

2018 • 2019
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Ontwikkeling van een rekentool voor de stabiliteitscontrole van pontons belast met mobiele kranen

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

ing. Frederik DHOLLANDER

COPROMOTOR :

ing. Tom T'JOENS

Daan Laeremans, Casimir Schalenborgh

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



KU LEUVEN



KU LEUVEN

2018 • 2019

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Ontwikkeling van een rekentool voor de stabiliteitscontrole van pontons belast met mobiele kranen

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

ing. Frederik DHOLLANDER

COPROMOTOR :

ing. Tom T'JOENS

Daan Laeremans, Casimir Schalenborgh

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



KU LEUVEN

Woord vooraf

Het masterproefonderwerp, dat in deze tekst beschreven wordt, heeft ons de kans gegeven om ons te verdiepen in de scheepsstabiliteit. Tot voor kort was deze materie niet gekend voor ons, maar door het toepassen van onze algemene kennis uit de opleiding en een goede begeleiding vanuit het bedrijf en de universiteit is dit toch tot een goed einde gekomen.

Graag bedanken wij enkele personen die op één of andere manier bijgedragen hebben aan dit werk:

- ing. Tom T'Joens, promotor en algemeen directeur van het bedrijf HYE nv, voor het aanrijken van dit onderwerp en de vele ideeën;
- ing. Frederik Dhollander, begeleider van het bedrijf HYE nv, voor de dagelijkse begeleiding en ondersteuning in de uitvoering van deze masterproef;
- prof. dr. ing. Bram Vandoren, promotor van de UHasselt, voor de ideeën, bijsturingen en deskundig advies;
- Karen Merlevede en Raquel Marza van studiebureau Multi Engineering nv uit Temse, voor het delen van documenten en de uitleg omtrent scheepsstabiliteit;
- René Van Ginneken van de firma Luyckx nv voor de info met betrekking tot de stabiliteit van kranen;
- Maarten Visser voor het aanrijken van de DELFTship software en het advies erbij;
- onze ouders voor de dagelijkse steun tijdens de opleiding en tijdens het uitwerken van deze scriptie.

Inhoudsopgave

Lijst met afkortingen.....	15
Definitielijst	17
Abstract	19
Abstract in English.....	21
1 Inleiding	23
1.1 Kader	23
1.2 Probleemstelling.....	25
1.3 Doelstellingen.....	25
1.4 Overzicht	26
2 Literatuurstudie – Drijvende werktuigen.....	27
2.1 Types hijsvaartuigen.....	27
2.1.1 Floating sheerleg	27
2.1.2 Self-elevating platforms.....	30
2.1.3 Backhoe dredgers	32
2.2 Soorten mobiele kranen	33
2.3 Opbouw van een rupskraan.....	35
2.4 Stabiliteit van mobiele kranen.....	36
2.4.1 Zwaartepunt en hefboom	37
2.4.2 Hijstabellen	38
2.5 Normen voor mobiele kranen	39
2.6 Richtlijnen voor gebruik op pontons	40
3 Literatuurstudie - Scheepsstabiliteit.....	43
3.1 Geometrie van een vaartuig: Algemene definities	43
3.2 Stabiliteit van een vaartuig	45
3.2.1 Gewichten en waterverplaatsing	45
3.2.2 Zwaartepunt.....	46
3.2.3 Opwaartse kracht.....	48
3.2.4 Drukkingspunt van de opwaartse kracht	49

3.2.5	Trim, list en heel.....	49
3.2.6	Verticaal evenwicht.....	50
3.2.7	Oprichtend koppel.....	52
3.2.8	Verandering interne lastenverdeling.....	53
3.2.9	Evenwichtsconcepten.....	54
3.2.10	Metacentrum.....	55
4	Stabiliteitsberekening.....	59
4.1	Ponton Waterduvel.....	59
4.2	Ponton BERL.....	66
4.3	Manuele stabiliteitsverificatie.....	70
4.3.1	Bepaling van de totale waterverplaatsing.....	71
4.3.2	Verschillende belastingen op het ponton.....	73
4.3.3	Hydrostatische gegevens.....	83
4.3.4	<i>Cross curves</i> van stabiliteit.....	90
4.3.5	Statische stabiliteitscurve.....	96
4.3.6	Evaluatie criteria.....	114
4.4	Stappenplan berekening.....	116
5	Opbouw rekentool.....	117
5.1	Aannames.....	117
5.2	Structuur van het rekenblad.....	118
5.2.1	Structuur rekenblad Waterduvel.....	119
5.2.2	Overzicht structuur rekenblad Waterduvel.....	132
5.2.3	Structuur van rekenblad BERL.....	134
5.2.4	Overzicht structuur rekenblad BERL.....	135
5.3	Gebruik van het rekenblad.....	137
5.4	Voornaamste stabiliteitscriteria.....	138
5.5	Toelichting geprogrammeerde code.....	139
6	Verificatie van het rekenblad.....	141
6.1	Verificatie met DELFTship.....	141
6.1.1	Verificatie 1: Waterduvel in combinatie met een giekkraan.....	141

6.1.2	Verificatie 2: Waterduvel in combinatie met een graafkraan	145
6.1.3	Verificatie 3: BERL in combinatie met een giekkraan	150
6.2	Verificatie met een praktijkstudie	153
6.2.1	Proefopstelling	154
6.2.2	Resultaten	157
6.3	Analyse	159
6.4	Verbeteren stabiliteit van kraanponton	160
6.4.1	Aanpassen lading en belastingen	160
6.4.2	Permanente ballast	161
6.4.3	Verwijderen gewicht	161
7	Conclusie	163
7.1	Rekentool	163
7.2	Verbeteringen en extra onderzoek	165
	Bibliografie	167
	Bijlagen	171
	Bijlage A – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,000m)	172
	Bijlage B – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,100m)	173
	Bijlage C – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,200m)	174
	Bijlage D – Cross curve data (PS) Waterduvel (trim 0,100m)	177
	Bijlage E – Cross curve data (PS) Waterduvel (trim 0,200m)	178
	Bijlage F – Wind silhouette Waterduvel: Construction	179

Lijst van tabellen

Tabel 1: Hijstabel Hitachi SCX-2800 [23]	38
Tabel 2: Hijstabel Hitachi SCX-2800 met 30,48 m giek op ponton [24]	41
Tabel 3: <i>Lightship</i> gewicht Waterduvel.....	60
Tabel 4: Overzicht tanks in ponton Waterduvel voor 100% gevuld.....	64
Tabel 5: <i>Lightship</i> gewicht BERL	67
Tabel 6: Overzicht tanks in ponton Waterduvel voor 10% gevuld.....	68
Tabel 7: Vloeistofreservoirs	70
Tabel 8: Lasten op het dek	71
Tabel 9: Lasten Miscellaneous - Vloeistofreservoirs	74
Tabel 10: Lasten Miscellaneous – Kraan en last	74
Tabel 11: Lasten Miscellaneous - Totaal	75
Tabel 12: Lasten <i>Void</i> - Totaal.....	76
Tabel 13: Lasten Engine room - Totaal	77
Tabel 14: Lasten Engine room - Totaal	78
Tabel 15: Lasten Fuel tanks - Totaal.....	78
Tabel 16: Lasten Waterballasttanks - Overzicht	80
Tabel 17: Lasten Waterballasttanks - Totaal.....	81
Tabel 18: Totaal Deadweight.....	82
Tabel 19: <i>Lightship</i> gewicht ponton Waterduvel.....	82
Tabel 20: Totale waterverplaatsing	82
Tabel 21: Berekening cross curve voor trim = 0,100	93
Tabel 22: Berekening cross crves voor trim = 0,200.....	95
Tabel 23: Tussenresultaten berekening hefboomsarm GZ	98
Tabel 24: Berekening GZ-waardes voor verschillende heel hoeken.....	99
Tabel 25: Kritische punten.....	102
Tabel 26: Submersion angles: downflooding points.....	105
Tabel 27: Berekening heefboomsarm additional heel moment.....	110

Tabel 28: Verificatie volgens: Bijzondere bepalingen voor drijvende werktuigen (01 – 01 – 1995).....	115
Tabel 29: Input door gebruiker in rekenblad Waterduvel	122
Tabel 30: Output zwaartepunten en gewicht van het rekenblad.....	123
Tabel 31: Weergave hydrostatische gegevens in het rekenblad.....	124
Tabel 32: Berekening rekenblad hefboomsarmen GZ	125
Tabel 33: Downflooding points Waterduvel	126
Tabel 34: GZ-Waardes voor de verschillende heel-hoeken	126
Tabel 35: Rekenblad - bepaling metacentrische hoogte	128
Tabel 36: Weergave vrijboord in rekenblad	130
Tabel 37: Verificatierapport uit het rekenblad – <i>Inland navigation</i>	131
Tabel 38: Verificatierapport uit het rekenblad.....	131
Tabel 39: Verificatie 1 - Waterverplaatsing manueel	142
Tabel 40: Verificatie 1 - Waterverplaatsing rekenblad.....	142
Tabel 41: Verificatie 1 - Waterverplaatsing DELFTship.....	143
Tabel 42: Verificatie 1 - Hydrostatische parameters vergelijking	143
Tabel 43: Verificatie 1 - Vergelijking van stabiliteitscriteria.....	144
Tabel 44: Verificatie 2 – lasten op het dek.....	146
Tabel 45: Verificatie 2 - Vullingspercentage ballastkamers.....	146
Tabel 46: Verificatie 2 - Waterverplaatsing rekenblad	147
Tabel 47: Verificatie 1 - Waterverplaatsing DELFTship.....	147
Tabel 48: Verificatie 2 - Hydrostatische parameters vergelijking	148
Tabel 49: Verificatie 2 - Vergelijking van stabiliteitscriteria.....	149
Tabel 50: Verificatie 3 - lasten op het dek	150
Tabel 51: Verificatie 3 – resulterende waterverplaatsing rekentool	151
Tabel 52: Verificatie 3 – resulterende waterverplaatsing DELFTship	151
Tabel 53: Verificatie 3 - Vergelijking van stabiliteitscriteria.....	152
Tabel 54: Extra lasten op het dek van de proefopstelling	155
Tabel 55: Praktijkmeting - Zwaartepunt en gewicht samenstel.....	156
Tabel 56: Praktijkmeting - Zwaartepunt last.....	157

Tabel 57: Praktijkmeting – Vaste ballast in BERL.....	157
Tabel 58: Praktijkmeting - Meetresultaten.....	158
Tabel 60: Resultaten DELFTship praktijkmeting	158
Tabel 60: resultaten rekentool praktijkmeting	159

Lijst van figuren

Figuur 1: Ponton Waterduvel [1]	23
Figuur 2: Hijsongeval Alphen aan de Rijn [8]	24
Figuur 3: Voorbeeld Floating sheerleg [12]	27
Figuur 4: Voorbeeld hijscapaciteit [13]	28
Figuur 5: Voorbeeld ballastkamers in pontons [14]	29
Figuur 6: Voorbeeld overkantelen van ponton [16]	29
Figuur 7: Structuurconcept van een drijvende bok [14]	29
Figuur 8: Jack-up vaartuig Apollo [15]	30
Figuur 9: Stabiliteitswerking Jack-Up platform [17]	31
Figuur 10: Oplegging van spuds met de bodem van Jack-Up platform [17]	32
Figuur 11: Backhoe dredger Minan Sinan [12]	33
Figuur 12: Telescoopkraan Liebherr [3]	34
Figuur 13: Hitachi SCX-2800 van HYE nv [19]	35
Figuur 14: Opbouw crawler crane [20]	36
Figuur 15: Kantelen van kraan [21]	36
Figuur 16: Zwaartepunt van de kraan [22]	37
Figuur 17: Loskomen achterzijde van de kraan bij te grote last [22]	38
Figuur 18: Maximum percentage van kantelgewicht [22]	39
Figuur 19: Geometrie volgens langsrichting	44
Figuur 20: Geometrie volgens dwarsrichting	44
Figuur 21: Verschuiving van zwaartepunt G	46
Figuur 22: Gehanteerde conventie assenkruis en benaming	47
Figuur 23: Gehanteerd assenstelsel afgebeeld op eenvoudig ponton	48
Figuur 24: Hydrostatische druk op een ondergedompeld lichaam [34, p. 26]	48
Figuur 25: Visualisatie heel (slagzij) en trim [34, p.11]	49
Figuur 26: Verticaal evenwicht	50
Figuur 27: Invloed extra last op verticaal evenwicht	51
Figuur 28: Oprichtend koppel	52

Figuur 29: Momentenevenwicht.....	53
Figuur 30: Effect van externe invloeden.....	53
Figuur 31: Evenwichtsconcepten [34, p. 39]	54
Figuur 32: Methode bepalen locatie metacentrum	55
Figuur 33: (Ligging metacentrum) Figuur hierboven besproken is 32	56
Figuur 34: Voorbeeld Azobe planken voor verdeling belasting.....	60
Figuur 35: Indeling Waterduvel.....	61
Figuur 36: Schema <i>sounding</i> -techniek [35].....	62
Figuur 37: Free Surface Effect [26].....	63
Figuur 38: Overzicht indeling Waterduvel	65
Figuur 39: Verlaagd dek in ponton Waterduvel [1].....	65
Figuur 40: Schematische weergave ponton Waterduvel met kranen	66
Figuur 41: Indeling BERL	67
Figuur 42: DELFTship model ballasttanks van het ponton BERL.....	68
Figuur 43: Voorbeeld extra deklast - heihamer van 23 ton	69
Figuur 44: Weergave assenstelsel longitudinale doorsnede.....	72
Figuur 45: Weergave assenstelsel bovenaanzicht.....	72
Figuur 46: Weergave assenstelsel doorsnede ponton.....	72
Figuur 47: Plan Waterduvel – locatie Miscellaneous.....	73
Figuur 48: Plan Waterduvel – locatie Void	76
Figuur 49: Plan Waterduvel – locatie Engine room.....	76
Figuur 50: Plan Waterduvel – locatie Fuel tanks	77
Figuur 51: Plan Waterduvel – locatie Ballasttanks	79
Figuur 52: Diepgang bij trimmen van een ponton	84
Figuur 53: Weergave hefboomsarm trimmoment.....	84
Figuur 54: Schematische weergave ponton	87
Figuur 55: Weergave Block coëfficiënt [32]	88
Figuur 56: Cross curves voor trim = 0,100	92
Figuur 57: Cross curves voor trim = 0,200	94
Figuur 58: Richtend moment als gevolg van extern moment	96

Figuur 59: Initiële heel en vrije oppervlakte-effect	97
Figuur 60: Extra zwaartepunt in rekening te brengen.....	97
Figuur 61: Static stability curve voor manuele verificatie	99
Figuur 62: Initiële list bepalen uit richtingscoëfficiënt GZ-curve	101
Figuur 63: Locatie kritische punten	102
Figuur 64: Afstand tot downflooding point.....	103
Figuur 65: Variabelen berekening diepgang.....	103
Figuur 66: Afstand tot downflooding point bij initiële heel.....	104
Figuur 67: Maximaal toegestane GZ-waarde afhankelijk van downflooding angle.....	106
Figuur 68: Hefboomsarm wind heeling moment op de GZ-curve.....	107
Figuur 69: Richtende hefboomsarm op GZ-curve	108
Figuur 70: GZ-curve met hefboomsarm additional heeling moment	110
Figuur 71: Bepaling additional heeling angle uit GZ-curve	111
Figuur 72: Bepaling residual stability uit de GZ-curve.....	112
Figuur 73: Startscherm rekenblad Waterduvel	120
Figuur 74: Weergave tanks in rekenblad Waterduvel	121
Figuur 75: Voorbeeldweergave statische stabiliteitscurve.....	125
Figuur 76: Additional heeling moment in GZ-curve	127
Figuur 77: <i>Residual stability</i>	128
Figuur 78: Bepaling metacentrische hoogte in rekenblad	129
Figuur 79: Lightship loadcase	137
Figuur 80: Ballast loadcase	137
Figuur 81: Dredging loadcase	137
Figuur 82: Giekkraan loadcase.....	138
Figuur 83: Transport loadcase.....	138
Figuur 84: Toekomstige AWT-Terminal bij ArcelorMittal Gent [31].....	153
Figuur 85: Proefopstelling BERL.....	154
Figuur 86: Bepaling zwaartepunt kraan achterwaarts	156
Figuur 87: Resultaten DELFTship praktijkmeting kraan zijwaarts	158

Lijst met afkortingen

Cb	Block coëfficiënt, een vormcoëfficiënt van het vaartuig
CL	Center line, de centrale as van een vaartuig
CL	Center line, de centrale as van het vaartuig
COB/B	Centre of Buoyancy, drukingspunten van de opwaartse kracht
COF/F	Centre of Floatation, rotatiepunt of het scharnier op het wateroppervlak
COG/G	Centre of Gravity, het massamiddelpunt
DFL	Downflooding, mogelijkheid tot het onderwaterlopen van de inwendige structuur door openingen in de romp
DISP	Water displacement, de waterverplaatsing veroorzaakt door een vaartuig
DO	Dirty Oil tank, vervuilde olietank
DT	Day tank, brandstoftank
FB	Free board, het vrijboord
FSE	Free surface effect, het vrije oppervlakte-effect van vloeistoffen
FSM	Free surface moment, het vrije oppervlaktemoment van vloeistoffen
FW	Fresh Water: Zoetwater met een dichtheid van $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
GG'	Free surface effect correction, de correctie van het zwaartepunt omwille van het vrije oppervlakte-effect
GMliquid	Centre of gravity to metacenter (liquid)
GMsolid	Centre of gravity to metacenter (solid)
KML	Keel to metacenter (Longitudinal)
KMt	Keel to metacenter (Transverse)
LCB	Longitudinal Centre of Buoyancy, het Buoyancy punt in de langsrichting
LCF	Longitudinal Centre of Floatation
LCG	Longitudinal centre of Gravity, het massamiddelpunt in de langsrichting
M	Metacentre, de ligging van het metacentrum
MCT	Moment to Change Trim by 1 cm, het moment nodig om de trim 1 cm aan te passen
MDO	Marine Diesel Oil tank, tank met dieselolie voor marine toepassingen
PS	Port Side, bakboord

PS	Port side, bakboordzijde van een vaartuig
SB	Star board, stuurboordzijde van een vaartuig
SB	Starboard, stuurboord
SEW	Sewage tank, afvalwatertank
t	Afkorting voor de eenheid ton
TCB	Transverse Centre of Buoyancy, het Buoyancy punt in de transrichting
TCF	Transverse Centre of Floatation
TCG	Transverse Centre of Gravity, het massamiddelpunt in de transrichting
TpCm	Immersion rate, het extra gewicht nodig om het vaartuig 1 cm te laten zinken
VCB	Vertical Centre of Buoyancy, het Buoyancy punt in de dwarsrichting
VCG	Vertical Centre of Gravity, het massamiddelpunt in de dwarsrichting

Definitielijst

Aft	Achterkant van een vaartuig
Draft	De diepgang op een bepaalde plaats gemeten
Fore	Voorkant van een vaartuig
Heel	Slagzij, of het zijwaarts hellen van een schip uitgedrukt in graden of radialen
Heelhoek	De hoek waaronder een schip slagzij zal hellen
Keel	Keel betekent kiel in het Nederlands. Het is een constructieonderdeel van het vaartuig, gelegen op de romp van dat vaartuig.
List	Initiële slagzij
Mean moulded draft	De gemiddelde diepgang
Midship	Midden van een vaartuig
Naval architecture	De studie die zich concentreert rond het ontwerp en de stabiliteitsberekeningen van vaartuigen
Spuds / Spudpalen	Steunpoten van een schip waarmee deze zich kunnen verankeren aan de zeebodem
Trim angle	De hoek waaronder een schip trim zal hebben, rekening houdend met de positie van LCF.
Trim	Het verschil tussen de diepgang achter- en vooraan
Vlucht	De afstand van het zwaartepunt van de belasting t

Abstract

HYE nv specialiseert zich in waterbouwwerken en bezit drie pontons waarop mobiele kranen worden geplaatst voor het uitvoeren van diverse hijs- en baggerwerkzaamheden vanop het water. De stabiliteit van dergelijke combinaties is complex en dient grondig voorbereid te worden. Deze masterproef heeft als doel het ontwikkelen van een rekentool dat de stabiliteitscontrole van kraanpontons vereenvoudigt.

De stabiliteit van een kraanponton berust op twee belangrijke aspecten. Ten eerste speelt de aanwezigheid van de mobiele kraan op het ponton een belangrijke rol, die bepalend is voor de maximale last. Ten tweede wordt de stabiliteit van het vaartuig zelf in rekening gebracht. De rekentool moet toestaan om de stabiliteit te verifiëren van een bepaalde hijsconfiguratie, terwijl de tool gemakkelijk in gebruik is en met zo weinig mogelijk inputparameters een accuraat resultaat weergeeft.

De rekentool is ontworpen in Microsoft Excel door gebruik te maken van de principes van scheepsstabiliteit, geometrische parameters van de pontons, eerder uitgevoerde stabiliteitsstudies en lastenboeken van de kranen. De verificatie van de rekentool is gebeurd aan de hand van een vergelijking met commerciële software en een praktijkopmeting. Hieruit volgt dat de rekentool overeenstemt met andere software maar dat er kleine verschillen optreden met de praktijk, te wijten aan extra deklasten die niet altijd in rekening gebracht worden.

Abstract in English

HYE nv specializes in water construction works and possesses three barges which are used in combination with mobile cranes to perform lifting and dredging works. Stability of these barges is a complex matter and requires extensive preparation. The objective of this Master's thesis is to develop a calculation tool that simplifies the stability control of a crane barge.

The stability of a crane barge rest on two main aspects. In the first place the stability of the mobile crane, used on a barge, defines the maximum load the configuration can handle. Secondly the stability of the barge which is defined by the ballast in the barge. The calculation tool must verify the stability of a certain barge configuration. The usage of the calculation tool must be simple and requires a small amount of input parameters while it still gives very accurate results.

The calculation tool is developed in Microsoft Excel by using the principles of ship stability, geometric parameters of the pontoons, formerly performed stability studies and load charts of the mobile cranes. The verification of the calculation tool is performed by comparing the results of the tool with the results of a professional software application and a field measurement. Hereby it is proven that the usage of the calculation tool for these lift operations match up to other software applications. However, small differences between the theory and the practice situation could occur due to deviations while entering all inputs.

1 INLEIDING

1.1 Kader

Kraanpontons zijn één van de meest gebruikte vaartuigen voor hijs- en transportwerkzaamheden op water of oevers, meestal bij gebruik op binnenwateren. De opdrachtgever van deze masterproef is het bedrijf HYE nv uit Zwijndrecht. HYE nv is een bedrijf dat gespecialiseerd is in waterbouw en civiele bouwkunde in België en Nederland [1]. Onder waterbouw vallen onder andere het aanleggen en versterken van oevers, de aanleg van landhoofden voor bruggen en het superviseren van totaalprojecten. Het bedrijf is in het bezit van drie pontons: BERL, Waterduvel en Sebastian. Op deze pontons worden hijs- en graafkranen geplaatst om diverse werkzaamheden zoals hijs- en baggerwerken uit te voeren. Op onderstaande foto (Figuur 1) is het recentste ponton Waterduvel van HYE nv te zien.



Figuur 1: Ponton Waterduvel [1]

De stabiliteit van dergelijke pontons is complex en belangrijk tijdens de uitvoering van de werkzaamheden. Om op een snelle en eenvoudige manier na te gaan of de werkzaamheden veilig kunnen verlopen, heeft het bedrijf de opdracht gegeven om een rekenblad te ontwerpen waarmee de stabiliteit van pontons bepaald wordt. Het bedrijf moet in staat zijn om dit rekenblad op een relatief eenvoudige manier te kunnen gebruiken terwijl er toch alle stabiliteitsaspecten in vervat zijn.

De kranen die op de pontons worden gebruikt, hebben een lastentabel waarin de maximale last op een bepaalde afstand tot de kraan bepaald is. Deze lastentabellen gelden wanneer de kraan op een vaste, stabiele ondergrond wordt gebruikt. Maar, deze lastentabel is niet volledig geldig op een onstabiele ondergrond zoals een ponton op water. Op water wisselt de hellingshoek immers continu tijdens het hijsen van lasten.

Voor moderne kranen wordt een lastentabel voorzien door de fabrikant specifiek voor het gebruik van de kranen op pontons. Hier worden grote veiligheidsfactoren op de lastentabel genomen door de fabrikant, in overeenstemming met de norm EN13000 [36]. Deze vermindering van hijsvermogen kan soms het verschil maken tussen het wel en niet mogen uitvoeren van bepaalde werkzaamheden, ook al zou het op een stabiele ondergrond nog perfect mogelijk zijn, mag het op een ponton niet meer met dezelfde kraan.

Ook moet de stabiliteit van het ponton zelf gewaarborgd blijven door het toepassen van ballast. Voor de pontons van HYE nv heeft een gespecialiseerd studiebureau, genaamd Multi Engineering uit Temse, de stabiliteitsberekening voor diverse belastingen in het verleden uitgevoerd. Maar het rapport van deze studie is vrij uitgebreid en moeilijk te begrijpen wanneer de lezer niet eigen is aan de materie. Daarnaast beperkt het rapport zich tot enkele specifieke belastingen, maar geeft het geen inzicht in andere belastingsgevallen zoals tijdens het hijsen in diagonale richting.

Het gebruik van mobiele kranen in combinatie met een ponton is een speciale onderneming, en dient met de nodige zorg gepland en uitgevoerd te worden. Spijtig genoeg zijn er enkele voorbeelden waar er een slechte voorgaande studie of een slechte uitvoering geleid heeft tot desastreuze gevolgen. Een recent voorbeeld hiervan is het ongeval in Alphen aan de Rijn in Nederland in de zomer van 2015. Bij het inhijzen van een brugdeel met twee kranen opgesteld op twee pontons ging het mis. Onderstaande Figuur 2 toont een foto na het ongeval waarop de gevolgen duidelijk te zien zijn.



Figuur 2: Hijsongeval Alphen aan de Rijn [8]

De Nederlandse Onderzoeksraad voor de veiligheid heeft een uitgebreid onderzoek gedaan naar dit ongeval en hierover een rapport geschreven [9]. Dit rapport concludeert dat het ongeval onvermijdelijk was gedurende de uitvoering door een gebrek aan voorbereiding. De stabiliteit van de pontons werd niet volledig nagerekend en er werden extra nadelige lasten op de pontons geplaatst die niet meegerekend waren in de hijsplannen. Ook waren de twee kranen niet van hetzelfde type en hoogte, waardoor de krachtwerking niet evenredig over beide kranen verdeeld werd. Een grote oorzaak hiervan was dat er geen

enkele overkoepelende projectleider was die een volledig overzicht over de uitvoerende werkzaamheden had. De verschillende aannemers verwachtten dat een andere de nodige studies zou doen van de hijsconfiguratie, die uiteindelijk niet gebeurd is. Ook was er onvoldoende rekening gehouden met de veiligheid tijdens de werkzaamheden.

In dit geval is het relatief goed afgelopen aangezien er geen dodelijke slachtoffers gevallen zijn. De materiële en bijgevolg financiële schade voor de betrokken bedrijven is echter wel bijzonder groot. Dergelijke ongevallen tonen nogmaals dat een goede voorbereiding en studie noodzakelijk is bij dergelijke werkzaamheden.

1.2 Probleemstelling

Omdat HYE nv zijn pontons ten volle wil benutten en snel een idee wil krijgen over de maximale mogelijkheden van het ponton, is het doel van deze masterproef een toegankelijk rekenblad te ontwerpen waarmee er met een input van slechts enkele parameters snel bepaald kan worden wat de maximale belasting is van de combinatie kraan met ponton. Deze maximale last zal afhankelijk zijn van de optredende helling van de kraan door de lasten, de aanpiklengte, de ballast van het ponton, de stroming, de wind enzovoort. Het rekenblad moet uiteindelijk aangeven of een bepaalde last mag getild worden of niet.

Naast de hijspontons BERL en Sebastian, wordt het ponton Waterduvel meestal gebruikt om baggerwerken uit te voeren met een graafmachine. Een graafmachine is nog complexer op het vlak van stabiliteit, aangezien de graafkraan het ponton naar beneden trekt wanneer deze materiaal opschept van de bodem. Dit vormt dan ook de laatste doelstelling: het rekenblad uitbreiden zodat een graafmachine in rekening kan worden gebracht. Door het rekenblad zal het voor HYE nv mogelijk zijn om hun pontons optimaal te benutten en snel te kunnen nakijken of een bepaalde hijswerkzaamheid kan uitgevoerd worden.

De onderzoeksvraag voor deze masterproef kan als volgt geformuleerd worden:

“Is het mogelijk een rekenblad te ontwerpen dat via een minimum aan inputparameters een duidelijke weergave geeft van de stabiliteit van het desbetreffende kraanponton?”

1.3 Doelstellingen

Het doel van deze masterproef is het ontwerpen van een rekentool dat snel de algemene stabiliteitsberekeningen van een pontonconfiguratie voor een specifiek project kan narekenen. De rekentool dient te besluiten of een bepaalde last in de gegeven configuratie kan getild worden en of er extra ballast moet voorzien worden indien nodig.

De verificatie van een configuratie van een ponton met een kraan berust op de stabiliteit van het ponton met de kraan enerzijds en de stabiliteit van de kraan op zichzelf anderzijds. Het moet mogelijk zijn om in de tool de parameters van de hijsconfiguratie in te geven, zoals zwaartepunten, steunpunten en massa's. De output van het rekenblad geeft weer of het geheel al dan niet stabiel is, en of er enige aanpassingen nodig zijn.

Indien de configuratie niet voldoet, moet het mogelijk zijn voor de gebruiker om aanpassingen te doen in de configuratie zodat het geheel toch stabiel wordt. Het rekenblad dient eenvoudig in gebruik te zijn met bijhorende instructies, zodat werknemers het rekenblad zonder veel voorkennis kunnen gebruiken.

Het rekenblad dient gevalideerd te worden met berekeningen door een ander professioneel rekenprogramma en ook door een praktijkmeting. De resultaten dienen vergeleken te worden en er dient bekeken te worden hoe de eventuele verschillen zijn ontstaan.

1.4 Overzicht

De scriptie is opgebouwd vertrekkende vanuit een uitgebreide literatuurstudie. In hoofdstuk 2 wordt de literatuurstudie over mobiele kranen samengevat. Eerst worden de verschillende types hijsvaartuigen toegelicht en de soorten kranen. Daarna worden de stabiliteitsprincipes voor mobiele kranen besproken en de bijhorende reglementering en beperkingen.

In hoofdstuk 3 zijn de principes van de scheepsstabiliteit toegelicht. Hier wordt vanuit een basis sterkteleer overgegaan naar de stabiliteit van schepen. Vervolgens wordt deze scheepsstabiliteit toegepast op pontons en worden de belangrijkste aandachtspunten aangehaald.

Hoofdstuk 4 beschrijft een toepassing van hoofdstuk 3 over de scheepsstabiliteit met een manuele berekening van de stabiliteit van het ponton Waterduvel. Eerst worden de eigenschappen en belangrijkste parameters van de pontons toegelicht en vervolgens volgt een manuele berekening.

Hoofdstuk 5 beschrijft de opbouw van het volledige rekenblad. Eerst worden de verschillende inputparameters toegelicht. Vervolgens wordt de werking en geïmplementeerde functies toegelicht, welke leiden tot de output van de rekentool.

In hoofdstuk 6 zijn de resultaten van de rekentool grondig getest door enerzijds een vergelijking met het commercieel softwareprogramma DELFTship en anderzijds een praktijktest.

2 LITERATUURSTUDIE – DRIJVENDE WERKTUIGEN

Zoals er in de probleemstelling al is vermeld, zal deze thesis de volledige opbouw bespreken die noodzakelijk is voor de ontwikkeling van een rekentool om de stabiliteit van kraanpontons te verifiëren. Hiervoor is er een grondige voorkennis van de scheepsstabiliteitstheorie vereist. Daarnaast is een kennis van de structurele opbouw van dergelijke vaartuigen noodzakelijk. Ook kunnen baggerpontons of *backhoe dredgers* ook geclassificeerd worden als kraanpontons. In plaats van een hijskraan zijn deze pontons uitgerust met een hydraulische graafkraan of *excavator*. Binnen deze literatuurstudie zal er eerst een kort overzicht gegeven worden over de verschillende types vaartuigen die in staat zijn om liftoperaties of graafwerkzaamheden uit te voeren. Vervolgens zullen de beginselen van scheepsstabiliteit worden beschreven.

2.1 Types hijsvaartuigen

In de offshore sector worden diverse hijsvaartuigen gebruikt. De meest voorkomende types worden in deze paragraaf toegelicht.

2.1.1 Floating sheerleg

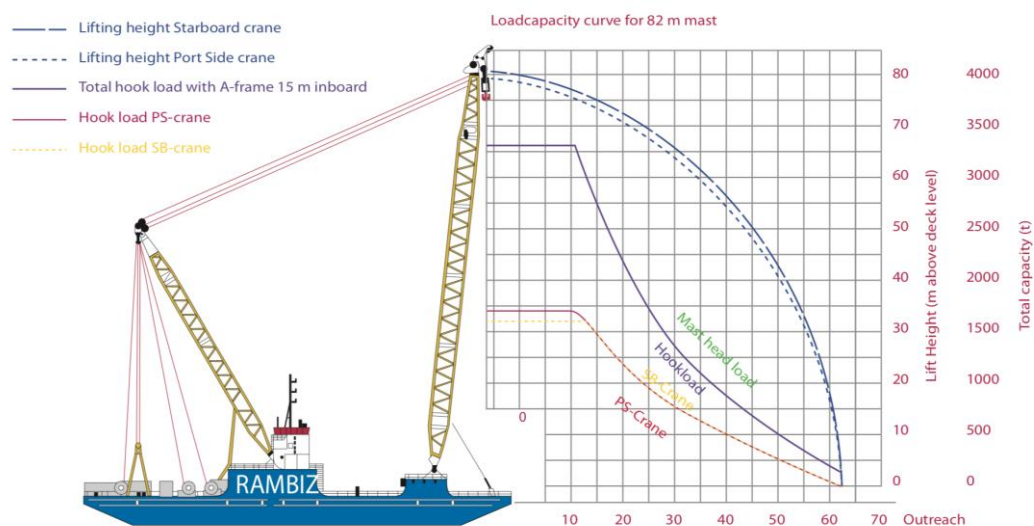
Een *Floating sheerleg* (voorbeeld in onderstaande Figuur 3), ook wel bekend als drijvende bok, is een type vaartuig dat gebruikt wordt voor *offshore* hijswerkzaamheden. Deze paragraaf is gebaseerd op bron [25]. Met een grote liftcapaciteit zijn de kranen in staat om lasten te kunnen tillen met een grootteorde van 3000 à 5000 ton. Oorspronkelijk werden *sheerlegs* gebruikt voor hijsoperaties kort bij land omwille van hun beperkte diepgang. Later werden deze vaartuigen ingezet voor offshore constructie- en hijswerkzaamheden, zoals het bergen van schepen of het plaatsen van funderingen voor windmolens op zee.



