansbestand

Het bekomen OV-bestand geeft voor karakteristieke golfhoogten van 0.01 tot 4 m met een interval van 0.01 m het **minimum** aantal overschrijdingen, het **maximum** aantal overschrijdingen en het **gemiddeld** aantal overschrijdingen van de kritieke waarde.

Uitgaande van de gemiddeld aantal overschrijdingen kan ook het cumulatief aantal overschrijdingen berekend worden. Deze cumulatieve functie drukt de overschrijdingskansen uit bij golven kleiner dan of gelijk aan een bepaalde significante golfhoogte. Hiermee kan de overschrijdingskans berekend worden indien de significante golfhoogte beperkt wordt tot een maximale waarde.

Door de OV-bestanden voor de heen- (V) en terugreis (T) in te voeren in een Excel-blad wordt de tabel gegenereerd voor de volledige reis. Het aantal overschrijdingen tijdens een volledige reis is natuurlijk de som van het aantal overschrijdingen in heen- en terugvaart.

De waarden kunnen grafisch voorgesteld worden. Een voorbeeld van zo een grafiek staat hieronder. Het betreft de overschrijding van een kritieke waarde van 0.8 MNm bij een A1-schip in het middenschip ($x=55$). Het schip vaart aan een snelheid van 10 kn.



Figuur 3.35: Minimum, maximum, en gemiddeld aantal overschrijdingen tijdens een reis, bij een zee-toestand overeenstemmend met de significante golfhoogte. De cumulatieve distributie geeft het maximale buigende moment indien de significante golfhoogte beperkt blijft tot de waarde in de abscis.

3.11.3 Reis-, jaar- & levensduuroverschrijding

Er wordt gezocht naar de karakteristieke golfhoogte waarbij het kritieke buigend moment eens per reis/jaar/levensduur bereikt wordt.

3.11.3.1 REIS

Een overschrijding per reis staat rechtstreeks aangegeven in de het OV-bestand. Er wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde waarde. Als de overschrijdingskans gelijk is aan 1, zal de kritieke waarde gemiddeld elke reis bereikt worden. Het bepalen van de golfhoogte komt dus neer op het zoeken in de gemiddelde waarden totdat de overschrijdingskans 1 wordt. De bijhorende significante golfhoogte geeft de gezochte waarde.

Merk op dat deze waarde eenvoudig kan afgelezen worden op bovenstaande grafiek. De golfhoogte die overeenstemt met een overschrijdingskans = 1 bedraagt 2.6 m.

3.11.3.2 JAAR

Er wordt verondersteld dat er jaarlijks 300 reizen ondernomen worden. Indien in 1 jaar de kritische waarde maar 1 maal overschreden mag worden, dient de kans op overschrijding gelijk te zijn aan: $1 / 300 = 0.0033$. Men gaat op zoek naar deze waarde in de cumulatieve overschrijdingskansverdeling.

De bijhorende golfhoogte bedraagt 2.59 m (zie grafiek)

3.11.3.3 LEVENSDUUR

Als verondersteld wordt dat het schip 20 jaar in dienst blijft, zal de kritische waarde gemiddeld één maal per levensduur overschreden worden als de overschrijdingskans gelijk is aan $0.033 / 20 = 0.001667$

De overeenkomstige golfhoogte is 2.23 m (zie grafiek)

3.11.4 Verschillende kritische waarden

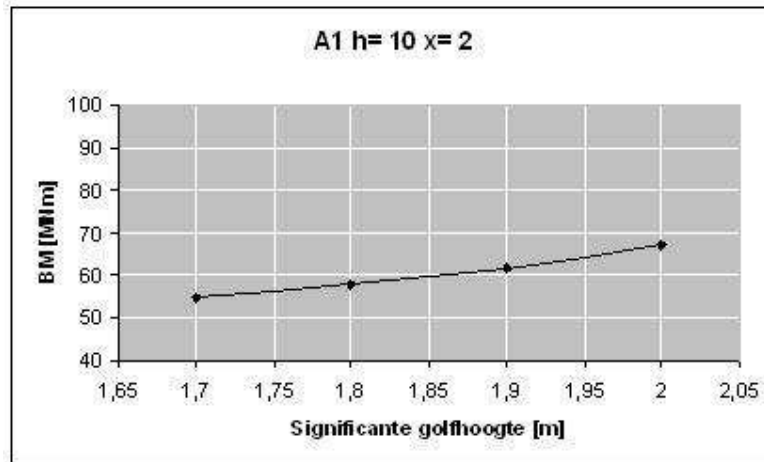
De bovenstaande evaluatie naar golfhoogte kan gebeuren voor verschillende waarden van het kritieke buigende moment. De resultaten worden samengevat in een nieuw Excel-bestand.

Hieronder wordt de samenvatting gegeven voor het midden van een A1-schip met snelheid 10 knopen en waterdiepte 10 m:

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,61	2,1	2,6	3,98
per jaar	1,48	2,07	2,59	3,98
per levensduur	1,22	1,87	2,23	2,69

Figuur 3.36: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde

De kritische waarden van het buigend moment worden steeds zodanig gekozen dat zij de significante golfhoogte tussen 1.7 en 2 bevatten. Dit laat toe om een grafiek op te stellen, die uitgaande van in het bovenstaande interval de bijhorende kritische waarde van het buigende moment geeft.



Figuur 3.37: Kritische BM'en horend bij $\zeta_{1/3}$ in het interval[1.7 m - 2 m]

Deze grafiek laat ook toe om een grafische evaluatie te maken van het belang van springing. Hiervoor dienen echter eerst de statische overschrijdingskansen berekend te worden.

3.12 Berekening statische overschrijdingskansen

Om de invloed van springing te begroten, moeten de hierboven bekomen overschrijdingskansen vergeleken worden met de overschrijdingskansen die optreden wanneer resonantie/springing niet beschouwd wordt.

In het statische geval wordt de bovenstaande methode ter berekening van de overschrijdingskansen volledig herhaald. De RAO's worden nu echter niet meer vermenigvuldigd met een dynamische versterkingsfactor.

De kenletter in de S1-bestanden voor een statische RAO is O, evenals voor het RES-bestand voor het traject Zeebrugge-Schelde. Het responsiegegevensbestand voor het traject Schelde-Zeebrugge wordt met de kenletter S aangeduid.

3.13 Vergelijking Statisch en Dynamisch

De vergelijking van de statische en dynamische overschrijdingskansen gebeurt als volgt.

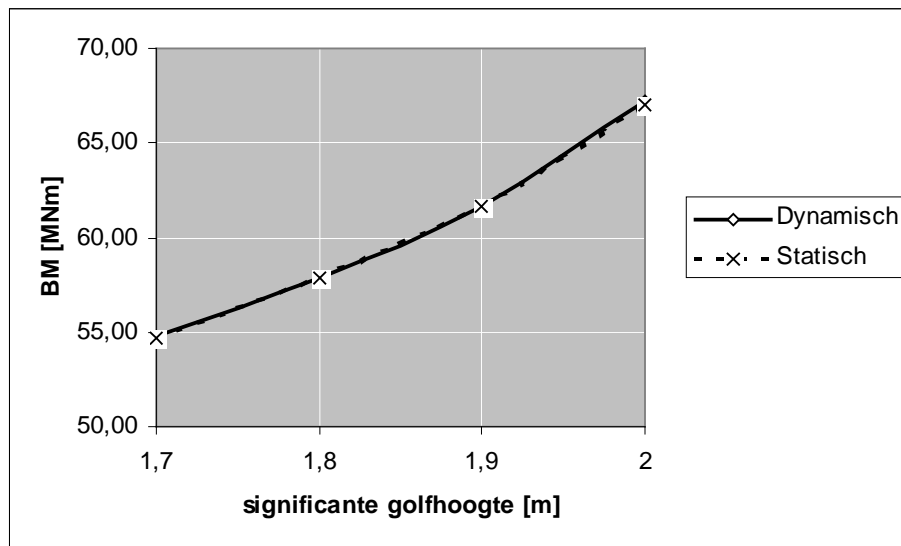
De buigende momenten die gepaard gaan met significante golfhoogten gelegen tussen 1.7 m en 2 m worden voor beide situaties getabelleerd.

Uitgaande van deze waarden wordt de procentuele toename berekend die springing induceert. Deze waarde krijgt in deze thesis de naam **springingsgevoeligheid**.

De resultaten worden bovendien grafisch voorgesteld.

Significante golfhoogte [m]	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	54,77	57,85	61,67	67,22
BM statisch [MNm]	54,69	57,81	61,62	67,03
Percentage aangroei [%]	0,149	0,058	0,073	0,291

Figuur 3.38: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 3.39: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

Voor een volgeladen A1-schip is de springingsgevoeligheid miniem. De resultaten voor andere basisconfiguraties zijn opgenomen in “5 Resultaten”

4 Praktische Berekeningen



De berekeningen die in het vorige hoofdstuk beschreven staan, dienen herhaald te worden voor alle beschouwde configuraties.

Om deze berekeningen vlot te laten verlopen werd in Excel een verzameling programma's (macro's) geschreven. Deze macro's zijn steeds met elkaar verbonden, en werken verder op de resultaten van vorige macro's.

Net als de berekeningen in het vorige hoofdstuk werden de macro's onderverdeeld naargelang het stadium waarin zij werken. Op die manier ontstaan er 4 groepen:

- Aanpassen Geometrie
- Berekening natuurlijke frequentie
- RAO
- Overschrijdingskans

De lezer wordt aangeraden ondertaande uitleg te lezen met het formulier binnen handbereik. Indien het formulier niet compatibel is met diens Excel-versie, kunnen de resultaten ook gelezen worden in de map "*resultaten*", eveneens aanwezig op de Cd-rom. Deze map bevat dezelfde opbouw als het formulier, maar de belangrijkste berekening zijn hier al ingevuld in de daartoe bestemde mappen.

Hieronder wordt de lay-out van het overkoepelende formulier van deze macro's weergegeven³⁸:

³⁸ Het werkt enkel bij Nederlandstalige versies van Excel 2000, of recentere Nederlandstalige versies. Kleine aanpassingen noodzakelijk in de Engelstalige versies kunnen echter snel aangebracht worden.

Figuur 4.1: Overkoepelend formulier

Met behulp van dit formulier kunnen alle berekeningen opnieuw gegenereerd worden. De resultaten worden weggeschreven naar bestanden die in onderstaande uiteenzetting beschreven worden.

Sommige stappen in de berekening werden niet uitgevoerd met Excel. Denk aan de omzetting naar S1-bestand (MS Word), bepalen van de RAO's (Seaway) of de verwerking van de S1-bestanden tot overschrijdingskansen.

De resultaten van deze berekeningsstappen, werden opgeslagen in bestanden die geopend werden met bovenstaand formulier. Een groot voordeel van het formulier is dat alle resultaten opnieuw gegenereerd worden als men beschikt over de juiste inputgegevens.

4.1 Installatie formulier

De installatie van bovenstaand formulier geschiedt erg eenvoudig. Op de bijgeleverde Cd-rom dient de volledige map “formulier” gekopieerd te worden naar een schrijfomgeving (Vb. de harde schijf van uw computer). Als het bestand “Springing bij Estuaire Containerschepen.xls” geopend wordt verkrijgt men bovenstaand formulier en kan men de berekeningen aanvatten.

4.2 Gebruik van het formulier

De eerste maal dat het formulier gebruikt wordt, moet de **opslaglocatie** bekendgemaakt worden. De opslaglocatie is de plaats waar het geheel van mappen en bestanden zich bevindt op de harde schijf. In het formulier wordt deze locatie aangeduid met **bronnaam**.

Vb. C:\Thesis\formulier

Controleer bij het eerste gebruik van het programma steeds of de bronnaam in het formulier overeenkomt met de locatie van de mappen, “*RAO*”, “*bonjean*”, “*berekening natuurlijke frequentie*”, “*DSP*”, “*overschrijdingskans*” en “*h_V_omega_mu*”. Deze 6 mappen vormen immers de werkomgeving van het formulier.

De mappen “*DSP*” en “*berekening natuurlijke frequentie*” bevatten inputwaarden. In de map “*DSP*” worden de OV-bestanden teruggevonden, terwijl in de map “*Berekening natuurlijke frequentie*” voornamelijk geometrische eigenschappen en massaverdelingen opgeslagen zijn.

In de map “*bonjean*” komen de aangepaste geometrische eigenschappen en massaverdelingen terecht. Bovendien bevat deze map de volledige ω_n -berekening aangevuld met de berekening van de dempingsverhouding.

In de map “*H_V_omega_mu*” komen de berekeningen en visualisatie van de eigengolven terecht.

De map “RAO” bevat zowel de seaway-output als de bewerkingen van de RAO’s en de gegenereerde S1-bestanden en ENC-bestanden. Hierin komen ook de grafieken van de RAO’s terecht.

De map “Overschrijdingskans” bevat tenslotte de verwerking van de OV-bestanden. Ze bevat voor alle onderzochte situaties de evaluatie van heen- en terugreis voor verschillende kritische waarden. De resultaten voor een volledige reis, jaar en levensduur worden weggeschreven naar een nieuw bestand dat de belangrijkste resultaten voor een bepaalde configuratie bundelt.

Bovenstaande berekening kan zowel in het statische als het dynamische geval gebeuren. Uiteindelijk kunnen de overschrijdingskansen in beide gevallen met elkaar vergeleken worden.

4.3 Aanpassen geometrie

De inputwaarden van bovenstaand formulier zijn het type schip (A,B,C, D) en de ladingstoestand van die schepen (Vol 1, Vol 2, Ballast 1).

Uitgaande van deze gegevens zijn al heel wat eigenschappen van de schepen bekend:

A	Vol 1	Vol 2	Ballast 1	B	Vol 1	Vol 2	Ballast 1
L [m]	109,5	109,5	109,5	L [m]	109,5	109,5	109,5
B [m]	11,4	11,4	11,4	B [m]	17,1	17,1	17,1
T [m]	3	4	2,38	T [m]	3,5	5	2,38
T1 [m]	3	4	2,75	T1 [m]	3,5	5	2,75
T2 [m]	3	4	2	T2 [m]	3,5	5	2
F [m]	2,5	3	3,12	F [m]	2,5	3,5	3,62
KG [m]	3,75	4	2,36	KG [m]	4	5,5	3,05
W [m ³]	0,58	0,67	0,58	W [m ³]	0,92	1,06	0,92

C	Vol 1	Vol 2	Ballast 1
L [m]	134,7	134,7	134,7
B [m]	17,1	17,1	17,1
T [m]	3,5	5	2,38
T1 [m]	3,5	5	2,75
T2 [m]	3,5	5	2
F [m]	2,5	3,5	3,62
KG [m]	4,5	5,5	3,05
W [m³]	1,44	1,68	1,44

D	Vol 1	Vol 2	Ballast 1
L [m]	134,7	134,7	134,7
B [m]	22,8	22,8	22,8
T [m]	3,5	5	2,38
T1 [m]	3,5	5	2,75
T2 [m]	3,5	5	2
F [m]	3	4	4,12
KG [m]	4,5	5,5	3,46
W [m³]	1,85	2,17	1,85

Figuur 4.2: Eigenschappen verschillende configuraties

De richtwaarden kunnen teruggevonden worden in de “Haalbaarheidsstudie Estuair Containervervoer” [1.].