Figuur 3: Voorbeeld Floating sheerleg [12]

De uitvoering van deze werken ging echter wel gepaard met een zeer gedetailleerde analyse van de haalbaarheid, veiligheid en betrouwbaarheid van de stabiliteit van de vaartuigen tijdens het liften. Zoals op onderstaande afbeelding (Figuur 4) te zien is, bevinden de kranen zich aan de voorkant van het vaartuig. Het liften van zware lasten is mogelijk indien zowel de sterkte van de kranen als de stabiliteit van het vaartuig gegarandeerd kan worden [11].

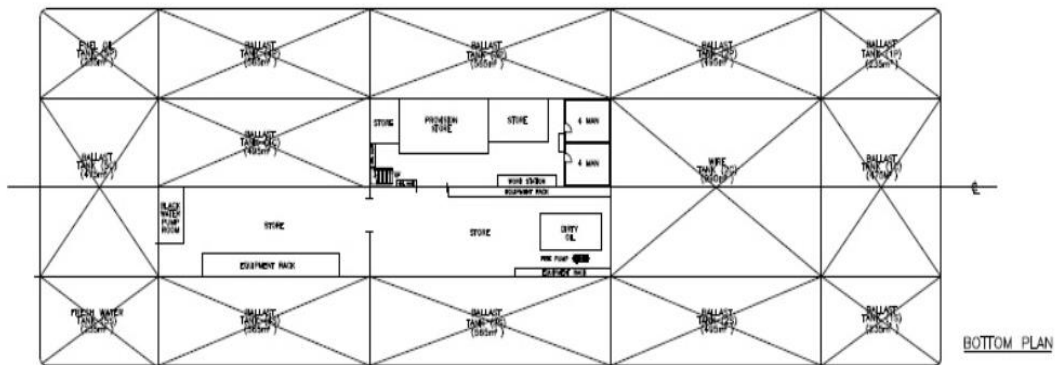
De sterkte van de kranen voldoet indien er een toelaatbare inwendige lastenverdeling aanwezig is. Het is van belang dat de kraan niet overbelast wordt om vervormingen van de structuur te voorkomen. De maximale liftcapaciteit van de kranen kunnen bepaald worden op basis van liftkarakteristieken. Deze curves zijn een weergave van de maximale last die getild kan worden in functie van de positie van de kraan(en). Op onderstaande curves in Figuur 4 is voor elke kraan de maximale last uitgezet ten opzichte van de lifthoogte (*lift height*) en de vlucht (*outrreach*).



Figuur 4: Voorbeeld hijscapaciteit [13]

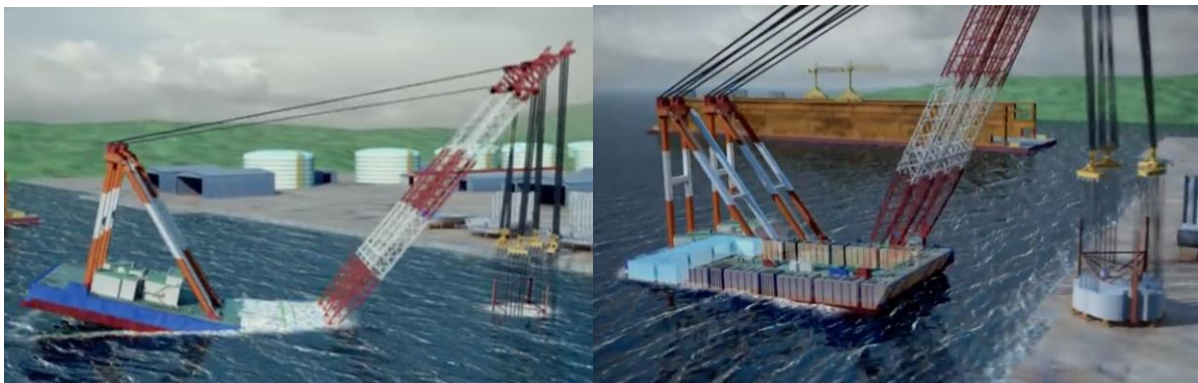
De maximale lasten in de liftcurves zijn gebaseerd op de sterkte van het hefwerktuig in longitudinale, verticale en transversale richting. Een overschrijding van deze waardes tijdens een liftoperatie kan falen van de kraan veroorzaken. Daarnaast dient er voor liftoperaties die offshore worden uitgevoerd ook rekening gehouden worden met de beweging van de golven.

Om de stabiliteit van dit vaartuig te kunnen garanderen is het aanbrengen van ballast noodzakelijk. Ballast plaatsen is het voorzien van een extra gewicht aan de achterzijde van het ponton om een betere evenwichtssituatie te verkrijgen tijdens het hijsen. In het plan op de volgende bladzijde (Figuur 5) is te zien dat een groot deel van de binnenstructuur van het vaartuig is voorzien van ballastkamers. Deze kamers worden tijdens het liften gelijkmatig gevuld met zeewater.



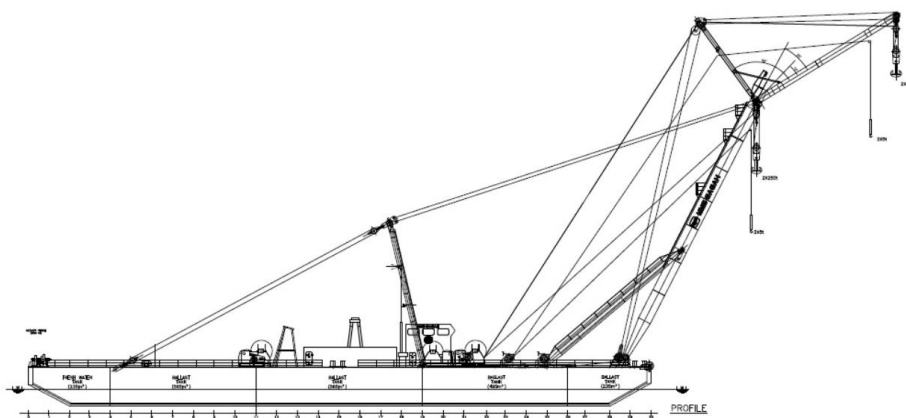
Figuur 5: Voorbeeld ballastkamers in pontons [14]

Op onderstaande afbeelding (Figuur 6) is te zien dat het vaartuig kan overkantelen indien er te weinig ballast is voorzien. Tijdens het hijsen is het ook zaak dat het ballasten snel en precies verloopt. De kraanoperator is verantwoordelijk dat de tanks precies genoeg gevuld zijn. Dit kan worden verwezenlijkt door middel van bediening op de brug. Zo worden de pompen aangestuurd die instaan voor het vullen van de tanks.



Figuur 6: Voorbeeld overkantelen van ponton [16]

Zoals op onderstaande Figuur 7 te zien is, is de structuur van de romp van een drijvende bok analoog aan die van een ponton waar de diepgang eerder beperkt zal blijven. De volledige hijsinstallatie is tevens vast gemonteerd op het dek van het ponton.



Figuur 7: Structuurconcept van een drijvende bok [14]

2.1.2 Self-elevating platforms

Een tweede soort hijsvaartuigen zijn de *self-elevating vessels* of ook wel *jack-up platforms* genaamd. De term *jack-up* overkoepelt een groot deel van de *offshore structures*, van kleine hijsvaartuigen tot zeer grote platforms voor gebruik in diep water. *Jack-up platforms* worden veelvuldig gebruikt bij de installatie van *offshore*-structuren zoals windmolenparken en *substations*. Het doel van een jack-up is om een mobiele en stabiele werkplaats te creëren op een offshore-locatie. Jack-ups kunnen zichzelf boven het wateroppervlak positioneren door middel van het ponton aan zijn steunpoten, ook wel spudpalen genaamd, op te richten. Hierdoor zullen deze platforms geen invloed ondervinden van golven, waardoor het platform veel stabielere zal staan tijdens het hijsen. In onderstaande Figuur 8 is een Jack-up platform afgebeeld.



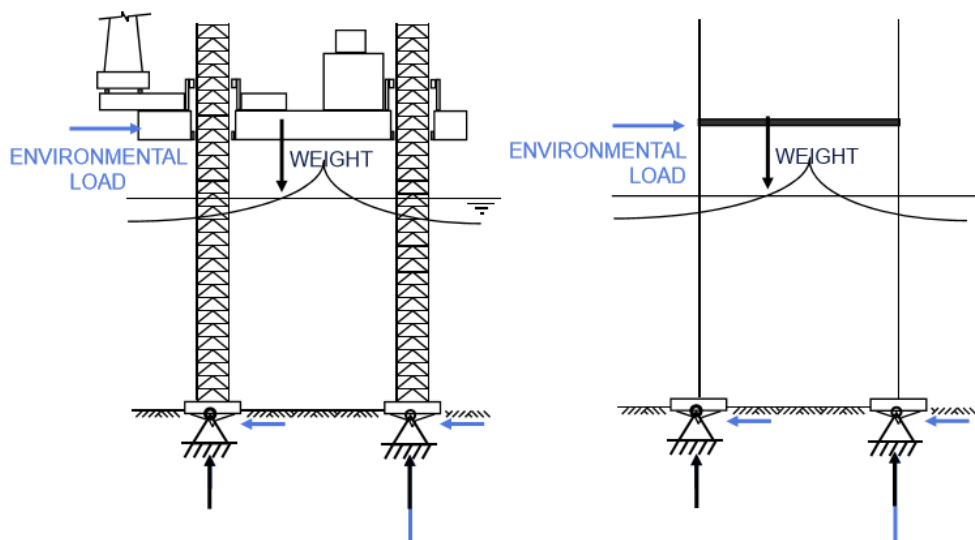
Figuur 8: Jack-up vaartuig Apollo [15]

Jack-ups zijn zelfvarende schepen die meestal uitgerust zijn met een DT/DP (*Dynamic Tracking/Dynamic Positioning*) systeem. Indien er hijswerkzaamheden vereist zijn voor de constructie van windmolens op zee, is een bepaling van de exacte locatie van het project van groot belang. Deze schepen moeten in staat zijn om deze locatie dus zeer precies te kunnen bereiken. Dit wordt mogelijk gemaakt door middel van het DP/DT. Dit systeem zorgt tevens voor een goede connectie tussen het vaartuig, omgevingsfactoren en de zeebodem.

In de transportfase van deze platforms worden de spuds opgehesen zodat deze de bodem niet raken tijdens het varen. De spuds mogen dan weer niet te hoog worden opgehesen aangezien dit het zwaartepunt verhoogt van de volledige structuur, wat de stabiliteit negatief zal beïnvloeden. Wanneer een *jack-up* op locatie aankomt, wordt deze meestal opgehesen naar een eerste op voorhand bepaalde hoogte. Vervolgens wordt deze naar zijn werkhogte gelift, waarop de hijsoperatie zal uitgevoerd worden.

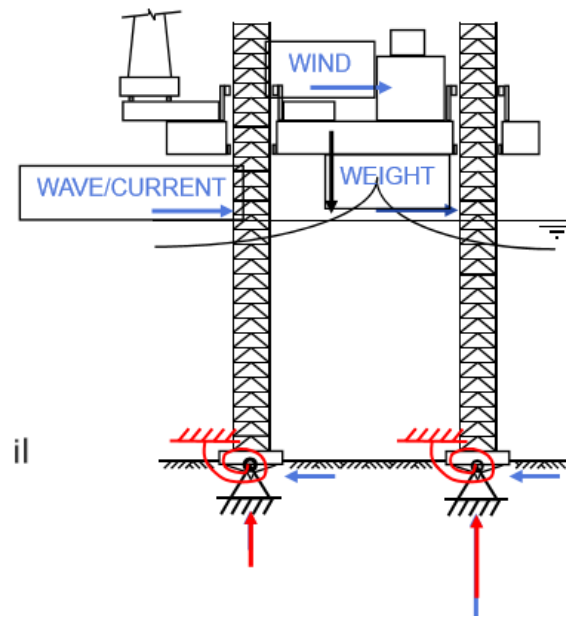
Voordat een jack-up kan gebruikt worden op een locatie, dient de locatie onderzocht te worden en de locatie-specifieke parameters vastgelegd te worden. Deze parameters zijn onder andere de stromingssnelheid, golfhoogte en windsnelheid. Daarnaast zijn ook de bodemparameters belangrijk om de inzinking van de benen te bepalen en de specifieke waterdiepte. Het komt frequent voor dat de bodem initieel niet geschikt is voor het toepassen van jack-up-platformen. Er dienen dan eerst baggerwerken uitgevoerd te worden om de bodem af te vlakken en te verstevigen, zodat het jack-up platform niet kan omkantelen.

Stabiliteit van een jack-up-platform kan beschouwd worden als de werking van een zeer groot portaalframe. De stabiliteit berust vooral op de verbinding tussen de benen en het platform, waardoor er een stijve structuur wordt gecreëerd. Figuur 9 geeft een voorstelling van deze opbouw.



Figuur 9: Stabiliteitswerking Jack-Up platform [17]

Belangrijk is ook de stijfheid van de verbinding tussen de benen en de fundering. Indien de verbinding van de benen met de bodem deels ingeklemd is met een bepaalde rotatieveerstijfheid, dan wordt de stijfheid van het geheel beter. Dit is weergegeven in onderstaande Figuur 10 op de volgende bladzijde. Dynamica van het geheel door de golven dient daarbij ook beschouwd te worden, aangezien deze de verbinding kunnen beïnvloeden door het versoepelen van de grond. Dit effect is vergelijkbaar met drijfzand waarbij de benen de bodem continu roeren.



Figuur 10: Oplegging van spuds met de bodem van Jack-Up platform [17]

Daarnaast zijn de benen, ook wel spuds genaamd, een belangrijke en soms beperkende factor van jack-up platformen. Alle lasten worden immers overgedragen naar de spuds, welke ze overbrengen naar de bodem. De spuds worden meestal gefabriceerd uit vakwerken voor zeer lange spuds of cilindervormige kokers. Het optredende moment als gevolg van de horizontale wind- en golfkrachten op de structuur is belangrijk. Een vakwerk neemt horizontale krachten op door bepaalde delen in trek en andere in druk te laten werken.

Voor het gebruik van deze jack-up-platforms is het dus belangrijk enkele controles te doen. De belangrijkste controles zijn:

- 1) inzinking van de spuds en geometrie van het geheel;
- 2) stabiliteit tegen kantelen als gevolg van windkracht en golf- en stromingsbelasting;
- 3) sterkte van de funderingen;
- 4) structurele stabiliteit van de spuds, verbindingen en de romp.

2.1.3 Backhoe dredgers

Een *backhoe dredger* is een baggertuig, bestaande uit een graafkraan die vast op een ponton gemonteerd is en op die manier baggerwerken op een beperkte diepte kan uitvoeren [11]. Het zijn hydraulische graafkranen met een grote bak die vast op een ponton worden gebouwd, zoals voorgesteld in Figuur 11 op de volgende bladzijde. Met de stationaire kraan die op een ponton wordt gemonteerd op een rotatietafel kan het gebaggerde materiaal in een naastgelegen slijtbak gedropt worden. Het woord *backhoe* is afgeleid van het feit dat de kraan graaft door de aarde achterwaarts te trekken in plaats van voorwaarts te scheppen.



Figuur 11: Backhoe dredger Minan Sinan [12]

Backhoe dredgers worden tegenwoordig veelvuldig gebruikt naast traditionele baggerwerktuigen die de baggerspecie hydraulisch verpompen. De graafkranen kunnen afhankelijk van hoe ze geconfigureerd zijn, toch op dieptes tot 20 meter baggeren. Er dient wel bemerkt te worden dat hoe langer de kraan geconfigureerd wordt, des te kleiner de inhoud van de bak of *bucket* zal zijn. Het grote voordeel van *backhoe dredgers* is dat ze in vergelijking met sleephopperzuigers en cutterzuigers goed manoeuvreerbaar zijn en ook mede dankzij hun geringe diepgang ideaal inzetbaar zijn op verdiepingswerken in rivieren of havens.

Sommige *backhoe dredgers* zijn zelfvoortstuwend waardoor ze mobieler zijn tussen de verschillende werkplekken op eenzelfde project. Indien *backhoes* over grote afstanden gemobiliseerd worden naar andere projecten, gebeurt de verplaatsing met sleepboten. De pontons zijn tevens ook uitgerust met spudpalen om het geheel uit het water te tillen of het geheel op zijn locatie te houden. Het graven veroorzaakt namelijk horizontale reacties op de bucket, die volledig worden doorgegeven op de spuds.

2.2 Soorten mobiele kranen

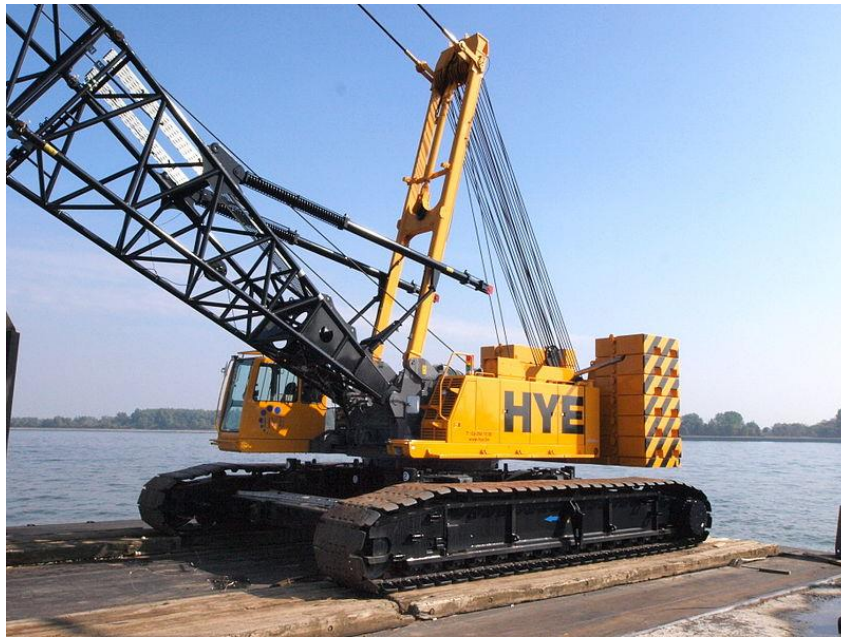
Mobiele kranen zijn er in zeer veel verschillende uitvoeringen. Ten opzichte van vaste kranen hebben ze het grote voordeel dat ze altijd kunnen gebruikt worden op de plaats waar ze nodig zijn. Ze kunnen meestal zeer snel verplaatst worden en de opbouwtijd is beperkt. Mobiele kranen zijn er in diverse maten en gewichten, elk met hun eigen voor- en nadelen. De giek van een mobiele kraan kan een telescoopgiek zijn, waardoor deze snel ingeschoven kan worden en heel compact is. Daarnaast kan de giek ook gebouwd zijn uit een vakwerk, welke over het algemeen sterker is maar minder mobiel. De kraan zelf kan gebouwd zijn op een onderstel van wielen of rupsen. Er zijn veel verschillende soorten mobiele kranen zoals kranen die op een kleine vrachtwagen gemonteerd staan of verreikers, maar hun hijscapaciteit is eerder beperkt [18]. In de bouwindustrie wordt veelal gebruik gemaakt van twee types mobiele kranen.

Het eerste type veelgebruikte mobiele kraan is een telescoopkraan, waarvan een voorbeeld van Liebherr in onderstaande Figuur 12 is weergegeven. Een telescoopkraan is één van de meest voorkomende mobiele kranen en bestaat uit een telescoopgiek die kan uitschuiven. De volledige kraan is op een vrachtwagen met wielen gebouwd zodat deze snel en makkelijk kan verplaatst worden. De telescoopkraan is voor vrijwel elk terrein geschikt en heeft het grote voordeel dat ze ook over de weg mogen rijden. De grootste telescoopkranen kunnen tot wel 1300 ton hijsen. Nadelig is dat een telescoopkraan steeds steunpoten nodig heeft om lasten te tillen. De reden hiervoor is dat de wielen kort bij elkaar staan en zo de voetafdruk van de kraan in de breedterichting te klein is. Daarnaast staat de kraan op een geveerd onderstel om over de weg te rijden. Hierdoor gaat de kraan al gedeeltelijk kantelen wanneer deze lasten tilt zonder extra steunpoten.



Figuur 12: Telescoopkraan Liebherr [3]

Een ander type mobiele kraan is een rupskraan, beter bekend als een *crawler crane*. In Figuur 13 op de volgende bladzijde is de Hitachi SCX-2800 rupskraan afgebeeld. Een rupskraan staat vanzelfsprekend op een onderstel van rupsen. De giek kan zowel gebouwd zijn als een telescoop of een vakwerk. Het voordeel van rupskranen is dat ze op alle terreinen inzetbaar zijn en ze geen steunpoten nodig hebben door de grote voetafdruk. Een nadeel is dat ze steeds met vrachtwagens dienen vervoerd te worden. De twee hijskranen die HYE nv gebruikt op zijn pontons zijn van dit type rupskraan.

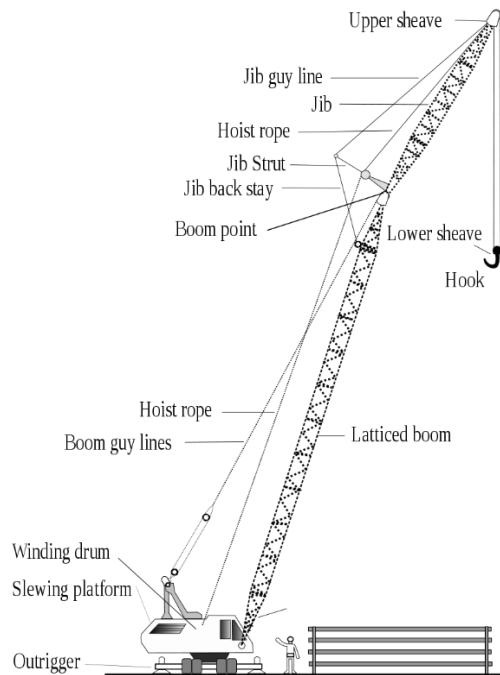


Figuur 13: Hitachi SCX-2800 van HYE nv [19]

Mobiele kranen zijn speciaal omdat ze een andere evenwichtssituatie hebben dan torenkranen. De ballast van een mobiele kraan hangt aan de grond en de giek kan op- of aftoppen. Een torenkraan daarentegen heeft een vaste opbouw waarbij enkel de kraan zelf om zijn as kan draaien. Afhankelijk van de positie van de last verandert het zwaartepunt. De stabiliteit van mobiele kranen wordt dus vooral bepaald door de kantelhoek. Meestal wordt aangenomen dat 75% van de last mag getild worden alvorens de kraan zou kantelen.

2.3 Opbouw van een rupskraan

Een rupskraan met een vakwerkgiek bestaat uit verschillende onderdelen. De kraan zelf bestaat enerzijds uit het onderstel met de rupsen en daarboven de kraan zelf op een rotatie-as. De giek bestaat in het geval van de kranen van HYE nv uit een vakwerk. Soms bestaat het vakwerk uit *boom* en een kleiner *jib* erbovenop met een scharnierpunt tussen. Het voordeel hierbij is dat de hellingshoek van de hoofdgiek beperkt blijft terwijl er met de *jib* toch een grotere afstand van de kraan tot de last, vlucht genaamd, kan bereikt worden. Over de giek lopen meerdere kabels over en weer, die opgewonden worden op een trommel. Figuur 14 op de volgende bladzijde geeft de opbouw van een rupskraan schematisch weer. De Hitachi SCX-2800 rupskraan die HYE nv in gebruik heeft, is niet voorzien van een *jib*, en heeft dus enkel een hoofdgiek.



Figuur 14: Opbouw crawler crane [20]

2.4 Stabiliteit van mobiele kranen

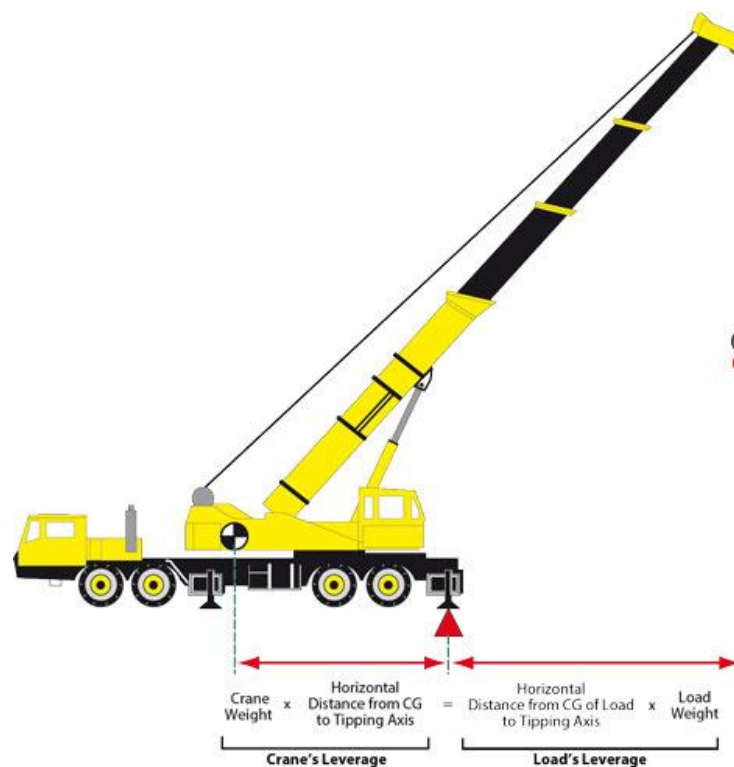
Van alle meest voorkomende ongevallen met kranen, zijn kantelgevallen de meest voorkomende [22]. Bij het kantelen wordt er geen last gedragen door de achterzijde van de kraan en zal deze loskomen van de grond zoals weergegeven in Figuur 15. Een veel voorkomende oorzaak is dat de kraanoperatoren de richtlijnen van de fabrikanten niet volledig volgen. Eén van de belangrijkste richtlijnen zijn de laadtabels van de kranen die worden opgesteld door de fabrikant. In paragraaf 2.4.2 zullen deze hijstabels besproken worden. Hierin kan teruggevonden worden wat de maximale last is dat een kraan mag tillen. De beste manier om een kantelongeval te voorkomen is om nooit méér te tillen dan toegelaten wordt door de fabrikant. Een extra methode is om steeds de initiële hijsoperatie te doen vanuit de minst stabiele richting en de last dan naar de stabiele richting te zwenken. Een stabiliteitsstudie van kranen is dus belangrijk om ongevallen te voorkomen. In deze paragraaf worden de belangrijkste stabiliteitsaspecten voor kranen besproken.



Figuur 15: Kantelen van kraan [21]

2.4.1 Zwaartepunt en hefboom

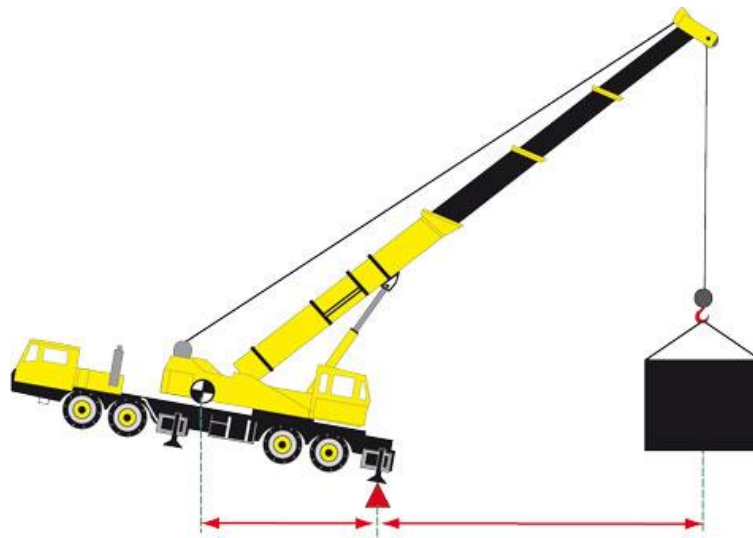
De zwaartekracht zorgt ervoor dat elk object een bepaalde massa heeft. De zwaartekracht kan voorgesteld worden door een puntlast die aangrijpt in het zwaartepunt van het object. Het zwaartepunt van een object is het massamiddelpunt en wordt gebruikt om het gewicht van het object voor te stellen. Rond dit zwaartepunt is de massa van het object gelijk verdeeld, waardoor het object in evenwicht is als het enkel op het zwaartepunt een ondersteuning zou hebben. Het zwaartepunt van de kraan zelf zonder giek is vast en vastgelegd door de fabrikant. Het totale zwaartepunt van de kraan met giek hangt af van de positie van de giek. Via een momentevenwicht is het zwaartepunt dan te berekenen. De afstand van het zwaartepunt van de kraan tot de voorste ondersteuning vermenigvuldigt met het gewicht van de kraan is de hefboom van de kraan. Dit is weergegeven in onderstaande Figuur 16.



Figuur 16: Zwaartepunt van de kraan [22]

De stabiliteit van mobiele kranen berust op het principe van balans door het gebruik van een hefboom. Wanneer de hefboom van de belasting even groot zou zijn als de kraanhefboom, zou er geen enkel gewicht meer gedragen worden door de achterste ondersteuning. Wanneer de last iets groter zou zijn of de vlucht van de last zou groter worden door bijvoorbeeld de wind, kan de achterzijde van de kraan loskomen van de grond en kan de kraan kantelen, zoals weergegeven in Figuur 17 op de volgende bladzijde. Dit is onveilig en dient dus vermeden te worden. Daarom wordt er vanuit gegaan dat de kraan altijd een gedeelte van het gewicht op zijn achterste ondersteuning dient te dragen.

Het percentage van de kantellast wordt vastgelegd in normen. In paragraaf 2.5 wordt dit verder besproken.



Figuur 17: Loskomen achterzijde van de kraan bij te grote last [22]

2.4.2 Hijstabbellen

De maximale last die een kraan mag tillen, wordt weergegeven in de hijstabbellen en zijn afhankelijk van de werkstraal waar de last wordt opgetild en de lengte van de giek. Onderstaande Tabel 1 geeft als voorbeeld de hijstabel weer van een rupskraan Hitachi SCX-2800.

Tabel 1: Hijstabel Hitachi SCX-2800 [23]

Boom length (m) Working radius (m)	15.25	18.30	21.35	24.40	27.45	30.50	33.50	36.55	39.65	42.65	45.70	48.75	51.80	54.85	57.90	60.95	64.00
4.3	275.0																
4.5	269.4	243.0/4.8															
5.0	244.3	242.4	216.0/5.2														
5.5	223.5	223.3	215.1	215.2/5.7													
6.0	205.8	205.6	205.3	204.9	189.0/6.1	162.0/6.6											
7.0	177.6	177.3	177.0	176.6	176.3	162.0	148.5	135.0/7.5									
8.0	155.9	155.7	155.4	155.1	154.8	154.6	147.8	134.8	120.8	121.5/8.4	108.0/8.9						
9.0	138.8	138.6	138.3	138.0	137.6	136.8	132.8	130.5	119.8	121.5	108.0	94.5/9.3	93.2/9.8				
10.0	125.0	124.8	124.5	124.1	123.9	121.0	117.6	116.0	113.0	110.0	107.4	94.5	93.0	81.0/10.2	78.3/10.7	67.5/11.1	65.6/11.8
12.0	102.0	102.2	102.1	102.0	100.1	97.8	95.4	94.6	92.5	90.3	88.4	86.5	84.5	81.0	77.5	67.5	65.4
14.0	81.9	82.0	81.9	81.7	81.5	81.5	79.9	79.6	77.9	76.1	74.7	73.2	71.6	70.3	68.9	67.5	64.5
16.0	75.1/14.9	68.0	67.9	67.8	67.6	67.5	67.3	68.4	67.0	65.6	64.5	63.2	61.9	60.7	59.7	58.6	57.4
18.0		59.8/17.6	57.7	57.6	57.4	57.3	57.0	58.2	58.0	57.4	56.5	55.4	54.2	53.2	52.4	51.5	50.4
20.0			50.0	49.9	49.7	49.5	49.3	50.4	50.2	49.9	49.7	49.1	48.1	47.2	46.5	45.7	44.7
22.0			49.5/20.2	43.9	43.6	43.5	43.2	44.2	44.0	43.7	43.6	43.4	43.0	42.2	41.5	40.9	40.0
24.0				41.8/22.8	38.7	38.5	38.2	39.3	39.0	38.7	38.7	38.4	38.1	37.9	37.5	36.9	36.0
26.0					35.7/25.5	34.5	34.2	35.2	35.0	34.7	34.5	34.3	34.0	33.8	33.7	33.4	32.7
28.0						31.2	30.8	31.8	31.6	31.2	31.2	30.9	30.6	30.3	30.2	30.0	29.7
30.0						31.0/28.1	28.0	29.0	28.7	28.3	28.2	28.0	27.7	27.4	27.2	27.1	26.7
32.0							27.0/30.8	26.5	26.2	25.8	25.7	25.5	25.2	24.9	24.7	24.6	24.2
34.0								25.0/33.4	24.1	23.7	23.6	23.3	23.0	22.7	22.6	22.3	22.1
36.0									22.2	21.8	21.7	21.4	21.1	20.8	20.7	20.5	20.1
38.0										20.2	20.0	19.7	19.3	19.1	19.0	18.7	18.4
40.0										19.7/38.7	18.5	18.2	17.8	17.6	17.5	17.2	16.9
42.0											17.7/41.3	16.9	16.6	16.2	16.1	15.8	15.6
44.0												15.8	15.3	15.1	14.9	14.6	14.3
46.0													14.3	14.0	13.8	13.6	13.2
48.0													14.1/46.6	13.0	12.8	12.6	12.2
50.0														12.2	12.0	11.6	11.3
52.0															11.2/51.9	10.8	10.5
54.0																10.1	9.7
56.0																9.9/54.5	9.0
58.0																	8.6/57.2

Uit deze tabel is af te lezen dat wanneer de last heel kort bij de kraan getild wordt, de kraan tot 275 ton kan tillen. Wanneer er echter getild wordt met de langste giek op de verst mogelijke locatie is dit maar 9 ton meer.

2.5 Normen voor mobiele kranen

Het ontwerp en gebruik van mobiele kranen in Europa is gereguleerd door enkele Europese normen en richtlijnen. De belangrijkste technische voorschriften voor binnenvaartuigen, die enkel op rivieren en kanalen gebruikt worden, worden besproken in de Europese richtlijn 2006/87/EG. Deze richtlijnen zijn vooral van toepassing op de stabiliteitstesten die uitgevoerd moeten worden alvorens een schip in dienst te stellen. Alsook beschrijft deze richtlijn de maximale waardes van *trim* en *heel* voor de verschillende vaartuigen. Deze zijn minder van toepassing op kranen, maar dienen ook in acht genomen te worden bij het gebruik van kranen op pontons.

Daarnaast is er de Europese norm EN13000 die de diverse eisen specificeert waaraan mobiele hijskranen moeten voldoen. De norm EN13000 is een heel uitgebreide norm die ook de hijstoebehoren zoals haken en kabels beschouwd en ook eisen stelt aan de cabine voor de operator. In dit document wordt verwezen naar de ISO 4305 norm. ISO is de International Organisation for Standardisation en publiceert normen die wereldwijd gehanteerd mogen worden. In onderstaande Figuur 18 is het percentage weergegeven van het kantelgewicht dat een kraan mag tillen. Voor een rupskraan is dit vastgelegd op 75 %.