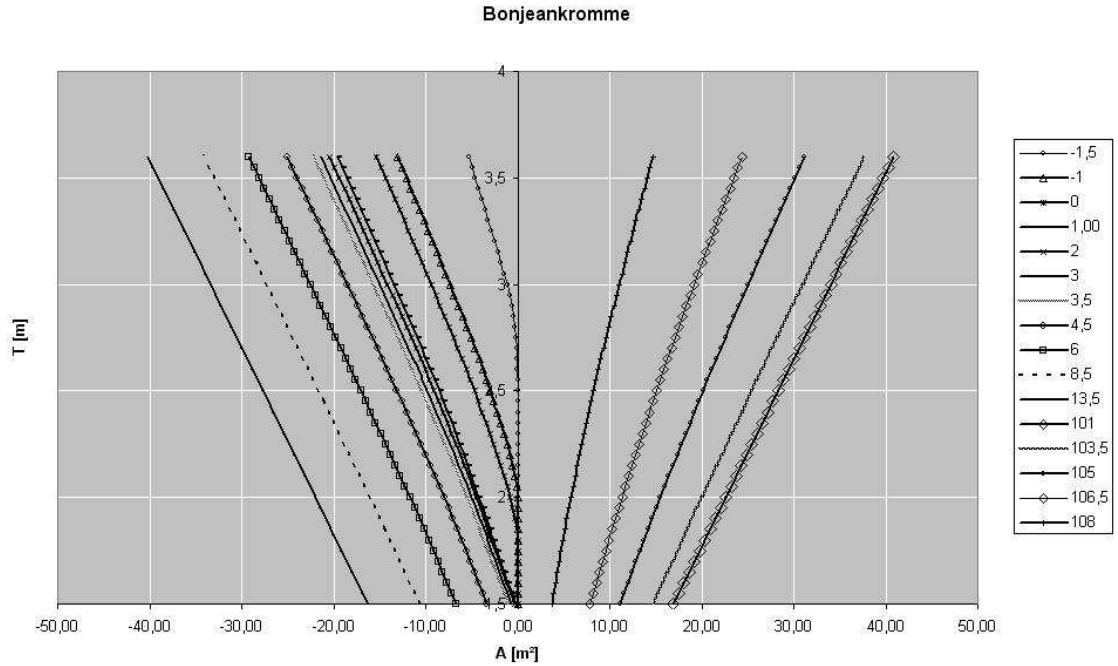
4.3.1 Bonjeankrommen

Voor trimberekeningen en ook voor de berekening van de natuurlijke frequenties met de methode van Todd, moeten de bonjeankrommen voorhanden zijn.

De bonjeankrommen drukken de natte dwarsoppervlakte van een schip - op een bepaalde langsscheepse afstand - uit in functie van de diepgang.

De bonjeankrommen voor een A1-schip worden uit Seaway berekend door de geometrische eigenschappen van het schip (waaronder oppervlakte) te berekenen bij verschillende diepgang.

De resultaten kunnen dan in een tweedimensionale tabel (T,x) overzichtelijk weergegeven worden. Een meer visuele voorstelling (waaruit eventuele fouten direct volgen) is de grafische voorstelling van deze tabel, die de bonjeancurven weergeven.



Figuur 4.3: Bonjeankrommen A-schip

De bonjeankrommen die hierboven gevisualiseerd worden, werden berekend voor een schip met afmetingen:

L_0 [m]	109,5
B_0 [m]	11,4
T_0 [m]	3,22

Bij de bespreking van het HUL-bestand in seaway werd reeds opgemerkt dat de rompen voor de verschillende configuraties gelijkvormig zijn, en aan de hand van 3 schaalfactoren aangepast kunnen worden. Dit houdt voor de dwarssecties in dat deze uitgerekt worden in B-richting en T-richting.

De bonjeankrommes voor andere afmetingen dan deze hierboven worden dus gevonden door de oppervlakken met een geometrische evenredigheidsfactor te vermenigvuldigen.

$$A = \frac{B \cdot T}{B_0 \cdot T_0} \cdot A_0 \quad (4.1)$$

Uitgaande van één bonjeankromme kunnen de bonjeankrommes voor alle configuraties berekend worden³⁹!

Dit gebeurt door de functie: **aanpassen_bonjean(L, B, T)**

Deze functie leest de waarden van A_0 in, en berekend de nieuwe waarden van A. De resultaten worden in een nieuwe werkblad “bonjean” opgeslagen.

Dit werkblad wordt op haar beurt toegevoegd aan een werkmap met de naam **bronnaam\bonjean\L, B en T.xls** (vb *bronnaam\bonjean\109.5, 11.4 en 3*)

4.3.2 De breedteverdeling

Analoog aan de bonjeankrommen, kan de breedteverdeling over de lengte bij verschillende diepgangen geëvalueerd worden door de geometrische berekeningen van Seaway bij verschillende diepgang.

De bekomen waarden voor $B=11.4$ m kunnen op analoge wijze als hierboven herrekend worden naar een andere breedte (analoge opmerking i.v.m. de abscis en ordinaat).

De functie analoog aan `aanpassen_bonjean(L,B,T)` wordt nu **aanpassen_breedte(L,B,T)**.

Door deze functie wordt een werkblad “breedte” toegevoegd aan de werkmap met de naam **bronnaam\bonjean\L, B en T.xls**.

4.3.3 Hoofdafmetingen

Een deel van de hoofdafmetingen werd reeds beschreven in de eerste paragraaf van dit hoofdstuk. De andere eigenschappen kunnen opnieuw via schaalfactoren omgerekend worden. Het displacement wordt bekomen door het displacement bij de oorspronkelijke afmetingen om te rekenen naar de huidige afmetingen.

³⁹ Bemerkt dat door een verandering van de diepgang ook de ordinaat in de tabellen/grafieken aangepast dient te worden, en een verandering van de lengte een schaalverandering van de abscis teweeg brengt.

Een eerste benadering van de gyratiestralen wordt bekomen door volgende algemeen bekende benaderingsregeltjes

$$k_{xx} = 0.35 \cdot B \quad (4.2)$$

$$k_{yy} = k_{zz} = 0.25 \cdot L \quad (4.3)$$

Bij latere berekeningen zal het werkblad “hoofdafmetingen” aangevuld worden met de natuurlijke frequentie en de dempingverhouding voor springing.

De functie verantwoordelijk voor het werkblad hoofdafmetingen luidt:

aanpassen_Hoofdafmetingen(L, B, T, T1, T2, F, w, KG).

4.3.4 Toegevoegde massa

Een aandachtig lezer heeft misschien al opgemerkt dat de toegevoegde massa zoals berekend in “3.3.5 Toegevoegde massa”, eveneens enkel afhankelijk is van geometrische eigenschappen.

Men kan dezelfde schaalfactoren gebruiken om de sectionele oppervlakteverhouding en de B/T-verhouding naar de nieuwe geometrie om te rekenen

$$\sigma_D \left(x \cdot \frac{L}{L_0} \right) = \frac{A \left(x \cdot \frac{L}{L_0} \right)}{B \left(x \cdot \frac{L}{L_0} \right) \cdot T \left(x \cdot \frac{L}{L_0} \right)} \quad (4.4)$$

Doordat teller en noemer beide aangepast worden aan diepgang en breedte, vallen de schaalfactoren in teller en noemer weg! De verdeling van de sectionele oppervlakteverhoudingen verandert niet in grootte, maar wordt conform de lengteverandering uitgerekte/ingedrukt.

Aanpassing van de breedte-diepgang-verhouding zal wel andere waarden opleveren.

De nieuwe combinaties van beide grootheden zullen in de $C(x)$ -grafiek aanleiding geven tot nieuwe waarden van $C(x)$. Deze C -waarden leiden uiteindelijk tot de nieuwe waarden voor de toegevoegde massa.

De bovenstaande berekening gebeurt door de functie:

aanpassen_Toegevoegde_massa(L, B, T).

Er wordt voor deze functie opnieuw een werkblad gemaakt waarin de berekeningen weergegeven worden. Bovendien worden de waarden toegevoegd in het werkblad “Berekeningen” daar zij een rechtstreekse impact hebben op de berekening van de natuurlijke frequentie.

Deze aanwezigheid in het werkblad “Berekeningen” is de reden dat de optie “Toegevoegde massa” in het formulier geklasseerd staat onder *Berekening natuurlijke frequentie* en niet onder *Geometrische aanpassing* waar ze principieel wel thuishoort.

4.4 Berekening natuurlijke frequentie

Het berekenen van de natuurlijke frequentie gaat gepaard met een groot aantal stappen. Om de berekening zo overzichtelijk mogelijk te maken werd voor alle stappen een aparte functie geprogrammeerd.

Bij het lezen van volgende bespreking kan men best in de map *bronnaam\formulier\bonjean* (of in resultaten\bonjean op de Cd-rom) het werkblad Berekeningen openen om de methode te volgen.

4.4.1 Langsscheepse verdeling

De verdeling van de lengteafstanden (x -waarden) wordt met vast interval gekozen. Het spreekt voor zich dat de lengte de enige schaalfactor is.

De functie `aanpassen_Xwaarden(L, B, T)`⁴⁰ levert de eerste vier kolommen van het werkblad “Berekeningen”.

Binnen een interval wordt de massa gelijkgesteld aan de waarde eigen aan het gemiddelde van het interval.

4.4.2 Toegevoegde massa

Zie “4.3.4 Toegevoegde massa”

4.4.3 Massaverdeling

De functie massaverdeling bestaat uit 2 functies. De eerste functie zal de juiste massaverdeling inlezen uit het bestand *bronnaam\berekening natuurlijke frequentie\massaverdelingen\Ladingsverdelingen_corrMV27022006.xls*

De tweede functie past de massaverdeling aan zodat de sluitfouten nul worden. De methode die hiervoor gehanteerd wordt staat vermeld in “3.3 Massaverdeling”.

Zowel de oorspronkelijke als de aangepaste massaverdeling worden weergegeven in het werkblad “Berekeningen”. Bovendien wordt de totale massa in een nieuwe kolom berekend.

4.4.4 Trillingsprofiel

Analoog aan de functie voor de massaverdeling bestaat de berekening van een gepast trillingsprofiel opnieuw uit 2 functies.

De eerste functie leest de theoretische trilling in. De tweede functie zal de theoretische trilling aanpassen volgens de methode van Schadloviski.

⁴⁰ Alhoewel voor de aanpassing van de x-waarden enkel de lengte vereist is, zijn breedte en diepgang noodzakelijk om het werkblad in de juiste werkmapp te slaan.

4.4.5 X-, V-, M-waarden

Uitgaande van het trillingsprofiel en de massaverdeling, wordt begonnen met de integratie van het product van beide waarden. De langsscheepse x-verdeling verandert nu ook doordat de functie een cumulatief karakter krijgt, en bijgevolg niet midden in een interval kan beginnen zoals bij de oorspronkelijke langsscheepse verdeling.

4.4.6 Traagheidsmoment

Het traagheidsmoment wordt ingelezen aan de hand van het weerstandsmoment aanwezig in het werkblad “hoofdafmetingen”.

4.4.7 Integratie M/I

Eénmaal de traagheidsmomenten ingelezen zijn, kunnen de verplaatsingen op de elasticiteitsmodulus na bepaald worden door M/I tweemaal te integreren. Dit gebeurt door de optie Integratie M/I te activeren.

De bijhorende functie levert 4 kolommen:

- De waarden van M/I
- De eerste integratie van deze waarden
- De eerste integratie verticaal verschoven zodat het gemiddelde nul wordt
- De integratie van de 3^{de} kolom

4.4.8 Aangepaste Trilling

De laatste 3 kolommen bevatten een overzicht van de 3 genormeerde trillingen:

- Theoretische tweeknoopstrilling van een uniforme balk opgelegd in zijn knooppunten
- Tweeknoopstrilling aangepast volgens Schadloviski
- Trillingsprofiel berekend uit de verplaatsingen.

4.4.9 Berekening natuurlijke frequentie

Uit het berekende trillingsprofiel kan nu de natuurlijke frequentie berekend worden.

De natuurlijke frequentie wordt weggeschreven naar het werkblad “Berekeningen”. De laatste berekende frequentie wordt opgenomen in het werkblad “hoofdafmetingen”.

4.4.10 Iteratie

Indien het trillingsprofiel, berekend in de vorige functie “Aangepaste Trilling” niet veel afwijkt van het oorspronkelijke trillingsprofiel zal de natuurlijke frequentie voldoende nauwkeurig zijn.

Meestal is er echter een iteratieve berekening nodig waarbij het trillingsprofiel berekend uit de verplaatsingen, als oorspronkelijk trillingsprofiel gekozen wordt.

Het aantal iteraties wordt opgevraagd in het formulier. Ervaring leert dat reeds na 4 iteraties een definitieve waarde voor ω_n bereikt wordt.

4.5 RAO

De berekening van de RAO gebeurt in Seaway. De verwerking van de resultaten wordt echter bekomen door de RAO-tabellen in te lezen in Excel-bestanden.

4.5.1 Berekening dempingsverhouding

Om de statische RAO om te rekenen naar een dynamische RAO, dient de dempingsverhouding bekend te zijn. Vroeger werd reeds aangehaald dat haar waarde berekend wordt uitgaande van L en ω_n .

Aangezien deze waarden allebei bekend zijn kan de dempingsverhouding berekend worden en weggeschreven naar het werkblad “hoofdafmetingen” in de betreffende werkmap.

4.5.2 Eigengolven

Uitgaande van de natuurlijke frequentie, de snelheid en de waterdiepte, kunnen de resonerende golfcomponenten bepaald worden.

De resultaten worden grafisch voorgesteld in een kompasvoorstelling zoals aangetoond in "3.7.5 Resonerende golfcomponenten".

4.5.3 Berekening RAO

De outputfile bekomen in Seaway wordt in een werkblad ("Onbewerkt") in Excel geplakt. Met behulp van een macro "*Genereer_RAO*" worden de RAO's uit de Seaway-output gedestilleerd voor relatieve koershoeken gaande van 0° tot 180°.

In eerste instantie worden zowel de RAO's van de amplitude als van de fasehoek berekend. Dit leidt tot 18 RAO's

- 3 snelheden
- 3 dwarssecties
- Amplitude en fasehoek

De werkmap wordt uiteindelijk opgeslagen op volgende locatie:

Bronnaam\RAO\''type''+'ladingstoestand'\Rao_My\''type''+'ladingstoestand''

Vb. Bronnaam\RAO\A1\Rao_My\A1.xls

Belangrijk is het op te merken dat de werkmap A1.xls⁴¹ Door de gebruiker zelf gegenereerd dient te worden. De macro "*Genereer_RAO*" helpt de RAO's uit de Seaway-output te halen, maar maakt geen deel uit van het besproken formulier.⁴²

⁴¹ Als voorbeeld kan natuurlijk net zo goed A2 of C3 of... gebruikt worden.

⁴² De programmacode van de macro *Genereer_RAO* kan nagelezen worden op de Cd-rom op de locatie Macro's\excel\Genereer_RAO)

Eenmaal het bestand A1.xls gegenereerd werd, kan de verwerking starten. Deze verwerking gebeurt wel door een functie aanwezig in het formulier:

bereken_RAO(L, B, T, h, x, Boot, Lad, dyn, bronnaam)

De invoerwaarden van deze functie zijn respectievelijk

- Lengte
- Breedte
- Diepgang
- Waterdiepte (10 m)
- Rangnummer dwarssectie
- Type
- Ladingsconditie
- Boolean die aanduidt of de statische of dynamische RAO gegenereerd dient te worden
- Bronnaam

Uitgaande van deze waarden worden de RAO's (voor de 3 snelheden) ingelezen uit de overeenkomstige werkmap en werkblad. Bovendien wordt uit het bestand "L, B en T.xls" de dempingsverhouding ingelezen uit het werkblad "hoofdafmetingen" (enkel in het dynamische geval).

Met behulp van de koershoek, de golffrequentie en de snelheid kan de ontmoetingsfrequentie bepaald worden. Op die manier wordt er een matrix gegenereerd die de ontmoetingsfrequentie geeft bij verschillende koershoek en golffrequentie. Die matrix wordt opgeslagen als een ENC-bestand.

Nu voor elke waarde in de RAO de corresponderende ontmoetingsfrequentie bekend is kan de dynamische versterking voor de verschillende RAO-waarden bepaald worden. In het statische geval wordt de dynamische versterking gelijk gesteld aan 1 voor alle frequenties.