Type of crane mounting	Maximum load ratings (percent of tipping loads)
Locomotive, without outriggers:	
Booms 60 feet or less	(1) 85
Booms over 60 feet	(1) 85
Locomotive, using outriggers fully extended...	80
Crawler, without outriggers.....	75
Crawler, using outriggers fully extended.....	85
Truck and wheel mounted without outriggers or using outriggers fully extended.....	85

Figuur 18: Maximum percentage van kantelgewicht [22]

Als laatste is ook Eurocode 7 van toepassing op het ontwerp en gebruik van kranen. Eurocode 7 is een norm die de stabiliteit van de ondergrond verzekert. Grote kranen worden opgehesen op poten om zo een grotere voetafdruk te hebben. Echter geven deze poten een zeer geconcentreerde last, waardoor een zwakke ondergrond zwaar kan samendrukken. De studie van de ondergrond behoort echter niet tot deze thesis, aangezien de kranen vooral op een ponton gebruikt worden met een stijf en vlak dek.

2.6 Richtlijnen voor gebruik op pontons

Normaal gezien wordt een mobiele kraan gebruikt op een stabiele en vlakke ondergrond. De fabrikant van de kranen schrijft de hijstabel dan ook voor ervan uitgaande van een stabiele en vlakke ondergrond. Echter is een ponton geen stabiele en vlakke ondergrond. Wanneer de belasting op een ponton verandert, zal het ponton in verschillende richtingen hellen. Door dit hellen zal de vlucht, of de afstand van de last tot de rotatie-as van de kraan, veranderen. Het is dan ook belangrijk dat de lastentabel aangepast wordt aan het gebruik op een ponton.

Ook dient er rekening mee gehouden te worden dat de kraan niet van het pontondek zal afschuiven wanneer het ponton *trim* en/of *heelt*. Hierdoor wordt er voorgeschreven dat de *trim* en *heel* nooit hoger mag zijn dan 5° wanneer een mobiele kraan op een ponton wordt geplaatst [5]. Er dient op het ponton steeds een inclinometer aanwezig te zijn om de hellingshoek te kunnen meten. Hitachi heeft voor het gebruik van de SCX_2800 rupskraan op pontons een document “Rated loads on barge (EN rating)” [24] gepubliceerd waar de beperkingen worden opgelegd wanneer de kraan gebruikt wordt op een ponton. In dit document zijn de hijstabellen vastgelegd voor de kraan die onder een bepaalde hellingshoek gebruikt wordt. Hitachi schrijft voor dat de kraan mag gebruikt worden tot een hellingshoek van 3°. Er is ook vastgelegd dat de gieklenkte beperkt is tot 64 m voor gebruik van de kraan op pontons, terwijl de maximale gieklenkte op het land gelijk is aan 91 m. Daarnaast wordt gesteld dat de kraan nooit mag gebruikt worden op een ponton bij ogenblikkelijke windsnelheden hoger dan 10 m/s of 36 km/h.

Een voorbeeld hijstabel van de SCX-2800 voor een gieklenkte van 30,48 m is in Tabel 2 op de volgende bladzijde weergegeven.

Tabel 2: Hijstabel Hitachi SCX-2800 met 30,48 m giek op ponton [24]

Unit ; t

Boom Length (m)	30.48			
Working Radius (m)	List Angle 0 deg	List Angle 1 deg	List Angle 2 deg	List Angle 3 deg
6.0	162.0 /6.6			
7.0	162.0	153.2 /7.1	110.9 /7.6	
8.0	154.6	138.2	110.5	84.0 /8.2
9.0	136.8	124.6	109.4	84.0
10.0	121.0	113.4	104.0	83.7
12.0	97.8	95.8	89.1	82.4
14.0	81.5	80.8	77.8	72.8
16.0	67.5	66.9	66.4	64.0
18.0	57.3	56.8	56.4	56.0
20.0	49.5	49.1	48.7	48.4
22.0	43.5	43.1	42.8	42.5
24.0	38.5	38.2	37.9	37.7
26.0	34.5	34.2	34.0	33.8
28.0	31.2	31.0	30.8	30.7
30.0	31.0 /28.1	30.8 /28.1	30.6 /28.1	30.5 /28.1

Hierin is te zien dat voor bijvoorbeeld een werkingsstraal van 10 m de maximale last bij een helling van 0° gelijk is aan 121 ton, en bij een helling van 3° maar 83,7 ton. Dit is een drastische vermindering ten opzichte van de originele hijscapaciteit en kan soms zorgen dat een opdracht niet kan doorgaan. De reden voor de sterke vermindering is vooral uit veiligheidsoverwegingen, aangezien de kraan al een initiële helling krijgt naar zijn kantellijn. De vlucht zal bij een hellingshoek van 3° niet drastisch vermeerderen.

3 LITERATUURSTUDIE - SCHEEPSSTABILITEIT

Scheepsstabiliteit is een vakgebied binnen de *naval architecture* waar de stabiliteitsvoorwaarden van vaartuigen uitgebreid aangekaart worden. Omdat het toepassingsgebied voor veel vaartuigen verschillend is, zijn de evaluatiecriteria voor de stabiliteit afhankelijk van het type vaartuig. Binnen deze thesis wordt er een onderzoek verricht naar de stabiliteit van pontons waarop hijs- of baggerwerkzaamheden worden uitgevoerd. Omdat hijsen op pontons een vrij delicate operatie is, dient de stabiliteit van de vaartuigen ten alle tijden geverifieerd te worden. Stabiliteitsaspecten van de pontons worden gelinkt aan de invloed van de mobiele kranen. Ook valt er te bemerken dat alle werkzaamheden worden uitgevoerd in binnenwaterwegen. Hierdoor zal de factor van golfslag, of deining genaamd, amper een rol spelen en wordt enkel het aspect rond statische scheepsstabiliteit behandeld. Deze idealisatie kan echter niet gemaakt worden voor vaartuigen die offshore hijsoperaties uitvoeren. Hier ondervinden de schepen wel enige invloed van golven en zijn de dynamische aspecten van de stabiliteit wel doorslaggevend.

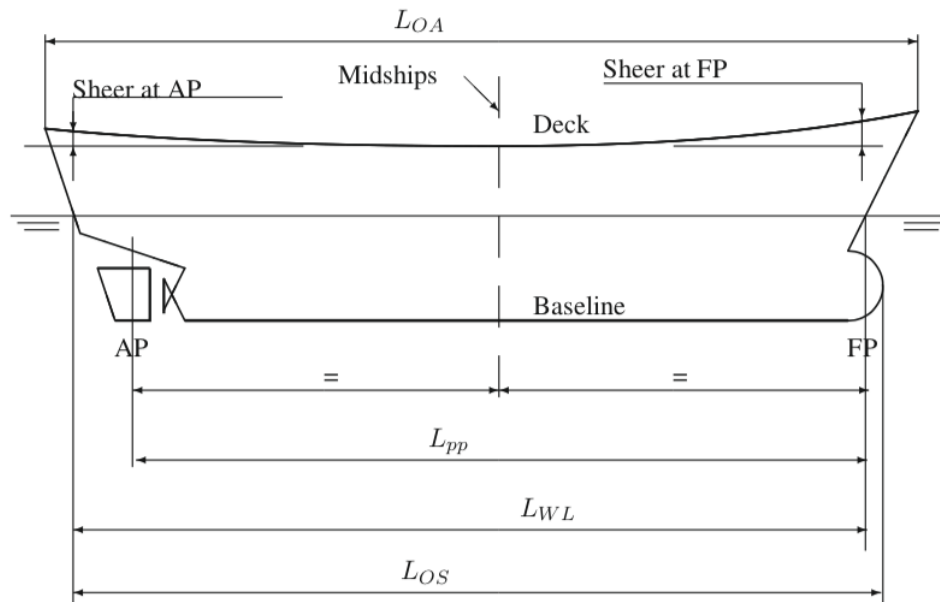
3.1 Geometrie van een vaartuig: Algemene definities

In de scheepsstabiliteitstheorie worden vele specifieke termen gebruikt. Aangezien deze de basis vormen voor de kennis van scheepsstabiliteit, dienen deze duidelijk te zijn om ze toe te passen. De voertaal voor deze termen is meestal Engels, daarom is het belangrijk de gebruikte termen en symbolen te verduidelijken.

Alle symbolen en benamingen die betrekking hebben op de geometrie van vaartuigen worden hier verduidelijkt en grafisch weergegeven in Figuur 19 en 20 op de volgende bladzijde:

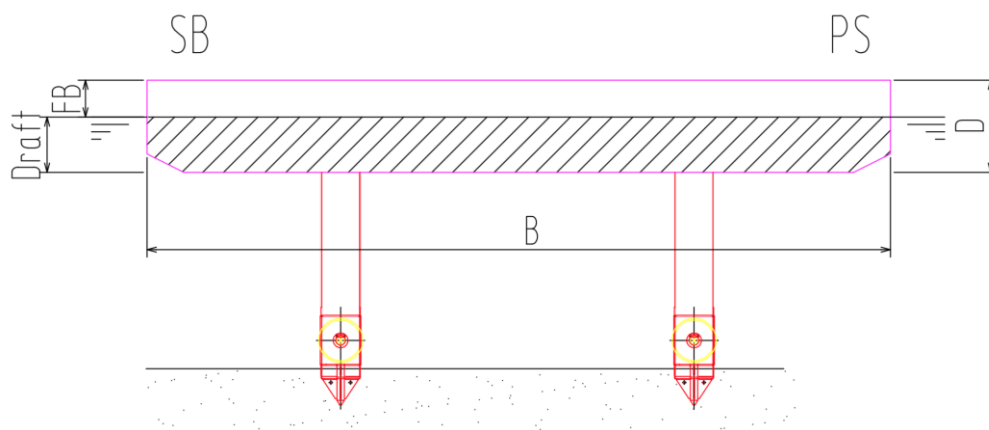
- *Aft*: de achterzijde van het vaartuig;
- *Midship*: het midden van het vaartuig;
- *Fore*: de voorkant van het vaartuig;
- Globale lengte (*Length overall* = L_{OA}): de grootste lengte in langsricting van het schip;
- Lengte tussen loodlijnen (*Length between perpendiculars* = L_{BP}): lengte tussen de voor- en achterloodlijn. De achterloodlijn is de loodlijn door de rotatie-as van het roer. Aangezien bij een ponton geen roer aanwezig is, wordt deze gelijk genomen aan de achtersteven.
- Lengte waterlijn (*Waterline length* = L_{WL}): horizontale afstand tussen de voor- en achterzijde van het schip ter hoogte van de waterlijn;

- Holte ($Depth = D$): verticale afstand tussen de basislijn aan de onderzijde van het schip (kiel) en het doorlopende dek bovenaan;
- Diepgang ($Depth\ of\ draught = T$): verticale afstand tussen kiel en de waterlijn in het midden van het schip gemeten;



Figuur 19: Geometrie volgens langsrichting

- SB (*Star board side*): stuurboordzijde;
- PS (*Port side*): bakboordzijde;
- Breedte ($Breath = B$): de grootste breedte van het schip in dwarsrichting;
- Vrijboord ($Freeboard = FB$): verticale afstand tussen de waterlijn en het hoogst doorlopende dek, gemeten aan de zijkant ter hoogte van $LBP/2$.



Figuur 20: Geometrie volgens dwarsrichting

3.2 Stabiliteit van een vaartuig

Voor elk vaartuig moet de stabiliteit gegarandeerd worden alvorens het te water gelaten wordt. De stabiliteit van een vaartuig is afhankelijk van zijn drijfvermogen, wat ervoor zorgt dat het vaartuig met een aanvaardbare diepgang rechtop kan blijven. Het stabiliteitsprincipe van een vaartuig berust op de gelijkheid tussen het totale gewicht en de opwaartse kracht. Daarnaast moet een vaartuig in staat zijn om zichzelf weer in een stabiele positie te brengen nadat er een evenwichtsuitwijking plaatsvond door middel van externe factoren. Het richten van een vaartuig naar zijn evenwichtspositie wordt in gang gezet door middel van een richtend koppel. De werking van deze stabiliteitsaspecten wordt in deze paragraaf uitvoerig beschreven.

3.2.1 Gewichten en waterverplaatsing

Een eerste aspect dat behandeld dient te worden, is de bepaling van het gewicht van een vaartuig. Het totale gewicht van een vaartuig is de som van alle gewichten die aanwezig zijn op het betreffende vaartuig. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee hoofdcategorieën, namelijk het *lightship* gewicht en het *deadweight*.

Lightship gewicht en *Deadweight*

Het gewicht van het schip zonder enige externe belastingen wordt beschreven als het *lightship* gewicht. Alles wat niet verplaatsbaar is of vast staat op het vaartuig valt onder het *lightship* gewicht. Alle externe massa's die worden aangebracht op het schip kunnen geclassificeerd worden onder *deadweight*. Dit omvat alles wat niet vast staat op een vaartuig.

Waterverplaatsing

Het totale gewicht van een vaartuig wordt omschreven als de totale vloeistofverplaatsing en is gelijk aan de som van het *lightship* gewicht en het *deadweight*. Het begrip vloeistofverplaatsing, meestal omschreven als waterverplaatsing, wordt gebruikt omwille van de wet van Archimedes. Hierin wordt er gesteld dat het totaal gewicht van een voorwerp dat zich in een vloeistof bevindt, gelijk is aan het gewicht van het volume vloeistof dat verplaatst is ten gevolge van de inwerking van het voorwerp. De waterverplaatsing wordt in stabiliteitsberekeningen vaak weergegeven als *DISP* wat voor *displacement* staat, met als eenheid ton.

$$DISP[ton] = V \cdot \rho$$

Met: V Het volume van de verplaatste vloeistof, in m^3
 ρ De massadichtheid van de verplaatste vloeistof, in t/m^3

Voor vaartuigen in zoetwater is de massadichtheid gelijk aan $\rho = 1 \text{ t/m}^3$. Indien schepen zich in zoutwater bevinden, verschilt deze waarde. Dan is de massadichtheid gelijk aan $\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$. Dit impliceert dat de diepgang van een vaartuig in zoetwater groter is dan in zoutwater voor hetzelfde gewicht. De pontons van HYE nv worden voornamelijk gebruikt in binnenwateren waar zoet- of lichtjes brakwater aanwezig is. Hiervoor wordt de massadichtheid van $\rho = 1 \text{ t/m}^3$ gehanteerd.

Zoals eerder is aangegeven, is de waterverplaatsing ook gelijk aan de som van *lightship* gewicht en *deadweight*:

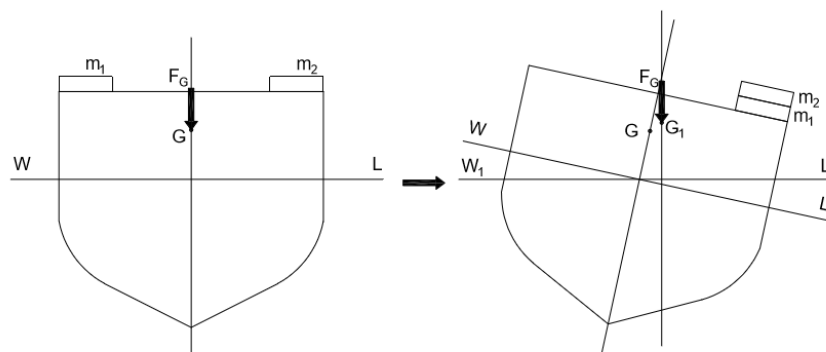
$$DISP [\text{ton}] = \text{lightship gewicht} + \text{deadweight}$$

De waterverplaatsing is een belangrijk begrip binnen de stabiliteitstheorie omdat het een uitgangspunt is voor alle berekeningen omtrent de stabiliteit.

3.2.2 Zwaartepunt

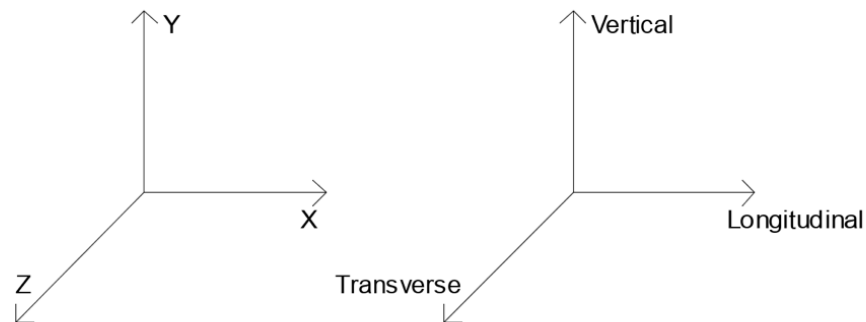
De plaats waar het gewicht van een voorwerp aangrijpt, wordt omschreven als het zwaartepunt van het betreffende voorwerp. Elk voorwerp op een vaartuig heeft zijn eigen zwaartepunt. Daarom wordt er op zoek gegaan naar het resulterende zwaartepunt van het vaartuig. Dit punt wordt voor alle berekeningen aangeduid met het symbool G wat voor *centre of gravity (COG)* staat en is dus het punt waar het totale gewicht zal aangrijpen.

De exacte ligging van G is volledig afhankelijk van de lastenverdeling op het vaartuig. De positie van G is vast voor een bepaalde lastenverdeling en verschuift niet als er een inzakking is. Indien er door een bepaalde inzakking lasten worden verplaatst, dan zal de lastenverdeling ook veranderen en verschuift punt G wel. In onderstaande situatie, afgebeeld in Figuur 21, heeft een vaartuig twee massa op zijn dek liggen (m_1 en m_2), door de verplaatsing van een massa, is de lastenverdeling veranderd en is punt G verschoven naar G_1 .



Figuur 21: Verschuiving van zwaartepunt G

De ligging van het zwaartepunt wordt berekend op basis van een gekozen assenstelsel. Er wordt binnen deze thesis niet gerekend met het klassieke x,y,z- assenstelsel, wel wordt het zwaartepunt bepaald in de langsrichting of longitudinale richting, de verticale richting en de transversale richting zoals is weergegeven op onderstaande Figuur 22.

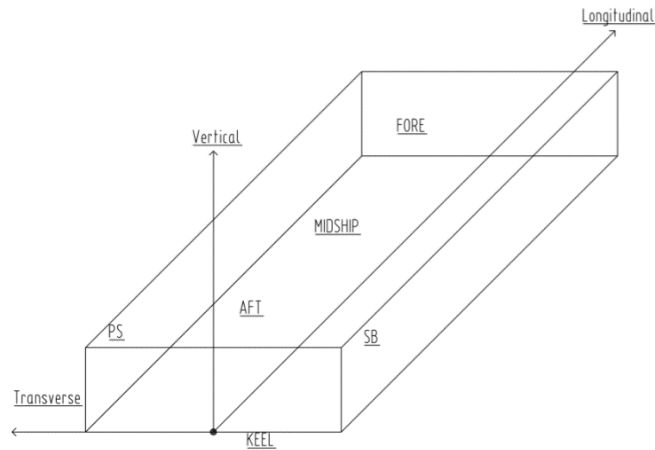


Figuur 22: Gehanteerde conventie assenkruis en benaming

De exacte plaats van G wordt bepaald aan de hand van drie afstanden, namelijk VCG, LCG en TCG. Hiervoor dient de plaats van de oorsprong van het assenstelsel bepaald te worden en eenduidig gehanteerd te worden doorheen de volledige stabiliteitsbepaling.

- VCG is de verticale afstand, vertrekkend van de oorsprong van het assenstelsel tot aan de verticale locatie van het zwaartepunt.
- LCG is de longitudinale afstand, of de afstand volgens de langsrichting van het vaartuig, vertrekkend vanaf de oorsprong van het gekozen assenstelsel tot aan de longitudinale locatie van het zwaartepunt.
- TCG is transversale afstand, vertrekkend van de oorsprong van het assenstelsel tot aan de transversale locatie van het zwaartepunt.

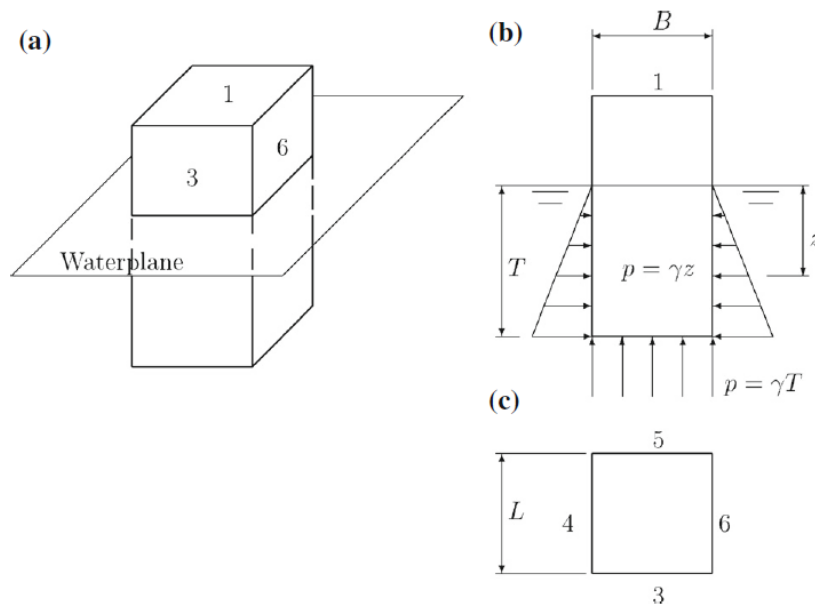
De oorsprong van het assenstelsel wordt gekozen aan de achterzijde van het vaartuig, ter hoogte van de kiel en gelegen op de centrale as. De longitudinale zin wordt positief beschouwd voorbij de achterzijde, gericht naar de voorkant. De verticale zin is positief voor alle punten die boven de kiel gelegen zijn. De transversale zin is positief naar bakboord toe, ook wel Port Side (PS) genoemd. Bakboord is de linkerzijde van het ponton wanneer gekeken wordt van de achtersteven naar de voorsteven. Het assenstelsel is voorgesteld in Figuur 23 op volgende bladzijde voor een vereenvoudigd balkvormig ponton.



Figuur 23: Gehanteerd assenstelsel afgebeeld op eenvoudig ponton

3.2.3 Opwaartse kracht

Veronderstel een voorwerp dat is ondergedompeld in een bepaalde vloeistof. Op het deel van het voorwerp dat zich onder het wateroppervlak bevindt, wordt een hydrostatische druk uitgeoefend. De hydrostatische druk werkt altijd loodrecht op alle delen van het ondergedompelde voorwerp (Figuur 24)



Figuur 24: Hydrostatische druk op een ondergedompeld lichaam [34, p. 26]

Deze hydrostatische druk zal resulteren in een verticale kracht die omhoog gericht is, namelijk de opwaartse kracht. Om een drijvend voorwerp in evenwicht te houden, moet er aan de wet van Archimedes voldaan worden. De opwaartse kracht moet namelijk gelijk zijn aan het gewicht van het voorwerp, dat op zijn beurt weer gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof. Dit wordt echter verduidelijkt eens het verticale evenwicht aangekaart zal worden.

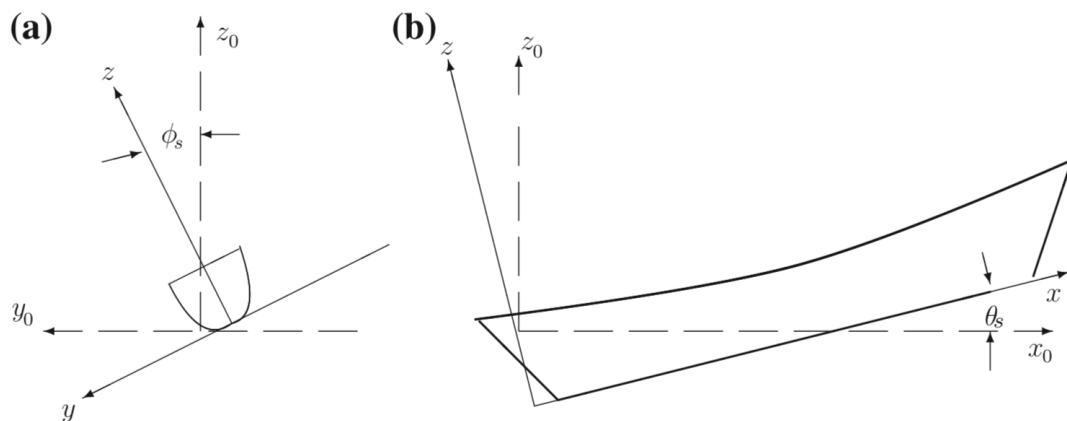
3.2.4 Drukkingspunt van de opwaartse kracht

Het punt waar de opwaartse kracht aangrijpt, is het zwaartepunt van het onderwatervolume. Dit zwaartepunt is gelegen in het volumetrisch centrum van het deel dat onder het watervlak ligt. Het drukkingspunt wordt aangeduid met punt B, wat voor *Buoyancy* of drijfvermogen staat. De exacte ligging van punt B wordt gegeven door de longitudinale, verticale en transversale afstand van punt B tot aan de gekozen oorsprong van het assenstelsel. Hier wordt er een onderscheid gemaakt tussen de volgende afstanden:

- VCB is de verticale afstand, vertrekkend van de oorsprong van het assenstelsel tot aan de verticale locatie van het drukkingspunt.
- LCB is de longitudinale afstand of de afstand volgens de langsrichting van het vaartuig, vertrekkend vanaf de oorsprong van het gekozen assenstelsel tot aan de longitudinale locatie van het drukkingspunt.
- TCB is transversale afstand, vertrekkend van de oorsprong van het assenstelsel tot aan de transversale locatie van het drukkingspunt.

3.2.5 Trim, list en heel

Het resulterende zwaartepunt van een vaartuig zal echter nooit perfect in het centrum gelegen zijn. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat het zwaartepunt en het drukkingspunt initieel niet op dezelfde werklijn liggen. Het vaartuig zal dus onder een bepaalde helling komen te liggen, volgens de longitudinale richting, transversale richting of beide zoals voorgesteld in onderstaande Figuur 25.



Figuur 25: Visualisatie heel (slagzij) en trim [34, p.11]

Trim

Wanneer een vaartuig een helling ondergaat volgens de langsrichting wordt er gesproken van *trim*. *Trim* wordt uitgedrukt in een lengte-eenheid (m) en wordt bepaald door het verschil in diepgang aan de achterloodlijn en diepgang aan de voorste loodlijn te berekenen.

$$Trim = Draft_{Fore} - Draft_{Aft}$$

Volgens de gehanteerde tekenconventie zal een positieve *trim* een grotere diepgang aan de voorzijde hebben en naar voor hellen. Een negatieve *trim* heeft een grotere diepgang aan de achtersteven, waardoor het vaartuig naar zijn achterzijde helt. *Trim* kan zowel worden uitgedrukt in een lengteafstand, zijnde het hoogteverschil tussen voor-en achtersteven. Maar *trim* kan ook als hellinghoek uitgedrukt worden indien de diepgang telkens gemeten is aan de loodlijnen van het vaartuig.

List, Heel

Een helling van het vaartuig volgens de dwarsrichting wordt omschreven als slagzij en wordt uitgedrukt als een hoek in graden (°). Er valt nog een onderscheid te maken tussen de begrippen *list* en *heel*.

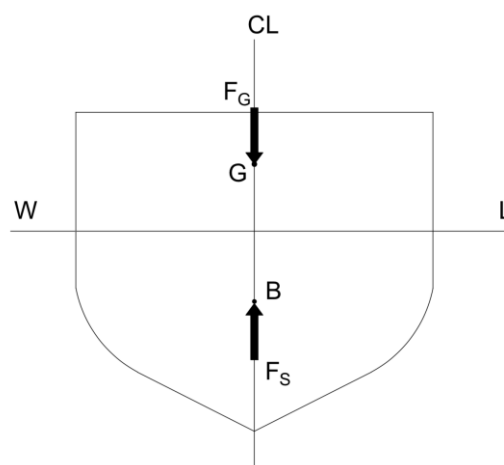
Wanneer slagzij wordt veroorzaakt doordat het zwaartepunt in transversale richting niet gelijk ligt met de centrale as van het vaartuig, wordt er gesproken van *list*. Indien het vaartuig een slagzij ondergaat door externe krachten, zal het drukingspunt een uitwijking ondergaan terwijl het zwaartepunt op dezelfde locatie blijft. Een slagzij die veroorzaakt wordt door de inwerking van externe factoren wordt omschreven als *heel*.

3.2.6 Verticaal evenwicht

Volgens de wet van Archimedes bevindt een drijvend lichaam zich in evenwicht wanneer de resultante van alle inwerkende krachten en momenten op het lichaam gelijk is aan nul. Dit wil zeggen dat het evenwicht bereikt is wanneer het volledige gewicht van het vaartuig gelijk is aan de opwaartse kracht. De evenwichtsvergelijking kan als volgt worden opgesteld en wordt voorgesteld in onderstaande Figuur 26.

$$F_g - F_s = 0$$

Met: F_g Het gewicht van het vaartuig, in kN
 F_s De opwaartse kracht die inwerkt op het vaartuig, in kN



Figuur 26: Verticaal evenwicht

De wet van Archimedes stelt ook dat het gewicht van het vaartuig gelijk is aan de totale waterverplaatsing en dat de opwaartse kracht op zijn beurt gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof. Hierdoor kan de evenwichtsvergelijking verder worden uitgewerkt:

$$g \cdot DISP - \rho \cdot g \cdot V = 0$$

Met: $DISP$ De initiële waterverplaatsing, in ton
 V Het initiële volume aan verplaatste vloeistof, in m^3
 g De valversnelling, in m/s^2
 ρ De massadichtheid van de vloeistof, in t/m^3

In bovenstaande vergelijking kan de valversnelling geschrapt worden en is de evenwichtsvoorwaarde bewezen:

$$DISP = \rho \cdot V$$

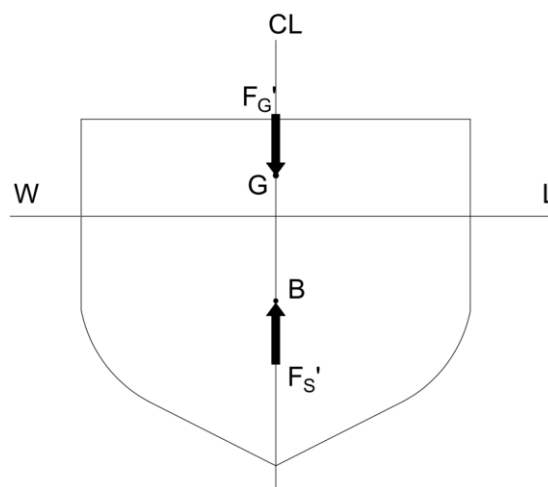
Indien er een extra massa aan het vaartuig toegevoegd wordt, zal er een nieuwe lastenverdeling ontstaan. Hierdoor wordt de waterverplaatsing groter en bijgevolg zinkt het vaartuig dieper in. Deze extra inzinking veroorzaakt een extra volume aan vloeistof dat er verplaatst wordt. Dit resulteert in een verandering van de evenwichtsvergelijking, zoals te zien in Figuur 27.

$$F_g' - F_s' = 0$$

$$g \cdot (DISP + \Delta DISP) - \rho \cdot g \cdot (V + \Delta V) = 0$$

$$DISP' = \rho \cdot V'$$

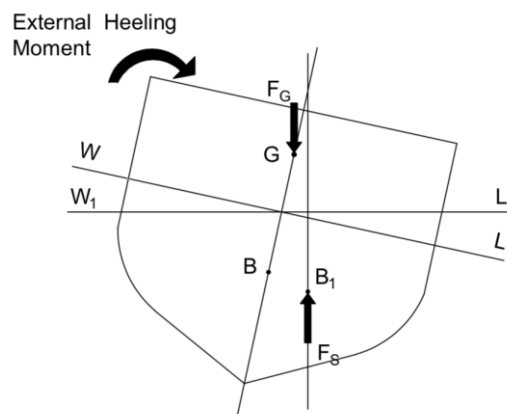
Met: F_g' Het nieuwe gewicht van het vaartuig, in kN
 F_s' De nieuwe opwaartse kracht, in kN
 $\Delta DISP$ De extra waterverplaatsing veroorzaakt door de extra last op het vaartuig, in ton
 ΔV Het extra volume aan verplaatste vloeistof veroorzaakt door de extra last, in m^3



Figuur 27: Invloed extra last op verticaal evenwicht

3.2.7 Oprichtend koppel

In de vorige gevallen is gebleken dat het zwaartepunt G en het drukingspunt B zich op dezelfde verticale werklijn bevinden en zo de evenwichtstoestand verkregen is. Wanneer er ten gevolge van externe invloeden bijvoorbeeld een kracht ten gevolge van winddruk, het vaartuig een inzakking (*trim* of *heel*) ondergaat, zullen het zwaartepunt en het drukingspunt niet meer op dezelfde werklijn liggen. Punt B zal echter verschoven worden omwille van een verandering in het volume van de waterverplaatsing. Punt G zal dezelfde positie echter behouden omdat er geen inwendige lastenverandering plaatsvond. Deze situatie is weergegeven in onderstaande Figuur 28.



Figuur 28: Oprichtend koppel

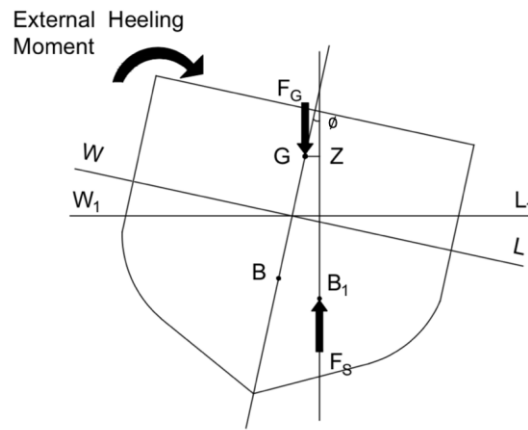
Om het vaartuig terug in zijn evenwichtstoestand te brengen, moet het externe moment dat de slagzij of *heel* veroorzaakt, gecompenseerd worden. Deze compensatie wordt verwezenlijkt aan de hand van een oprichtend koppel. Dit koppel is afhankelijk van de richtende hefboomsarm zoals in Figuur 29 op de volgende bladzijde is afgebeeld. Het momentenevenwicht kan dus als volgt worden opgesteld:

$$M_{\text{ext}} = GZ \cdot F_g$$

Met: M_{ext} Het externe moment ten gevolge van externe invloeden, in t.m

GZ De hefboomsarm van het oprichtende koppel, in m

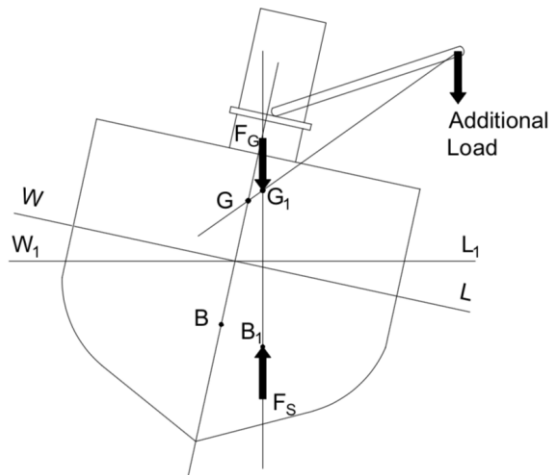
Indien er aan deze vergelijking is voldaan, zal het momentenevenwicht worden bereikt. Een vaartuig dat een goede stabiliteit vertoont, zal een voldoende oprichtend koppel hebben zodat het terug naar zijn rechtopstaande positie gebracht kan worden. Heeft het schip een lage stabiliteit, dan zal het oprichtend koppel eerder beperkt zijn.