Door de oorspronkelijk RAO-waarden te vermenigvuldigen met hun dynamische versterking bekomt men de dynamische RAO. Door deze te spiegelen rond koershoeken 180° bekomt men de dynamische RAO voor (relatieve) koershoeken gaande van 0° tot 360°.

De 3 RAO's overeenstemmend met 3 snelheden worden opgeslaan op volgende locatie:

Bronnaam\RAO\'type'+\'ladingstoestand'\Rao_My\x='x',h=10

Vb. Bronnaam\RAO\A1\Rao_My\x=55,h=10.xls

De 3 RAO's worden ook afzonderlijk opgeslagen als S1-bestand. Net als de ENC-bestanden krijgen ze de **naam** zoals beschreven in "3.10.2 Genereren Responsiegegevensbestand".

4.5.4 Grafiek RAO

Met deze functie worden de dynamische RAO's in grafieken gegoten.

4.6 Overschrijdingskans

Nadat de S1-bestanden en ENC-bestanden door het programma SW_RESMX.exe omgerekend werden tot RES-bestanden. Worden deze op hun beurt omgezet door de programma's MND_RESP.exe en JR_RESP.exe naar OV-bestanden.

Deze OV-bestanden worden via het formulier verder verwerkt.

4.6.1 Berekening overschrijdingskans

De OV-bestanden worden opgeslagen op de locatie Bronnaam\DSP.

De functie **Overschrijdingskans(Boot, lad, x, 10, 40, reis, jaar, dyn, h, bronnaam)** leest het juiste bestand in en plakt het in een verwerkingsbestand.

De inputwaarden van deze functie zijn

- Type
- Ladingsconditie
- Rangnummer dwarssectie
- Snelheid
- Kritische waarde buigend moment
- Aantal reizen per jaar
- Aantal jaren per levensduur
- Dynamische of statische berekening
- Waterdiepte

De functie berekend de overschrijdingskansen en de grafieken.

De overeenkomstige werkmap wordt opgeslagen als:

**Bronnaam\Overschrijdingskans\"boot\"+\"Ladingsconditie\"\"boot\"+\"Ladingsconditie\"V\"V\"x
\"x\"kr\"krit.xls**

Vb. Bronnaam\overschrijdingskans\A1\A1V10x2kr0,6.xls

Bovendien schrijft deze functie de overschrijdingskansen per reis, jaar en levensduur weg naar een bestand, gemeenschappelijk voor alle kritische waarden van deze combinatie inputwaarden.

Dit bestand heeft dezelfde naam als het eerst opgeslagen bestand, alleen valt de verwijzing naar de kritieke waarde weg

Vb. Bronnaam\overschrijdingskans\A1\A1V10x2.xls

4.6.2 Vergelijking Statisch/Dynamisch

Wanneer de overschrijdingskansen zowel in het statische als het dynamische geval berekend werden, kunnen de resultaten met elkaar vergeleken worden.

Deze vergelijking houdt onder andere in dat de procentuele aangroei bij dynamische responsie (springingsgevoeligheid) berekend wordt.

Het resultaat wordt in een apart bestand opgeslagen. Dit bestand krijgt de naam van de onderzochte configuratie en het woord “standaardcondities”

Vb. Bronnaam\overschrijdingskans\A1\A1 standaardcondities.xls

4.6.3 Afwijkende condities

Door op de knop “Afwijkende Condities” te klikken kunnen afwijkingen van de standaardconditie berekend worden.

Dit gebeurt in een nieuw formulier waarvan de functie’s uitgelegd worden in “5.4.1 Aangepaste condities”

5 Resultaten

5.1 Natuurlijke frequenties

In onderstaande tabel worden de berekende waarden gegeven per configuratie. De waarden kunnen op de Cd-rom nagelezen worden op de locatie **resultaten\bonjean\samenvatting.xls**.

	L	B	T	F	Depl	KG	b/bo	ω_n
	[m]	[m]	[m]	[m]	[ton]	[m]	[-]	[rad/s]
A1	109,5	11,4	3	2,5	3591	3,75	0,00355	6,7176
A2	109,5	11,4	4	3	4788	4	0,00379	7,7118
A3	109,5	11,4	2,375	3,125	2845	2,36	0,00354	6,6549
B1	109,5	17,1	3,5	2,5	5977	4	0,00348	6,4130
B2	109,5	17,1	5	3,5	8539	5,5	0,00379	7,7233
B3	109,5	17,1	2,375	3,625	4058	3,05	0,00350	6,4918
C1	134,7	17,1	3,5	2,5	7350	4,5	0,00290	5,0422
C2	134,7	17,1	5	3,5	10501	5,5	0,00314	5,9979
C3	134,7	17,1	2,375	3,625	4990	3,05	0,00296	5,2708
D1	134,7	22,8	3,5	3	9548	4,5	0,00285	<u>4,8305</u>
D2	134,7	22,8	5	4	13641	5,5	0,00310	5,8337
D3	134,7	22,8	2,375	4,125	6482	3,46	0,00290	5,0185

Figuur 5.1: Samenvatting geometrische eigenschappen

De natuurlijke frequentie blijkt het kleinst te zijn voor het schip met de grootste afmetingen, maar met de kleinste holte en weerstandsmoment. In volle toestand is de natuurlijke frequentie lager dan in ballastconditie. Dit laatste is het geval voor alle schepen, behalve het A1-schip. De reden hiervoor is dat het deplacement tussen ballast en volgeladen conditie van het A1-schip niet veel verschilt.

Er treden hier immers 2 effecten op:

- Als de massa meer geconcentreerd wordt aan de uiteinden ontstaat een lagere natuurlijke frequentie. De massa's aan de uiteinden geven immers aanleiding tot grote krachten (massa x versnelling) aan de uiteinden. Deze geven het middenschip slappere eigenschappen.
- Hoe groter de massa (en ook het displacement) echter hoe lager de natuurlijke frequentie. De grote massa zal immers meer tijd nodig hebben om in beweging te komen.

In ballast treden beide tegenstrijdende effecten (t.g.v. displacementsverandering en massaverdelingsverandering) op. Voor het A-schip primeert het 1^{ste}, bij grotere schepen wordt de displacementsverandering belangrijker en zal de natuurlijke frequentie in ballast hoger zijn dan in volgeladen toestand.

5.2 Resultaten standaardconditie

In dit onderdeel worden de resultaten weergegeven voor de verschillende testschepen varend bij standaardconditie.

Deze standaardconditie is

- Snelheid = 10 kn
- Diepgang = 10 m
- Koershoek heen = 70°
- Koershoek terug = 250 °
- Evaluatie in het middenschip

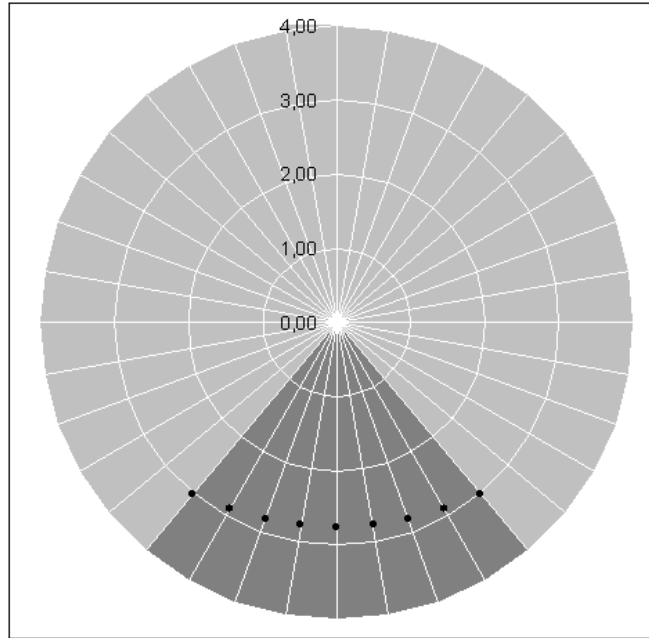
Voor deze conditie worden per testschip volgende resultaten weergegeven:

- De eigengolven horend bij de verschillende situaties worden grafisch uitgezet. Voor de visualisatie wordt gebruik gemaakt van de kompasvisualisatie zoals beschreven in het onderdeel “3.7.5 Resonerende golfcomponenten”.
- Zowel in het statische als het dynamische geval worden de significante golfhoogten berekend voor verschillende waarden van het buigend moment.
- Het verschil in statische en dynamische responsie wordt weergegeven in tabel en grafiek. Deze drukken het maximale buigend moment uit dat 1 maal bereikt wordt tijdens de levensduur van het schip. Dit op voorwaarde dat de golfhoogte beperkt wordt tot een bepaalde waarde (1.7, 1.8, 1.9 en 2). Bovendien wordt de procentuele toename van het buigend moment (springingsgevoeligheid) berekend als rekening gehouden wordt met dynamische effecten.

Op het einde van dit hoofdstuk worden de resultaten besproken en verklaard.

5.2.1 A1-schip, Ladingsconditie: Vol (A1).

5.2.1.1 $V = 10 \text{ KN}$, $X = 55 \text{ M}$, $H = 10$ ⁴³



Figuur 5.2: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,65	2,1	2,67	3,98
per jaar	1,52	2,08	2,6	3,98
per levensduur	1,23	1,87	2,24	2,71

Figuur 5.3: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

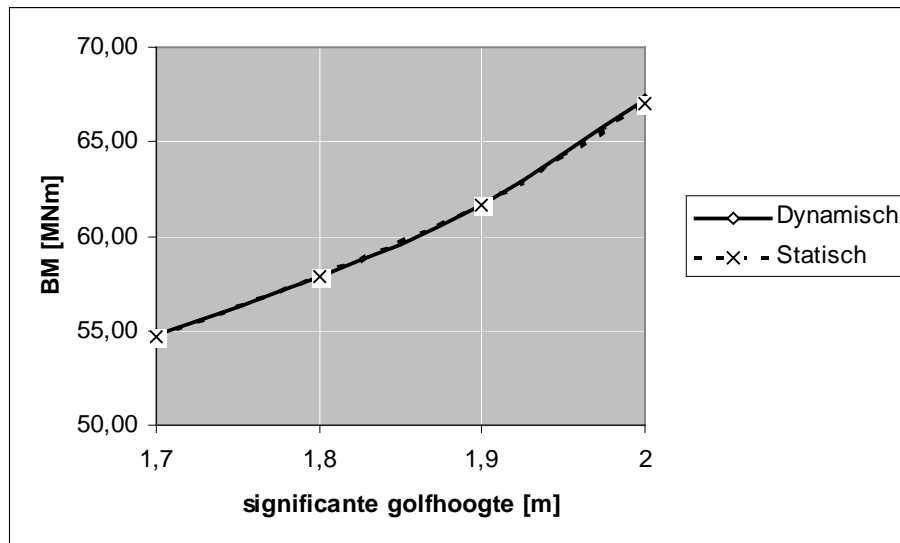
	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
Per reis	1,61	2,1	2,6	3,98
Per jaar	1,48	2,07	2,59	3,98
per levensduur	1,22	1,87	2,23	2,69

Figuur 5.4: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

⁴³ Een reis beslaat hier zowel heen- als terugreis., zijnde het traject Westerschelde-Zeebrugge-Westerschelde.

Significante golfhoogte [m]	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	54,77	57,85	61,67	67,22
BM statisch [MNm]	54,69	57,81	61,62	67,03
Percentage aangroei [%]	0,149	0,058	0,073	0,291

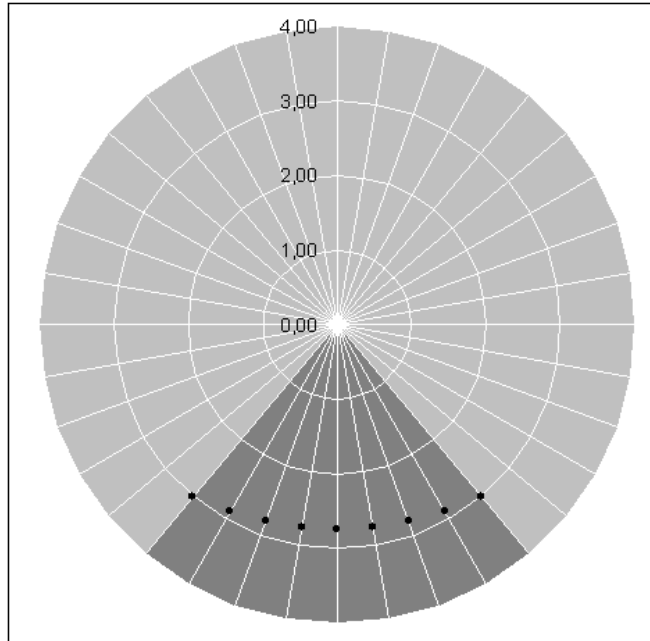
Figuur 5.5: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.6: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.2 A1-schip, Ladingsconditie: Ballast (A3).

5.2.2.1 $V = 10 \text{ KN}$, $X = 55 \text{ M}$, $H = 10$



Figuur 5.7: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,69	2,21	3,98	3,98
per jaar	1,58	2,19	2,72	3,98
per levensduur	1,35	1,91	2,3	2,9

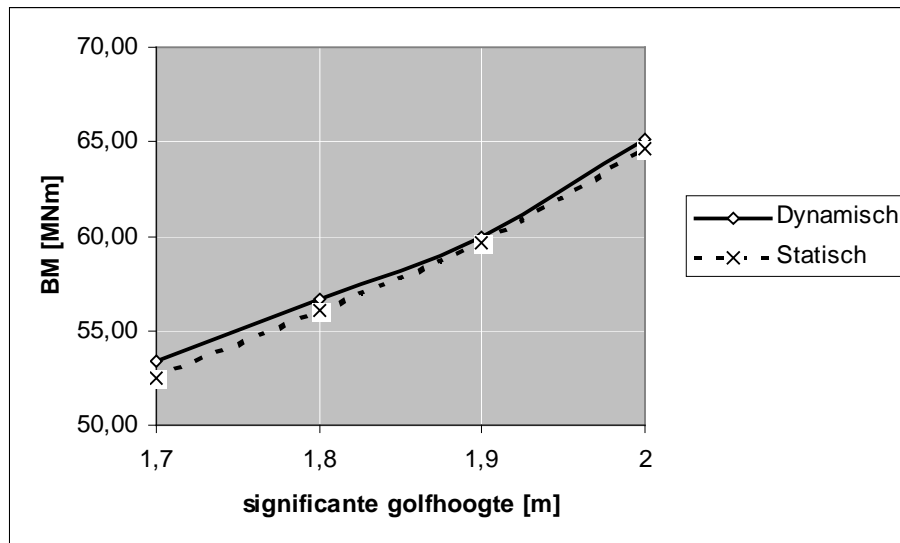
Figuur 5.8: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
Per reis	1,67	2,21	2,71	3,98
Per jaar	1,54	2,16	2,72	3,98
per levensduur	1,3	1,9	2,29	2,84

Figuur 5.9: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	53,33	56,67	60,00	65,13
BM statisch [MNm]	52,50	56,07	59,64	64,62
Percentage aangroei [%]	1,587	1,062	0,599	0,794

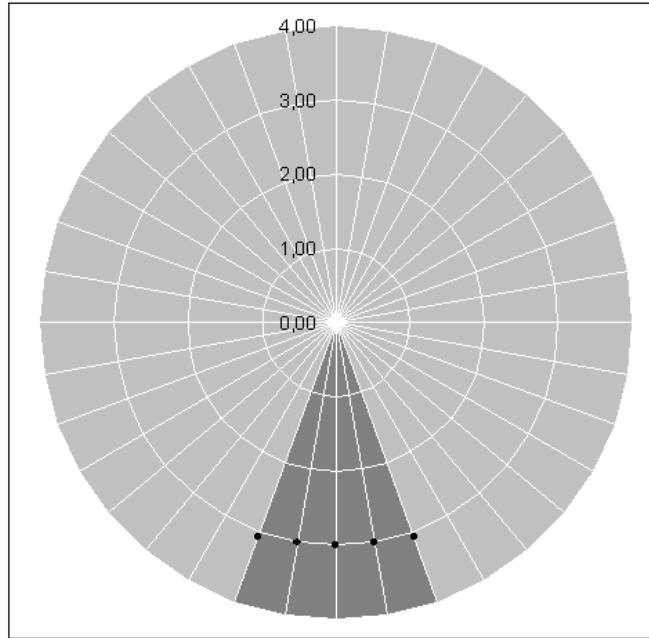
Figuur 5.10: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.11: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.3 A2-schip, Ladingsconditie: Vol (A2).