Figuur 29: Momentenevenwicht

3.2.8 Verandering interne lastenverdeling

In het geval er extra massa op het vaartuig wordt geplaatst of wanneer er massa's op het vaartuig verplaatst worden, zal de inwendige lastenverdeling van het vaartuig aangepast worden. Hierdoor zal niet enkel het zwaartepunt verplaatst worden, omwille van de inzakking verandert het ook volume verplaatste vloeistof en bijgevolg het drukkingspunt. Beschouw de situatie zoals in onderstaande Figuur 30, waar een massa gelift door middel van een kraan een verplaatsing van G naar G_1 en van B naar B_1 veroorzaakt.



Figuur 30: Effect van externe invloeden

Het evenwicht zal hier verkregen worden wanneer het nieuwe zwaartepunt G_1 en drukkingspunt B_1 op dezelfde verticale werklijn komen te liggen. In bovenstaande Figuur 30 is dit het geval, het vaartuig zal hier dus een initiële slagzijhoek of een initiële *list* hebben.

3.2.9 Evenwichtsconcepten

Stabiel evenwicht

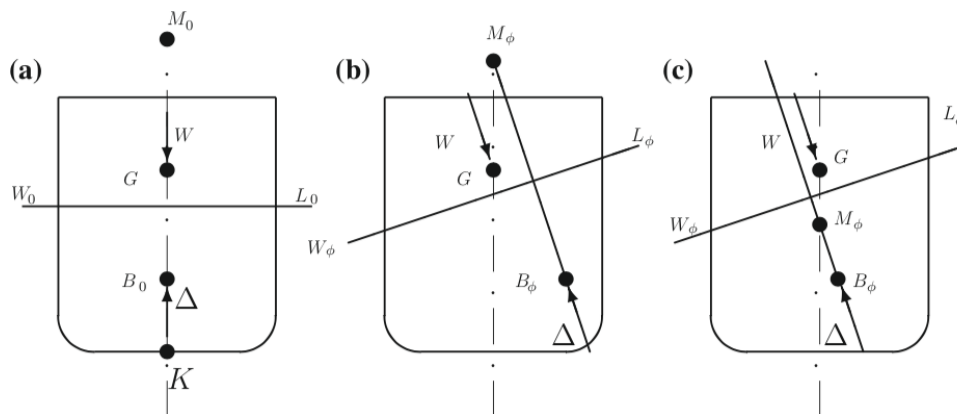
Wanneer een drijvend lichaam in evenwicht wordt onderworpen aan een extern moment, zal het lichaam een inzakking vertonen. Wanneer dit moment wordt weggenomen en het object zich terug in de oorspronkelijke positie zal bevinden, wordt er gesproken van stabiel evenwicht, zoals afgebeeld in geval a op onderstaande afbeelding (Figuur 31).

Neutraal evenwicht

Indien een object wordt blootgesteld aan een extern moment en het object een inzakking vertoont waarbij er na het wegnemen van de belasting het object in dezelfde positie blijft, wordt er gesproken van neutraal evenwicht. Het lichaam zal dus niet meer de neiging hebben om naar zijn oorspronkelijke positie te roteren. Deze situatie is weergegeven als geval b (Figuur 31).

Onstabiel evenwicht

Tot slot wordt de situatie beschouwd waar een vaartuig een hoekverplaatsing zal hebben ten gevolge van een extern moment en deze hoekverplaatsing blijft toenemen in dezelfde draairichting. Indien de belasting weg is, is de situatie kenmerkend voor een onstabiel evenwicht. Het is echter mogelijk dat er situaties bestaan waar het lichaam stabiel is voor kleine verplaatsingen en onstabiel is voor grote verplaatsingen ten opzichte van de evenwichtspositie. Dit zijn veel voorkomende situaties in stabiliteitsberekeningen voor schepen. De onstabiele situatie is afgebeeld als geval c (Figuur 31).



Figuur 31: Evenwichtsconcepten [34, p. 39]

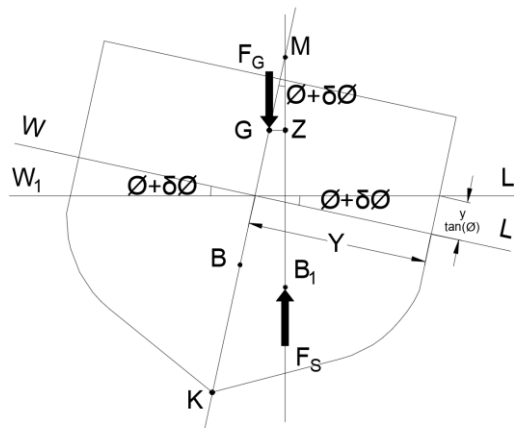
Omdat er in deze studie enkel de stabiliteitsgevallen van pontons worden beschouwd, is enkel het verkrijgen van een stabiel evenwicht van belang. Pontons zullen vaak een hijskraan of een *excavator* als extra belasting hebben. Deze kranen kunnen mobiel of gemonteerd worden op een ponton, afhankelijk van de liftooperaties. Omdat er in dit geval enkel mobiele kranen worden aanschouwd, is het van belang dat de maximale *trim* en *heel* worden afgestemd op de normen van de kraan. Vandaar dat het neutrale evenwicht en het

Voor het gebruik van mobiele hijskranen op pontons wordt de maximale helling gelimiteerd tot 3°. Omwille van deze reden wordt er binnen deze thesis niet dieper ingegaan op de verschuiving van het metacentrum.

Binnen de scheepsstabiliteit wordt de metacentrische hoogte GM bepaald, dit is de afstand tussen het zwaartepunt en het metacentrum. De bepaling van de metacentrische hoogte is een belangrijk aspect voor het nazicht van de stabiliteit van een vaartuig. Er zijn namelijk twee metacentra te onderscheiden, één in de transversale richting en één in de longitudinale richting.

Bepaling van de metacentrische hoogte: transversaal metacentrum

Beschouw een symmetrisch vaartuig dat zal hellen met een kleine hoek, $\delta\phi$. Zoals in het vorige deel is besproken, zal punt B verschuiven en bijgevolg een richtend moment genereren. De verplaatsing van B weg van de CL (center lijn) van het vaartuig wordt met zijn nieuwe positie aangeduid als B_1 . Door een verticale lijn te trekken door B_1 zal deze op een bepaald punt kruisen met de CL van het schip. Volgens de transversale richting is dit kruisingspunt het transversale metacentrum, aangeduid op Figuur 33 als punt M. De afstand tussen het punt G waar het gewicht van het lichaam aangrijpt en de verticale rechte door de nieuwe positie waar de opwaartse kracht aangrijpt B_1 , is de richtende hefboomsarm of *righting arm* GZ.



Figuur 33: (Ligging metacentrum) Figuur hierboven besproken is 32

De afstand tussen het massamiddelpunt G en het metacentrum M is de transversale metacentrische hoogte, deze wordt aangeduid met GM. Deze afstand is een belangrijke index voor transversale stabiliteit voor kleine hoeken van *heel*. Door het toepassen van driehoeksmmeetkunde kan het richtend moment geschreven worden in functie van GM.

$$GZ = GM \cdot \sin \delta\phi$$

$$GM = \frac{GZ}{\sin \delta\phi}$$

GZ wordt beschouwd als de hefboomsarm die een richtend moment zal genereren die het object terug in zijn rechtopstaande positie brengt. Om aan deze voorwaarde te kunnen voldoen, moet GM dus altijd een positieve waarde hebben of anders gezegd, moet het metacentrum altijd boven het massamiddelpunt gelegen zijn. Dit is een van de belangrijke stabiliteitscriteria waarop een vaartuig zal worden nagezien.

De metacentrische hoogte kan ook gevonden worden indien de posities van de kiel bekend is, door toepassing van volgende formule:

$$GM = KM - KG$$

Longitudinaal metacentrum

Het metacentrum in de longitudinale richting is gelijkaardig aan de transversale richting. Het verschil is dat er hier rekening gehouden moet worden met de longitudinale inzakking of *trim*. Vaak is een schip niet symmetrisch volgens de langsrichting, vandaar dat punt B niet altijd in een vast transversale vlak ligt. Hierdoor moet er rekening gehouden worden met het verschil in diepgang tussen de voor- en achterkant van het schip. Het metacentrum kan verkregen worden door de rechte door punt B voor een gelijkmatige kiel te laten kruisen met de rechte door de nieuwe positie van het Buoyancy punt waar de opwaartse kracht aangrijpt B₁, nadat het schip een *trim* onderging met een kleine hoek.

4 STABILITEITSBEREKENING

Het ontwikkelde rekenblad zal dienen om de stabiliteit te verifiëren van twee pontons die eigendom zijn van het bedrijf HYE nv. Het gaat hier om de pontons: Waterduvel en BERL. Deze vaartuigen worden voornamelijk ingezet in binnenwaterwegen. De typische werken waarvoor de pontons worden gebruikt, bestaan voornamelijk uit het construeren van kaaimuren, jetty's (constructies die water met het land verbinden), sluizen en hijsen in combinatie met het vervoeren van bruggdelen. Om deze werkzaamheden te realiseren, maakt HYE nv gebruik van rupskranen en *excavators* die op de pontons worden ingezet. Voor deze werken van start gaan, dient de stabiliteit van deze constructies met behulp van een rekentool geverifieerd te worden. Om dit rekenblad te ontwikkelen, is een grondige voorstudie vereist over de berekeningen om de stabiliteit van een vaartuig te controleren. De beste manier om dit te doen is door eerst een uitgebreide handmatige stabiliteitsberekening van een bepaalde configuratie te doen om vervolgens alle principes te implementeren in de rekenbladen. In dit hoofdstuk wordt een bepaalde loadcase op één van de pontons uitgeschreven. Voor dit van start kan gaan, is de nodige informatie over de pontons Waterduvel en BERL vereist.

4.1 Ponton Waterduvel

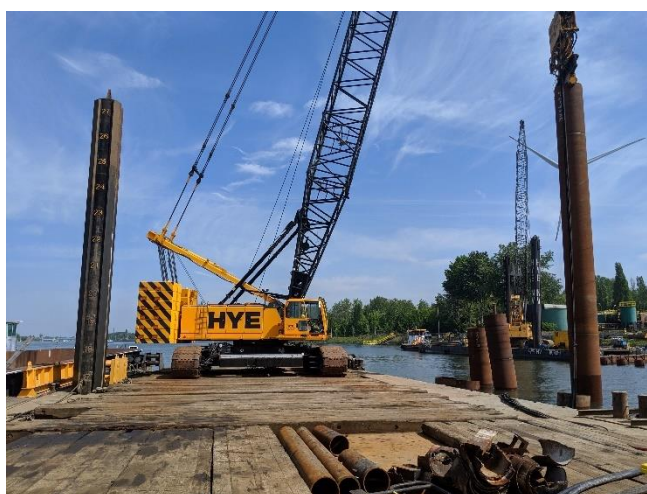
Waterduvel is gebouwd in 2012 en beschikt over de mogelijkheid om zelf te varen door de ingebouwde motor en *bowthruster*. Het ponton is voorzien van drie ruimtes waar spudpalen in geplaatst kunnen worden. Voor werkzaamheden is Waterduvel toegankelijk voor een mobiele hijskraan en een *excavator*. Hiervoor zijn de nodige ballastkamers aanwezig aan de binnenzijde die kunnen gevuld worden met water om een contragewicht te voorzien voor alle kraan- en deklasten. Daarnaast is het ponton ook uitgerust met andere vloeistofreservoirs zoals een vers-watertank, een gasolietank en een hydrauliekolietank. De machinekamer bevat de motoren en biedt ook plaats voor eventueel extra generatoren. Extra benodigdheden en werkmateriaal kunnen benedendeks gestockeerd worden in de voorziene opslagplaatsen.

Geometrie Waterduvel

- Globale lengte: $LOA = 42\ m$
- Globale breedte: $B = 11,8\ m$
- Diepte: $D = 2,500\ m$

Gewicht en zwaartepunt: Waterduvel *lightship*

In het *lightship* gewicht zit de volledige stalen structuur van het ponton vervat, zonder belastingen van de motoren (*engines*). Er dient wel nog opgemerkt te worden dat er een houten *Azobe* beplanking op het dek (Figuur 34) wordt aangebracht. Het doel hiervan is om een betere lastenverdeling van de kraanlasten op het dek te verkrijgen en deze te verdelen naar de dragende compartimenten van de inwendige structuur. Daarnaast voorkomen deze planken slijtage van het dek als gevolg van de ijzeren rupsbanden van de kraan. Zo voorziet de beplanking ook een betere grip voor de kraan, waardoor er meer wrijvingsweerstand tussen de rupsbanden en het dek zal zijn.



Figuur 34: Voorbeeld Azobe planken voor verdeling belasting

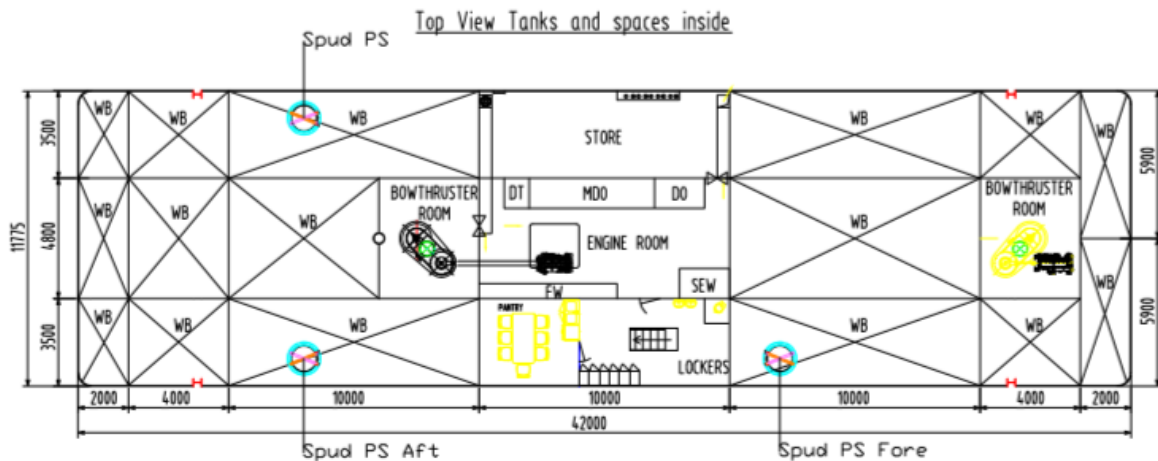
In Tabel 3 hieronder is een overzicht gegeven van de belangrijkste onderdelen van het ponton die het *lightship* vormen. Met deze onderdelen wordt het gewicht en de zwaartepuntligging van het volledig *lightship* berekend.

Tabel 3: *Lightship* gewicht Waterduvel

Beschrijving	Gewicht	VCG	LCG	TCG
	t	m	m	m
<i>Outfitting deck</i>	12,000	3,500	20,000	0,000 (CL)
<i>Outfitting ER</i>	15,000	1,500	22,000	0,000 (CL)
<i>Azobe on deck</i>	19,000	2,550	21,000	0,000 (CL)
<i>Casco</i>	238,148	1,374	19,600	0,127 (PS)
Totaal	284,148	1,549	19,837	0,106 (PS)

Indeling inwendige ruimtes

De indeling van de kamers onder het dek is gebaseerd op basis van hun functie. De meeste ruimtes worden gebruikt als ballastkamers, andere ruimtes zijn brandstoftanks, afvalwatertanks, vers-watertanks, opslagruimtes en machinekamers. De indeling van de kamers is weergegeven op onderstaand plan in Figuur 35.



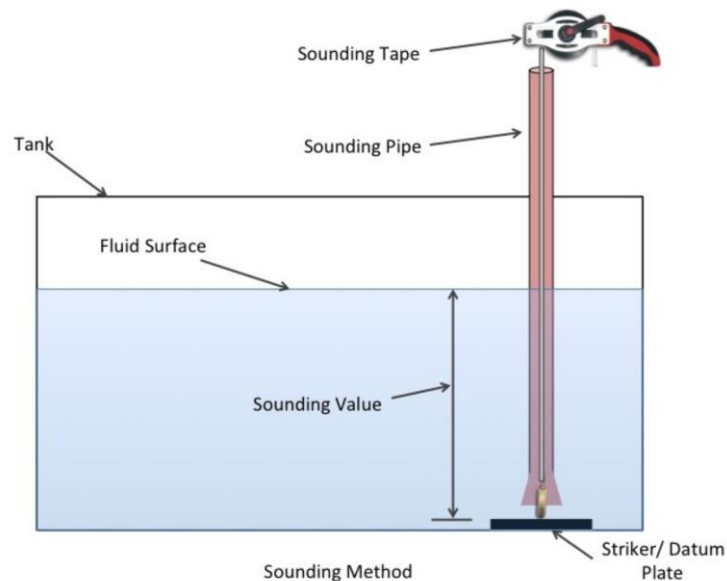
Figuur 35: Indeling Waterduivel

Op het plan is te zien dat het merendeel van de ruimtes vooraan en achteraan worden gebruikt als waterballasttanks (WB). In het midden van het ponton bevinden zich de machinekamer (*engine room*) en enkele opslagruimtes (*lockers, stores*) die niet van vloeistoffen worden voorzien. Het ballasten van deze ruimtes heeft trouwens geen nut aangezien ze te centraal zijn gelegen en alleen maar de waterverplaatsing zullen vergroten. Daarnaast zijn brandstoftanks (*day tank, marine diesel oil tank*), afvalwatertank (*sewage tank*) en het vervuilde oliereservoir (*dirty oil tank*) ook aanwezig in het ponton.

Voor elke tank wordt het zwaartepunt afzonderlijk bepaald. Omdat voor rechthoekige tanks het zwaartepunt meestal gelijk is aan het middelpunt van het volume vloeistof, kunnen de longitudinale en transversale locaties (LCG en TCG) bepaald worden op basis van de afmetingen op het plan. Hiervoor dient de oorsprong van het assenstelsel eenduidig bepaald te worden. De verticale locatie van het zwaartepunt kan pas bepaald worden wanneer het volume van de tank bekend is. Op basis van de hoogte van de vloeistofstand in de tank, wordt het VCG bepaald. Niet alle tanks zijn echter perfect rechthoekig waardoor de bepaling van het zwaartepunt complexer zal verlopen. Zo zijn de tanks PS_{Aft} , CL_{Aft} , SB_{Aft} , PS_{Fore} en SB_{Fore} niet perfect rechthoekig omwille van een afgevlakte bodem.

De bepaling van het zwaartepunt van deze tanks gebeurt op basis van zogenaamde *tank sounding*-tabellen en capaciteitstabellen van alle tanks. *Sounding* is een veel gebruikte techniek om volume-metingen uit te voeren in vloeistoftanks van vaartuigen. Voor de

overige tanks kan er tevens het zwaartepunt worden bepaald op basis van de tabellen die later worden aangehaald. De berekeningen verlopen ook nauwkeuriger door deze gegevens te gebruiken. Onderstaande Figuur 36 geeft schematisch de *sounding*-techniek weer.



Figuur 36: Schema *sounding*-techniek [35]

Daarnaast is er nog een belangrijk fenomeen waarmee rekening gehouden moet worden wanneer vloeistoffen in tanks deel uitmaken van de belastingen op een vaartuig. In het geval dat vloeistoftanks niet volledig gevuld zijn en de tank een bepaalde helling ondergaat, zal het zwaartepunt verschuiven. Dit kan verklaard worden door middel van het vrije oppervlakte-effect van vloeistoffen ook wel bekend als het *Free Surface Effect*.

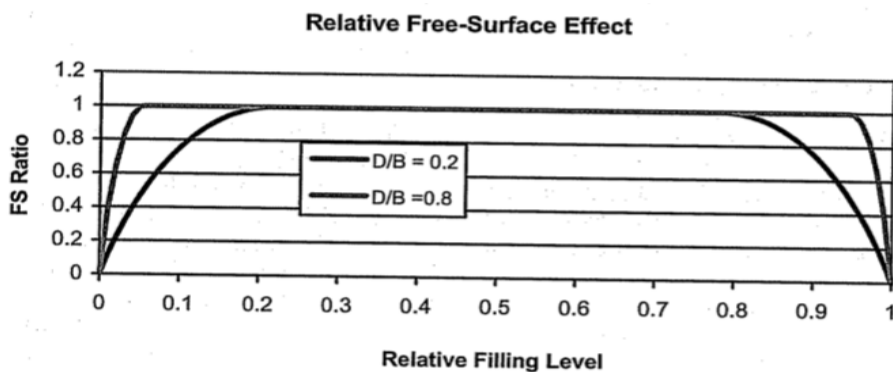
Het vrije vloeistofeffect wordt in rekening gebracht door aan elke tank een vrij oppervlaktemoment of een *Free Surface Moment* (FSM) toe te kennen. Het FSM hangt af van het massatraagheidsmoment (I) en van de massadichtheid van de vloeistof. Voor rechthoekige tanks kan FSM als volgt bepaald worden:

$$FSM = I \cdot \rho_{vloeistof}$$

Het traagheidsmoment van de tank kan worden uitgeschreven in functie van de lengte en breedte:

$$FSM = \frac{l \cdot b^3}{12} \cdot \rho_{vloeistof}$$

Zoals blijkt op onderstaande curve (Figuur 37) zal het vrije oppervlaktemoment niet in rekening worden gebracht wanneer de tank niet is gevuld (vullingspercentage 0%) of wanneer de tank volledig is gevuld (vullingspercentage 100%). Voor tussenliggende vullingspercentages zal het vrije oppervlaktemoment nagenoeg constant blijven.



Figuur 37: Free Surface Effect [26]

Zoals eerder is aangehaald, zal niet elke tank van het ponton perfect rechthoekig zijn waardoor bovenstaande formule niet nauwkeurig genoeg is. Het vrije oppervlaktemoment zit tevens ook vervat in de *sounding* tabellen van alle tanks.

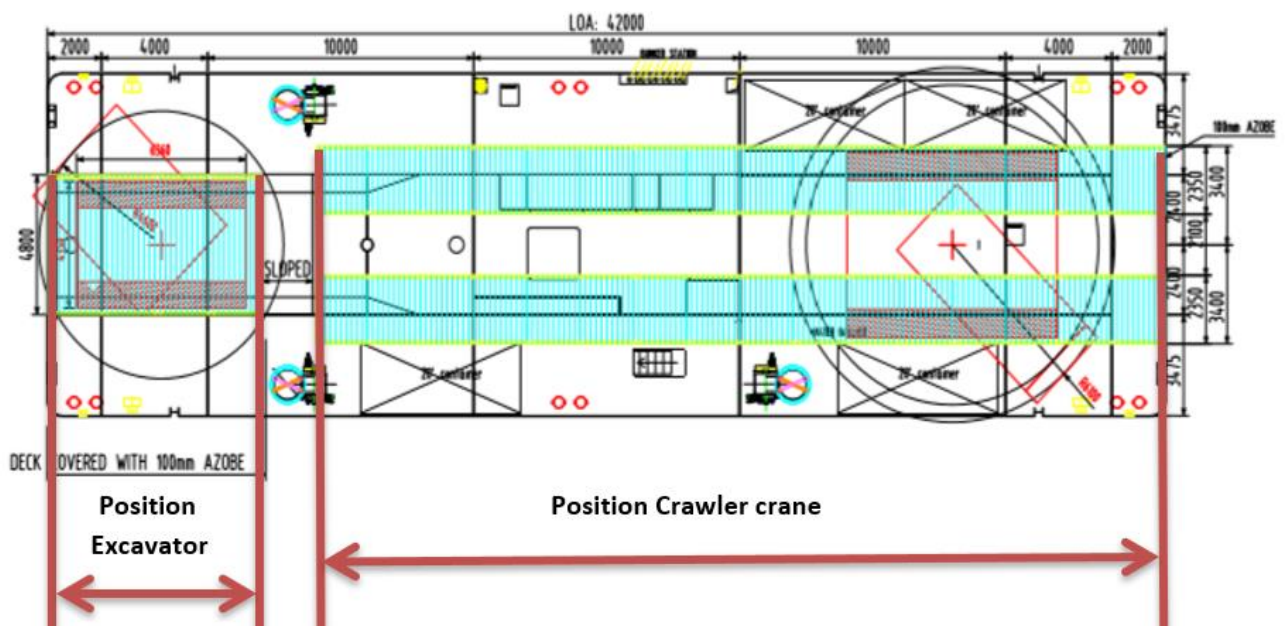
Tabel 4 op de volgende bladzijde voorziet een overzicht van het zwaartepunt, de afmetingen en het vrije oppervlaktemoment voor alle tanks aanwezig in Waterduvel.

Tabel 4: Overzicht tanks in ponton Waterduvel voor 100% gevuld

Geometrie en zwaartepunt van tanks met een maximale capaciteit (100% <i>Fill</i>)									
Tank	<i>Sounding</i>	Lengte	Breedte	Hoogte	LCG	TCG	VCG	ρ	FSM
Beschrijving	m ³	m	m	m	m	m	m	t/m ³	t*m
<i>FW</i>	5,821	5,500	0,600	1,800	18,750	-2,100	0,900	1,000	0,097
<i>DO</i>	1,999	2,000	1,200	1,700	23,500	1,800	0,850	0,950	0,134
<i>SEW</i>	4,234	2,000	1,200	1,800	25,000	-1,800	0,900	1,000	0,282
<i>Spud SB_Aft</i>	2,916	1,338	1,338	2,500	9,000	-4,800	1,250	1,000	0,113
<i>Spud PS</i>	2,916	1,338	1,338	2,500	9,000	4,800	1,250	1,000	0,113
<i>Spud SB_Fore</i>	2,916	1,338	1,338	2,500	9,000	-4,800	1,250	1,000	0,113
<i>Pantry</i>	34,400	4,000	3,475	2,500	18,000	-4,150	1,250	1,000	14,006
<i>Locker room</i>	51,450	6,000	3,475	2,500	23,000	-4,150	1,250	1,000	21,009
<i>Stores</i>	85,750	10,000	3,475	2,500	21,000	4,150	1,250	1,000	35,015
<i>Engine room</i>	121,941	14,000	4,800	2,500	18,680	-0,038	1,315	1,000	109,670
<i>Bowthruster</i>	43,200	4,000	4,800	2,500	38,000	0,000	1,250	1,000	33,178
<i>MDO</i>	9,996	1,000	1,200	1,700	20,500	1,800	0,850	0,900	0,635
<i>Daytank</i>	1,999	5,000	1,200	1,700	17,500	1,800	0,850	0,900	0,127
<i>PS_Aft</i>	16,292	2,000	3,475	2,500	1,035	4,150	1,307	1,000	7,003
<i>CL_Aft</i>	11,054	2,000	4,800	1,250	1,071	0,000	0,701	1,000	7,003
<i>SB_Aft</i>	19,292	2,000	3,475	2,500	1,035	-4,150	1,307	1,000	18,063
<i>PS_1</i>	34,300	4,000	3,475	2,500	4,000	4,150	1,250	1,000	14,006
<i>CL_1</i>	24,461	4,000	4,800	1,250	4,000	0,000	0,650	1,000	36,127
<i>SB_1</i>	34,300	4,000	3,475	2,500	4,000	-4,150	1,250	1,000	14,006
<i>PS_2</i>	82,892	10,000	3,475	2,500	11,069	4,128	1,250	1,000	34,404
<i>CL_2</i>	55,037	6,000	4,800	2,500	9,432	0,000	1,250	1,000	54,190
<i>SB_2</i>	82,892	10,000	3,475	2,500	11,069	-4,128	1,250	1,000	34,404
<i>PS_4</i>	85,750	10,000	3,475	2,500	31,000	4,150	1,250	1,000	35,015
<i>CL_4</i>	117,600	10,000	4,800	2,500	31,000	0,000	1,250	1,000	90,317
<i>SB_4</i>	82,892	10,000	3,475	2,500	31,103	-4,150	1,250	1,000	34,404
<i>PS_5</i>	34,300	4,000	3,475	2,500	38,000	4,150	1,250	1,000	14,006
<i>SB_5</i>	34,300	4,000	3,475	2,500	38,000	-4,150	1,250	1,000	14,006
<i>PS_FORE</i>	27,465	2,000	5,875	2,500	40,965	2,950	1,307	1,000	33,546
<i>SB_FORE</i>	27,465	2,000	5,875	2,500	40,965	-2,950	1,307	1,000	33,545

Gebruikt materieel op de Waterduvel

Het ponton Waterduvel kan worden ingezet in combinatie met een mobiele hijskraan en een mobiele *excavator*, afhankelijk van de opdracht die gerealiseerd dient te worden. In onderstaande Figuur 38 is het bovenaanzicht van het dek van de Waterduvel weergegeven. Daarop is te zien dat de hijskraan en *excavator* zich zullen positioneren op de blauw gemarkeerde zones. De hijskraan wordt aan de achtersteven gepositioneerd en kan zijn positie vrij kiezen over bijna heel het ponton. Zoals eerder besproken en weergegeven in Figuur 34 wordt in de praktijk houten *Azobe* beplanking voorzien om de belasting door de kraan te verspreiden en schade aan het dek door de rupsen te voorkomen.



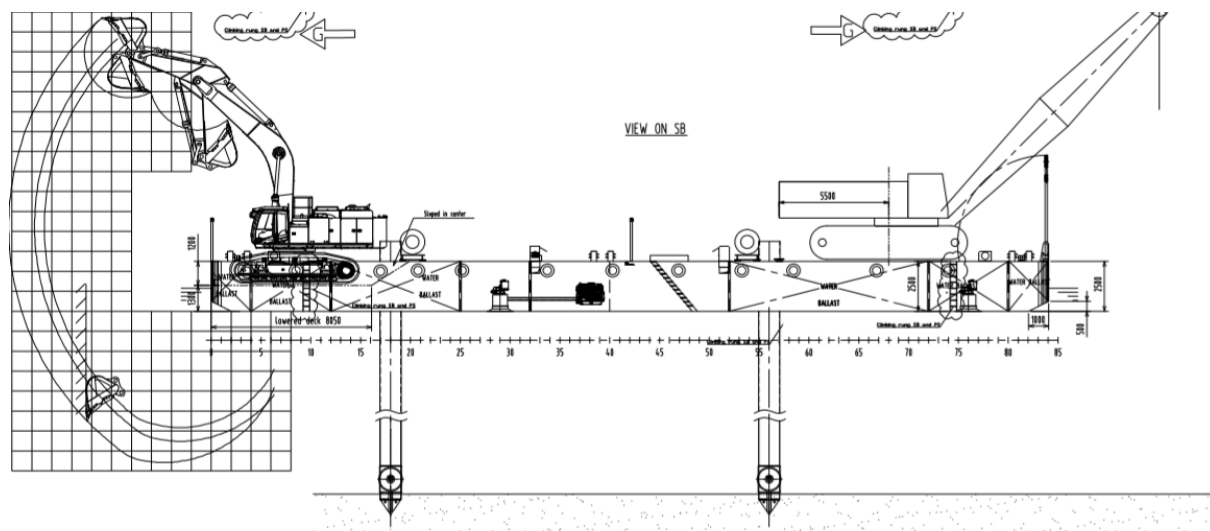
Figuur 38: Overzicht indeling Waterduvel

Tijdens baggerwerken in binnenwaterwegen, wordt de mobiele graafkraan, of *excavator*, achteraan op het ponton gepositioneerd. Hiervoor is een speciale ruimte (Figuur 39) voorzien waar het dek vooraan 0,5m is verlaagd, waardoor de graafkraan dieper kan baggeren.



Figuur 39: Verlaagd dek in ponton Waterduvel [1]

Indien er zware liftoperaties worden uitgevoerd, gebruikt HYE nv een hijskraan op rupsbanden. De kraan heeft de mogelijkheid om zich over een groot deel van de lengte van het ponton te verplaatsen zoals aangegeven op het plan. Onderstaande Figuur 40 toont een doorsnede van het ponton Waterduvel.



Figuur 40: Schematische weergave ponton Waterduvel met kranen

4.2 Ponton BERL

Het ponton BERL is gebouwd in 1995 en beschikt niet over de mogelijkheid om zelf te varen. Het ponton BERL is zoals de Waterduvel voorzien van drie ruimtes waar spudpalen in geplaatst kunnen worden. Voor het uitvoeren van hijswerkzaamheden kan een mobiele hijskraan op het ponton geplaatst worden. De BERL wordt bijna uitsluitend gebruikt met de Hitachi SCX-2800 mobiele hijskraan, aangezien deze grote kraan enkel op het ponton BERL past. Om het ponton te stabiliseren, zijn er enkele ballasttanks voorzien in het ponton die als contragewicht fungeren om de hellingshoeken te beperken. Aangezien de kraan maar aan één zijde, de *Aft* of achtersteven, kan geplaatst worden, zijn er enkel ballasttanks voorzien aan de voorsteven. In tegenstelling tot de Waterduvel is het ponton BERL niet-zelfvarend, en heeft het dus geen benodigdheden hiervoor nodig. Er zijn buiten de ballasttanks dus geen andere tanks aanwezig in de romp van het ponton. Enkel is er nog een FO tank aanwezig voor brandstof in op te slagen voor de machines aan boord, maar deze wordt in de praktijk gebruikt als ballasttank.

Geometrie BERL

- Globale lengte: $LOA = 49,950 \text{ m}$
- Globale breedte: $B = 14,960 \text{ m}$
- Diepte: $D = 3,000 \text{ m}$

Gewicht en zwaartepunt: BERL *lightship*

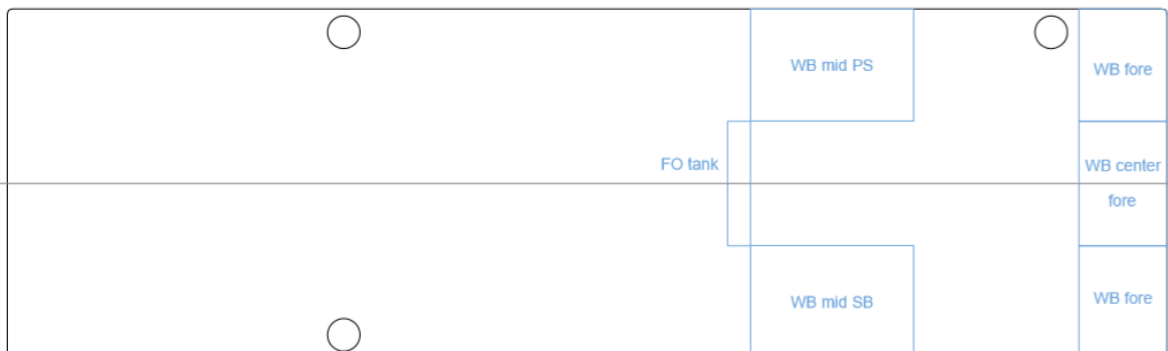
In het *lightship* gewicht zit de volledige stalen structuur van het ponton vervat, zonder belastingen van de motoren. Het *lightship* gewicht van het ponton BERL is gelijk aan 500 ton, waarbij het zwaartepunt gelegen is in het midden van het ponton. Voor het *lightship* gewicht zijn de ballasttanks volledig leeg. In Tabel 5 hieronder is een overzicht gegeven van de belangrijkste onderdelen van het ponton die het *lightship* gewicht vormen.