5.2.3.1 $V = 10$, $X = 55$, $H = 10$



Figuur 5.12: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,67	2,1	2,68	3,98
per jaar	1,54	2,12	2,67	3,98
per levensduur	1,25	1,9	2,25	2,72

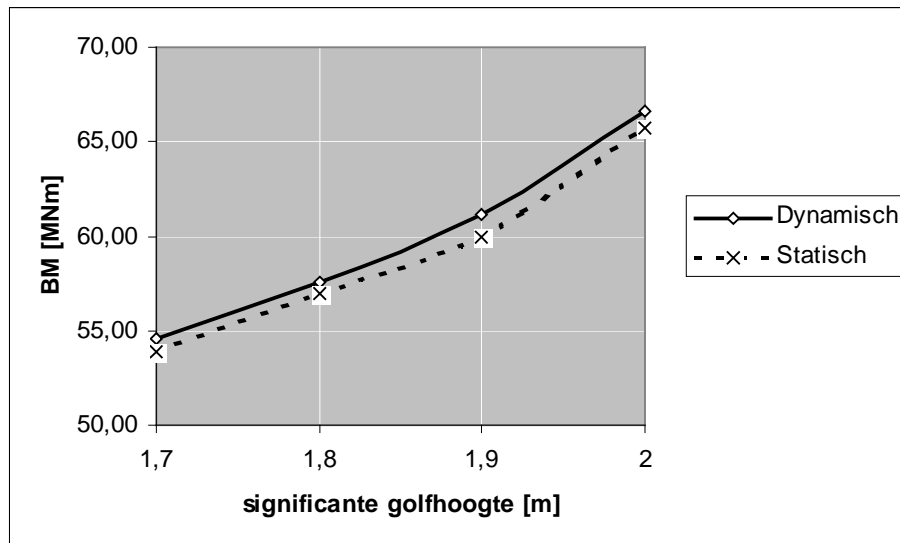
Figuur 5.13: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
Per reis	1,65	2,1	2,67	3,98
Per jaar	1,52	2,11	2,61	3,98
per levensduur	1,22	1,88	2,24	2,72

Figuur 5.14: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	54,55	57,58	61,11	66,67
BM statisch [MNm]	53,85	56,92	60,00	65,71
Percentage aangroei [%]	1,299	1,147	1,852	1,449

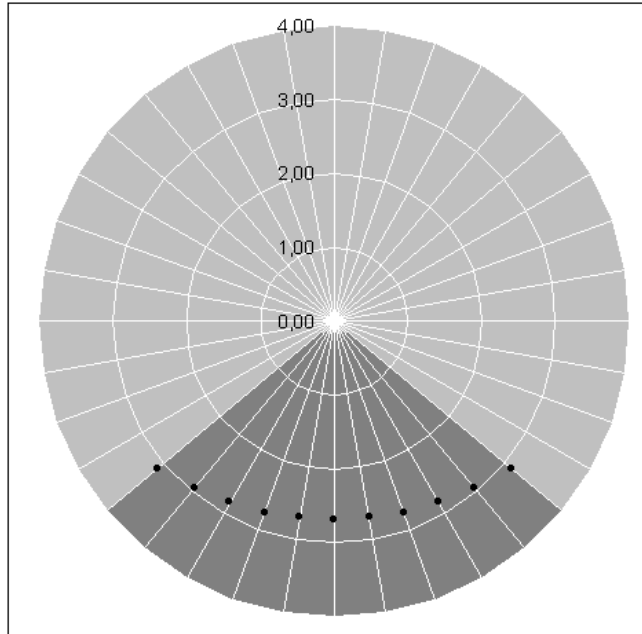
Figuur 5.15: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.16: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.4 B1-schip, Ladingsconditie: Vol (B1).

5.2.4.1 $V = 10$, $X = 55$, $H = 10$



Figuur 5.17: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
Per reis	1,2	1,66	2,04	2,29
Per jaar	1,06	1,54	1,97	2,26
per levensduur	0,91	1,25	1,71	2,01

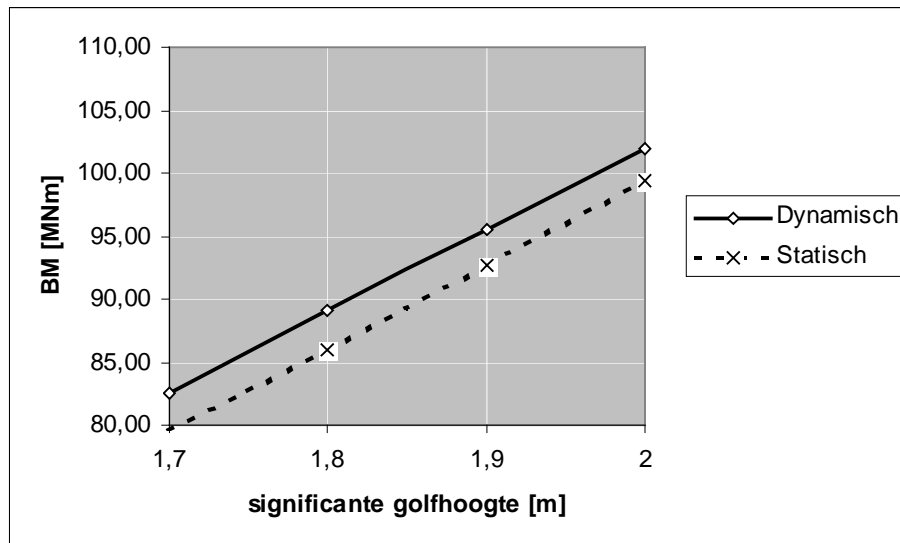
Figuur 5.18: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
Per reis	1,14	1,61	1,97	2,23
Per jaar	0,98	1,47	1,9	2,23
per levensduur	0,82	1,22	1,66	1,97

Figuur 5.19: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	82,58	89,03	95,48	101,94
BM statisch [MNm]	79,57	86,00	92,67	99,33
Percentage aangroei [%]	3,790	3,526	3,040	2,620

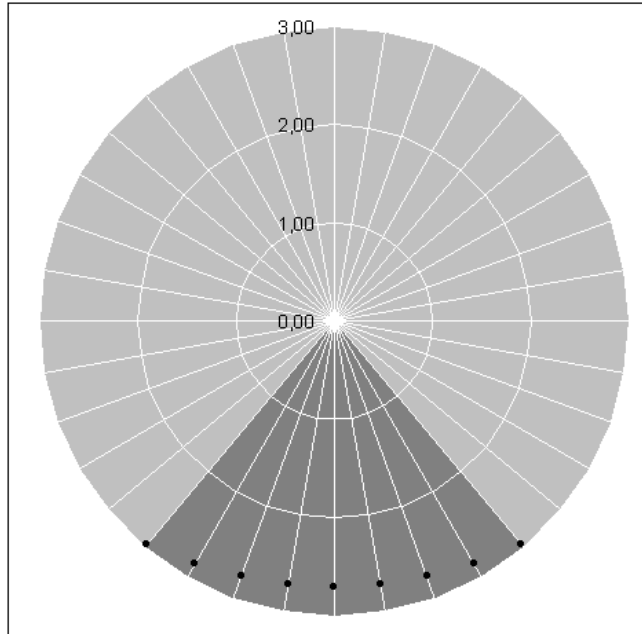
Figuur 5.20: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.21: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.5 B1-schip, Ladingsconditie: Ballast (B3).

5.2.5.1 $V = 10, X = 55, H = 10$



Figuur 5.22: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,23	1,73	2,1	2,53
per jaar	1,09	1,61	2,05	2,38
per levensduur	0,92	1,37	1,8	2,07

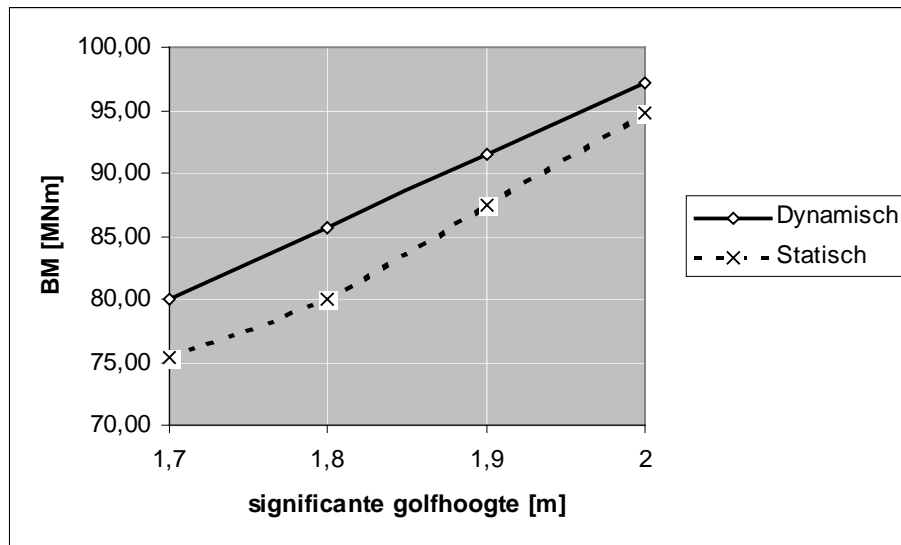
Figuur 5.23: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,14	1,64	2,04	2,46
per jaar	0,89	1,48	1,97	2,34
per levensduur	0,6	1,22	1,7	2,05

Figuur 5.24: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	80,00	85,71	91,43	97,14
BM statisch [MNm]	75,35	80,00	87,41	94,81
Percentage aangroei [%]	6,173	7,143	4,600	2,455

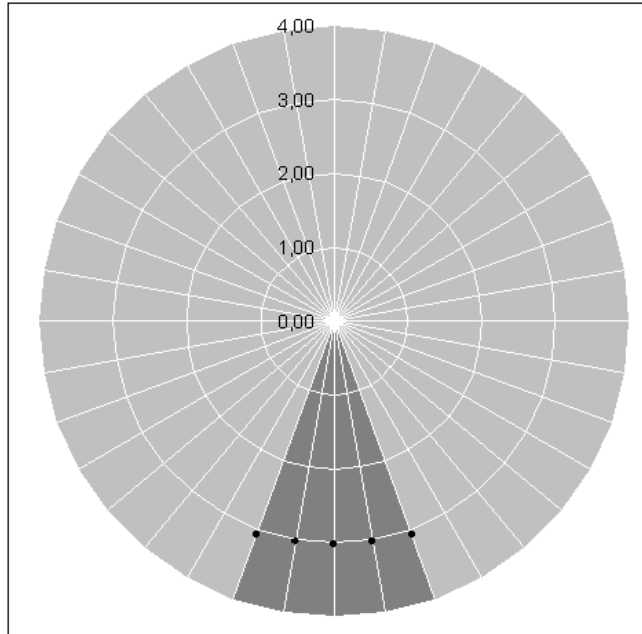
Figuur 5.25: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.26: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.6 B2-schip, Ladingsconditie: Vol (B2).

5.2.6.1 $V = 10$, $X = 55$, $H = 10$



Figuur 5.27: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
per reis	1,22	1,75	2,05	2,35
per jaar	1,09	1,6	2,01	2,29
per levensduur	0,93	1,25	1,78	2,07

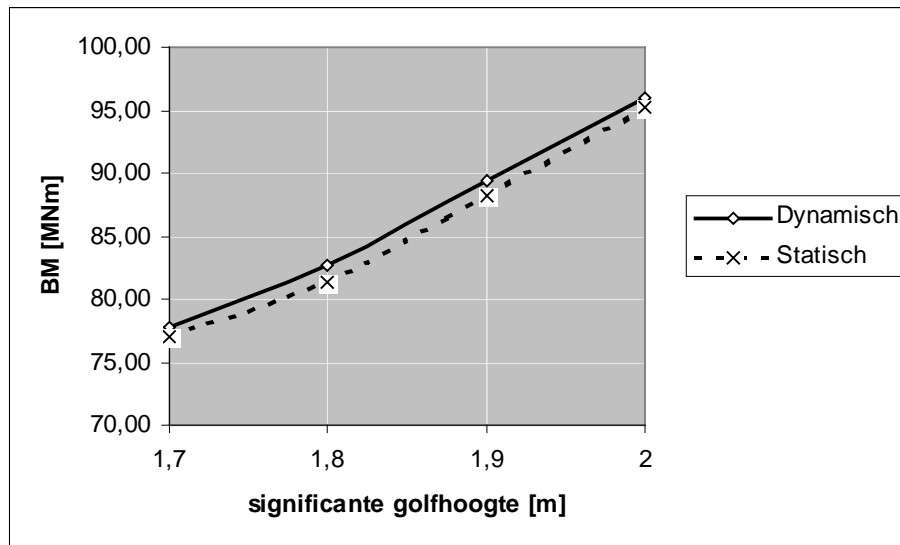
Figuur 5.28: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	40	60	80	100
Per reis	1,2	1,69	2,05	2,29
Per jaar	1,06	1,55	1,99	2,28
per levensduur	0,9	1,22	1,76	2,06

Figuur 5.29: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	77,78	82,67	89,33	96,00
BM statisch [MNm]	76,98	81,38	88,28	95,17
Percentage aangroei [%]	1,035	1,582	1,198	0,870

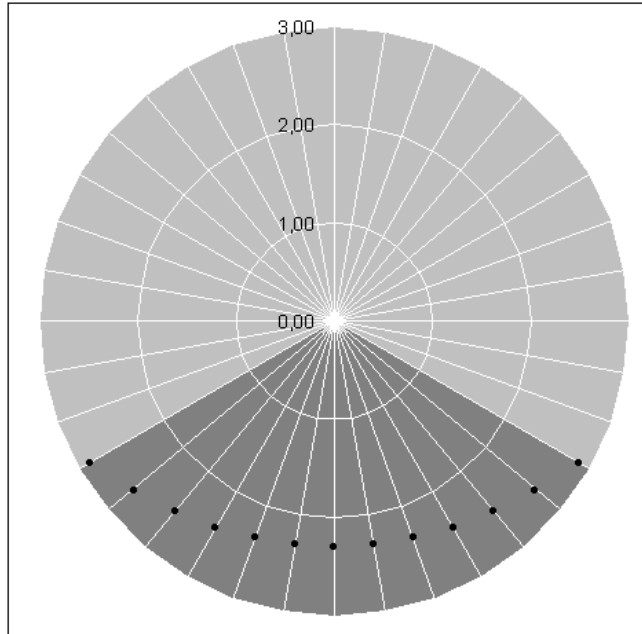
Figuur 5.30: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.31: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.7 C1-schip, Ladingsconditie: Vol (C1).