Tabel 5: *Lightship* gewicht BERL

Beschrijving	Gewicht	VCG	LCG	TCG
	t	m	m	m
<i>Casco</i>	500,000	3,900	25,000	0
Totaal	500,000	3,900	25,000	0

Indeling inwendige ruimtes

Zoals eerder besproken, zijn er in het ponton BERL enkel tanks aanwezig die gebruikt worden als ballasttanks. De indeling van deze ballastkamers is weergegeven op onderstaand plan in Figuur 41. Op het plan is één tank aangeduid als FO, wat staat voor Fuel Oil Tank, maar deze wordt gebruikt als waterballasttank.

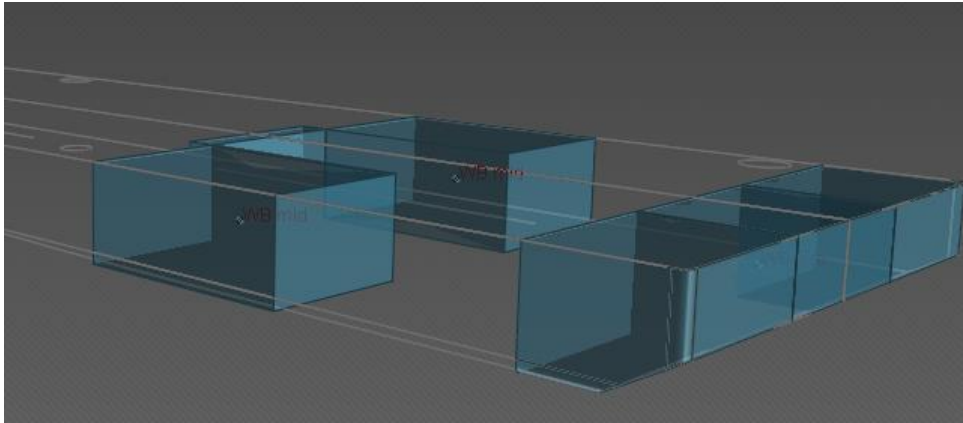


Figuur 41: Indeling BERL

Voor elke tank wordt het zwaartepunt afzonderlijk bepaald. Hier dient opgemerkt te worden dat de twee ballasttanks “WB *Fore*” aan de voorsteven samen worden beschouwd als een geheel, en er wordt geen verschil gemaakt tussen de twee. De twee tanks aan stuurboord en bakboord dienen dus steeds evenredig gevuld te zijn. Voor de ballasttanks “WB *mid*” wordt er wel een onderscheid gemaakt tussen de ballasttank aan bakboord en stuurboord.

Het zwaartepunt in longitudinale en transversale richting (LCG en TCG) is meestal vast door de rechthoekige doorsnede. De verticale locatie van het zwaartepunt is afhankelijk van het vullingspercentage van de ballasttank. Op basis van de hoogte van de vloeistofstand

in de tank, wordt het VCG bepaald. Niet alle tanks zijn echter perfect rechthoekig waardoor de bepaling van het zwaartepunt complexer zal verlopen. Zo zijn de tanks “*WB Center Fore*” en “*WB Fore*” niet perfect rechthoekig onderaan omwille van een afgevlakte voorsteven, waardoor de bepaling van het zwaartepunt moeilijker is. Dit is voorgesteld in onderstaande Figuur 42.



Figuur 42: DELFTship model ballasttanks van het ponton BERL

De bepaling van het zwaartepunt van deze tanks gebeurt op basis van zogenaamde *tank sounding*-tabellen en capaciteitstabellen van alle tanks. Deze methode is besproken in de paragraaf met de beschrijving van het ponton Waterduvel. Daarnaast is er nog een belangrijk fenomeen waarmee rekening gehouden moet worden. Wanneer vloeistoffen in een reservoir deel uitmaken van de belastingen op een vaartuig, en het reservoir is niet volledig gevuld, gaat de vloeistof ook hellen wanneer het vaartuig helt. Hierdoor verschuift het zwaartepunt van de ballasttank. Dit is het vrije oppervlakte-effect van vloeistoffen en is ook besproken bij de bespreking van het ponton Waterduvel.

De onderstaande Tabel 6 voorziet een overzicht van het zwaartepunt, de afmetingen en het vrije oppervlaktemoment van alle tanks aanwezig in het ponton BERL wanneer de tanks 100 % gevuld zijn.

Tabel 6: Overzicht tanks in ponton Waterduvel voor 10% gevuld

Geometrie en zwaartepunt van tanks met een maximale capaciteit (100% <i>Fill</i>)									
Tank	<i>Sounding</i>	Lengte	Breedte	Hoogte	LCG	TCG	VCG	ρ	FSM
Beschrijving	m ³	m	m	m	m	m	m	t/m ³	t*m
<i>FO Tank</i>	15,41	0,980	5,350	3,000	31,540	0,000(CL)	0,900	0,900	11,03
<i>Mid_PS</i>	100,010	7,050	4,825	3,000	35,555	-5,087(SB)	1,500	1,000	64,67
<i>Mid_SB</i>	100,010	7,050	4,825	3,000	35,555	5,087(PS)	1,500	1,000	64,67
<i>Center Fore</i>	54,290	3,800	5,350	3,000	47,972	0,000(CL)	1,614	1,000	47,52
<i>Fore</i>	97,820	3,800	9,650	3,000	47,972	0,000(CL)	1,615	1,000	998,64

Gebruikt materieel op de BERL

Het ponton BERL wordt, zoals eerder aangehaald, bijna uitsluitend gebruikt in combinatie met de Hitachi SCX-2800 rupskraan. Deze wordt aan de achtersteven van het ponton geplaatst, en kan op die manier lasten zijwaarts of achterwaarts optillen. Op het ponton BERL kunnen drie spudpalen geplaatst worden, die het wegdrijven van het ponton voorkomen. De spudpalen zullen echter geen verticale belastingen opvangen, waardoor deze enkel een invloed hebben wanneer ze opgehesen zijn voor transport. Het gewicht van de spudpalen is 25 ton per stuk.

Daarnaast zijn er op de BERL op de voorsteven enkele vaste belastingen aanwezig. Op de BERL zijn meestal drie materiaalcontainers aanwezig die elk 1 tot 3 ton wegen. Ook is er op de voorsteven een elektrische lier geplaatst waarop de hijskabels kunnen opgerold worden wanneer deze niet in gebruik zijn. Het gewicht van deze lier met kabels is geschat op 25 ton.

Buiten deze vaste belastingen is er ook materieel aanwezig dat continu verandert van positie. Voorbeelden hiervan zijn hydraulische aggregaten voor de trilblokken, de trilblokken, stroomgenerator, brandstoftanks, heihamer enzovoort. Wanneer de stabiliteit van het geheel geverifieerd wordt, is het belangrijk de positie van het zwaartepunt en het gewicht van deze belastingen in te geven in het rekenblad. Grote gewichten die ver uit het midden van het ponton staan, kunnen een grote invloed hebben op de stabiliteit van het ponton. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in onderstaande foto (Figuur 43) waarbij de heihamer op dat moment niet gebruikt wordt. Maar het gewicht van deze heihamer is 23 ton, wat een impact kan hebben op de stabiliteit. Afhankelijk van de positie van de extra belasting kan de impact voor- of nadelig zijn.



Figuur 43: Voorbeeld extra deklast - heihamer van 23 ton

4.3 Manuele stabiliteitsverificatie

Voor alle bewerkingen geïmplementeerd kunnen worden in het rekenblad, moet de volledige stabiliteitsverificatie van een ponton onderhevig aan een reeks belastingen, stapsgewijs worden uitgeschreven. Alle tussenstappen om tot bepaalde resultaten te komen, worden in dit deel op een overzichtelijke manier weergegeven. Zo is het meteen duidelijk welke gehanteerde principes toegepast worden in het rekenblad. De beste manier om dit te doen is door een realistische praktijksituatie volledig uit te werken.

De *load case* die hier wordt uitgewerkt zal aangrijpen op Waterduvel. Op het ponton wordt een hijskraan geplaatst die een last van 48 ton zal tillen met een vlucht van 10m, de ruimtes aan de binnenzijde van het ponton worden tevens voorzien van de nodige ballast om stabiliteit tijdens het hijsen te garanderen. In onderstaande Tabel 7 is het vullingspercentage van de tanks voor de loadcase gegeven, en in Tabel 8 zijn de deklasten gegeven.

Tabel 7: Vloeistofreservoirs

Lastencategorie: <i>Miscellaneous</i>	
Omschrijving	Fill (%)
Fresh water tank (FW)	97,0
Dirty oil tank (DO)	10,0
Sewage tank (SEW)	10,0
Lastencategorie: <i>Fuel</i>	
Omschrijving	Fill (%)
Marine diesel oil tank (MDO)	97,0
<i>Daytank</i> (DT)	97,0
Lastencategorie: <i>Waterballast</i> (WB)	
Omschrijving	Fill (%)
PS _{AFT}	100,0
SB _{AFT}	100,0
PS ₁	100,0
CL ₁	100,0
SB ₁	100,0

Tabel 8: Lasten op het dek

Lasten op het dek				
Omschrijving	Massa	VCG	LCG	TCG
	ton	m	m	m
Hijskraan	85,000	5,000	38,500	0,000 (CL)
Last Hijskraan	48,100	5,000	48,000	0,000(CL)

4.3.1 Bepaling van de totale waterverplaatsing

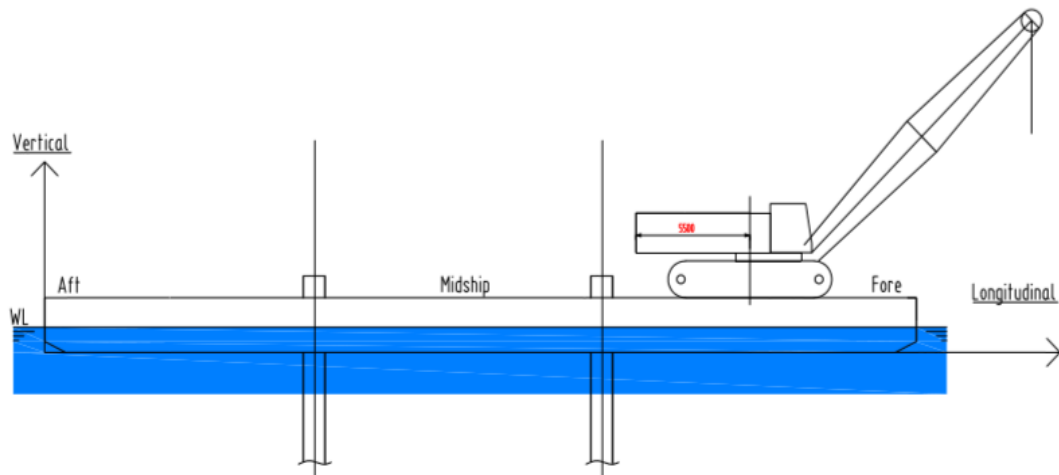
De eerste stap naar de verificatie bestaat uit het analyseren van de volledige lastencombinatie. De pontons worden niet alleen onderworpen aan lasten veroorzaakt door een hijskraan, naast de lasten van de kraan zal het ponton voorzien worden van de nodige ballast om een contragewicht te bieden tegenover de kraanlasten. Andere belastingen zoals olietanks, brandstoftanks, vers-watertanks, afvalwatertanks of eventuele lasten afkomstig van de machinekamer worden ook in deze belastingscombinatie verwerkt.

Zoals in de literatuurstudie is besproken, wordt het resulterende gewicht van het ponton omschreven als de totale waterverplaatsing (wet van Archimedes). Om de waterverplaatsing op een overzichtelijke manier te berekenen, worden alle belastingen opgedeeld in categorieën. Eerst wordt er een onderscheid gemaakt tussen *lightship* gewicht en *deadweight*. Alle belastingen die onder *deadweight* vallen, kunnen nogmaals in subcategorieën worden onderverdeeld. De volgende vijf subcategorieën zijn te onderscheiden:

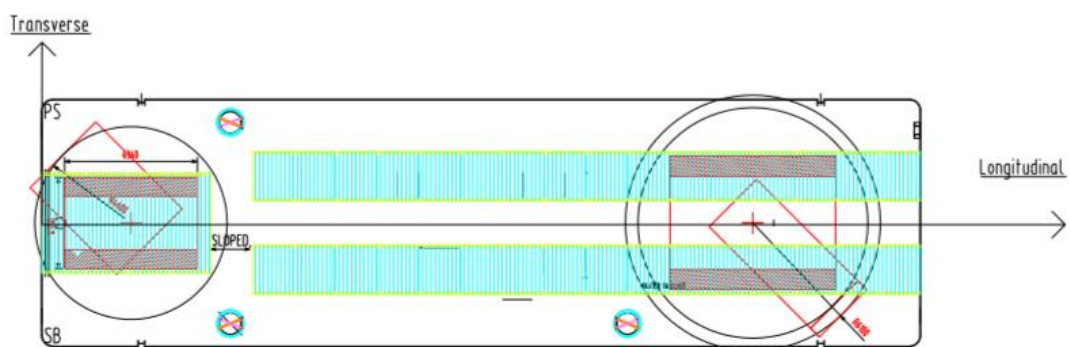
- *Miscellaneous*,
- *Void*,
- *Engine room*,
- *Fuel*,
- *Waterballast*.

Voor elke categorie wordt de waterverplaatsing bepaald door alle gewichten met elkaar op te tellen. Vervolgens wordt het zwaartepunt van elke massa afzonderlijk bepaald, van de totale waterverplaatsing wordt zo het resulterende zwaartepunt achterhaald. De plaats van het zwaartepunt wordt in de verticale, longitudinale en transversale richting bepaald ten opzichte van de oorsprong van het assenstelsel. Er dient echter een eenduidige tekenconventie gehanteerd te worden.

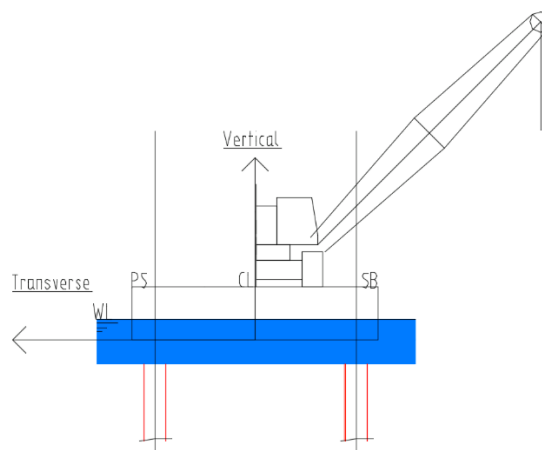
De oorsprong van het assenstelsel is gelegen aan de achterzijde, ter hoogte van de kiel en gelijk met de *centre line* (CL) of de centrale as van het vaartuig. In de verticale richting zijn alle punten positief die boven de kiel gelegen zijn, in de transversale richting is de positieve zin gericht naar *port side* (PS) of backboordzijde en in de longitudinale richting is de positieve zin gericht naar de voorkant van het ponton. Ter verduidelijking is het assenstelsel uitgezet op een zij-, voor- en bovenaanzicht van het ponton (Figuur 44, 45 en 46).



Figuur 44: Weergave assenstelsel longitudinale doorsnede



Figuur 45: Weergave assenstelsel bovenaanzicht



Figuur 46: Weergave assenstelsel doorsnede ponton

4.3.2 Verschillende belastingen op het ponton

Lasten afkomstig van *Miscellaneous*

De belastingen die onder de categorie *Miscellaneous* vallen, zijn diverse lasten of varia op het ponton. Enkele tanks die centraal gelegen zijn zoals de tank voor het *fresh water* (FW) of verse water, de tank voor *dirty oil* (DO) of vuile olie en de *sewage* (SEW) tank of afvalwatertank, kunnen onder deze categorie vallen. De ligging van de tanks is op onderstaand plan (Figuur 47) aangeduid.

PS_AFT	PS_1	<input type="checkbox"/>	PS_2	STORES			PS_4	PS_5	PS_FORE
CL_Aft	CL_1	CL_2		DT	MDO	DO	CL_4	BOWTHRUSTER	
SB_Aft	SB_1	<input type="checkbox"/>	SB_2	ENGINE ROOM		FW	SEW	SB_FORE	
SB_Aft	SB_1	<input type="checkbox"/>	SB_2	PANTRY	LOCKER ROOM	<input type="checkbox"/>	SB_4		SB_5

Figuur 47: Plan Waterduvel – locatie Miscellaneous

Het gewicht van de tanks, die gevuld worden met vloeistoffen, wordt bepaald op basis van een vullingspercentage of een percentage aan *fill*. Als de vloeistof in de betreffende tank bekend is, kan op basis van het volume en de dichtheid, het gewicht bepaald worden. Tanks SEW en DO worden voor 10% gevuld, tank FW voor 97%.

$$Gewicht_{FW} = 0,97 \cdot 5,821 \text{ m}^3 \cdot 1 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 5,647 \text{ t}$$

$$Gewicht_{DO} = 0,1 \cdot 1,999 \text{ m}^3 \cdot 0,95 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 0,190 \text{ t}$$

$$Gewicht_{SEW} = 0,1 \cdot 4,234 \text{ m}^3 \cdot 1 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 0,423 \text{ t}$$

Daarnaast moet het zwaartepunt ten opzichte van het gekozen assenstelsel bepaald worden. Hiervoor dienen VCG, LCG en TCG voor elke tank bepaald te worden. Wanneer vloeistoftanks niet volledig gevuld zijn, kan het vrije oppervlakte-effect hier een rol spelen wanneer het ponton onder een bepaalde helling (*trim, list of heel*) gelegen zal zijn. De bepaling van het zwaartepunt van elke tank gebeurt door het centrum van het volume aan vloeistof te bepalen en op het einde wordt er een correctie doorgevoerd op basis van het vrije oppervlakte-effect. Eerst wordt het zwaartepunt van de tanks bepaald zonder rekening te houden met de helling. LCG en TCG worden bepaald op basis van de gegevens in de algemene overzichtstabel van het ponton Waterduvel (Tabel 4, p. 62) waar de informatie van elke tank in het ponton in vervat is. VCG varieert echter met het volume van de tank. Omdat het zwaartepunt zich altijd centraal zal bevinden voor rechthoekige tanks, is VCG altijd de helft van de hoogte tot waar de vloeistof in de tank komt.

$$VCG_{FW} = \frac{1}{2} \cdot h_{FW} \cdot 0,97 = \frac{1}{2} \cdot 1,800 \cdot 0,97 = 0,873 \text{ [m]}$$

$$VCG_{DO} = \frac{1}{2} \cdot h_{DO} \cdot 0,10 = \frac{1}{2} \cdot 1,700 \cdot 0,10 = 0,085 \text{ [m]}$$

$$VCG_{SEW} = \frac{1}{2} \cdot h_{SEW} \cdot 0,10 = \frac{1}{2} \cdot 1,800 \cdot 0,10 = 0,090 \text{ [m]}$$

In onderstaande Tabel 9 zijn de gegevens van de belastingen van de tanks die tot *Miscellaneous* behoren samengevat.

Tabel 9: Lasten Miscellaneous - Vloeistofreservoirs

Beschrijving	Dichtheid	Fill	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t/m^3	%	t	m	m	m	$t \cdot m$
<i>Fresh Water (FW)</i>	1,000	97,0	5,647	0,873	18,750	-2,100(SB)	0,097
<i>Dirty Oil (DO)</i>	0,950	10,0	0,190	0,085	23,500	1,800(PS)	0,134
<i>Sewage (SEW)</i>	1,000	10,0	0,423	0,090	25,500	-1,800(PS)	0,282

Naast de lasten afkomstig van deze tanks behoren het gewicht van de giekkraan, samen met de last die getild zal worden, ook tot de lastencategorie *Miscellaneous*. Het gewicht is hier meteen gekend en omdat vloeistoffen hier niet van toepassing zijn, wordt er geen FSM bepaald. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel 10.

Tabel 10: Lasten Miscellaneous – Kraan en last

Beschrijving	Gewicht	VCG	LCG	TCG
	t	m	m	m
Giekkraan	85,000	5,000	38,500	0,000(CL)
Kraanlast	48,100	5,000	48,000	0,000(CL)

De totale waterverplaatsing van *Miscellaneous* met het bijhorende zwaartepunt wordt bepaald als de som van alle afzonderlijke gewichten:

$$Gewicht_{Miscellaneous} = \sum_{i=1}^n Gewicht_i = 139,360 \text{ [t]}$$

Het resulterende vrije oppervlaktemoment wordt bepaald door alle afzonderlijke momenten te sommeren:

$$FSM_{Miscellaneous} = \sum_{i=1}^n FSM_i = 0,513 [t \cdot m]$$

Het totale zwaartepunt wordt bepaald door een afweging te maken van elk afzonderlijk gewicht ten opzichte van het totale gewicht:

$$VCG_{Miscellaneous} = \frac{\sum_{i=1}^n Gewicht_i \cdot VCG_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} = 4,811 [m]$$

$$LCG_{Miscellaneous} = \frac{\sum_{i=1}^n Gewicht_i \cdot LCG_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} = 40,917 [m]$$

$$TCG_{Miscellaneous} = \frac{\sum_{i=1}^n Gewicht_i \cdot TCG_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} = -0,088 [m]$$

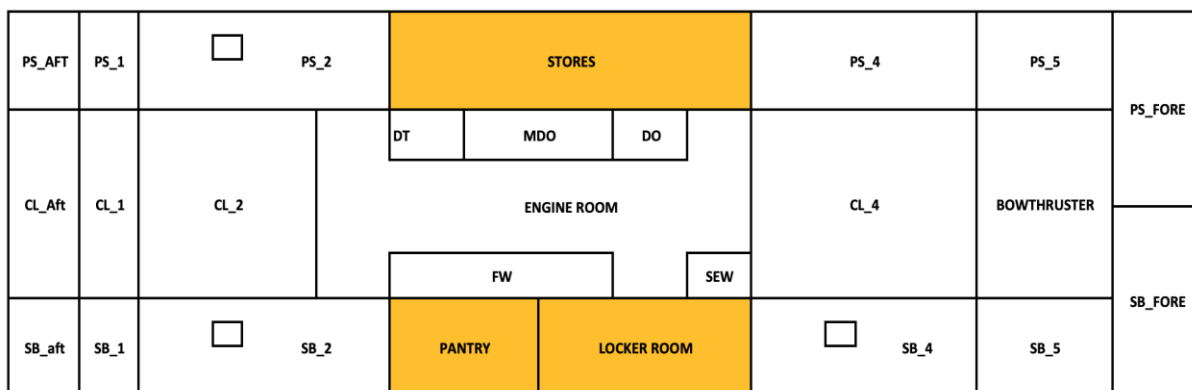
De resultaten worden in onderstaande Tabel 11 samengevat.

Tabel 11: Lasten Miscellaneous - Totaal

Beschrijving	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>t · m</i>
Totaal: <i>Miscellaneous</i>	139,360	4,811	40,917	-0,088 (SB)	0,513

Lasten afkomstig van *Void*

De ruimtes van het ponton die onder de categorie *Void* vallen, worden beschouwd als lege ruimtes. Deze kamers worden meestal gebruikt als opslagplaatsen. In de meeste belastingsgevallen worden er hier geen lasten in verrekend. Zoals op het plan (Figuur 48) op de volgende bladzijde is weergegeven, bevinden deze ruimtes zich ook vrij centraal zowel aan stuurboordzijde als aan bakboordzijde. De totale waarde van het gewicht, VCG, LCG, TCG en FSM zijn dus gelijk aan nul.



Figuur 48: Plan Waterduvel – locatie Void

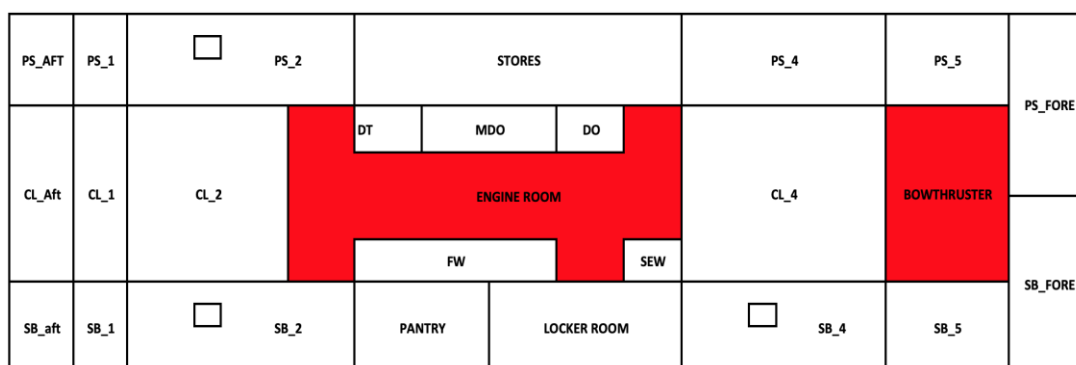
De resultaten van de lasten *Void* zijn in onderstaande Tabel 12 samengevat.

Tabel 12: Lasten *Void* - Totaal

Beschrijving	Dichtheid	Fill	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t/m^3	%	t	m	m	m	$t \cdot m$
Pantry	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
Locker room	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
Stores	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
Totaal Void			0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000

Lasten afkomstig van *Engine room*

Hier worden alle lasten opgesomd die voorkomen in de machinekamers, afgebeeld in Figuur 49. Het ponton is echter niet-zelfvarend waardoor er geen motoren aanwezig zijn die propellers zullen aandrijven. De mogelijkheid bestaat wel dat de machinekamer voorzien wordt van enkele generatoren. In dit belastingsgeval zijn er geen lasten aanwezig in deze kamers.



Figuur 49: Plan Waterduvel – locatie Engine room

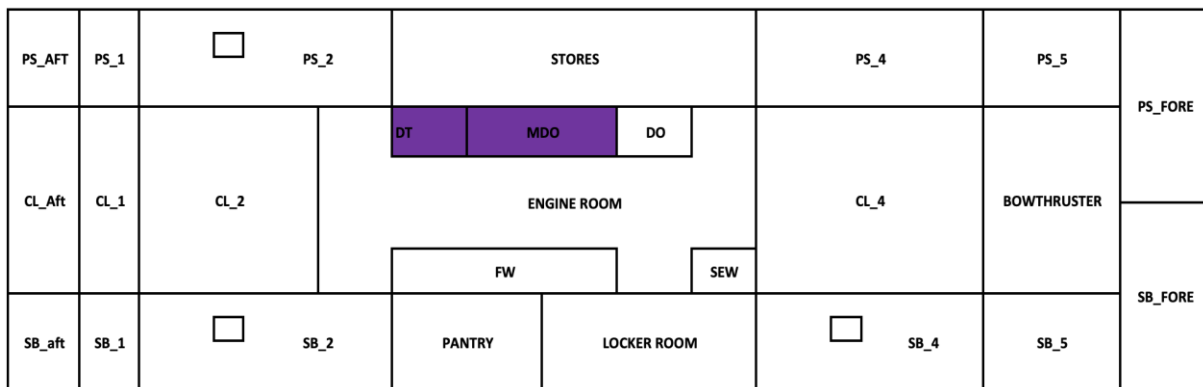
De resultaten van de lasten Engine room zijn in onderstaande Tabel 13 samengevat.

Tabel 13: Lasten Engine room - Totaal

Beschrijving	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>t · m</i>
Engine room	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
Bowthruster room	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
Totaal: <i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000

Lasten afkomstig van *Fuel tanks*

In het ponton Waterduvel zijn er twee reservoirs aanwezig voor brandstof. De eerste brandstoftank is voor scheepvaartdiesel, of *Marine Diesel Oil* (MDO). De tweede is voor dagelijkse brandstof, de *daytank* (DT). In onderstaande Figuur 50 is de locatie van deze brandstoftanks weergegeven.



Figuur 50: Plan Waterduvel – locatie Fuel tanks

Beide brandstoftanks worden voor dit belastingsgeval voor 97% gevuld. Dit resulteert in de volgende massa's:

$$Gewicht_{MDO} = 0,97 \cdot 9,996 \text{ m}^3 \cdot 0,9 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 8,727 \text{ t}$$

$$Gewicht_{DT} = 0,97 \cdot 1,999 \text{ m}^3 \cdot 0,9 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 1,745 \text{ t}$$

De verticale locatie van het zwaartepunt wordt hier bepaald:

$$VCG_{MDO} = \frac{1}{2} \cdot h_{MDO} \cdot 0,97 = \frac{1}{2} \cdot 1,800 \cdot 0,97 = 0,824 \text{ [m]}$$

$$VCG_{DT} = \frac{1}{2} \cdot h_{DT} \cdot 0,97 = \frac{1}{2} \cdot 1,800 \cdot 0,97 = 0,824 \text{ [m]}$$

De resultaten van de lasten Engine room zijn in onderstaande Tabel 14 samengevat.

Tabel 14: Lasten Engine room - Totaal

Beschrijving	Dichtheid	Fill	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t/m^3	%	t	m	m	m	$t \cdot m$
MDO	1,000	97,0	8,727	0,824	20,500	1,800(PS)	0,635
Daytank	1,000	97,0	1,745	0,824	17,500	1,800(PS)	0,127

De totale waterverplaatsing is de som van alle afzonderlijke gewichten:

$$Gewicht_{Fuel\ tanks} = \sum_{i=1}^n Gewicht_i = 10,472 [t]$$

Het resulterende vrije oppervlaktemoment wordt bepaald door alle afzonderlijke momenten te sommeren:

$$FSM_{Fuel\ tanks} = \sum_{i=1}^n FSM_i = 0,762 [t \cdot m]$$

Het totale zwaartepunt wordt bepaald door een afweging te maken van elk afzonderlijk gewicht ten opzichte van het totale gewicht:

$$VCG_{Fuel\ Tanks} = \frac{\sum_{i=1}^n Gewicht_i \cdot VCG_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} = 0,824 [m]$$

$$LCG_{Fuel\ Tanks} = \frac{\sum_{i=1}^n Gewicht_i \cdot LCG_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} = 20,000 [m]$$

$$TCG_{Fuel\ Tanks} = \frac{\sum_{i=1}^n Gewicht_i \cdot TCG_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} = 1,800 [m]$$

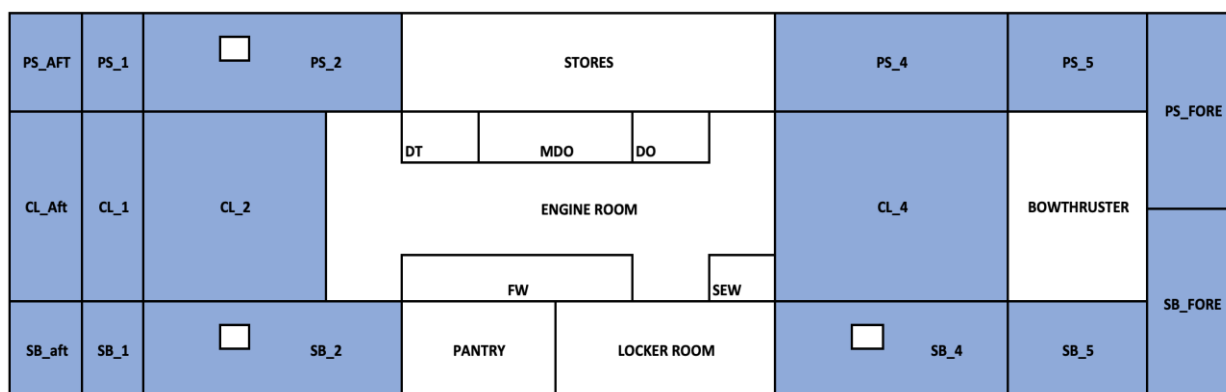
De resultaten worden in onderstaande tabel 15 samengevat:

Tabel 15: Lasten Fuel tanks - Totaal

Beschrijving	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	$t \cdot m$
Totaal: Fuel tanks	10,472	0,824	20,000	1,800(PS)	0,762

Lasten afkomstig van Waterballasttanks

Zoals eerder is aangehaald, is het ballasten van een vaartuig waarop hijswerkzaamheden plaatsvinden noodzakelijk om de stabiliteit te kunnen garanderen. De ligging van alle waterballasttanks is weergegeven op onderstaand plan (Figuur 51).



Figuur 51: Plan Waterduvel – locatie Ballasttanks

Zoals eerder besproken in de inleiding zullen de pontons die hier gebruikt worden voornamelijk worden ingeschakeld voor werken op binnenwateren. Hierdoor worden de ballastkamers gevuld met zoetwater, de densiteit van zoetwater bedraagt $1,000 \text{ t/m}^3$. Het vullen van de tanks gebeurt op basis van de positie van de kraan op het ponton. Uit de belastingen van categorie *Miscellaneous* blijkt dat het zwaartepunt van de kraan en de last zich aan de voorzijde van het ponton zal bevinden. Om dit te compenseren, worden de ballasttanks aan de achterzijde gevuld. Tanks PS_{Aft} , SB_{Aft} , PS_1 , CL_1 , SB_1 worden voor 100% gevuld. Door de tanks volledig te vullen, zal het vrije vloeistoffenoppervlak hier geen invloed uitoefenen en zal het vrije oppervlaktemoment voor elke ballasttank nul bedragen. De massa en zwaartepuntsligging kan voor elke tank bepaald worden op basis van de *sounding* tabellen. In Tabel 16 op de volgende bladzijde worden alle gegevens samengevat.

Tabel 16: Lasten Waterballasttanks - Overzicht

Beschrijving	Dichtheid	Fill	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t/m^3	%	t	m	m	m	$t \cdot m$
PS_Aft	1,000	100,0	16,292	1,307	1,035	4,150 (PS)	0,000
CL_Aft	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
SB_Aft	1,000	100,0	16,292	1,307	1,035	-4,150 (SB)	0,000
PS_1	1,000	100,0	34,300	1,250	4,000	4,150 (PS)	0,000
CL_1	1,000	100,0	24,461	0,650	4,000	0,000 (CL)	0,000
SB_1	1,000	100,0	34,300	1,250	4,000	-4,150 (SB)	0,000
PS_2	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
CL_2	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
SB_2	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
PS_4	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
CL_4	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
SB_4	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
PS_5	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
SB_5	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
PS_FORE	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
SB_FORE	1,000	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000

De totale waterverplaatsing is de som van alle afzonderlijke gewichten:

$$Gewicht_{waterballast} = \sum_{i=1}^n Gewicht_i = 125,646 [t]$$

Het resulterende vrije oppervlaktmoment wordt bepaald door alle afzonderlijke momenten te sommeren:

$$FSM_{waterballast} = \sum_{i=1}^n FSM_i = 0,000[t \cdot m]$$

Het totale zwaartepunt wordt bepaald door een afweging te maken van elk afzonderlijk gewicht ten opzichte van het totale gewicht:

$$VCG_{Waterballast} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i \cdot VCG_i}{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i} = 1,148 [m]$$

$$LCG_{Waterballast} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i \cdot LCG_i}{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i} = 3,231 [m]$$

$$TCG_{Waterballast} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i \cdot TCG_i}{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i} = 0,000 [m]$$

De resultaten worden in onderstaande Tabel 17 samengevat.

Tabel 17: Lasten Waterballasttanks - Totaal

Beschrijving	Gewicht	<i>VCG</i>	<i>LCG</i>	<i>TCG</i>	<i>FSM</i>
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>t · m</i>
Totaal: <i>Waterballast</i>	125,646	1,148	3,231	0,000 (CL)	0,000

Lasten afkomstig van *Deadweight*

De totale waterverplaatsing is de som van alle afzonderlijke gewichten, namelijk *Miscellaneous*, *Void*, *Engine room*, *Fuel* en *Waterballast* die in de vorige paragrafen opgesomd zijn.

$$\text{Gewicht}_{Deadweight} = \sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i = 275,478 [t]$$

Het resulterende vrije oppervlaktemoment wordt bepaald door alle afzonderlijke momenten te sommeren:

$$FSM_{Deadweight} = \sum_{i=1}^n FSM_i = [t \cdot m]$$

Het totale zwaartepunt wordt bepaald door een afweging te maken van elk afzonderlijk gewicht ten opzichte van het totale gewicht:

$$VCG_{Deadweight} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i \cdot VCG_i}{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i} = 2,989 [m]$$

$$LCG_{Deadweight} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i \cdot LCG_i}{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i} = 22,933 [m]$$

$$TCG_{Deadweight} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i \cdot TCG_i}{\sum_{i=1}^n \text{Gewicht}_i} = 0,024 [m]$$

De resultaten worden in onderstaande Tabel 18 samengevat.

Tabel 18: Totaal Deadweight

Beschrijving	Gewicht	<i>VCG</i>	<i>LCG</i>	<i>TCG</i>	<i>FSM</i>
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>t · m</i>
Totaal: <i>Miscellaneous</i>	139,360	4,811	40,917	-0,088 (SB)	0,513
Totaal: <i>Void</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
Totaal: <i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
Totaal: <i>Fuel tanks</i>	10,472	0,824	20,000	1,800 (PS)	0,762
Totaal: <i>Waterballast</i>	125,646	1,148	3,231	0,000 (CL)	0,000
Totaal: <i>Deadweight</i>	275,478	2,989	22,933	0,024 (PS)	1,275

Lasten afkomstig van *Lightship weight*

De resultaten voor het lightship worden in onderstaande Tabel 19 samengevat.

Tabel 19: Lightship gewicht ponton Waterduvel

Beschrijving	Gewicht	<i>VCG</i>	<i>LCG</i>	<i>TCG</i>
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
Totaal: <i>Lightship</i>	284,148	1,549	19,837	0,106 (PS)

Totale waterverplaatsing

De resultaten voor de totale waterverplaatsing berekend met het *lightship* en het *deadweight* worden in onderstaande Tabel 19 weergegeven.

Tabel 20: Totale waterverplaatsing

Beschrijving	Gewicht	<i>VCG</i>	<i>LCG</i>	<i>TCG</i>	<i>FSM</i>
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>t · m</i>
Waterverplaatsing	559,626	2,258	21,361	0,066 (PS)	1,275

4.3.3 Hydrostatische gegevens

Eens de totale waterverplaatsing bekend is, kunnen de hydrostatische gegevens bepaald worden. Deze gegevens worden bepaald op basis van hydrostatische data die vervat zitten in tabellen en curves. Deze gegevens zijn voor ieder vaartuig verschillend. De tabellen worden voorzien door de constructeur van het vaartuig of kunnen gegenereerd worden met behulp van bepaalde software. De hydrostatische data bestaan uit een reeks parameters die een rol spelen in de stabiliteitsberekening van vaartuigen, de parameters worden uitgezet ten opzichte van de waterverplaatsing en diepgang. De hydrostatische tabellen zijn echter specifiek voor een bepaalde *trim*. De *trim* is in het begin van alle berekeningen nog niet bekend, hierdoor worden de berekeningen eerst uitgevoerd op basis van tabellen voor een *trim* van 0,000m. Eens de *trim* exact bepaald is, kunnen de hydrostatische parameters gecorrigeerd worden. In dit deel worden de volgende hydrostatische parameters bepaald.

Mean moulded draft

Ten eerste wordt de *Mean moulded draft* bepaald uit de tabel van de hydrostatische data. Dit is de gemiddelde diepgang of de verticale afstand van de kiel tot aan het wateroppervlak. Deze diepgang hangt af van de totale waterverplaatsing en wordt bepaald op basis van een lineaire interpolatie uit de hydrostatische tabel voor een *trim* van 0,000m. Omdat de exacte waarde van de totale waterverplaatsing (559,626 ton) niet eenduidig afgelezen kan worden, dient er een boven- en ondergrens bepaald te worden voor de waterverplaatsing en de diepgang:

$$\begin{aligned} \text{Mean moulded draft [m]} \\ = \text{draft}_1[\text{m}] + \frac{\text{DISP}_2[\text{t}] - \text{DISP}_1[\text{t}]}{\text{draft}_2[\text{m}] - \text{draft}_1[\text{m}]} \cdot (\text{DISP}[\text{t}] - \text{DISP}_1[\text{t}]) \end{aligned}$$

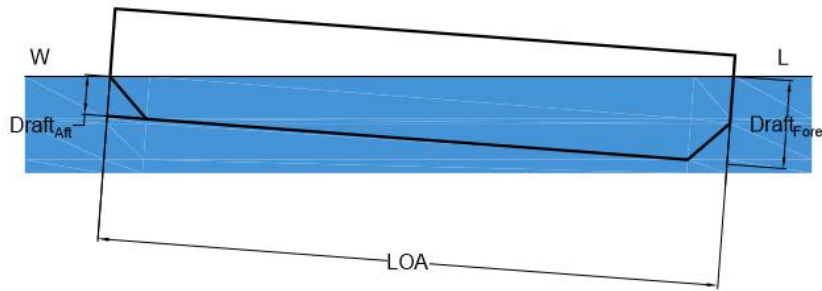
De parameters uit de hydrostatische tabel implementeren in bovenstaande formule geeft de volgende waarde voor de gemiddelde diepgang.

$$\text{Mean moulded draft} = 1,1 + \frac{1,15 - 1,1}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 1,139 \text{ [m]}$$

Trim

Trim is het verschil in diepgang aan de loodlijn vooraan (*Draft Fore*) en diepgang aan de achterloodlijn (*Draft Aft*). In Figuur 52 op de volgende bladzijde is een trim naar voor van een ponton afgebeeld, waarbij de diepgang achteraan dus kleiner is dan de diepgang vooraan.

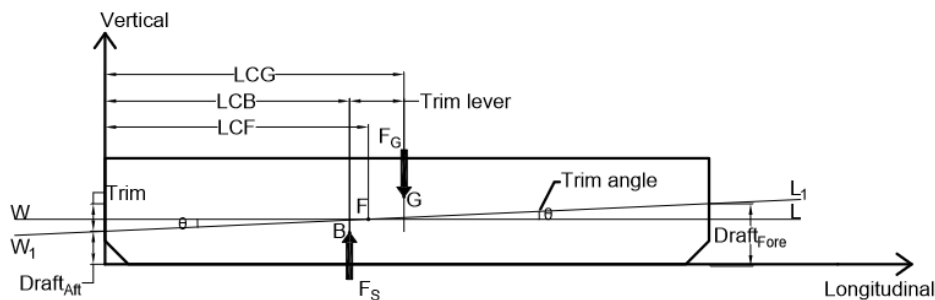
$$\text{Trim [m]} = \text{Draft}_{\text{Fore}}[\text{m}] - \text{Draft}_{\text{Aft}}[\text{m}]$$



Figuur 52: Diepgang bij trimmen van een ponton

Omdat deze diepgangen nog niet gekend zijn, wordt *trim* met behulp van een andere formule bepaald. *Trim* wordt namelijk altijd berekend volgens de longitudinale richting van het vaartuig, en wordt veroorzaakt wanneer de longitudinale locatie van het zwaartepunt (G) en het drukkingspunt (B) niet hetzelfde is, met andere woorden G en B liggen niet meer op dezelfde verticale werklijn. Hierdoor wordt er een moment gecreëerd namelijk het trimmoment met als hefboomsarm het verschil tussen de longitudinale afstand van G en B. Deze hefboomsarm is aangeduid als de “*Trim lever*” in onderstaande figuur 53.

$$TrimMoment[t \cdot m] = DISP[t] \cdot (LCG[m] - LCB[m])$$



Figuur 53: Weergave hefboomsarm trimmoment

Afhankelijk van de tekenconventie kunnen de termen LCG en LCB nog van plaats verwisseld worden in bovenstaande formule. *Trim* wordt hier positief beschouwd wanneer de diepgang vooraan groter is dan aan de achterkant. Zoals eerder aangegeven is, zal de hijskraan altijd vooraan worden geplaatst, hier zal de *trim* dus een positieve waarde hebben. In het geval er baggerwerken worden uitgevoerd met behulp van een *excavator* die achter geplaatst wordt, zal de *trim* naar alle waarschijnlijkheid een negatieve waarde aannemen.

Trim wordt echter uitgedrukt in een lengte-eenheid (meter) waardoor er nog een omzetting van het trimmoment vereist is. Deze omzetting gebeurt op basis van het moment dat de trim 1cm verandert (*Moment to Change Trim by 1 cm*) MCT.

Door deze parameter toe te passen, kan de *trim* waarde als volgt bepaald worden:

$$Trim[m] = \frac{TrimMoment [t \cdot m]}{MCT [t \cdot m/cm] \cdot 100}$$

De extra factor van 100 in de noemer van bovenstaande formule heeft betrekking tot de omzetting van centimeter naar meter.

$$Trim[m] = DISP[t] \cdot \frac{LCG[m] - LCB[m]}{MCT [t \cdot m/cm] \cdot 100}$$

Wanneer de waterverplaatsing en zijn bijhorende zwaartepunt gekend zijn, kunnen LCB en MCT bepaald worden door gebruik te maken van hydrostatische tabellen. Er dient ook nog opgemerkt te worden dat hydrostatische tabellen afhankelijk zijn voor een bepaalde *trim* waarde. De *trim* is echter nog niet gekend. Daarom wordt er een eerste berekening van LCB en MCT uitgevoerd op basis van hydrostatische tabellen, aangenomen dat er nog geen *trim* is opgetreden, *trim* = 0,000 m. Via lineaire interpolatie worden de volgende waardes bepaald:

$$LCB[m] = LCB_1[m] + \frac{LCB_2[m] - LCB_1[m]}{DISP_2[t] - DISP_1[t]} \cdot (DISP[t] - DISP_2[t])$$

$$LCB = 21,041 + \frac{21,041 - 21,041}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 21,041[m]$$

$$= MCT_1[t \cdot m/cm] + \frac{MCT_2[t \cdot m/cm] - MCT_1[t \cdot m/cm]}{DISP_2[t] - DISP_1[t]} \cdot (DISP[t] - DISP_1[t])$$

$$MCT = 17,408 + \frac{17,402 - 17,408}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 17,403 [t \cdot m/cm]$$

Deze waardes implementeren in de formule van *trim* geeft:

$$Trim = 559,626 \cdot \frac{21,361 - 21,041}{17,403 \cdot 100} = 0,103[m]$$

Meestal kan de waarde van de *trim* nog meer geoptimaliseerd worden naargelang de *trim* zal toenemen. Voor een lage waarde van trim levert deze eerste berekening meestal al een correct resultaat op. Indien het vaartuig grote waardes van trim vertoont, moet er nog een extra optimalisatie worden uitgevoerd. Er wordt namelijk verder gebouwd op deze eerste trimberekening. Door dezelfde berekening als een iteratief proces te herhalen kan een *trim* optimalisatie gerealiseerd worden. Dit impliceert echter wel dat de berekeningen van LCB en MCT nu starten gebruikmakende van de hydrostatische tabellen van het ponton Waterduvel. Deze tabellen zijn voor een *trim* van 0,000; 0,100 en 0,200 toegevoegd in respectievelijk Bijlage A, B en C. In dit geval worden LCB en MCT nu bepaald uit de hydrostatische tabel van *trim* = 0,103m.

De hydrostatische data voor deze exacte trim waarde van 0,103m is echter niet beschikbaar. Tabellen van benaderende trim waarde zijn echter wel beschikbaar, zo heeft de meest benaderende ondergrens een waarde van 0,100m en de bovengrens een waarde van 0,200m. Uit de tabel in Bijlage B en C worden de waardes van MCT en LCB als volgt geïnterpoleerd:

Voor hydrostatische data met een *trim* van 0,100m geeft dit:

$$LCB_{0,100} = 21,363 + \frac{21,349 - 21,363}{564,938 - 540,29} \cdot (559,626 - 540,29) = 21,352[m]$$

$$MCT_{0,100} = 17,408 + \frac{17,402 - 17,408}{564,838 - 540,29} \cdot (559,626 - 540,29) = 17,403 [t \cdot m/cm]$$

Voor hydrostatische data met een *trim* van 0,200m geeft dit:

$$LCB_{0,200} = 21,685 + \frac{21,657 - 21,685}{564,985 - 540,337} \cdot (559,626 - 540,337) = 21,663 [m]$$

$$MCT_{0,200} = 17,408 + \frac{17,402 - 17,408}{564,985 - 540,337} \cdot (559,626 - 540,337) = 17,403[t \cdot m/cm]$$

Deze waardes dienen nogmaals geïnterpoleerd te worden, niet meer in functie van de waterverplaatsing maar in functie van trimwaardes:

$$LCB_{0,103} = 21,352 + \frac{21,663 - 21,352}{0,200 - 0,100} \cdot (0,103 - 0,100) = 21,361 [m]$$

$$MCT_{0,103} = 17,403 + \frac{17,403 - 17,403}{0,200 - 0,100} \cdot (0,103 - 0,100) = 17,403 [t \cdot m/cm]$$

De extra waarde die nog aan de oorspronkelijke trim wordt toegevoegd, wordt hier bepaald:

$$Trim = 559,626 \cdot \frac{21,361 - 21,361}{17,403 \cdot 100} = 0,000[m]$$

Trim neemt in dit geval dus een lage waarde aan waardoor de eerste berekening echter volstond. De optimalisatie speelde in dit geval geen rol meer. Omdat het vaartuig in realiteit wel grotere trimwaardes kan aannemen, dient deze optimalisatie zeker niet verwaarloosd te worden in de constructie van het rekenblad.

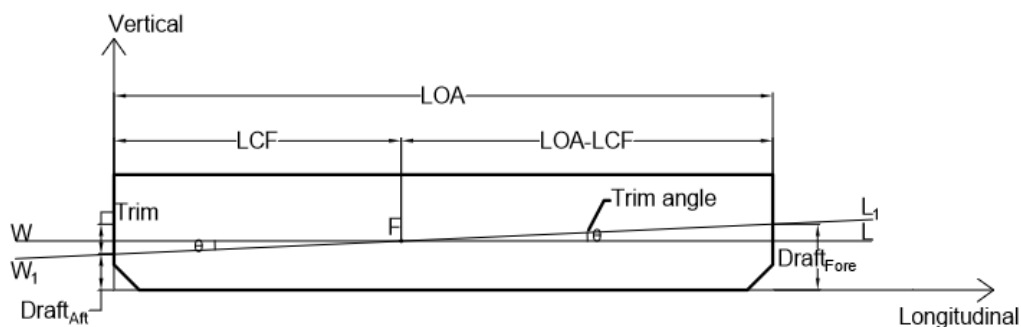
Diepgangen aan de loodlijnen

Eens de trim bepaald is, kunnen de diepgangen aan de achterste en voorste loodlijn bepaald worden. Op de pontons Waterduvel en BERL vallen de loodlijnen gelijk met de uiterste delen van het dek omwille van een *block coëfficiënt* die de constante van 1 zal benaderen. Hierdoor wordt er altijd gerekend met de globale lengte van het ponton (42,000 m). Om deze diepgangen te bepalen, wordt een nieuw begrip geïntroduceerd, namelijk het zwaartepunt van de waterlijn voorgesteld met het symbool F (*centre of floatation*). Dit punt is het rotatiepunt van het vaartuig op het wateroppervlak. Om de diepgangen aan de loodlijnen te bepalen, dient de longitudinale afstand van punt F tot de achterloodlijn (LCF) gekend te zijn. Op basis van onderstaande Figuur 54 en de nodige driehoeksmetkundige principes kunnen de diepgang achteraan (*Draft Aft pp*) en de diepgang vooraan (*Draft Fore pp*) bepaald worden.

De diepgangen worden bepaald door de gemiddelde diepgangen met een trim toename op te tellen:

$$Draft_{Fore}[m] = \text{mean moulded draft} + trim_{Fore}$$

$$Draft_{Aft}[m] = \text{mean moulded draft} - trim_{Aft}$$



Figuur 54: Schematische weergave ponton

Deze *trim* toenames kunnen als volgt bepaald worden:

$$trim_{Fore} = \tan(\theta) \cdot (LOA - LCF)$$

Op basis van gelijkvormige driehoeken van $\tan(\theta)$ bepaald worden omdat de totale trim wel gekend is.

$$\tan(\theta) = \frac{Trim}{LOA}$$

Dit invullen in de formule voor de *trim* toename aan de voorkant geeft:

$$trim_{Fore} = \frac{Trim}{LOA} \cdot (LOA - LCF)$$

De *trim* toename aan de achterzijde is simpelweg het verschil tussen de *trim* en de *trim* toename aan de voorzijde:

$$trim_{Aft} = Trim - trim_{Fore}$$

Dit invullen in de formules van de diepgangen geeft:

$$Draft_{Fore}[m] = \text{mean moulded draft} + \frac{Trim}{LOA} \cdot (LOA - LCF)$$

$$Draft_{Fore}[m] = 1,139 + \frac{0,103}{42,000} \cdot (42,000 - 21,040) = 1,190 \text{ m}$$

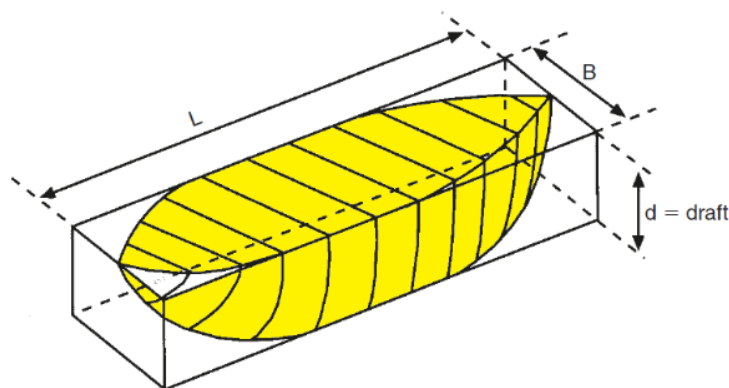
$$Draft_{Aft}[m] = \text{mean moulded draft} - \left(Trim - \frac{Trim}{LOA} \cdot (LOA - LCF) \right)$$

$$Draft_{Aft}[m] = 1,139 - \left(0,103 - \frac{0,103}{42,000} \cdot (42,000 - 21,040) \right) = 1,087 \text{ m}$$

Block coëfficiënt

De *block coëfficiënt* is een parameter die de vorm van de boeg van een vaartuin beschrijft. Het stelt de ratio voor van het onderwatervolume ten opzichte van een balkvormig volume met dezelfde lengte, breedte en diepgang van een vaartuin. Voor een ponton zal de *block coëfficiënt* een waarde van 1 benaderen, en kan dus verwaarloosd worden in de berekeningen. In Figuur 55 is de boeg voorgesteld die de block coëfficiënt bepaald.

$$Cb = 0,991 + \frac{0,991 - 0,991}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 0,991 \cong 1$$



Figuur 55: Weergave Block coëfficiënt [32]

Drukkingspunt opwaartse kracht

De positie van het drukkingspunt wordt bepaald aan de hand van drie afstanden ten opzichte van de oorsprong van het assenstelsel. Zo wordt er een interpolatie uitgevoerd op basis van de hydrostatische tabellen van een trim van 0,000m om het initiële COB te bepalen. Wanneer de *trim* 0,000m bedraagt, zal de positie van het *Buoyancy center* gelijk zijn aan:

$$LCB = 21,041 + \frac{21,041 - 21,041}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 21,041 [m]$$

$$VCB = 0,554 + \frac{0,579 - 0,554}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 0,574 [m]$$

$$TCB = 0,011 + \frac{0,012 - 0,011}{564,891 - 540,242} \cdot (559,626 - 540,242) = 0,012 [m]$$

Zwaartepuntscorrectie

Omwille van het vrije vloeistofoppervlak bestaat de mogelijkheid dat tijdens een inzakking van het vaartuig de afzonderlijke zwaartepunten van alle vloeistofreservoirs kunnen verschuiven. Hierdoor ontstaat er een verandering in de inwendige lastenverdeling en zal het resulterende zwaartepunt een verschuiving ondergaan. Voor alle niet volledig gevulde vloeistofreservoirs zal er dus een correctie van het zwaartepunt worden uitgevoerd. Deze correctie is afhankelijk van het totale vrije oppervlaktemoment en kan bepaald worden door de som te maken van alle afzonderlijke momenten. Om de zwaartepuntsverschuiving te bepalen, wordt het resulterende vrije oppervlaktemoment gedeeld door de totale waterverplaatsing.

$$GG' [m] = \frac{\sum_{i=1}^n FSM_i}{DISP}$$

$$GG' = \frac{1,275}{559,626} = 0,002 [t \cdot m]$$

Eens de correctiefactor bepaald is, kan de nieuwe locatie van het zwaartepunt berekend worden. Enkel de verticale locatie van het zwaartepunt zal een correctie ondergaan. In theorie kan er ook rekening gehouden worden met trim van een vaartuig en zal de longitudinale locatie van het zwaartepunt ook een verschuiving ondergaan. Deze verplaatsing zal echter een kleine rol spelen in de stabiliteitsberekeningen en is dus verwaarloosbaar.

De nieuwe locatie van VCG kan als volgt bepaald worden:

$$VCG' [m] = VCG [m] + GG' [m] = 2,258 + 0,002 = 2,260 m$$

Metacentrische hoogtes

In de literatuurstudie is de nodige informatie uitgeschreven over de ligging van het metacentrum. Er is ook vermeld dat het metacentrum zowel een transversale (KM_T) als een longitudinale component (KM_L) zal hebben, beide maken ook deel uit van de parameters die in de hydrostatische tabellen vervat zitten. Door het interpolatieproces analoog toe te passen, worden de volgende metacentrische hoogtes bepaald ten opzichte van de kiel van het ponton.

$$KM_T = 10,797 \text{ m}$$

$$KM_L = 131,235 \text{ m}$$

Daarnaast kan de metacentrische hoogte ook bepaald worden ten opzichte van VCG en VCG'.

$$GM_{solid} = KM_t - VCG$$

$$GM_{solid} = 10,797 - 2,258 = 8,539 \text{ m}$$

$$GM_{liquid} = KM_t - VCG'$$

$$GM_{liquid} = 10,797 - 2,260 = 8,537 \text{ m}$$

4.3.4 Cross curves van stabiliteit

Cross curves van stabiliteit bevatten informatie over het evalueren van de intacte stabiliteit van een bepaald vaartuig. Deze curves bevatten informatie over de ligging van het metacentrum voor een bepaalde slagzij of *heel* hoek. In de literatuurstudie is reeds vermeld dat onder grote *heel* hoeken het metacentrum verschuift ten opzichte van de centrale as van een vaartuig, om dit te compenseren wordt er met een vals metacentrum gewerkt (N) dat wel op de centrale as blijft. *Cross curves* worden bekomen door de metacentrische hoogte vanaf de kiel (KN) ten opzichte van waarden van waterverplaatsing te plotten voor een variatie aan *heel* hoeken. Het gebruik van cross curves speelt namelijk een belangrijke rol in de bepaling van de richtende hefboomsarm (GZ) om de statische stabiliteitscurve te bekomen. Dit wordt echter aangekaart in het volgend deel.

De data die in deze curves vervat zit, is tevens ook afhankelijk van *trim* waarden en naar welke zijde het vaartuig een *heel* zal hebben. Zo zijn cross curves voor *heel* naar PS verschillend van de cross curves voor een *heel* naar SB. Om te bepalen naar welke zijde het vaartuig zal hellen, wordt er beroep gedaan op de resulterende waarde van TCG. Uit de gekozen tekenconventie van het assenstelsel kan afgeleid worden dat een positieve waarde

van TCG overeenkomt met een *heel* naar PS, een negatieve waarde van TCG komt overeen met een *heel* naar SB.

In dit belastingsgeval worden de cross curves geraadpleegd om de metacentrische hoogte te bepalen ten opzichte van de kiel van het ponton. Elke curve is tevens ook specifiek voor een bepaalde *heel*, daarom worden de cross curves bepaald voor een interval voor de hoeken 0°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 50° en 60°, overeenstemmend met de *trim* waarde en de transversale locatie van het zwaartepunt.

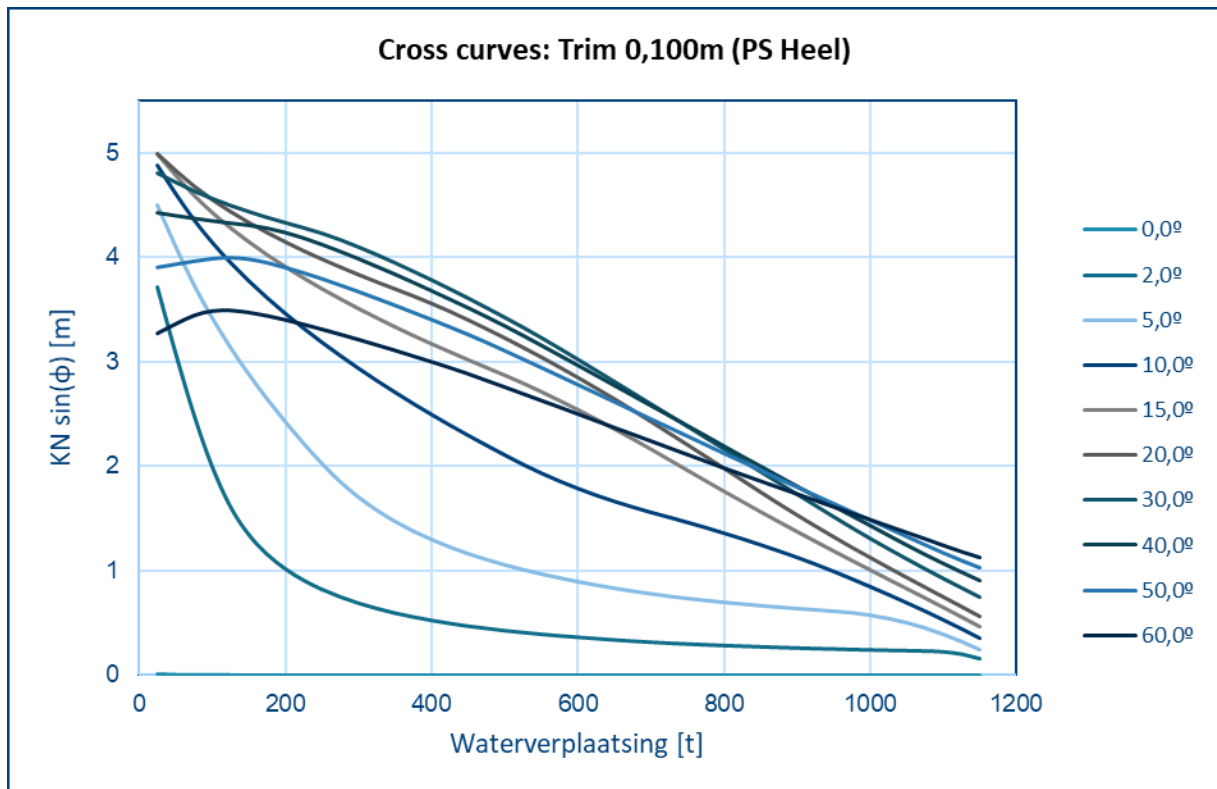
$$TCG = 0,066 \text{ m}$$

$$Trim = 0,103 \text{ m}$$

Er wordt dus een *heel* naar PS verondersteld voor een *trim* van 0,103m. De curves voor deze specifieke *trim* waarde zijn echter niet beschikbaar. Het is daarom aangeraden om te werken met een bovengrens en een ondergrens van de bepaalde *trim* waarde. De meest nauwkeurige onder- en bovengrens zijn respectievelijk 0,100m en 0,200 m. De cross curves zijn weergegeven, voor een trim van 0,100 en 0,200, in respectievelijk Figuur 56 en 57 op de volgende bladzijden.

De metacentrische hoogtes worden bepaald voor elke *heel*hoek en voor beide *trim* waardes, de berekeningen worden uitgevoerd door middel van lineaire interpolatie. Alle waardes zijn weergegeven in onderstaande tabellen (Tabel 21 en 22). De metacentrische hoogte dient nu nog een laatste maal omgevormd te worden tot een *trim* waarde van 0,103m, ook dit verloop met behulp van een lineaire interpolatie. Het vergt echter wat rekenwerk om deze methode te hanteren, maar het is wel een nauwkeurige benadering. Een groot deel van het rekenwerk zou ingekort kunnen worden indien de cross curve enkel en alleen voor de specifieke trim gegenereerd kan worden. Dan wordt de metacentrische hoogte slechts éénmaal bepaald voor de correcte *trim*. Deze vereenvoudiging is mogelijk indien de specifieke tabel onmiddellijk gegenereerd kan worden met een bepaalde software zoals *DELFTship*.

Trim 0,100 m:

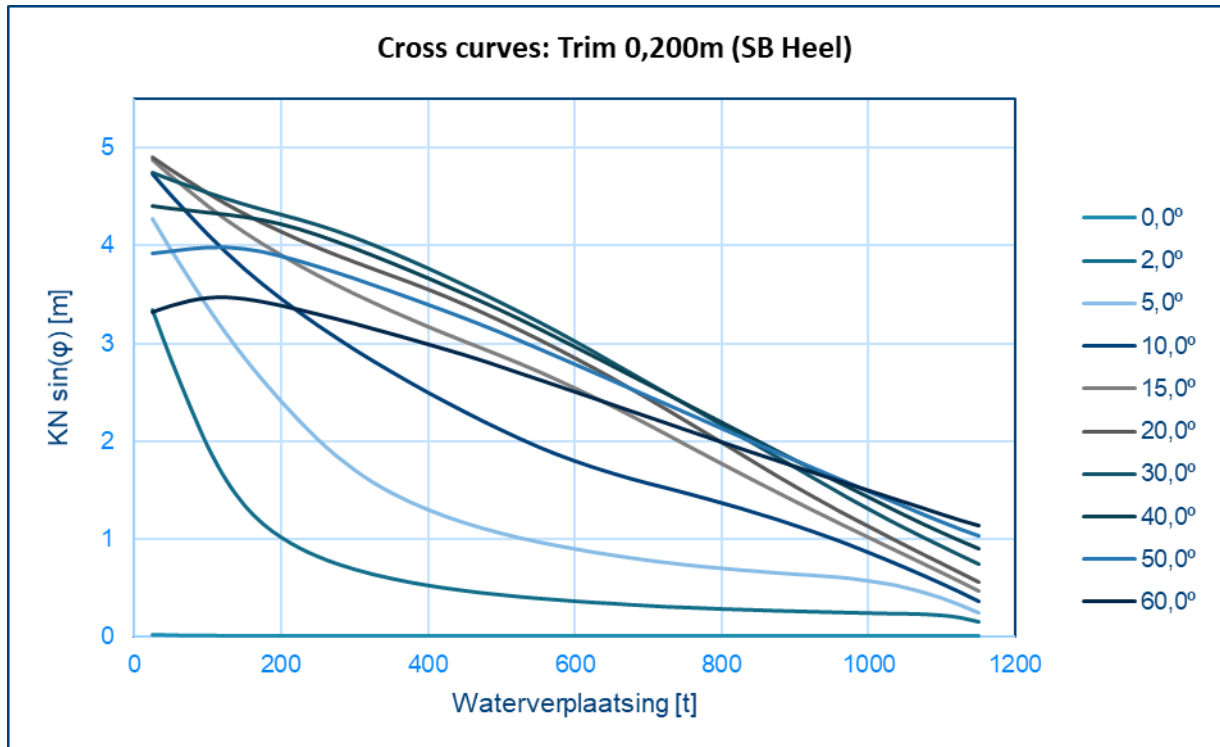


Figuur 56: Cross curves voor trim = 0,100

Tabel 21: Berekening cross curve voor trim = 0,100

<i>Heel</i> (ϕ_i)	<i>Berekening</i>	$KN_{\phi_i} \cdot \sin(\phi_i)$
Graden	$KN_{\phi_i} = KN_1 + \frac{KN_2 - KN_1}{DISP_2 - DISP_1} \cdot (DISP - DISP_1)$	m
0°	$KN_{0^\circ} = 0,012 + \frac{0,012 - 0,012}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	0,012
2°	$KN_{2^\circ} = 0,394 + \frac{0,379 - 0,394}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	0,388
5°	$KN_{5^\circ} = 0,971 + \frac{0,933 - 0,971}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	0,957
10°	$KN_{10^\circ} = 1,937 + \frac{1,861 - 1,937}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	1,908
15°	$KN_{15^\circ} = 2,714 + \frac{2,629 - 2,714}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	2,682
20°	$KN_{20^\circ} = 3,047 + \frac{2,951 - 3,047}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	3,010
30°	$KN_{30^\circ} = 3,228 + \frac{3,126 - 3,228}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	3,189
40°	$KN_{40^\circ} = 3,155 + \frac{3,060 - 3,155}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	3,119
50°	$KN_{50^\circ} = 2,944 + \frac{2,863 - 2,944}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	2,913
60°	$KN_{60^\circ} = 2,629 + \frac{2,565 - 2,629}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	2,605

Trim 0,200 m:



Figuur 57: Cross curves voor trim = 0,200

Tabel 22: Berekening cross crves voor trim = 0,200

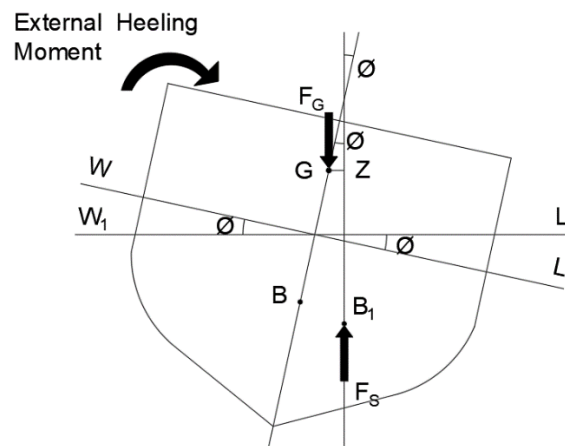
<i>Heel</i> (ϕ_i)	<i>Berekening</i>	$KN_{\phi_i \sin(\phi_i)}$
Graden	$KN_{\phi_i} = KN_1 + \frac{KN_2 - KN_1}{DISP_2 - DISP_1} \cdot (DISP - DISP_1)$	m
0°	$KN_{0^\circ} = 0,012 + \frac{0,012 - 0,012}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	0,012
2°	$KN_{2^\circ} = 0,395 + \frac{0,380 - 0,395}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	0,389
5°	$KN_{5^\circ} = 0,971 + \frac{0,933 - 0,971}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	0,957
10°	$KN_{10^\circ} = 1,938 + \frac{1,862 - 1,938}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	1,909
15°	$KN_{15^\circ} = 2,711 + \frac{2,627 - 2,711}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	2,679
20°	$KN_{20^\circ} = 3,045 + \frac{2,950 - 3,045}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	3,009
30°	$KN_{30^\circ} = 3,229 + \frac{3,129 - 3,229}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	3,191
40°	$KN_{40^\circ} = 3,159 + \frac{3,064 - 3,159}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	3,123
50°	$KN_{50^\circ} = 2,949 + \frac{2,868 - 2,949}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	2,918
60°	$KN_{60^\circ} = 2,634 + \frac{2,570 - 2,634}{575,100 - 550,1} \cdot (559,626 - 550,100)$	2,610

4.3.5 Statische stabiliteitscurve

Zoals in de literatuurstudie is vermeld, zal een vaartuig een richtend koppel ondervinden wanneer externe factoren een bepaalde *heel* hoek veroorzaken. Het richtend koppel is het moment dat het vaartuig terug in zijn rechtopstaande positie tracht te brengen eens de externe krachten geen invloed meer uitoefenen. De grootte van dit richtende moment is dus een indicatie voor de stabiliteit van een vaartuig en het kan bekomen worden met de volgende formule:

$$\text{Richtend moment } [t \cdot m] = \text{DISP}[t] \cdot \text{GZ}[m]$$

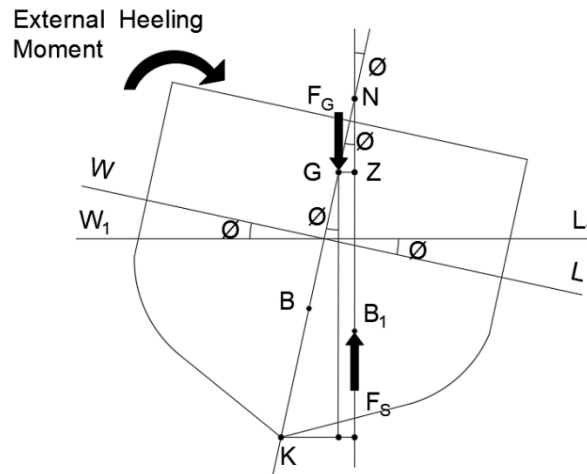
In onderstaande Figuur 58 wordt de hefboomsarm GZ voorgesteld.