5.2.7.1 $V = 10$, $X = 65$, $H = 10$



Figuur 5.32: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	100	125	150	175
per reis	1,87	2,1	2,44	2,69
per jaar	1,71	2,11	2,41	2,71
per levensduur	1,46	1,83	2,12	2,38

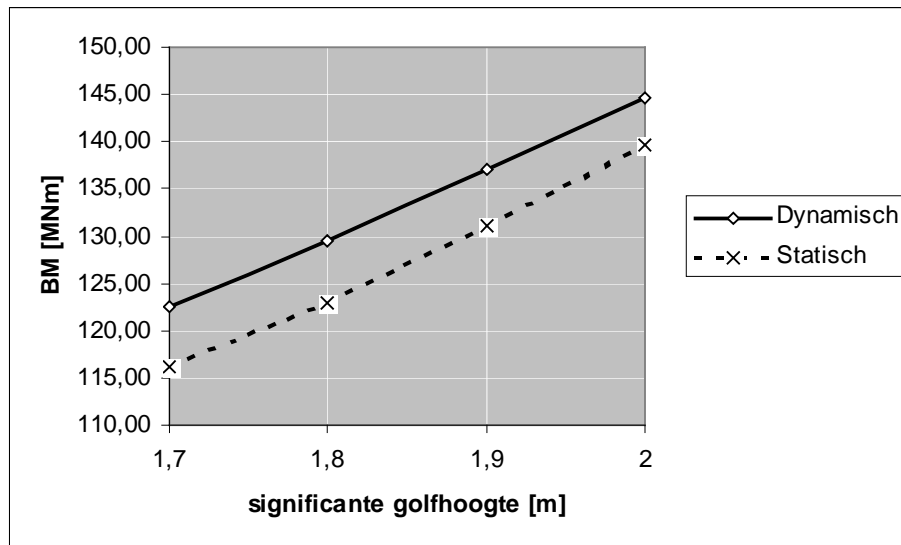
Figuur 5.33: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	100	125	150	175
Per reis	1,78	2,08	2,43	2,67
Per jaar	1,62	2,04	2,31	2,63
per levensduur	1,34	1,74	2,07	2,29

Figuur 5.34: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	122,50	129,55	137,12	144,70
BM statisch [MNm]	116,22	122,97	131,03	139,66
Percentage aangroei [%]	5,407	5,345	4,645	3,610

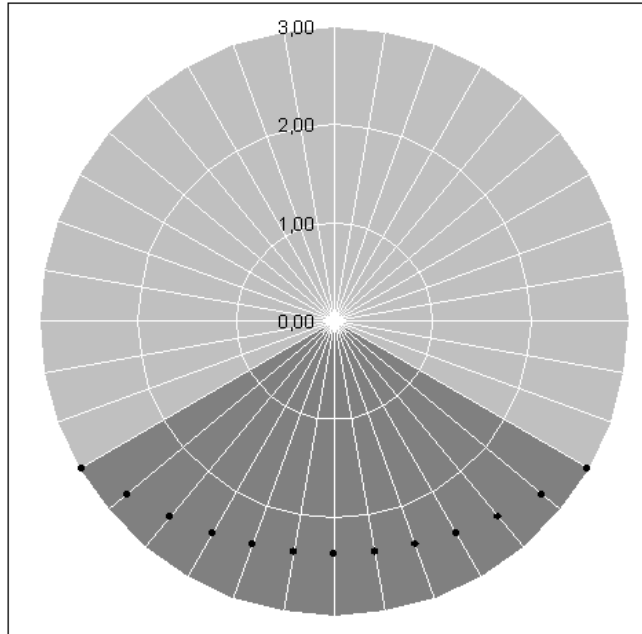
Figuur 5.35: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.36: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.8 C1-schip, Ladingsconditie: Ballast (C3)

5.2.8.1 $V = 10$, $X = 65$, $H = 10$



Figuur 5.37: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	100	125	150	175
per reis	1,9	2,25	2,58	2,86
per jaar	1,81	2,2	2,56	2,9
per levensduur	1,55	1,92	2,23	2,54

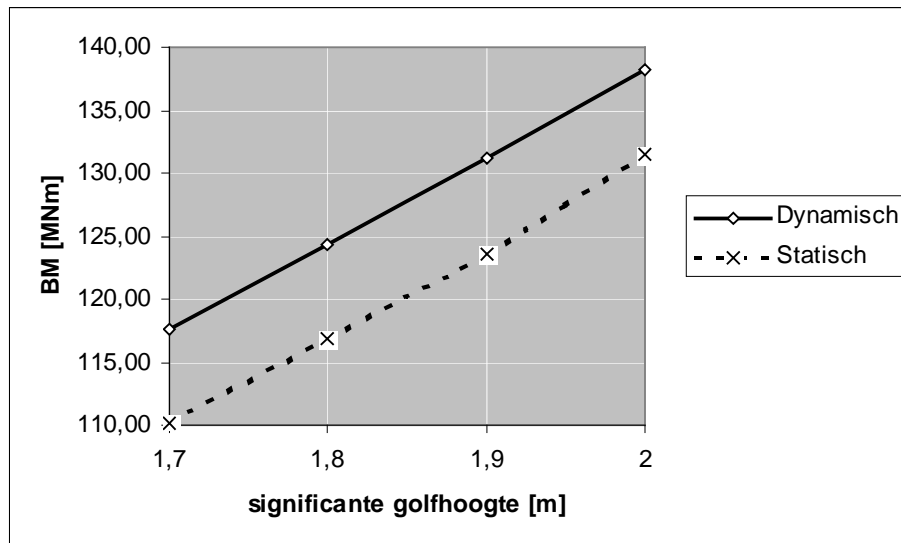
Figuur 5.38: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	100	125	150	175
Per reis	1,86	2,1	2,53	2,79
Per jaar	1,67	2,12	2,48	2,8
per levensduur	1,44	1,81	2,17	2,48

Figuur 5.39: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	117,57	124,32	131,25	138,19
BM statisch [MNm]	110,14	116,89	123,65	131,45
Percentage aangroei [%]	6,748	6,358	6,148	5,130

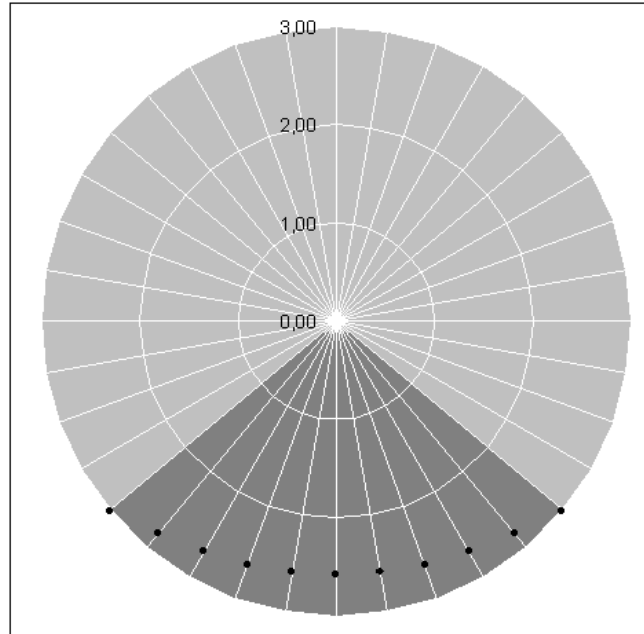
Figuur 5.40: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.41: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.9 C2-schip, Ladingsconditie: Vol (C2).

5.2.9.1 $V = 10$, $X = 65$, $H = 10$



Figuur 5.42: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	100	125	150	175
per reis	1,88	2,1	2,52	2,71
per jaar	1,78	2,14	2,46	2,73
per levensduur	1,53	1,89	2,14	2,44

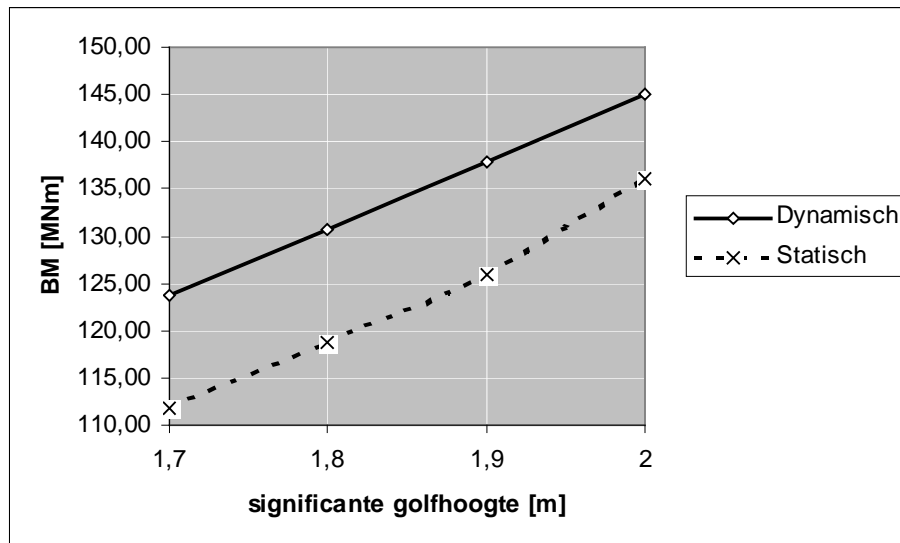
Figuur 5.43: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	100	125	150	175
Per reis	1,77	2,08	2,43	2,68
Per jaar	1,61	2,04	2,33	2,67
per levensduur	1,32	1,72	2,07	2,3

Figuur 5.44: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	123,75	130,71	137,86	145,00
BM statisch [MNm]	111,81	118,75	126,00	136,00
Percentage aangroei [%]	10,683	10,075	9,410	6,618

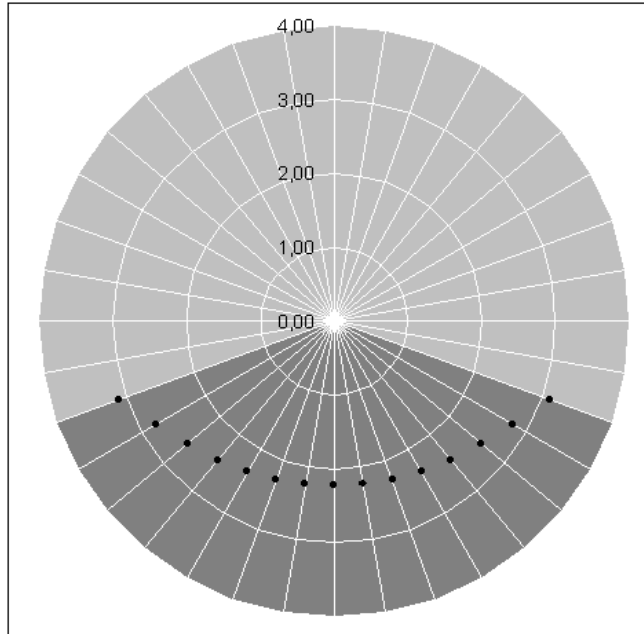
Figuur 5.45: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.46: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.10 D1-schip, Ladingsconditie: Vol (D1).

5.2.10.1 $V = 10$, $X = 65$, $H = 10$



Figuur 5.47: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,79	2,05	2,23	2,45
per jaar	1,64	1,94	2,2	2,43
per levensduur	1,32	1,65	1,92	2,12

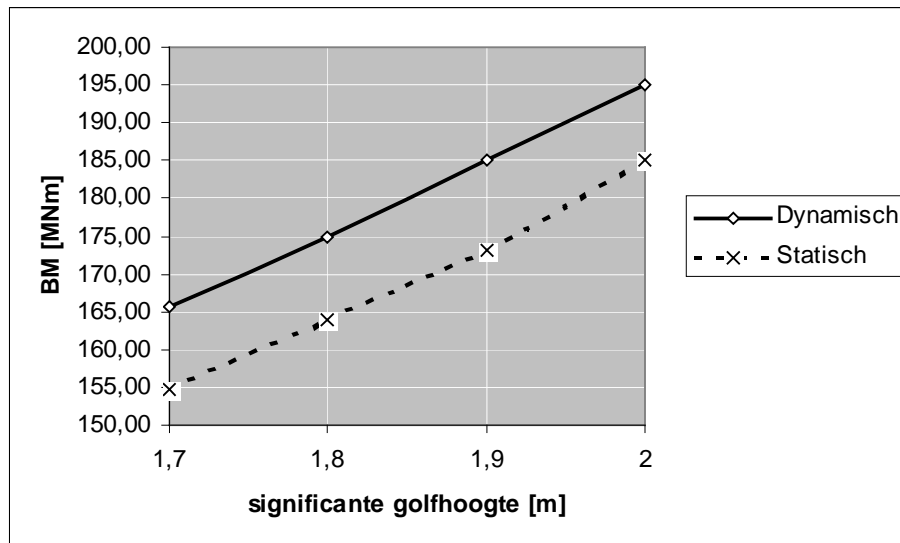
Figuur 5.48: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,69	1,9	2,1	2,36
Per jaar	1,52	1,81	2,1	2,28
per levensduur	1,22	1,53	1,8	2,05

Figuur 5.49: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	165,74	175,00	185,00	195,00
BM statisch [MNm]	154,63	163,89	173,15	185,00
Percentage aangroei [%]	7,186	6,780	6,845	5,405

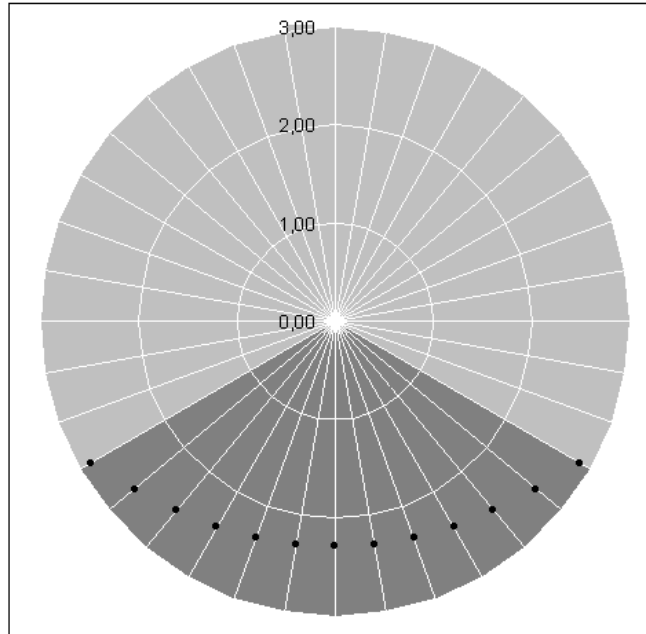
Figuur 5.50: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.51: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.11 D1-ship, ladingsconditie: Ballast (D3)

5.2.11.1 $V = 10$, $X = 65$, $H = 10$



Figuur 5.52: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,79	2,06	2,34	2,58
per jaar	1,65	1,99	2,25	2,54
per levensduur	1,34	1,7	1,94	2,2

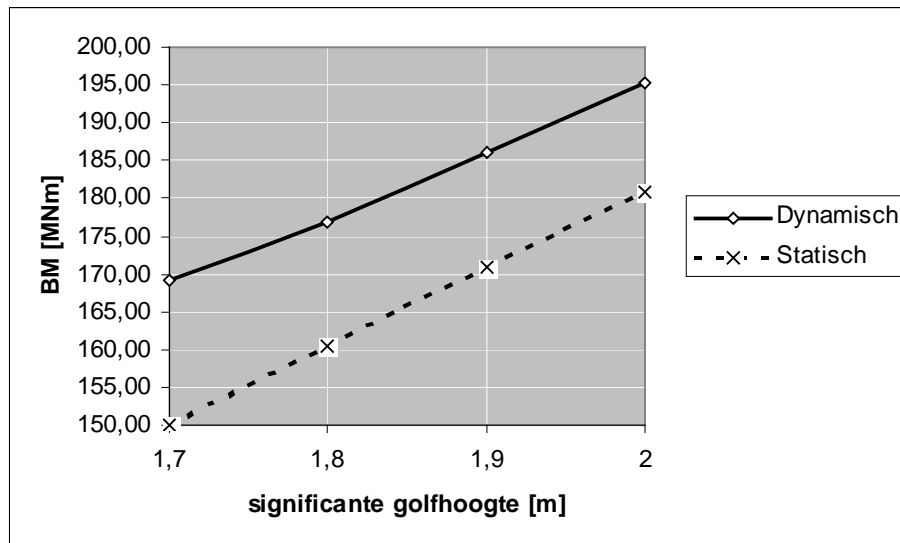
Figuur 5.53: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,64	1,94	2,1	2,46
Per jaar	1,44	1,8	2,1	2,38
per levensduur	1,1	1,44	1,78	2,05

Figuur 5.54: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	169,12	176,85	186,11	195,37
BM statisch [MNm]	150,00	160,42	170,83	180,77
Percentage aangroei [%]	12,745	10,245	8,943	8,077

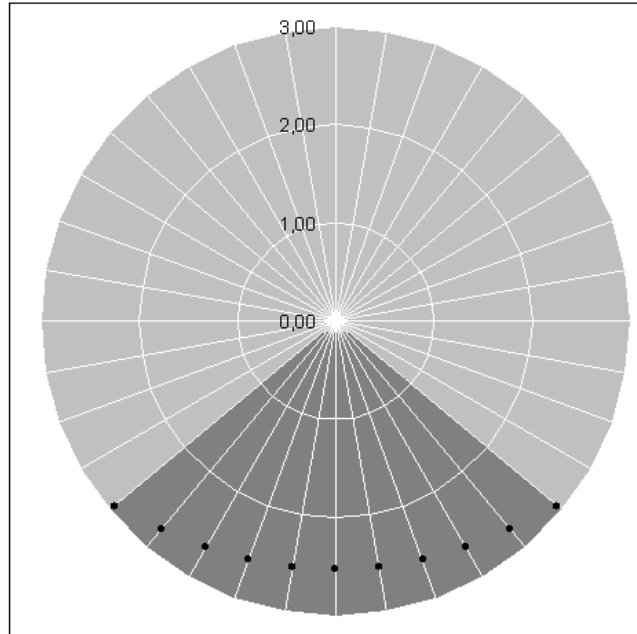
Figuur 5.55: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.56: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.2.12 D2-schip, Ladingsconditie: Vol (D2).