Figuur 58: Richtend moment als gevolg van extern moment

Uit de formule blijkt dat het richtend moment afhankelijk is van de waterverplaatsing en een GZ-waarde. Deze GZ stelt de richtende hefboomsarm voor en is afhankelijk van de *heel* hoek. Dit is een logisch gevolg, want als het vaartuig ten gevolge van een externe kracht een grote *heel* heeft, dient het richtende moment en bijgevolg de richtende hefboomsarm voldoende te zijn om het vaartuig terug rechtopstaand te positioneren.

In het deel omtrent cross curves werd al aangehaald dat de metacentrische hoogte wordt bepaald voor de *heel* hoeken: 0°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 50° en 60° door een vals metacentrum (N) te hanteren dat op de centrale as blijft van het vaartuig. Om de GZ-waardes voor deze hellingshoeken te bepalen, dient er een verband gevonden te worden met de ligging van het metacentrum. Beschouw volgende situatie in Figuur 59 op de volgende bladzijde waar het ponton een bepaalde *heel* heeft.



Figuur 59: Initiële heel en vrije oppervlakte-effect

In deze situatie is GZ de transversale afstand tussen de gewichtsvector en de vector van de opwaartse kracht. Deze afstand kan in verband gebracht worden met de ligging van het metacentrum door de nodige driehoeksmetkundige bewerkingen toe te passen.

$$GZ = KN \cdot \sin(\phi) - (VCG) \cdot \sin(\phi)$$

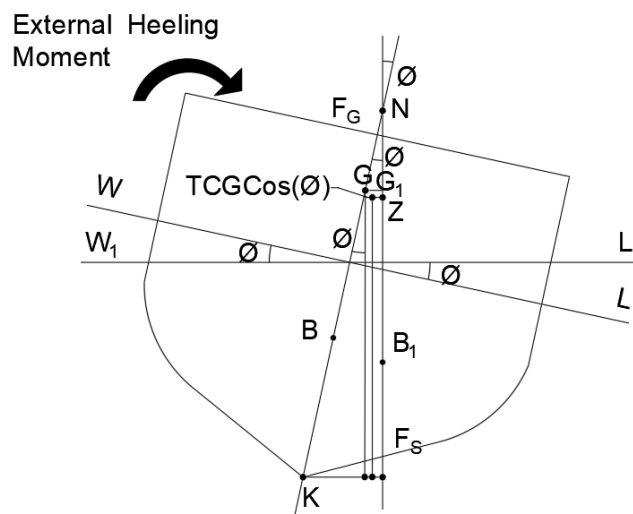
Door het vrije oppervlakte-effect in rekening te brengen, dient er nog een correctie op de verticale locatie van het zwaartepunt doorgevoerd te worden.

$$GZ = KN \cdot \sin(\phi) - (VCG') \cdot \sin(\phi)$$

Met: $VCG' = VCG + GG'$

Bovenstaande formule is bekomen door enkel rekening te houden met een situatie waar het zwaartepunt op de centrale as van het vaartuig is gelegen. In praktijk zal het zwaartepunt nooit rechtstreeks op de centrale as gelegen zijn. Hierdoor dient de transversale locatie van het zwaartepunt ook in rekening gebracht te worden, zoals weergegeven in Figuur 60.

$$GZ = KN \cdot \sin(\phi) - (VCG + GG') \cdot \sin(\phi) - TCG \cdot \cos(\phi)$$



Figuur 60: Extra zwaartepunt in rekening te brengen

De statische stabiliteitscurve is een plot van waarden voor de oprichtende hefboomsarm ten opzichte van een bepaalde *heel* hoek. De vorm van deze curve varieert afhankelijk van de waterverplaatsing, *trim*, verticale en transversale positie van het zwaartepunt en het effect van het vrije vloeistofoppervlak. Voor elke *heel* hoek worden de termen in de bovenstaande formule bepaald, en samengevat in onderstaande Tabel 23.

Tabel 23: Tussenresultaten berekening hefboomsarm GZ

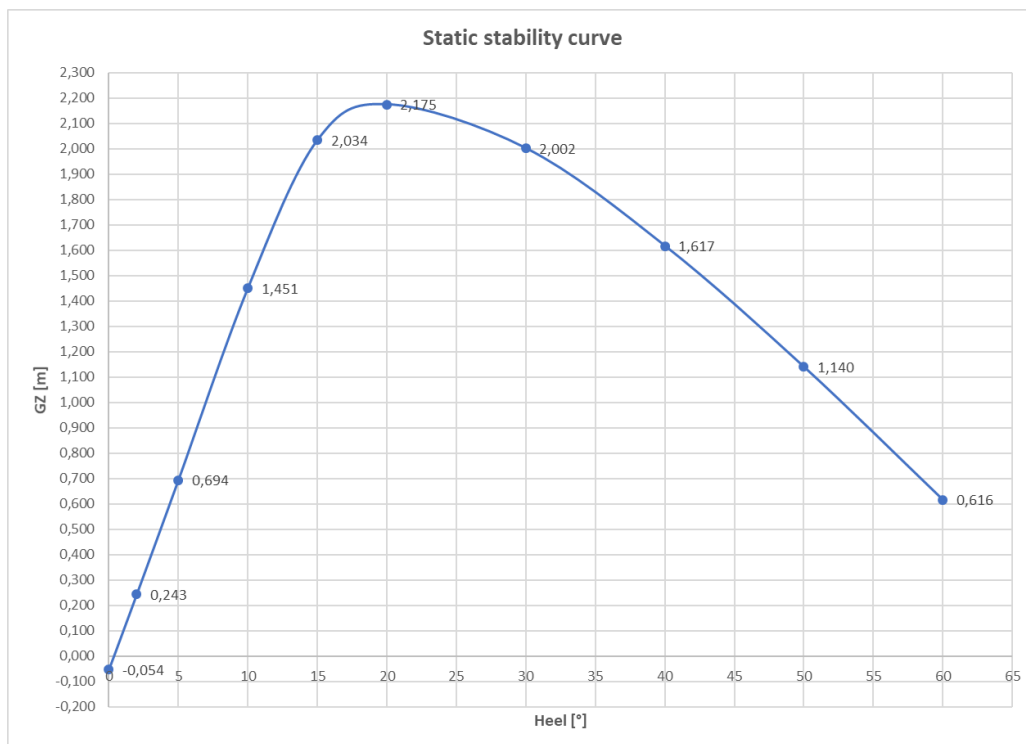
<i>Heel</i>	<i>Waterverplaatsing</i>	$KN_{\phi_i} \sin(\phi_i)$	$VCG \cdot \sin(\phi)$	$GG' \cdot \sin(\phi)$	$TCG \cdot \cos(\phi)$
Graden	t	m	m	m	m
0°	559,626	0,012	0,000	0,000	0,066
2°	559,626	0,388	0,079	0,000	0,066
5°	559,626	0,957	0,197	0,000	0,066
10°	559,626	1,908	0,392	0,000	0,065
15°	559,626	2,682	0,584	0,000	0,064
20°	559,626	3,010	0,772	0,001	0,062
30°	559,626	3,189	1,129	0,001	0,057
40°	559,626	3,119	1,451	0,001	0,050
50°	559,626	2,913	1,730	0,001	0,042
60°	559,626	2,605	1,955	0,001	0,033

Door alle termen in bovenstaande Tabel 23 te implementeren, kan de GZ-waarde voor elke *heel*-hoek bepaald worden. De resultaten zijn samengevat in Tabel 24 op volgende bladzijde.

Tabel 24: Berekening GZ-waardes voor verschillende heel hoeken

Heel (ϕ_i)	Berekening	GZ_{ϕ_i}
Graden		m
0°	$GZ_{\phi_i} = KN \cdot \sin(\phi_i) - (VCG + GG') \cdot \sin(\phi_i) - TCG \cdot \cos(\phi_i)$	-0,054
2°		0,243
5°		0,694
10°		1,451
15°		2,034
20°		2,175
30°		2,002
40°		1,617
50°		1,140
60°		0,616

Om tot de statische stabiliteitscurve te komen, worden de waardes van GZ geplott ten opzichte van de verschillende *heel* hoeken. Deze GZ-curve of *static stability curve* wordt weergegeven in onderstaande Figuur 61.



Figuur 61: Static stability curve voor manuele verificatie

Initial list

Op de bekomen GZ-curve zal blijken dat er enkele gebieden te bespreken zijn. Ten eerste valt het op dat de richtende hefboom met een negatieve waarde begint (-0,054 m). Vervolgens zal de curve bij benadering een lineair gedrag aannemen tot een *heel* hoek tussen de 10° en 15° is bereikt. Bij de intersectie van de curve met de x-as zal de hefboom een waarde van nul aannemen waardoor het vaartuig voor deze lastencombinatie een initiële list zal aannemen. De list wordt altijd bepaald uitgaande van de statische stabiliteitscurve door het eerst nulpunt te gaan bepalen.

Op de curve is te zien dat de *list* in dit geval een kleine waarde zal aannemen. Hierdoor is niet aangewezen om deze waarde rechtstreeks af te lezen op de curve.

Voor kleine *heel* hoeken is gebleken dat de curve een lineair gedrag vertoont. Zo kan de vergelijking voor een lineaire rechte worden opgesteld:

$$y = a \cdot x + q$$

Met: a De richtingscoëfficiënt van de vergelijking
 q Een extra constante

Voor deze vergelijking kan de y vervangen worden door GZ_i , x staat in de vergelijking voor een *heel* hoek: ϕ_i .

$$GZ_i = a \cdot \phi_i + q$$

De exacte waarde van de richtingscoëfficiënt a en de constante q kan bepaald worden op basis van de coördinaten van de eerste twee punten op de vergelijking:

$$GZ_i - GZ_1 = \frac{GZ_2 - GZ_1}{\phi_2 - \phi_1} \cdot (\phi_i - \phi_1)$$
$$GZ_i = \frac{GZ_2 - GZ_1}{\phi_2 - \phi_1} \cdot \phi_i - \phi_1 \cdot \frac{GZ_2 - GZ_1}{\phi_2 - \phi_1} + GZ_1$$

De coördinaten van de eerste twee punten in bovenstaande vergelijking invullen geeft:

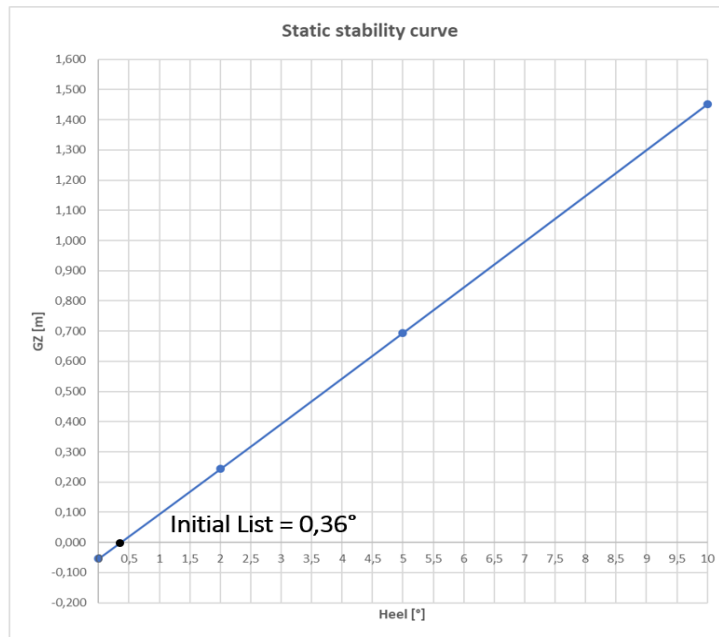
$$GZ_i = \frac{0,243 - (-0,054)}{2 - 0} \cdot \phi_i - 0 \cdot \frac{0,243 - (-0,054)}{2 - 0} + (-0,054)$$
$$GZ_i = 0,149 \cdot \phi_i - 0,054$$

De initiële list kan nu nauwkeurig berekend worden door het nulpunt van deze vergelijking te bepalen. De vergelijking is ook geplot in Figuur 62 op de volgende bladzijde.

$$0 = 0,149 \cdot \phi_i - 0,054$$

$$\phi_i = \frac{0,054}{0,149} = 0,36^\circ$$

$$\text{Initial list} = 0,36^\circ$$



Figuur 62: Initiële list bepalen uit richtingscoëfficiënt GZ-curve

Op het verdere verloop van de curve zal de GZ-waarde blijven stijgen tot een maximum is bereikt. Voor een *heel* van 20° zal de richtende hefboom zijn maximale waarde hebben. Daarna zal blijken dat de waarde van de hefboom weer zal dalen eens de helling verder opgevoerd wordt.

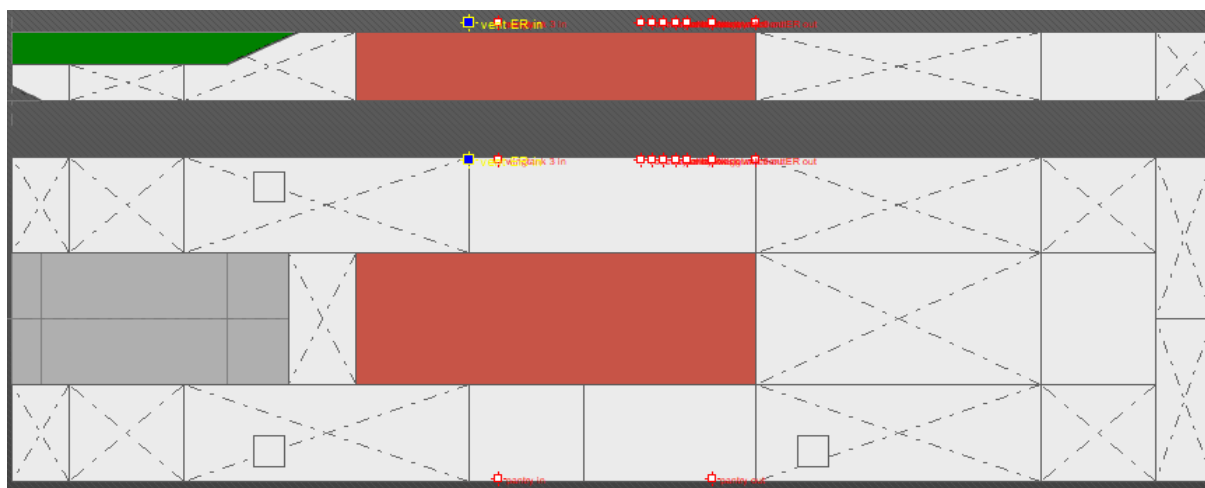
Bepalen van de maximale hefboomsarm

Het bepalen van de maximale waarde van GZ is ook één van de aspecten die een rol spelen binnen de stabiliteitsverificatie van het ponton. Wanneer een vaartuig openingen op zijn structuur heeft op plaatsen die niet waterdicht zijn, kan dit een limitering veroorzaken van de maximale GZ-waarde. Deze niet-waterdichte punten of *downflooding points* zijn meestal aanwezig op een vaartuig, vaak komen *downflooding points* voor als ventilatieopeningen. Omdat het ponton Waterduvel in zijn inwendige structuur een machinekamer bezit en er daarnaast ook nog brandstoftanks aanwezig zijn, zal het ponton de volgende kritische punten bezitten die in Tabel 25 op de volgende bladzijde zijn opgesomd.

Tabel 25: Kritische punten

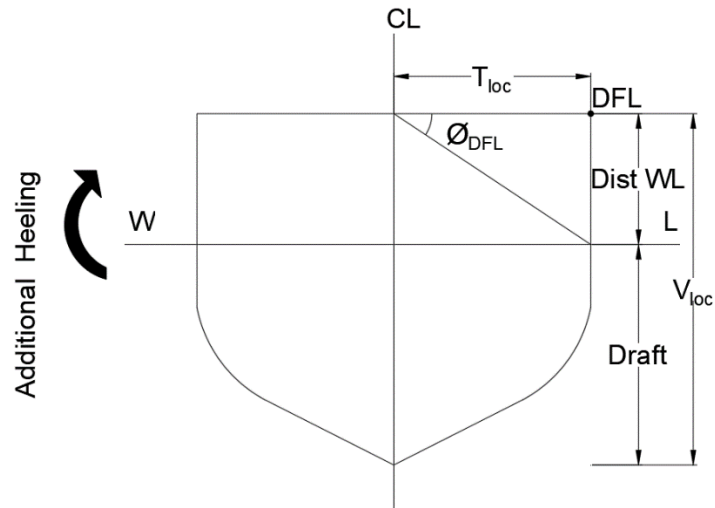
Beschrijving	Type	L loc	T loc	T loc
		m	m	m
Vent ER in	Downflooding	16,000	5,800	2,800
Vent ER out	Downflooding	26,000	5,800	2,800
Vent daytank	Downflooding	22,000	5,800	2,800
Vent fuel tank	Downflooding	22,400	5,800	2,800
Vent dirty oil	Downflooding	22,800	5,800	2,800
Vent sewage	Downflooding	23,200	5,800	2,800
Vent Fresh water	Downflooding	23,600	5,800	2,800
Wingtank 3 in	Downflooding	17,000	5,800	2,800
Wingtank 3 out	Downflooding	24,500	5,800	2,800
Pantry in	Downflooding	17,000	-5,800	2,800
Pantry out	Downflooding	24,500	-5,800	2,800

In onderstaande Figuur 63 zijn de kritische punten ook aangeduid met rode en gele bollen.



Figuur 63: Locatie kritische punten

Van alle *downflooding points* wordt de *submersion angle* bepaald. Dit is de hoek waaronder het vaartuig moet hellen zodat het betreffende *downflooding point* gelijk komt te liggen met het wateroppervlak. Indien er een ideale situatie verondersteld wordt waar het vaartuig geen initiële list zal hebben, kan de *submersion angle* ϕ_{DFL} bepaald worden als de verticale afstand tot aan het wateroppervlak ($Dist_{WL}$) en de transversale afstand ten opzichte van de centrale as (T_{loc}) gekend zijn, zoals weergegeven in Figuur 64 op de volgende bladzijde.



Figuur 64: Afstand tot downflooding point

$$\phi_{DFL} = \tan^{-1} \left(\frac{Dist_{WL}}{T_{loc}} \right)$$

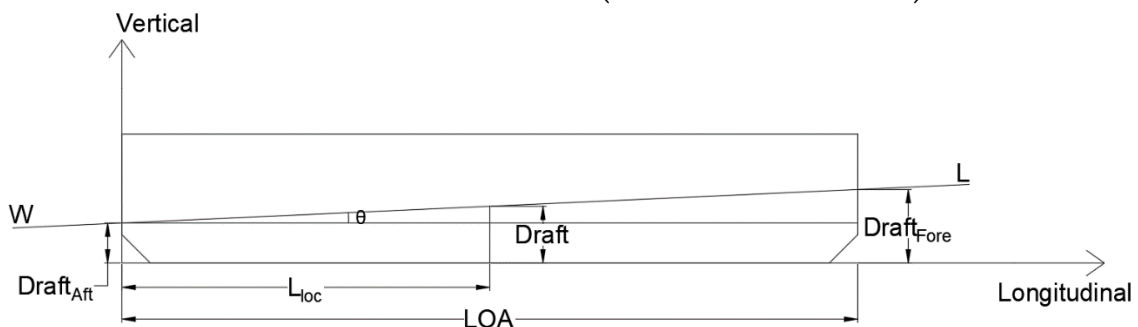
De afstand van het *downflooding point* tot aan het wateroppervlak kan berekend worden als de diepgang of *draft* gekend is.

$$Dist_{WL} = V_{loc} - Draft$$

De diepgang is afhankelijk van de longitudinale positie van het *downflooding point*. Om de diepgang op een bepaalde longitudinale locatie te bepalen, wordt de volgende formule gehanteerd, waarbij de gegevens verduidelijkt worden in Figuur 65.

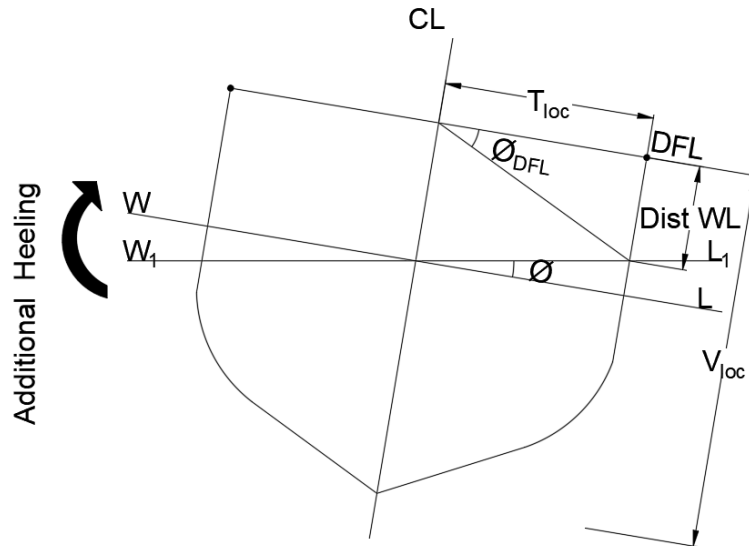
$$Draft = Draft_{Aft} + L_{loc} \cdot \tan(\theta)$$

$$Draft = Draft_{Aft} + L_{loc} \cdot \left(\frac{Draft_{Fore} - Draft_{Aft}}{LOA} \right)$$



Figuur 65: Variabelen berekening diepgang

Wanneer het vaartuig een initiële *heel*/slagzij heeft, wordt de afstand van het *downflooding point* tot aan het wateroppervlak op een andere manier bepaald. De afstand zal echter ingekort kunnen worden zoals weergegeven in Figuur 66 op de volgende bladzijde.



Figuur 66: Afstand tot downflooding point bij initiële hee

$$Dist_{WL} = V_{loc} - Drafft - T_{loc} \cdot \tan(\phi)$$

$$\phi_{DFL} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{loc} - Drafft - T_{loc} \cdot \tan(\phi)}{T_{loc}} \right)$$

$$\phi_{DFL} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{loc} - \left(Drafft_{Aft} + L_{loc} \cdot \tan \left(\frac{Drafft_{Fore} - Drafft_{Aft}}{LOA} \right) \right) - T_{loc} \cdot \tan(\phi)}{T_{loc}} \right)$$

Voor alle *downflooding points* worden de *submersion angles* met bovenstaande formules bepaald. Voor het eerste *downflooding point* (*Vent ER in*) wordt de diepgang op basis van zijn longitudinale locatie bepaald:

$$Drafft = 1,087 + 16,000 \cdot \left(\frac{1,190 - 1,087}{42,000} \right) = \mathbf{1,126\ m}$$

Vervolgens wordt de afstand tot aan het wateroppervlak bepaald voor *downflooding point: Vent ER in*:

$$Dist_{WL} = 2,800 - 1,126 - 0,036 = \mathbf{1,638\ m}$$

Zo kan de *submersion angle* bepaald worden:

$$\phi_{DFL} = \tan^{-1} \left(\frac{1,638}{5,800} \right) = \mathbf{15,77^\circ}$$

In Tabel 26 op de volgende bladzijde is de berekening van de *submersion angle* uitgevoerd voor alle downflooding points.

Tabel 26: Submersion angles: downflooding points

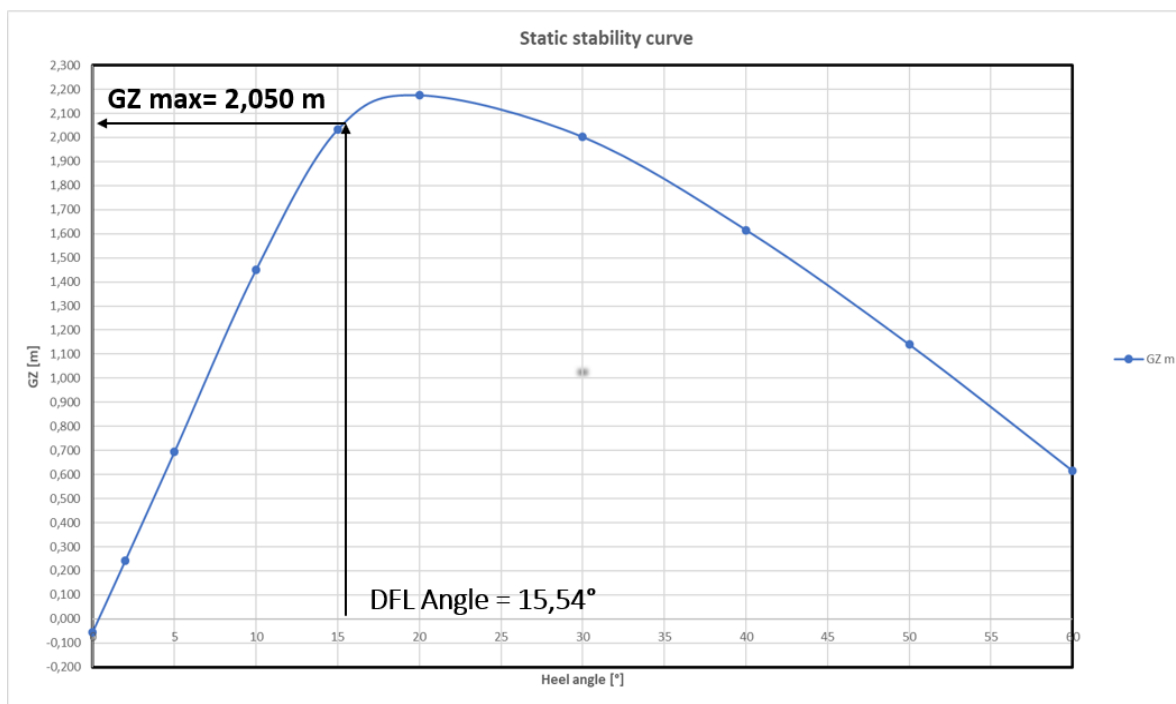
Beschrijving	V_{loc}	<i>Draft</i>	$T_{loc} \cdot \tan(\varnothing)$	$Dist_{WL}$	\varnothing_{DFL}
	m	m	m	m	Degr(°)
<i>Vent ER in</i>	2,800	1,126	0,036	1,638	15,77
<i>Vent ER out</i>	2,800	1,150	0,036	1,613	15,54
<i>Vent daytank</i>	2,800	1,140	0,036	1,623	15,63
<i>Vent fuel tank</i>	2,800	1,141	0,036	1,622	15,62
<i>Vent dirty oil</i>	2,800	1,143	0,036	1,621	15,61
<i>Vent sewage</i>	2,800	1,144	0,036	1,620	15,61
<i>Vent Fresh water</i>	2,800	1,144	0,036	1,619	15,60
<i>Wingtank 3 in</i>	2,800	1,128	0,036	1,634	15,75
<i>Wingtank 3 out</i>	2,800	1,148	0,036	1,618	15,58
<i>Pantry in</i>	2,800	1,128	-0,036	1,708	16,41
<i>Pantry out</i>	2,800	1,148	-0,036	1,690	16,24

De meest kritische *submersion angle* is de minimale waarde van alle hoeken voor alle *downflooding points*. Uit bovenstaande Tabel 26 kan afgelezen worden dat deze gelijk is aan:

$$\varnothing_{DFL} = 15,54^\circ$$

De aanwezigheid van deze *downflooding points* zal dus een limiterende werking hebben op de bepaling van de maximale GZ-waarde. Op basis van de statische stabiliteitscurve, welke afgebeeld is in Figuur 67 op de volgende bladzijde, kan de maximale richtende hefboomsarm bepaald worden. Voor dit belastingsgeval wordt de volgende waarde op de curve afgelezen:

$$GZ_{max} = 2,050 \text{ m}$$



Figuur 67: Maximaal toegestane GZ-waarde afhankelijk van downflooding angle

Windcriteria

Het effect van de windkracht dient ook in rekening gebracht te worden. Hier wordt er op basis van de windsilhouetten een moment bepaald dat voor een extra slagzij of *heel* zal zorgen. Omdat de wind enkel zal aangrijpen op het gedeelte van het ponton dat zich boven het wateroppervlak bevindt, zijn de windsilhouetten afhankelijk van het gebruikte materieel op het ponton. Zo zal het gebruik van een giekkraan een ander windoppervlak impliceren dan voor het gebruik van een *excavator*.

Voor dit belastingsgeval wordt er logischerwijs de windsilhouettentabel van een giekkraan geraadpleegd. Hierdoor kan het *wind heeling moment* voor een waterverplaatsing van 559,626 ton en een *draft* van 1,139 m berekend worden op basis van een lineaire interpolatie.

De momenten worden berekend op basis van twee windcriteria. Voor het eerste windcriterium wordt er rekening gehouden met de voorschriften voor vaartuigen die zich in binnenwateren bevinden, hier wordt er gerekend met een maximale winddruk van 13 kg/m². Het tweede windcriterium houdt rekening met bijzondere bepalingen van drijvende werktuigen waarbij een meer kritische winddruk van 40 kg/m² gehanteerd wordt.

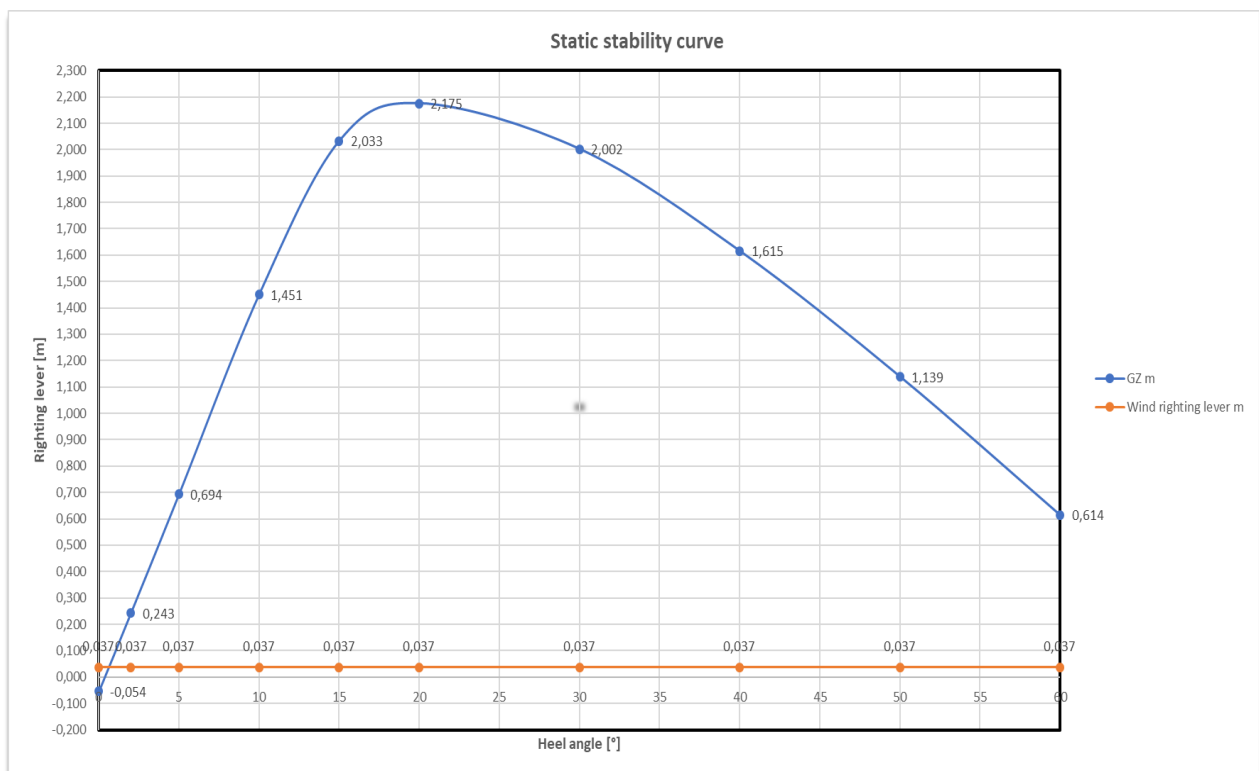
Voor het eerste windcriterium wordt er dus een winddruk van 13 kg/m² gebruikt. Er dient wel opgemerkt te worden dat de windsilhouetten gebruik maken van een standaardwaarde voor de winddruk, deze bedraagt 25 kg/m². Hierdoor is er nog een omzetting naar de gewenste winddruk vereist. Eens deze omzetting is gedaan, zal het windmoment voor het eerste criterium de volgende waarde aannemen:

$$\text{Wind heeling moment} = 20,719 \text{ [t} \cdot \text{m]}$$

De richtende hefboomsarm kan bekomen worden door het *wind heeling* moment te delen door de totale waterverplaatsing dat het vaartuig veroorzaakt:

$$\text{Richtende hefboom} = \frac{\text{Wind heeling moment}}{\text{DISP}} = \frac{20,719}{559,626} = 0,037 \text{ [m]}$$

Deze hefboom kan constant beschouwd worden voor alle *heel*-hoeken, zo kan de volgende curve in Figuur 68 geconstrueerd worden.