5.2.12.1 $V = 10$, $X = 65$, $H = 10$



Figuur 5.57: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,87	2,08	2,26	2,53
per jaar	1,69	2,01	2,21	2,48
per levensduur	1,32	1,71	1,94	2,15

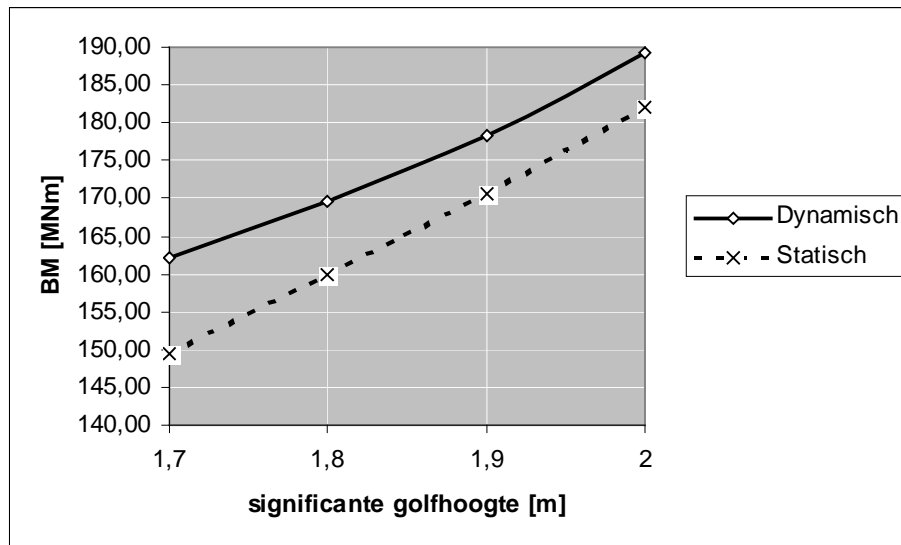
Figuur 5.58: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,75	2,05	2,19	2,44
Per jaar	1,54	1,89	2,15	2,38
per levensduur	1,25	1,54	1,87	2,1

Figuur 5.59: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	162,12	169,70	178,26	189,13
BM statisch [MNm]	149,36	159,78	170,65	182,14
Percentage aangroei [%]	8,545	6,205	4,459	3,836

Figuur 5.60: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.61: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.3 Bespreking standaardconditie

%	1,7	1,8	1,9	2
A1	0,15	0,06	0,07	0,29
A2	1,30	1,15	1,85	1,45
A3	1,59	1,06	0,60	0,79
B1	3,79	3,53	3,04	2,62
B2	1,03	1,58	1,20	0,87
B3	6,17	7,14	4,60	2,46
C1	5,41	5,34	4,65	3,61
C2	10,68	10,08	9,41	6,62
C3	6,75	6,36	6,15	5,13
D1	7,19	6,78	6,84	5,41
D2	8,54	6,20	4,46	3,84
D3	12,75	10,25	8,94	8,08

Figuur 5.62: Samenvatting procentueel responsieverschil statisch en dynamisch

Intuïtief verwacht men dat de basisconfiguraties die leiden tot de laagste natuurlijke frequentie ook leiden tot de grootste verschillen in responsie tussen het statische en dynamische geval. Uit de kompasoriëntaties van de eigengolven kan immers afgeleid worden dat hoe lager de natuurlijke frequentie, hoe meer golven er binnen het golfspectrum zijn die aanleiding geven tot resonantie. Logisch is het dus te denken dat in dat geval het verschil tussen de dynamische en statische responsie het grootst zal zijn.

De resultaten hierboven spreken dit echter tegen. De configuratie die leidt tot de laagste natuurlijke frequentie is immers het D1-schip in volgeladen toestand. Haar natuurlijke frequentie is net iets lager dan die van hetzelfde schip in ballastconditie. Nochtans zal de tweede gemiddeld 10% meer dynamische dan statische responsie induceren. Terwijl dat in de volgeladen toestand slechts 6.5 % bedraagt.

De verklaring hiervoor is dat in de RAO van het schip in ballast voornamelijk de kopgolven aanleiding geven tot hoge buigende momenten. Dit heeft te maken met de aparte massaverdeling

van het schip in ballast. De zwaarste massa's bevinden zich in voor en achterschip, terwijl het middenschip een eerder geringe massa heeft. Een golftop in het midden van het schip zal bijgevolg aanleiding geven tot erg grote buigende momenten midscheeps. Dit effect is het grootst in koptolven omdat daar de breedte van de golf t.o.v het schip het kleinst is en de golf een smal deel van het middenschip ondersteund.

De eigengolven met laagste frequentie (en dus met normaal gezien de hoogste energie-inhoud) komen steeds voor bij koptolven⁴⁴. Aangezien in de RAO van een schip in ballast, koptolven aanleiding geven tot grotere buigende momenten dan volgeladen schepen, zal de dynamische versterker toegepast worden op hogere waarden en zal het verschil tussen dynamische en statische responsie groot worden.

De gevolgen van bovenstaand verschijnsel leiden ertoe dat voor de schepen A1,B1, C1 en D1 de ballastconditie de grootste springingsgevoeligheid bezit. Bij het D1-schip is het effect van springing zelf zo groot dat de absolute waarde van het buigend moment van het schip in ballast iets groter wordt dan van het schip in volle conditie. Dit verschil is echter erg gering. Een schip dat **ontworpen wordt in volle toestand**, zal dus t.g.v. springing buigende momenten kunnen verwachten die maximum **7.19 %** hoger zijn dan deze die volgen uit de statische berekening.

Bij het bekijken van de resultaten valt ook een **trend** op tussen de verschillende maximale golfhoogtes. Wanneer grotere golfhoogtes toegelaten worden verkleint het procentuele verschil tussen statische en dynamische responsie. Bijgevolg zal de statische responsie relatief sterker stijgen dan de dynamische responsie. Dit kan verklaard worden doordat de grotere golfhoogten overeenstemmen met lagere golffrequenties. Deze golffrequenties komen niet in de buurt van de eigengolven, waardoor ze geen grote invloed van springing ervaren. Hierdoor zal bij hogere golven de springingsgevoeligheid afnemen. De absolute waarden van zowel statische als dynamische responsie zullen natuurlijk wel toenemen. Net als de absolute waarde van het verschil tussen beide, maar relatief wordt springing minder belangrijk.

De schepen van het 2^{de} type, die een hogere holte en weerstandsmoment bezitten dan hun kleine broertjes, hebben een minder samenhangend verloop. Bij de A- en C-schepen leidt een hogere holte tot grotere springingsgevoeligheid. Wanneer bij beide schepen de breedte (B- en D-schepen)

⁴⁴ Zie kompasoriëntaties van de eigengolven

vergroot wordt, bekomt men een kleinere springingsgevoeligheid bij toenemende holte. Een mogelijke verklaring wordt gevonden door de natuurlijke frequentie te bestuderen. Bij de A- en C-schepen leidt de 2^{de} configuratie tot relatief geringere toenames van de natuurlijke frequentie dan bij de B- en D-schepen.

5.4 Resultaten Aangepaste Conditie

5.4.1 Aangepaste condities

Nu voor verschillende basisconfiguraties de springingsgevoeligheid bepaald werd bij één standaardconditie, zal voor één basisconfiguratie de springingsgevoeligheid bij verschillende condities onderzocht worden.

Er werd gekozen om de aangepaste condities toe te passen op een volgeladen D1-schip.

De evaluatie van deze nieuwe condities gebeurt eenvoudig met het eerder besproken formulier. Door het aanklikken van de knop “Afwijkende condities” in het veld “Overschrijdingskansen” bekomt men een nieuw formulier. In dit formulier waarvan de lay-out hieronder afgebeeld wordt kunnen de condities van heen en terugreis aangepast worden. Door vervolgens op de berekeningsknop te klikken wordt voor de gekozen condities de statisch en dynamische overschrijdingskansen berekend. Analoog als bij de basisconfiguraties worden statische en dynamische responsie uiteindelijk met elkaar vergeleken.

D1: Afwijkende condities

Heenreis

- $V = 10 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 60^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 80^\circ$
- $V = 12 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 70^\circ$
- $V = 8 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 70^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 8 \text{ m}, \text{phi} = 70^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 12 \text{ m}, \text{phi} = 70^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 70^\circ$

terugreis

- $V = 10 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 240^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 260^\circ$
- $V = 12 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 250^\circ$
- $V = 8 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 250^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 8 \text{ m}, \text{phi} = 250^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 12 \text{ m}, \text{phi} = 250^\circ$
- $V = 10 \text{ kn}, h = 10 \text{ m}, \text{phi} = 250^\circ$

Berekenen Terug

Figuur 5.63: formulier ter evaluatie van de afwijkende condities

Zoals het bovenstaande formulier duidelijk maakt worden volgende condities onderzocht:

- Afwijkingen op de koers. Dit is mogelijks het gevolg van verlijeren (door wind) of verzetten (door stroming).
- Invloed van de scheepssnelheid. Een hogere scheepssnelheid zal aanleiding geven tot eigengolven met lagere frequentie en bijgevolg hogere energiedichtheid. Bijgevolg wordt verwacht dat toenemende snelheid leidt tot een hogere springingsgevoeligheid.
- Invloed van waterdiepte. Veranderingen van de waterdiepte zijn eigen aan de getijdewerking. Deze heeft een deflectie van ca. 4 m.

Naast deze afwijkingen kan in de heen of terugvaart ook de standaardconditie ingesteld worden (de onderste optie in het formulier).

5.4.2 Variaties op de koershoek

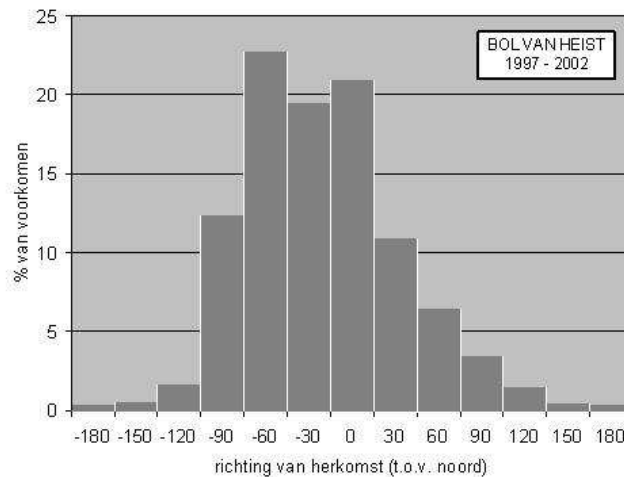
Onder invloed van externe factoren zoals wind en stroming zal een schip niet perfect zijn koershoek volgen. Dit wil zeggen dat de koershoek t.o.v. de bodem verschillend is van deze door het water.

Zoals reeds aangehaald dient de koershoek over land bij heen- en terugreis respectievelijk 70° en 250° te bedragen. Door externe factoren is het mogelijk dat de koers door het water aangepast dient te worden om invloeden van wind en stroming te compenseren. Om deze reden worden condities onderzocht waarin de koershoek afwijkt van de vooropgestelde waarde. Er wordt voor zowel heen als terugreis een afwijking van 10° in beide richtingen onderzocht.

Het spreekt voor zich dat de RAO of natuurlijke frequentie van schepen niet verandert bij koerswijzigingen. Veranderingen in de responsie zullen te wijten zijn aan een verschillende energiedichtheid van de kopgolven die het schip ervaart.

Het directioneel golfspectrum heeft immers een voorkeursrichting. Deze is het gevolg van de noordwester die meestal in het Kanaal blaast, en de trechtersvormige geometrie van de Noordzee. De voorkeursrichting van de golven in het estuaire gebied is ca 150° .

De distributie van de golfrichtingen wordt hieronder weergegeven [1.]:



Figuur 5.64: Bol van Heist, distributie van de significante golfhoogte en de golfrichting: percentages van voorkomen.

De golfrichting wordt aangeduid met richting van herkomst. De grafiek kan bijgevolg ook geïnterpreteerd worden als het aandeel kopgolven dat optreedt als het schip vaart volgens een koers overeenstemmend met de abscis van de grafiek. Men leest op de grafiek af dat voor een koers van 70° een groter aandeel kopgolven aanwezig is dan voor $250^\circ (= -110^\circ)$. De springingsgevoeligheid zal dus maximaal zijn op de terugreis. Hierdoor wordt een grotere variatie van de springingsgevoeligheid verwacht wanneer de koershoek in de heenreis veranderd wordt dan wanneer deze in de terugreis veranderd wordt.

Hieronder worden voor de aangepaste koershoeken de statische en dynamische overschrijdingskansen weergegeven en met elkaar vergeleken. De eigengolven zijn dezelfde als voor het D1-schip in standaardcondities. De variatie van de koershoek wordt maar in 1 richting aangebracht. Bij de terugreis wordt de standaardconditie verondersteld.

Vergelijking met de standaardconditie levert de invloed van de koersafwijking

5.4.2.1 KOERS HEEN: 60°

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,87	2,06	2,23	2,52
Per jaar	1,7	2	2,22	2,46
per levensduur	1,46	1,75	1,97	2,19

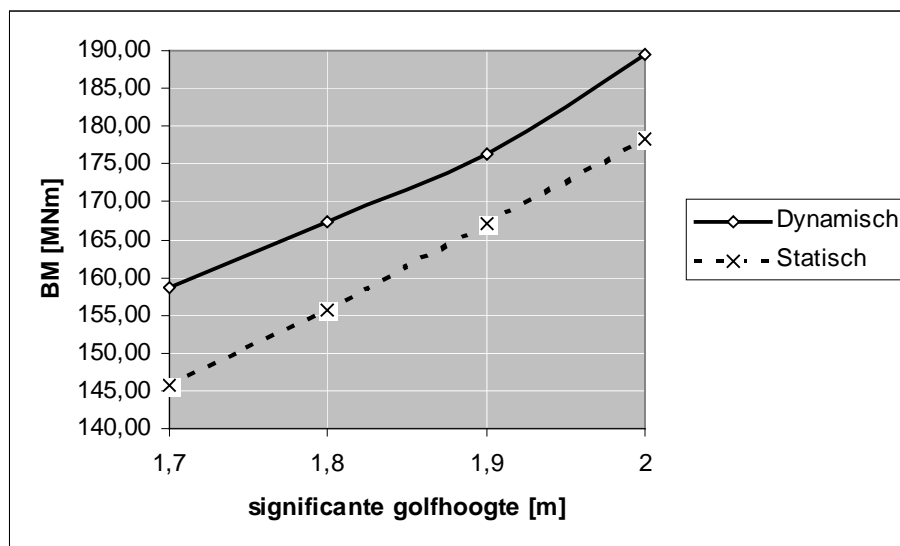
Figuur 5.65: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,74	1,98	2,1	2,43
Per jaar	1,57	1,89	2,12	2,32
per levensduur	1,29	1,6	1,89	2,08

Figuur 5.66: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	158,62	167,24	176,32	189,47
BM statisch [MNm]	145,69	155,68	167,05	178,41
Percentage aangroei [%]	8,876	7,425	5,550	6,202

Figuur 5.67: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.68: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.2.2 KOERS HEEN: 80°

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,76	2,05	2,19	2,41
Per jaar	1,57	1,89	2,14	2,35
per levensduur	1,25	1,54	1,83	2,07

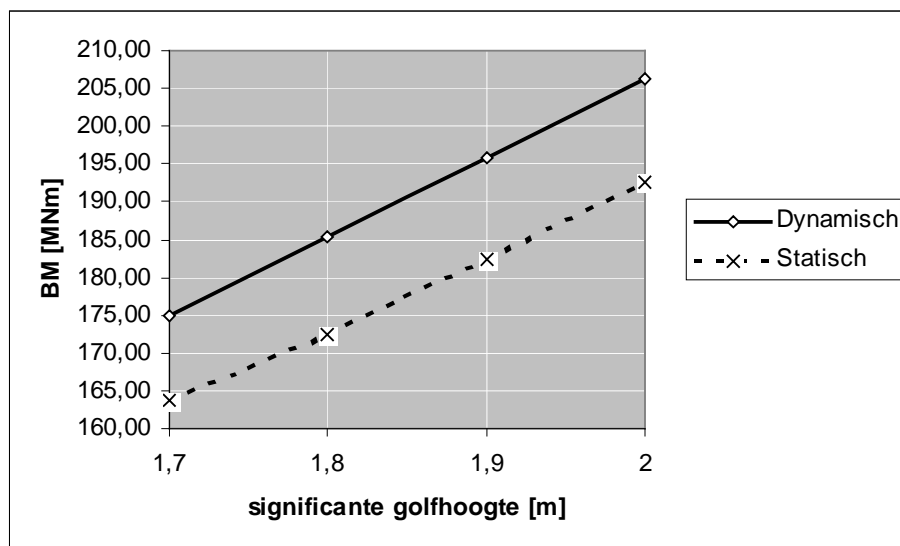
Figuur 5.69: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,62	1,88	2,08	2,28
Per jaar	1,45	1,72	2,05	2,22
per levensduur	1,17	1,46	1,7	1,94

Figuur 5.70: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	175,00	185,42	195,83	206,25
BM statisch [MNm]	163,79	172,41	182,29	192,71
Percentage aangroei [%]	6,842	7,542	7,429	7,027

Figuur 5.71: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.72: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.2.3 KOERS TERUG: 240°

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,8	2,05	2,23	2,46
Per jaar	1,65	1,95	2,2	2,43
per levensduur	1,32	1,68	1,92	2,12

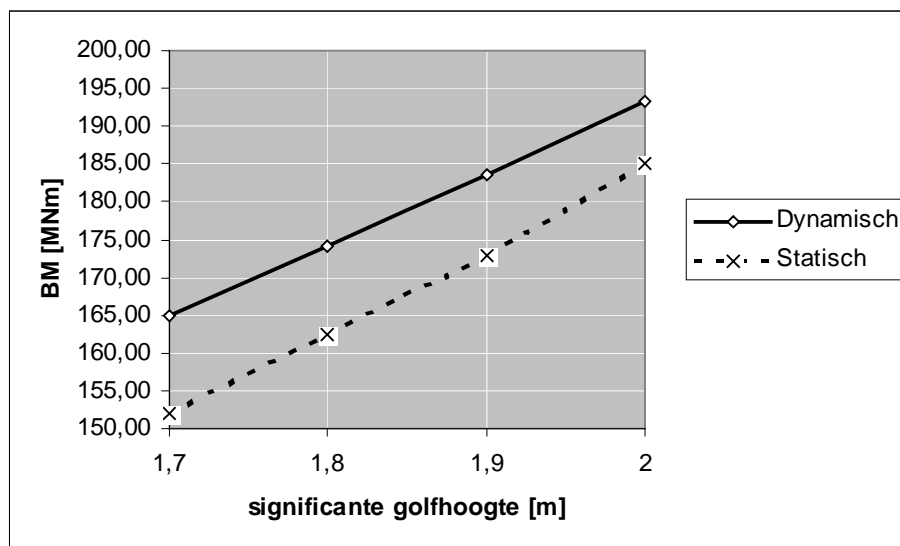
Figuur 5.73: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,69	1,9	2,1	2,36
Per jaar	1,53	1,82	2,1	2,29
per levensduur	1,22	1,54	1,81	2,07

Figuur 5.74: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	164,81	174,07	183,65	193,27
BM statisch [MNm]	152,08	162,50	172,92	185,00
Percentage aangroei [%]	8,371	7,123	6,209	4,470

Figuur 5.75: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.76: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.2.4 KOERS TERUG: 260°

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,76	2,05	2,19	2,44
Per jaar	1,61	1,92	2,15	2,39
per levensduur	1,27	1,63	1,9	2,12

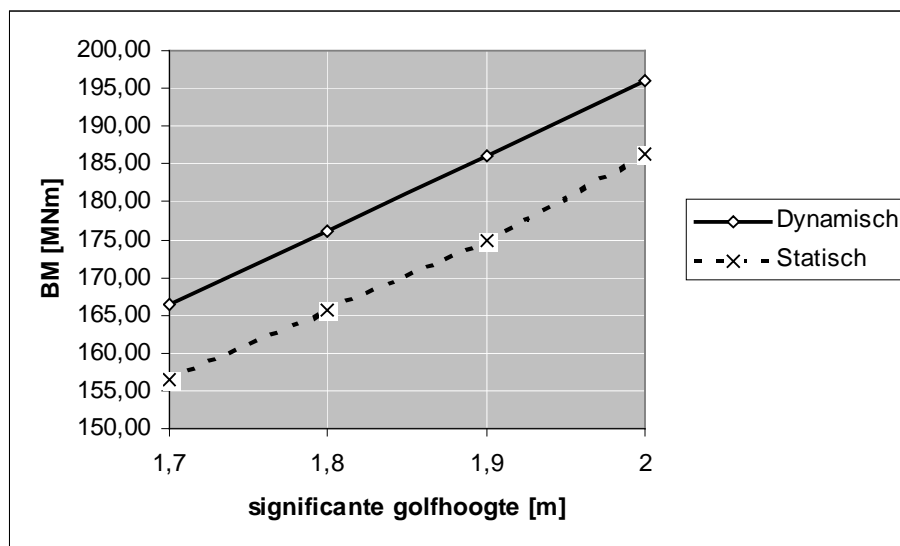
Figuur 5.77: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,65	1,9	2,1	2,35
Per jaar	1,5	1,8	2,07	2,27
per levensduur	1,22	1,53	1,79	2,04

Figuur 5.78: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	166,35	176,00	186,00	196,00
BM statisch [MNm]	156,48	165,74	175,00	186,36
Percentage aangroei [%]	6,304	6,190	6,286	5,171

Figuur 5.79: Vergelijking statisch en dynamisch



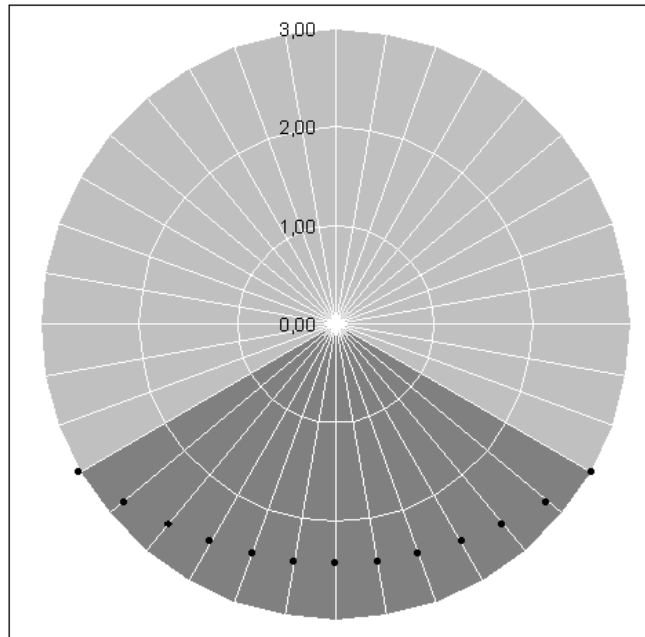
Figuur 5.80: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.3 Variaties op de snelheid

Bij toenemende snelheid zullen de eigengolven een lagere frequentie hebben, en bijgevolg een hogere energiedichtheid. Bij toenemende snelheid wordt een hogere springingsgevoeligheid verwacht. Om de verandering van de eigengolven in functie van de snelheid te visualiseren, worden de resultaten voorafgegaan door de kompasoriëntatie van de eigengolven. Vervolgens wordt de gebruikelijke evaluatie verder gezet.

In het volgende wordt eenzelfde snelheid verondersteld in heen- en terugvaart.

5.4.3.1 SNELHEID: 8 KN



Figuur 5.81: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,86	2,06	2,25	2,46
per jaar	1,66	1,97	2,2	2,45
per levensduur	1,32	1,7	1,92	2,14

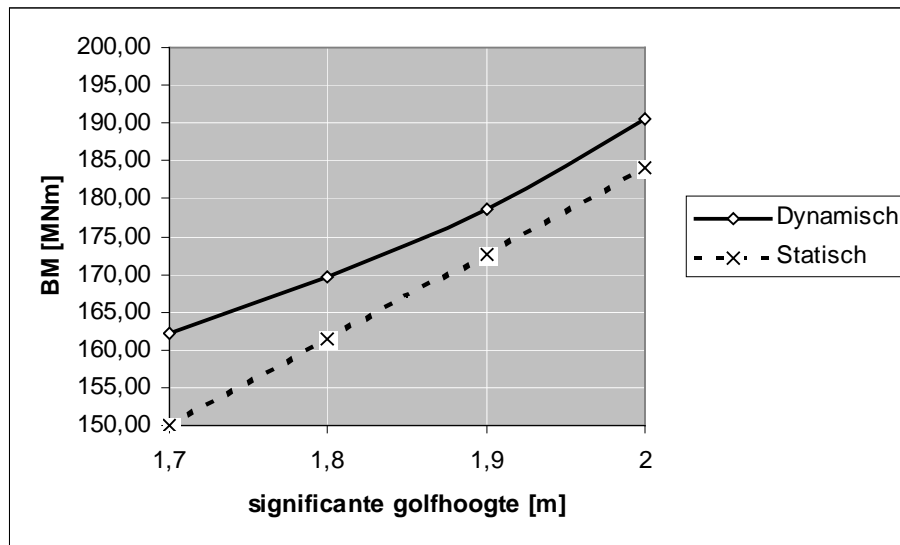
Figuur 5.82: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,75	2,02	2,1	2,43
per jaar	1,55	1,89	2,14	2,35
per levensduur	1,25	1,54	1,87	2,08

Figuur 5.83: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

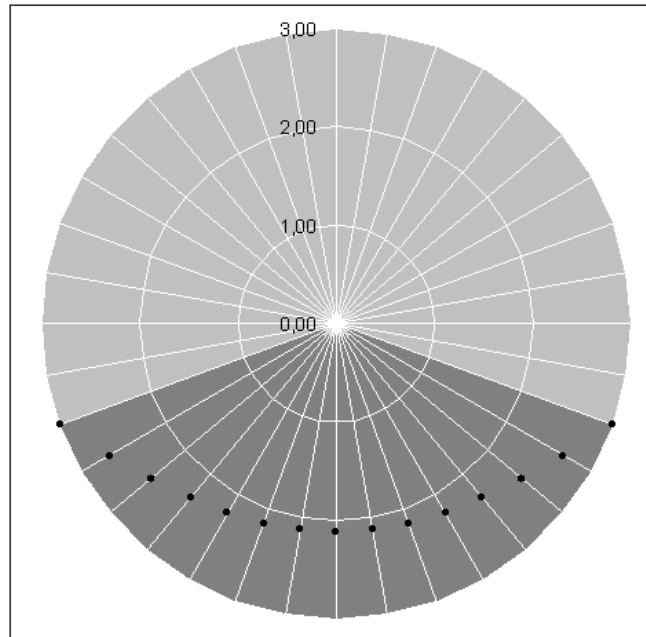
Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	162,12	169,70	178,57	190,48
BM statisch [MNm]	150,00	161,36	172,73	184,09
Percentage aangroei [%]	8,081	5,164	3,383	3,469

Figuur 5.84: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.85: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.3.2 SNELHEID: 12 KN



Figuur 5.86: Resonerende golven t.o.v. de relatieve koershoek

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,76	2,05	2,19	2,44
Per jaar	1,61	1,92	2,15	2,39
per levensduur	1,3	1,63	1,9	2,11

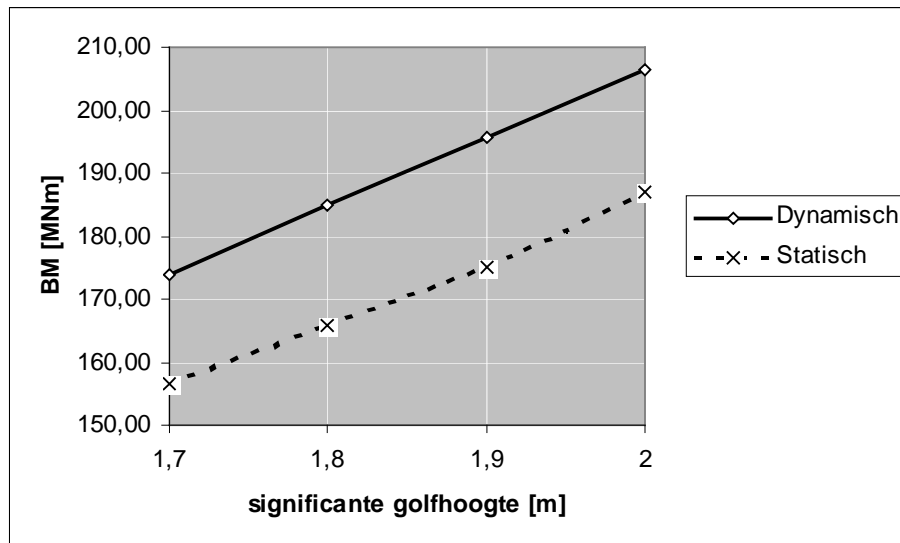
Figuur 5.87: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
Per reis	1,61	1,87	2,08	2,26
Per jaar	1,45	1,72	2,04	2,22
per levensduur	1,19	1,46	1,71	1,94

Figuur 5.88: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	174,00	184,78	195,65	206,52
BM statisch [MNm]	156,48	165,74	175,00	186,90
Percentage aangroei [%]	11,195	11,489	11,801	10,496

Figuur 5.89: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.90: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.4 Variaties van de diepgang

Door getijdewerking zal de waterdiepte in het estuaire gebied niet constant zijn. Bijgevolg is het nuttig om de responsie van het schip te bepalen bij afwijkende diepgangen.

De waterstandvariatie van de getijdewerking aan de Belgische kust bedraagt zo'n 4 m. Naast de standaardwaterdiepte van 10 m zullen waterdieptes van 8 en 12 m onderzocht worden.

Een verandering van de waterdiepte heeft onder andere effect op de dispersiebetrekking, waardoor de eigengolven zullen variëren. Dit kan aanleiding geven tot een andere dynamische responsie. Bovendien verandert ook de statische responsie.

Voor beide afwijkingen van de waterdiepte worden de eigengolven, de statische en dynamische responsie en de spingingsgevoeligheid geëvalueerd.

5.4.4.1 WATERDIEPTE = 8 M

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,69	1,9	2,1	2,36
per jaar	1,51	1,81	2,08	2,3
per levensduur	1,22	1,53	1,8	2,05

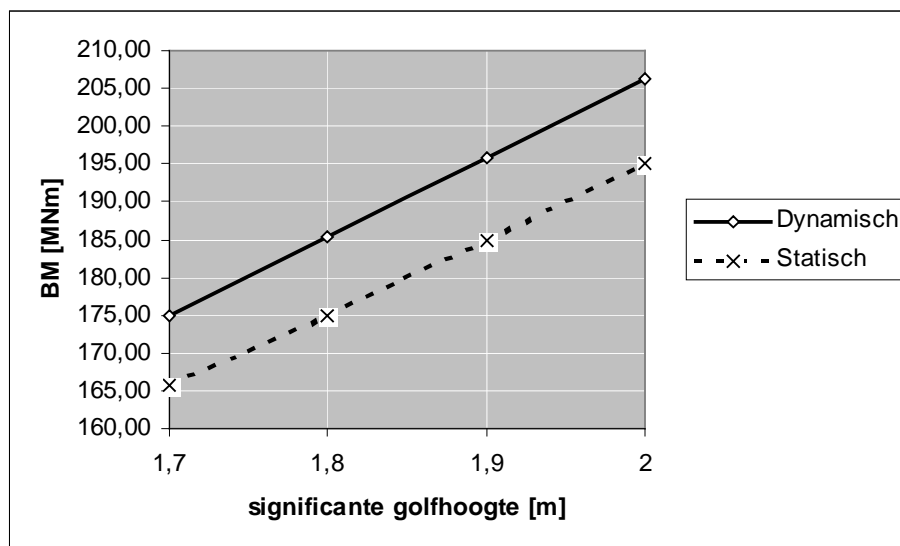
Figuur 5.91: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

	Kritische waarde BM [MNm]			
	125	150	175	200
per reis	1,61	1,87	2,08	2,26
per jaar	1,45	1,71	2,02	2,21
per levensduur	1,18	1,46	1,7	1,94

Figuur 5.92: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	175,00	185,42	195,83	206,25
BM statisch [MNm]	165,74	175,00	185,00	195,00
Percentage aangroei [%]	5,587	5,952	5,856	5,769

Figuur 5.93: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.94: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.4.4.2 WATERDIEPTE = 12 M

		Kritische waarde BM [MNm]			
		125	150	175	200
Per reis	Per reis	1,86	2,06	2,23	2,46
	Per jaar	1,69	2	2,21	2,45
	per levensduur	1,44	1,74	1,94	2,15

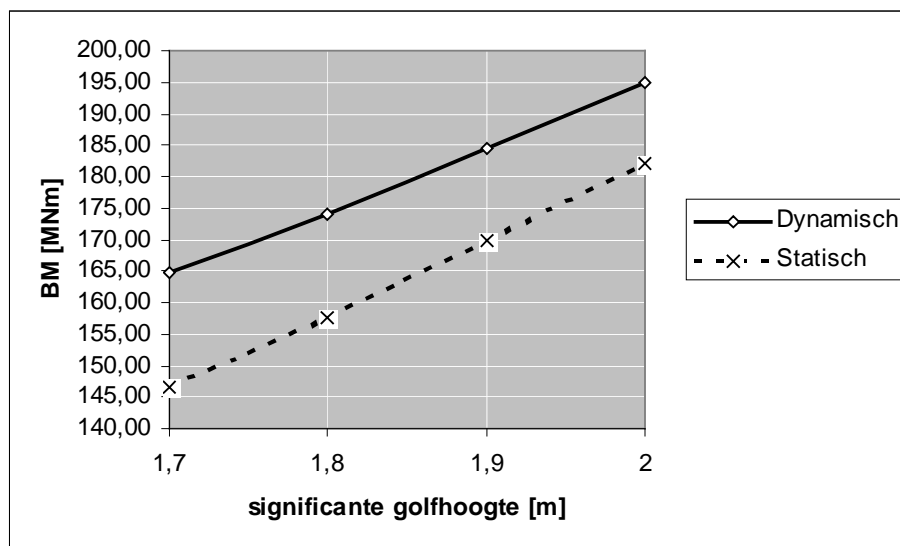
Figuur 5.95: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Statisch)

		Kritische waarde BM [MNm]			
		125	150	175	200
Per reis	Per reis	1,67	1,88	2,1	2,29
	Per jaar	1,53	1,81	2,07	2,25
	per levensduur	1,22	1,54	1,81	2,05

Figuur 5.96: significante golfhoogte voor 1 x overschrijding kritische waarde (Dynamisch)

Significante golfhoogte	1,7	1,8	1,9	2
BM dynamisch [MNm]	164,81	174,07	184,38	194,79
BM statisch [MNm]	146,67	157,50	170,00	182,14
Percentage aangroei [%]	12,374	10,523	8,456	6,944

Figuur 5.97: Vergelijking statisch en dynamisch



Figuur 5.98: Vergelijking statisch en dynamisch (grafisch)

5.5 Samenvatting aangepaste condities

Hieronder wordt in een tabel een samenvatting gegeven van de gevolgen van de aangepaste condities op de statische en dynamische responsie.

De eerste 2 kolommen van deze tabel duiden de aangepaste conditie aan. Ze drukken de variatie ten opzichte van de standaardconditie uit van respectievelijk heen- en terugreis. Om gemakkelijk de invloed van de verschillende factoren te begroten, wordt steeds maar één eigenschap van de standaardconditie gewijzigd.

Vervolgens worden de statische en dynamische responsie, net als de springingsgevoeligheid (in %) voor elk van deze condities ingevuld. De waarden komen overeen met die in het vorige onderdeel.

Om de waarden van de aangepaste condities te kunnen vergelijken met deze van de standaardconditie worden de gemiddelde waarden berekend over de verschillende significante golfhoogten en vergelijkt men deze met de waarde van de standaardconditie. De vergelijking gebeurt door het bepalen van de procentuele toe- of afname van de beschouwde grootheid te berekenen.

D1-schip: afwijkende condities							
Heen	Terug	Maximale golfhoogte [m]				Gemiddeld	Afwijking van SC in %
		1,7	1,8	1,9	2		
Standaard	Standaard						
	BM dynamisch [MNm]	165,74	175,00	185,00	195,00	180,19	-
	BM statisch [MNm]	154,63	163,89	173,15	185,00	169,17	-
	Percentage aangroei [%]	7,19	6,78	6,84	5,41	6,55	-
koers = 60°	Standaard						
	BM dynamisch [MNm]	158,62	167,24	176,32	189,47	172,91	-4,04
	BM statisch [MNm]	145,69	155,68	167,05	178,41	161,71	-4,41
	Percentage aangroei [%]	8,88	7,43	5,55	6,20	7,01	7,01
koers = 80 °	Standaard						
	BM dynamisch [MNm]	175,00	185,42	195,83	206,25	190,62	5,79
	BM statisch [MNm]	163,79	172,41	182,29	192,71	177,80	5,10
	Percentage aangroei [%]	6,84	7,54	7,43	7,03	7,21	10,01
Standaard	koers = 240 °						
	BM dynamisch [MNm]	164,81	174,07	183,65	193,27	178,95	-0,68
	BM statisch [MNm]	152,08	162,50	172,92	185,00	168,13	-0,62
	Percentage aangroei [%]	8,37	7,12	6,21	4,47	6,54	-0,16

Standaard	koers = 260°						
	BM dynamisch [MNm]	166,35	176,00	186,00	196,00	181,09	0,50
	BM statisch [MNm]	156,48	165,74	175,00	186,36	170,90	1,02
	Percentage aangroei [%]	6,30	6,19	6,29	5,17	5,99	-8,64
V = 8 kn	V = 8 kn						
	BM dynamisch [MNm]	162,12	169,70	178,57	190,48	175,22	-2,76
	BM statisch [MNm]	150,00	161,36	172,73	184,09	167,05	-1,25
	Percentage aangroei [%]	8,08	5,16	3,38	3,47	5,02	-23,34
V = 12 kn	V = 12 kn						
	BM dynamisch [MNm]	174,00	184,78	195,65	206,52	190,24	5,58
	BM statisch [MNm]	156,48	165,74	175,00	186,90	171,03	1,10
	Percentage aangroei [%]	11,20	11,49	11,80	10,50	11,25	71,58
H = 8 m	H = 8 m						
	BM dynamisch [MNm]	175,00	185,42	195,83	206,25	190,62	5,79
	BM statisch [MNm]	165,74	175,00	185,00	195,00	180,19	6,51
	Percentage aangroei [%]	5,59	5,95	5,86	5,77	5,79	-11,64
H = 12 m	H = 12 m						
	BM dynamisch [MNm]	164,81	174,07	184,38	194,79	179,51	-0,37
	BM statisch [MNm]	146,67	157,50	170,00	182,14	164,08	-3,01
	Percentage aangroei [%]	12,374	10,523	8,456	6,944	9,57	46,09

5.5.1 Bespreking afwijkende condities

5.5.1.1 KOERSAFWIJ KING

Zoals voorspeld werd is de verandering in springingsgevoeligheid het grootst in de heenreis. Merkwaardig bij de heenreis is echter dat een variatie van de koershoek in beide richting aanleiding geeft tot een toename van de springingsgevoeligheid. Men zou immers verwachten dat als de springingsgevoeligheid in de ene richting toeneemt (omdat het aandeel van koptolven toeneemt) deze in de andere richting zal afnemen. De verklaring hiervoor kan gegeven worden uitgaande van een gedetailleerde studie van de voorkeursrichtingen van de golven. Door de beperkte invloed op springing wordt deze hier niet uitgevoerd.

Op het eerste zicht mag het lijken dat de springingsgevoeligheid relatief met 10 % kan toenemen⁴⁵.

Dit geeft echter een vertekend beeld van de werkelijkheid. Een schip zal nooit gedurende zijn volledige levensduur zijn koershoek moeten aanpassen aan de omstandigheden (waarvan in de berekening wel uitgegaan werd). Doordat de relatieve verandering bovendien erg klein zijn dient geen rekening gehouden te worden met koersafwijkingen tijdens de vaart.

5.5.1.2 SNELHEIDSVERANDERING

De resultaten bij snelheidsverandering illustreren de grote snelheidsgevoeligheid van springing. Dat dit alles te maken heeft met de verschuiving van de eigengolven naar golven met lagere frequentie dient eigenlijk niet meer herhaald te worden.

Als de ontwerpssnelheid met 2 kn verhoogd wordt, leidt dit een springingsgevoeligheid die 1.7 keer hoger ligt dan in het oorspronkelijke geval. Voor het D1-schip leidt dit tot een springingsgevoeligheid van 11.25 %. Er mag echter verwacht worden dat voor een D3-schip deze waarde kan oplopen tot 15 à 17 %.

Snelheidsverhogingen doen de springingsgevoeligheid in grote mate toenemen.

⁴⁵ Merk wel op dat dit 10 % van de oorspronkelijke waarde uitdrukt. De springingsgevoeligheid van de standaardconditie zal bijgevolg vermenigvuldigd worden met 1,1. Men dient ervoor te waken dat de 10 % niet als absolute toename geïnterpreteerd wordt. Indien die fout toch gemaakt zou worden, wordt gebruik gemaakt van een relatieve toename van ca. 150 % !

5.5.1.3 DIEPTEVERANDERINGEN

Een afname van de diepgang doet zowel de statische als de dynamische responsie stijgen. Blijkbaar is de statische responsie gevoeliger voor diepteveranderingen. Hierdoor zal de springingsgevoeligheid toenemen met de waterdiepte.

Een waterdiepte van 12 m leidt tot een springingsgevoeligheid die 1.4 maal groter is dan deze voor 10 m. Doordat de waarden van de buigende momenten echter gedaald zijn blijft het optredende buigende moment kleiner dan bij de standaardconditie.

Omgekeerd zal voor een waterdiepte van 8 m de springingsgevoeligheid dalen. De absolute waarde van het buigende moment, zal echter stijgen.

Het is dus aan te raden het schip statisch te **ontwerpen bij de kleinste waterdiepte** waarbij het schip kan werken. Met de aannames die gedaan zijn wordt als **ontwerpdiepgang 8 m** voorgesteld.

Opgelet: Indien het statische ontwerp gebeurt bij een waterdiepte van 10 m, en het schip vaart (door omstandigheden) continu bij een waterdiepte van 8 m. Dan zal de procentuele misrekening in het project gelijk zijn aan:

$$\frac{BM_{\text{dynamisch bij gebruik}} - BM_{\text{statisch bij ontwerp}}}{BM_{\text{statisch bij ontwerp}}} \cdot 100 = \frac{190.62 - 169.17}{169.17} \cdot 100 = 12.7\%$$

De fout ligt hier echter niet bij verwaarlozing van springing, maar wel bij het onderstellen van een verkeerde diepgang in de statische analyse.

6 Besluit

Het besluit van deze thesis is dat men bij het scheepsontwerp weinig rekening dient te houden met springing. Op voorwaarde dat de snelheid beperkt blijft tot 10 kn. De springingsgevoeligheid bedraagt dan immers maximaal 10 % (D1-schip in ballast).

Als uitgegaan wordt van een **schip ontworpen in volle toestand** is de springingsgevoeligheid verkleind tot ca. **6.5 %**.

Als bovendien het statische ontwerp gebeurde bij de **laagste waterdiepgang (8 m)** bedraagt de springingsgevoeligheid nog amper **5.8 %**.

Doordat aan de hand van veiligheidsfactoren een schip overgedimensioneerd wordt, kunnen de dynamische invloeden opvangen worden zonder dat deze expliciet in rekening gebracht worden.

Ander **ontwerpcriteria** waarmee men best rekening houdt

- De **scheepssnelheid beperken tot 10 kn**
- De statische responsie berekenen bij de **laagste diepgang** die het schip tijdens het traject ervaart (8 m)
- Schepen met **afmetingen groter dan deze van het D1-schip** komen **niet** in aanmerking

7 Referenties

- [1] Prof. Dr. Ir. M. Vantorre, ir. B. Vandevoorde, ir. Tjepko van der Werff, Haalbaarheidsstudie Estuair Containervervoer als hinterlandverbinding voor de Haven van Zeebrugge, Ministerie van de Vlaamse gemeenschap, Antwerpen/Gent, 2005
- [2] Benoît Vandevoorde en Stefan Paprocki, Optimalisatie van een vrachtschip voor de estuaire vaart, Afstudeerwerk, universiteit Gent 2005.
- [3] F.H. Todd, Ship Hull Vibration, Edward Arnold (Publishers) LTD, London, 1961.
- [4] Prof. Dr. Ir. P. Truyens, Trillingen in Scheepsconstructies, Firw Ugent, Gent, 1995
- [5] Prof. Dr. Ir. N. Noldus, Mechanische Trillingen, Firw Ugent, Gent, 2005
- [6] Prof. Dr. Ir. R. Van Impe, Berekening van Bouwkundige Constructies, Firw Ugent, Gent, 2005
- [7] Prof. Dr. Ir. M. Vantorre, Manoeuvrer- en zeegangsgedrag van maritieme constructies, Firw Ugent, Gent, 2005
- [8] Prof. Dr. Ir. R. Van Keer, Inleiding tot de numerieke wiskunde, Firw Ugent, Gent, 2004
- [9] R. Wereldsma, Statistical approach to the analysis of longitudinal stresses in a simplified ship's girder due to a long crested irregular oblique sealoading, Delft, 1972
- [10] Ir. F.F. van Gunsteren, Springing of ships in waves, Delft University Press, Delft, 1978.
- [11] Jelena Vidiv Perunovic, Springing response due to bidirectional wave excitation, Technical University of Denmark, Lyngby, 2005