Figuur 68: Hefboomsarm wind heeling moment op de GZ-curve

Het windcriterium wordt bekomen door de *heel*/hoek te bepalen van de intersectie tussen de GZ-curve en de richtende windhefboomsarm. Op de curve kan een waarde van 0,5° worden afgelezen.

De waarde kan ook meer in detail worden bepaald door de vergelijking van het lineaire deel van de GZ-curve te raadplegen:

$$GZ_i = 0,149 \cdot \phi_i - 0,054$$

Voor de GZ-waarde kan de richtende windhefboom worden ingevuld en kan de vergelijking naar ϕ_i worden opgelost:

$$\phi_i = \frac{0,037 + 0,054}{0,149} = 0,611^\circ$$

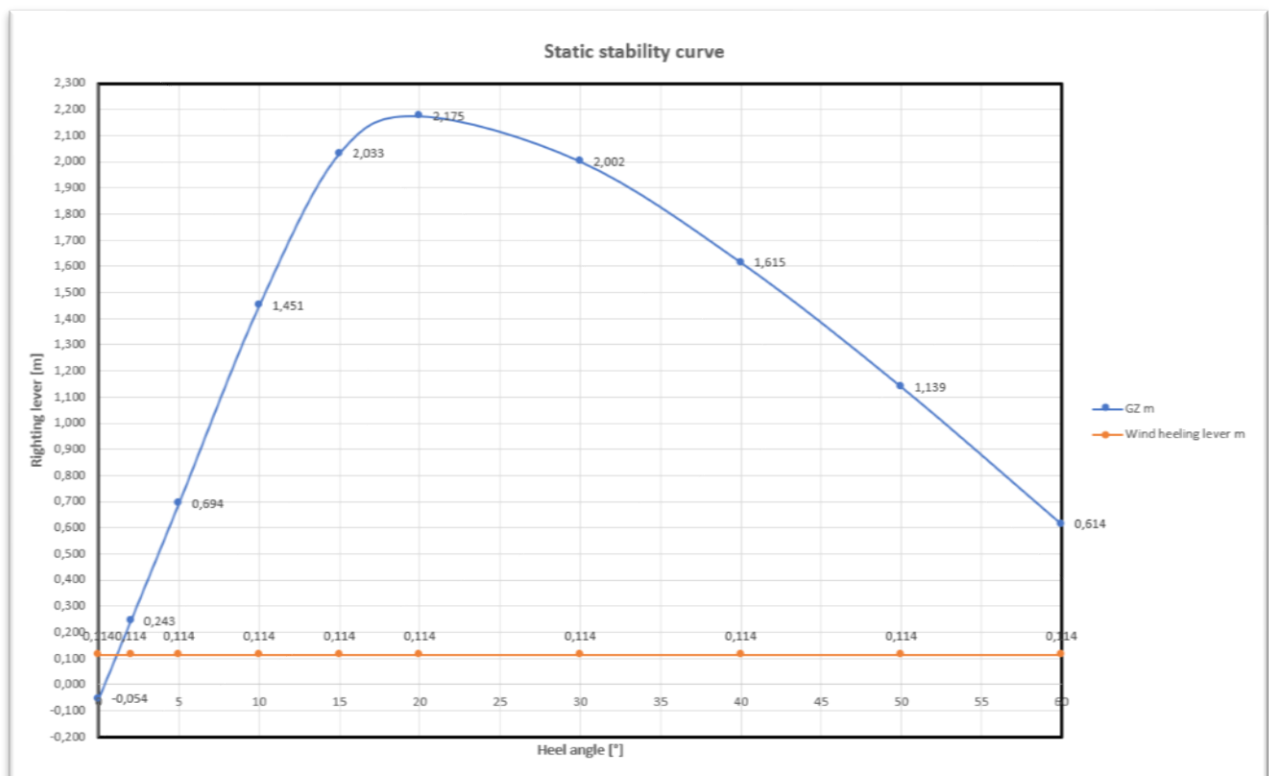
$$\text{Wind criterion} = 0,61^\circ$$

Deze procedure kan analoog worden toegepast voor een winddruk van 40 kg/m²:

$$\text{Wind heeling moment} = 63,751 [t \cdot m]$$

$$\text{Richtende hefboom} = \frac{63,751}{559,626} = 0,114 [m]$$

Deze richtende hefboomsarm wordt als volgt geplot:



Figuur 69: Richtende hefboomsarm op GZ-curve

De vergelijking van het lineaire deel is:

$$GZ_i = 0,149 \cdot \phi_i - 0,054$$

Voor de GZ-waarde kan opnieuw de richtende windhefboom worden ingevuld en kan de vergelijking zo naar ϕ_i worden opgelost:

$$\phi_i = \frac{0,114 + 0,054}{0,149} = 1,127^\circ$$

Het windcriterium voor een winddruk van 40 kg/m² bedraagt 1,127°.

$$\text{Wind criterion} = 1,13^\circ$$

Additional heel moment

Naast de invloed van de windkrachten op de volledige structuur zal er ook nog een additioneel hellend moment worden berekend. Het hellend moment houdt rekening met de invloed van de kraan. Zo wordt er verondersteld dat de kraan een last van 48,110 ton zal nemen met zijn maximale vlucht gekoppeld aan deze last. Er wordt overigens verondersteld dat de kraan 90° zal zwenken waardoor de vlucht een grote rol speelt in de bepaling van het zwaartepunt van de last in transversale richting.

Het *additional heeling moment* kan als volgt worden bepaald:

$$\text{Additional heeling moment [t} \cdot \text{m]} = \text{weight[t]} \cdot TCG_{load} \text{ [m]}$$

$$\text{Additional heeling moment} = 48,110 \cdot 12,200 = 586,942 \text{ [t} \cdot \text{m]}$$

Om het totale hellende moment te berekenen, wordt deze waarde nog opgeteld met het meest kritische wind moment:

$$\begin{aligned} \text{Calculated heeling moment [t} \cdot \text{m]} \\ = \text{Additional heeling moment [t} \cdot \text{m]} + \text{wind heeling moment [t} \cdot \text{m]} \end{aligned}$$

$$\text{Calculated heeling moment} = 586,942 + 63,751 = 650,693 \text{ [t} \cdot \text{m]}$$

Dit hellend moment wordt omgezet naar een overeenstemmende richtende hefboom door deze waarde te delen door de totale waterverplaatsing:

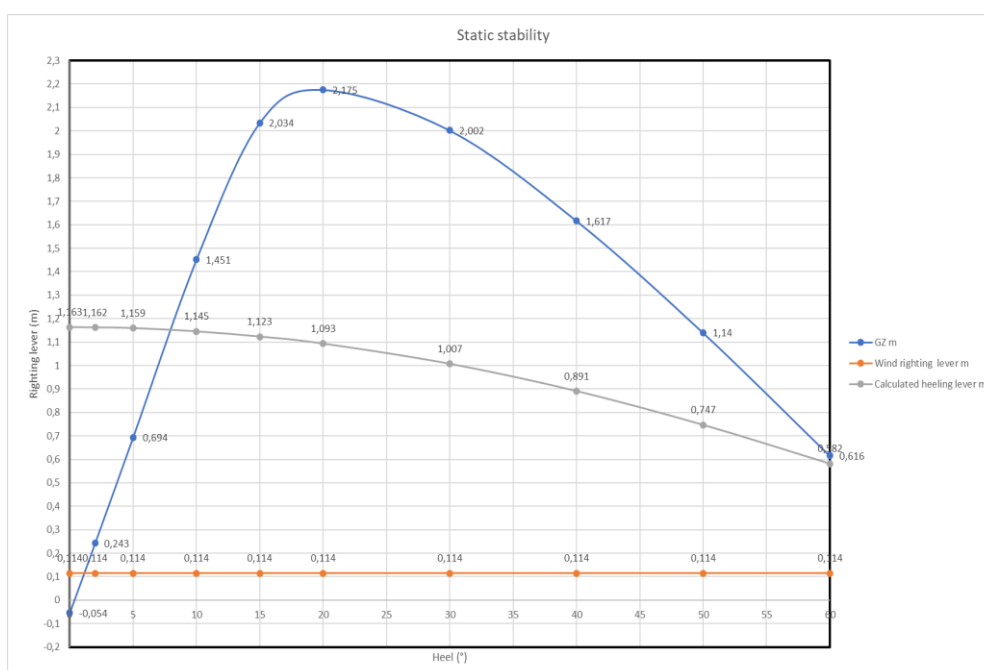
$$\text{Calculated heeling lever [m]} = \frac{\text{Calculated heeling moment [t} \cdot \text{m]}}{\text{DISP [t]}} = 1,163 \text{ [m]}$$

Deze hefboomsarmen zijn echter afhankelijk van de hellingshoek, hierdoor wordt de curve opgesteld door elke hefboomsarm te vermenigvuldigen met $\cos(\phi_i)$. In Tabel 27 op de volgende bladzijde worden de berekende hefboomsarmen samengevat.

Tabel 27: Berekening heefboomsarm additional heel moment

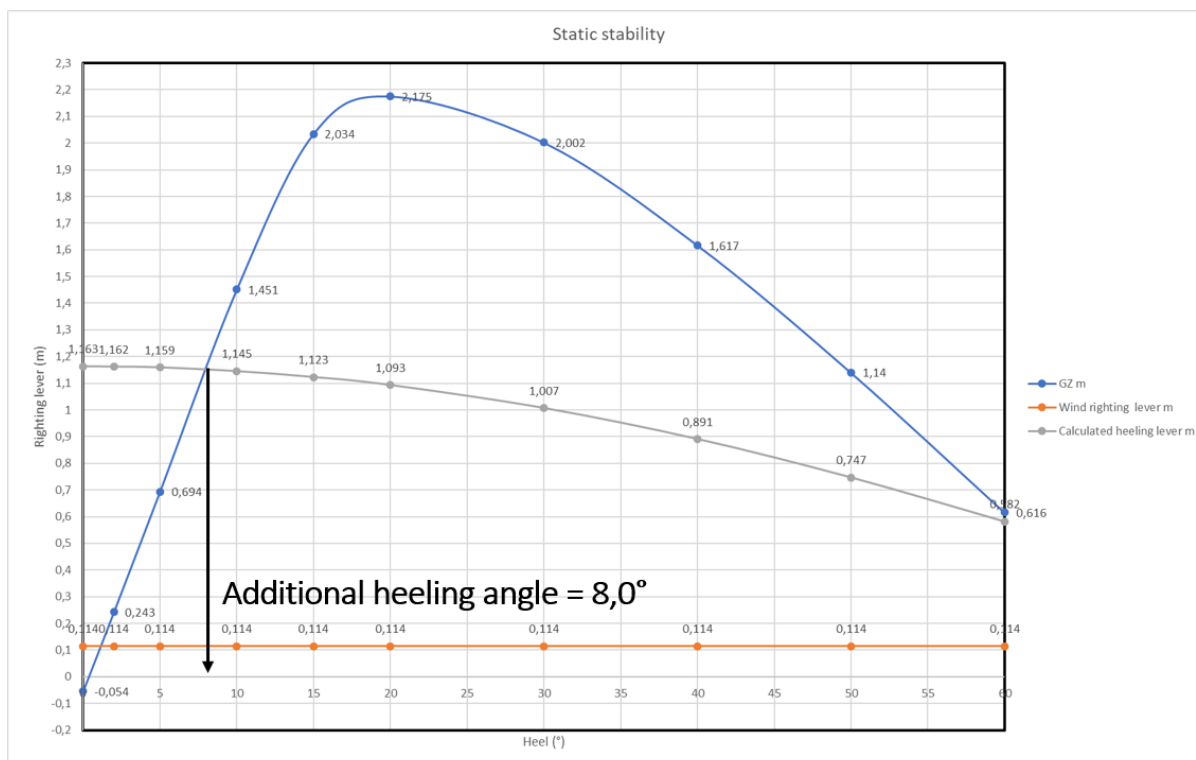
Heel	GZ	Wind righting lever	Calculated heeling lever
Graden (°)	m	m	m
0	-0,054	0,114	1,163
2	0,243	0,114	1,162
5	0,694	0,114	1,159
10	1,451	0,114	1,145
15	2,034	0,114	1,123
20	2,175	0,114	1,093
30	2,002	0,114	1,007
40	1,617	0,114	0,891
50	1,140	0,114	0,747
60	0,616	0,114	0,582

De waarden in bovenstaande tabel worden geplot om de volgende curves te verkrijgen in onderstaande Figuur 70.



Figuur 70: GZ-curve met heefboomsarm additional heeling moment

Op basis van deze curve kan de *additional heeling angle* bepaald worden. Dit is de *heel* hoek die overeenkomt met de intersectie van de GZ-curve en de *Calculated heeling lever* curve. Dit is weergegeven in onderstaande Figuur 71.



Figuur 71: Bepaling additional heeling angle uit GZ-curve

Deze waarde kan op de curve worden afgelezen:

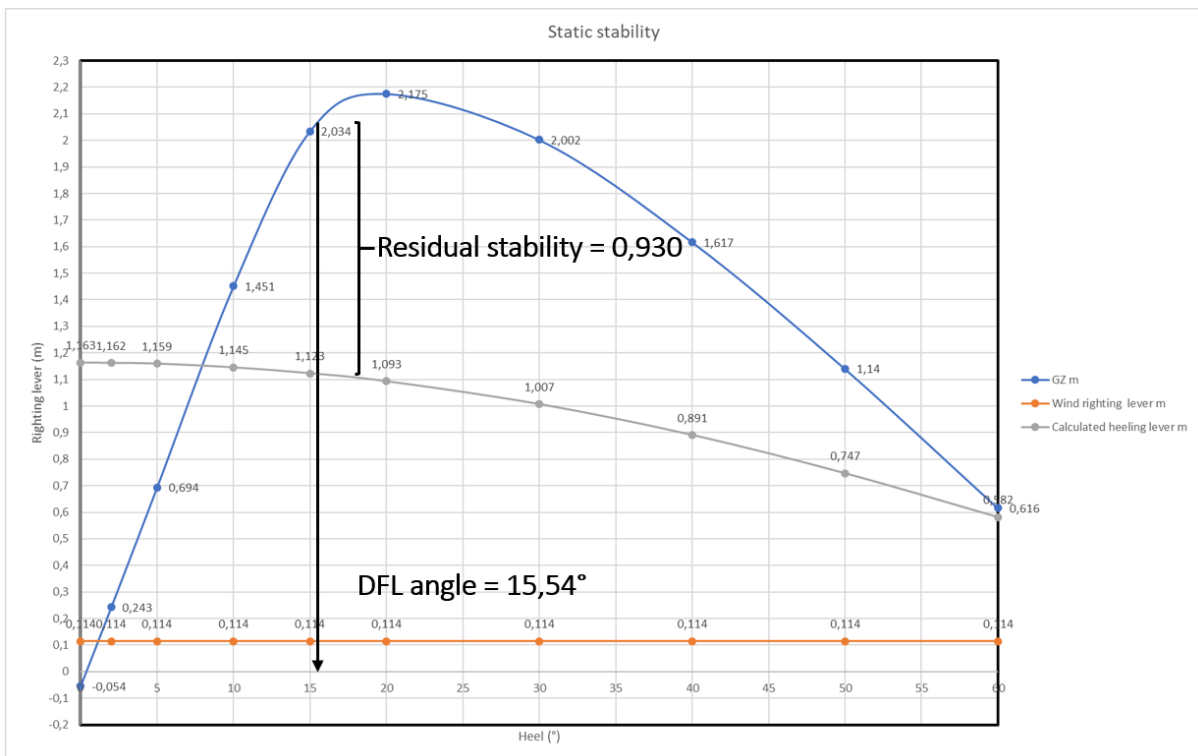
$$\text{Calculated heeling angle} = 8,0^\circ$$

Residual stability

De *residual stability* of overblijvende stabiliteit omvat de resterende GZ-waarde nadat de GZ-curve gelimiteerd werd door de *calculated heeling* curve. De *residual stability* kan bekomen worden door GZ-max te verminderen met de *calculated heeling lever* voor de *submersion angle* van het meest kritische *downflooding point*. Dit is weergegeven in Figuur 72 op volgende bladzijde.

$$\text{Residual stability [m]} = GZ_{max}[m] - \text{Calculated heeling lever} \cdot \cos(\phi_{DFL}) [m]$$

$$\text{Residual stability} = 2,050 - 1,163 \cdot \cos(15,54) = 0,930 \text{ m}$$



Figuur 72: Bepaling residual stability uit de GZ-curve

Initiële metacentrische hoogte

De initiële metacentrische hoogte kan bepaald worden op basis van de GZ-curve. Zoals eerder al is aangegeven, zal deze curve voor kleine *heel*-hoeken een lineair gedrag vertonen. Door lineaire rechte te laten plotten en deze te laten oplopen tot een *heel* hoek van $57,3^\circ$. De overeenkomstige waarde op de *righting lever* as stelt de initiële metacentrische hoogte GM voor. De vergelijking van de lineaire rechte is eerder in dit hoofdstuk al opgesteld:

$$GZ_i = 0,149 \cdot \phi_i - 0,054$$

De *heel* hoek van $57,3^\circ$ invullen in de vergelijking geeft:

$$GM = 0,149 \cdot 57,3 - 0,054 = 8,484 \text{ m}$$

Vrijboord

Tot slot wordt het vrijboord of *free board* nog bepaald. Het vrijboord is de verticale afstand van het dek tot aan de waterlijn, deze afstand hangt af van de diepgang of *draft* van het vaartuig. Zo is ook gebleken dat de diepgang van een vaartuig kan verschillen naargelang de locatie op het vaartuig.

Het vrijboord wordt op de vier hoekpunten van het ponton berekend als volgt:

1) Vrijboord: *SB Aft*

$$FB_{SBAft} = V_{loc,Aft} - Draft_{Aft} - T_{loc,SBAft} \cdot \tan(\emptyset)$$

$$FB_{SBAft} = 2,800 - 1,087 - (-5,800) \cdot \tan(0,36) = 1,750 \text{ m}$$

2) Vrijboord: *PS Aft*

$$FB_{PSAft} = V_{loc,Aft} - Draft_{Aft} - T_{loc,PSAft} \cdot \tan(\emptyset)$$

$$FB_{PSAft} = 2,800 - 1,087 - (5,800) \cdot \tan(0,36) = 1,677 \text{ m}$$

3) Vrijboord: *SB Fore*

$$FB_{SBFore} = V_{loc,Fore} - Draft_{Fore} - T_{loc,SBFore} \cdot \tan(\emptyset)$$

$$FB_{SBFore} = 2,800 - 1,190 - (-5,800) \cdot \tan(0,36) = 1,646 \text{ m}$$

4) Vrijboord: *PS Fore*

$$FB_{PSFore} = V_{loc,Fore} - Draft_{Fore} - T_{loc,PSFore} \cdot \tan(\emptyset)$$

$$FB_{PSFore} = 2,800 - 1,190 - (5,800) \cdot \tan(0,36) = 1,574 \text{ m}$$

Omdat de transversale component van het resulterende zwaartepunt (TCG) een positieve waarde heeft, wordt er dus een slagzij naar bakboordzijde (PS) verondersteld. Hierdoor zullen de vrijboorden aan bakboordzijde de laagste waarden hebben of met andere woorden, het meest kritisch zijn. Rekening houdend met *trim* kan er geconcludeerd worden dat de diepgang aan de voorzijde van het ponton het grootst is, waardoor het vrijboord daar de laagste waarde zal aannemen. Het meest kritische vrijboord van het vaartuig zal zich aan de voorkant, aan bakboordzijde bevinden.

$$FB_{PSFore} = 1,574 \text{ m}$$

De bovenstaande vrijboorden zijn berekend op referentiepunten die zich nog 0,300 m boven het dek bevinden. Het meest kritische vrijboord ten opzichte van het dek wordt dan:

$$FB_{PSFore} = 1,574 \text{ m} - 0,300 \text{ m} = 1,274 \text{ m}$$

4.3.6 Evaluatie criteria

Eens de berekeningen zijn uitgevoerd, dienen alle resultaten geverifieerd te worden ten opzichte van een reeks stabiliteitscriteria. Meestal wordt de stabiliteit geverifieerd op basis van normen die opgesteld zijn door internationale organisaties, de meest gehanteerde normen komen van IMO (*International Marine Organisation*). Deze eisen worden voornamelijk toegepast voor grote vaartuigen die worden ingezet voor offshore doeleinden.

Omdat er in deze thesis een specifiek stabiliteitsgeval wordt behandeld, dienen de gehanteerde verificatienormen zo goed mogelijk afgestemd te worden op de aanwezigheid van mobiele kranen op pontons. Studiebureau *Multi Engineering* maakte tijdens hun stabiliteitsverificatie gebruik van de normen: Bijzondere bepalingen voor drijvende werktuigen (01 – 01 – 1995). Alle resultaten bekomen in vorig deel, worden geverifieerd op basis van deze normen. Deze verificatie is weergegeven in Tabel 28 op de volgende bladzijde, met telkens erbij vermeld of er voldaan wordt aan de voorwaarde.

Tabel 28: Verificatie volgens: Bijzondere bepalingen voor drijvende werktuigen (01 – 01 – 1995)

Beschrijving	Bekomen waarde	Criteria	Benodigde waarde	Voldoet
Vrijboord				
FB _{SBAft}	1,750 (m)	>	0,300 (m)	OK
FB _{PSAft}	1,677 (m)	>	0,300 (m)	OK
FB _{SBFore}	1,646 (m)	>	0,300 (m)	OK
FB _{PSFore}	1,574 (m)	>	0,300 (m)	OK
Meest kritische Vrijboord: FB _{PSFore}	1,274 (m)	>	0,150 (m)	OK
<i>Inland wind criterion (Winddruk: 13kg/m²)</i>				
Criterium	0,61°	<	10,0°	OK
<i>Inland wind criterion (Winddruk: 40kg/m²)</i>				
Criterium	1,13°	<	10,0°	OK
<i>Inclination angles</i>				
<i>Trim angle</i>	0,14°	<	3°	OK
<i>Heel angle</i>	0,36°	<	3°	OK
Maximale GZ-waarde, gelimiteerd door de mogelijkheid tot <i>Downflooding</i> $\phi_{DFL} = 15,54^\circ$				
<i>GZ-Max</i>	2,050 (m)	>	0,513 (m)	OK
<i>Additional heeling moment</i>				
Criterium	8,0°	<	10°	OK
Initiële metacentrische hoogte				
GM	8,484 (m)	>	0,150 (m)	OK
<i>Residual stability</i>				
<i>Res stability</i>	0,930 (m)	>	0,080 (m)	OK

Op basis van deze verificatie is gebleken dat de stabiliteit van Waterduvel tijdens deze hijsoperatie aan alle criteria voldoet. De veiligheid voor deze liftoperatie kan gegarandeerd worden.

4.4 Stappenplan berekening

Tot slot is gebleken dat deze berekening zeer langdradig en ingewikkeld kan zijn. Om toch nog duidelijk overzicht te krijgen van alle gehanteerde berekeningen, worden alle berekeningsprocedures kort samengevat in volgend stappenplan [33]:

- 1) Berekening van de resulterende waterverplaatsing met bijhorende zwaartepunt (VCG, LCG en TCG).
- 2) Bepaling van alle hydrostatische parameters, vertrekkende van een onbekende trim. Er wordt gerekend met een trim van 0,000 m.
- 3) Bepaling van de werkelijke *trim*.
- 4) Optimaliseren van de *trimwaarde* en een tweede berekening van de hydrostatische gegevens op basis van de nieuwe trim waarde.
- 5) Opstellen van de statische stabiliteitscurve vertrekkende van de metacentrische hoogte van elke *heel* hoek, uit de cross curves.
- 6) Berekening van de initiële *list* op basis van de GZ-curve.
- 7) Bepaling van de maximale GZ-waarde, rekening houdend met de mogelijkheid tot *downflooding*.
- 8) Verrekenen van de windmomenten.
- 9) Berekening van het additioneel hellende moment.
- 10) Bepaling van de initiële metacentrische hoogte (GM).
- 11) Uitrekenen van de *residual stability*.
- 12) Calculatie van alle vrijboorden.
- 13) Uitvoeren van een verificatie van alle bekomen waardes ten opzichte van de geldende normen.

5 OPBOUW REKENTOOL

In het vorige hoofdstuk is de volledige stabiliteitsberekening van een kraanpontoon uitgevoerd. Omdat deze berekening toch vrij uitgebreid is en het heel wat rekenwerk vergt om deze methode uit te werken voor meerdere belastingscombinaties op de pontons, is het eerder aangewezen om een rekentool hiervoor te ontwerpen.

Er is geopteerd om het rekenblad in Microsoft Excel te ontwikkelen, aangezien Excel een universeel programma is dat alomtegenwoordig is in de bedrijfswereld. Excel biedt tevens de mogelijkheid om op een eenvoudige manier gegevens te implementeren. De volledige berekeningsprocedure is geprogrammeerd in *Visual Basic for Applications (VBA)*, de programmeeromgeving van Excel.

Het rekenblad is zo ontworpen dat het eenvoudig in gebruik is waardoor de gebruiker ervan op een snelle en correcte manier de stabiliteit van hijswerkzaamheden kan controleren. In dit hoofdstuk wordt de volledige opbouw van het rekenblad besproken. Deze opbouw heeft betrekking tot alle gemaakte aannames, alle inputs en outputs en tot slot hoe de gebruiker het rekenblad dient te gebruiken.

5.1 Aannames

Voor de stabiliteitsverificatie is de aanname gemaakt dat pontons zich enkel in binnenwateren zullen bevinden voor hun werkzaamheden. Hierdoor worden er geen invloeden van de golfwerking beschouwd. De golven die ontstaan in binnenwaterwegen worden voornamelijk geactiveerd door de invloed van andere schepen. Wanneer er delicate hijsoperaties plaatsvinden, kan ervoor gezorgd worden dat de waterwegen tijdelijk niet toegankelijk zijn voor andere vaartuigen. Hierdoor kan het nadelige effect van de golven en het mogelijke risico op aanvaring door andere vaartuigen ook verwaarloosd worden.

Er wordt altijd verondersteld dat de pontons niet zullen verschuiven eens de werken worden uitgevoerd. Hun positie blijft met andere woorden dezelfde. Dit kan gerealiseerd worden door drie spudpalen te gebruiken. De spudpalen worden tot op de bodem gebracht, waardoor het ponton vast staat. De spuds nemen geen enkele verticale krachten op en dienen enkel om het wegdrijven van het vaartuig te voorkomen. Het laten zakken van de spuds gebeurt op basis van de zwaartekracht. Aan boord zijn er de nodige mechanismes aanwezig om de *spuds* terug omhoog te trekken. Eens de *spuds* op de bodem staan, oefenen deze geen belasting meer uit op het ponton. Enkel tijdens de mobilisatie van de pontons worden de spuds van de bodem gehaald en veroorzaken ze wel een belasting.

Ondanks dat de kranen niet vast gemonteerd staan op het ponton, zullen ze tijdens het hijsen of baggeren niet van plaats veranderen. Hierdoor mag er slechts een maximale waarde van *trim* en *list* of *heel* gehanteerd worden. De kranen die worden ingezet, zijn ook oorspronkelijk ontworpen voor werken op een vaste ondergrond.

Er wordt geen rekening gehouden met de sterkte van het ponton, het rekenblad zal enkel de stabiliteit verifiëren. Doordat er grote krachten ten gevolge van de hijskraan en het ballast optreden, kunnen er ook grote inwendige krachten en momenten op het ponton optreden. De sterkte van het ponton om deze inwendige krachten te doorstaan, is ook een verificatie die gemaakt dient te worden alvorens een vaartuig te water wordt gelaten. Dit behoort echter niet tot de doelstellingen van deze thesis. Ook zijn er al dergelijke verificaties uitgevoerd waardoor er aangenomen kan worden dat de sterkte van de pontons voldoen.

5.2 Structuur van het rekenblad

Voor de opmaak van het rekenblad is er rekening gehouden met de noden van de gebruiker. Het is de bedoeling dat de gebruiker slechts een minimaal aantal inputparameters moet invoeren. Daarnaast dient de stabiliteitsverificatie snel te verlopen en moeten alle evaluatiecriteria overzichtelijk worden opgesomd. Kortom, het rekenblad dient eenvoudig in gebruik te zijn voor de stabiliteitsverificatie van de pontons Waterduvel en BERL van HYE nv.

Om het rekenblad op een nauwkeurige manier te laten fungeren, dienen er toch een grote hoeveelheid aan inputparameters te worden ingegeven. Het merendeel van deze inputparameters kunnen echter voorgeprogrammeerd worden. Alle inputs die niet veranderen naargelang er een andere lastenverdeling op het ponton ontstaat, worden op voorhand ingevuld.

Het ontworpen rekenblad geeft de mogelijkheid om alle stabiliteitsaspecten voor werkzaamheden op pontons te verifiëren. Dit rekenblad kan als alternatief gebruikt worden voor dure geavanceerde softwareprogramma's. Later zal de correctheid van het rekenblad gecontroleerd en vergeleken worden met professionele software.

5.2.1 Structuur rekenblad Waterduvel

Zoals eerder is vermeld, zijn alle stabiliteitsberekeningen voorgeprogrammeerd in VBA. Daarnaast zal het rekenblad ook voorzien zijn van de nodige code om de handelingen van de gebruiker te vereenvoudigen. Het programma zal als het ware worden omgevormd tot een applicatie waar er veel belang is gehecht aan de gebruikersinteractie of *User Interface*.

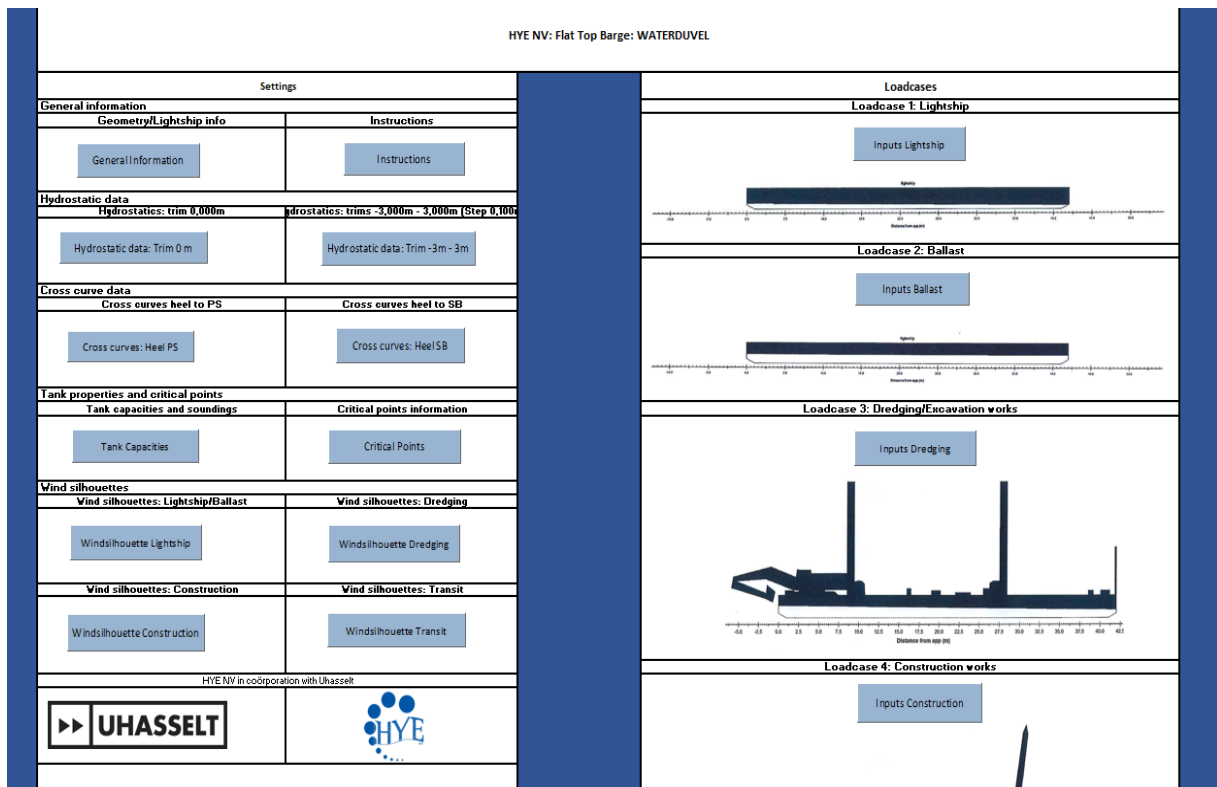
Het rekenblad van Waterduvel bestaat uit een groot aantal tabbladen die naargelang hun functie worden onderverdeeld in vier hoofdcategorieën:

- Tabbladen voor inputparameters die voorgeprogrammeerd zijn;
- Tabbladen voor inputparameters die worden ingevuld door de gebruiker;
- Tabbladen waar resultaten worden weergegeven;
- Tabbladen waar de stabiliteitsverificatie wordt weergegeven.

De code die nodig is voor het schakelen tussen bepaalde tabbladen wordt volledig gelinkt aan *command buttons*. Hierdoor kan er op een eenvoudige manier worden geschakeld tussen alle tabbladen. *Command buttons* worden tevens ook gehanteerd voor het voltooiën van bepaalde berekeningen. Eens alle inputs ingegeven zijn, kunnen een reeks berekeningen uitgevoerd worden door middel van een eenvoudig muisklik. Op het ingeven van de *inputs* na, zijn alle handelingen van de gebruiker volledig geautomatiseerd.

Bij het opstarten van het rekenblad komt de gebruiker uit op de startpagina (Figuur 73 op de volgende bladzijde). Deze geeft de mogelijkheid om allerhande zaken aan de instellingen aan te passen of om meteen naar de *inputs* van een gepast belastingsgeval te gaan. Aan de linkerzijde, alle knoppen die gelinkt zijn aan bepaalde instellingen en aan de rechterzijde alle knoppen die leiden naar de belastingsgevallen. Normaal gezien moet de gebruiker niets meer aan de instellingen aanpassen en kan er meteen worden overgegaan tot het selecteren van het correcte belastingsgeval. De volgende vijf belastingsgevallen zijn beschikbaar:

- *Loadcase 1: Lightship*: enkel het *lightship* gewicht wordt gegenereerd, zonder andere lasten.
- *Loadcase 2: Ballast*: het *lightship* gewicht in combinatie met waterballast of andere vloeistoftanks wordt gegenereerd.
- *Loadcase 3: Dredging*: de invloed van een *excavator* om bagger- of andere graafwerkzaamheden wordt hier gegenereerd in combinatie met de nodige ballast.
- *Loadcase 4: Construction*: de invloed van een hijskraan om civiele werken uit te voeren, wordt hier gegenereerd in combinatie met de nodige ballast.
- *Loadcase 5: Transit*: dit is de transportsituatie, hier kan een *excavator* gecombineerd worden met een hijskraan, meestal wordt de belasting van de *spuds* hier wel in verrekend.



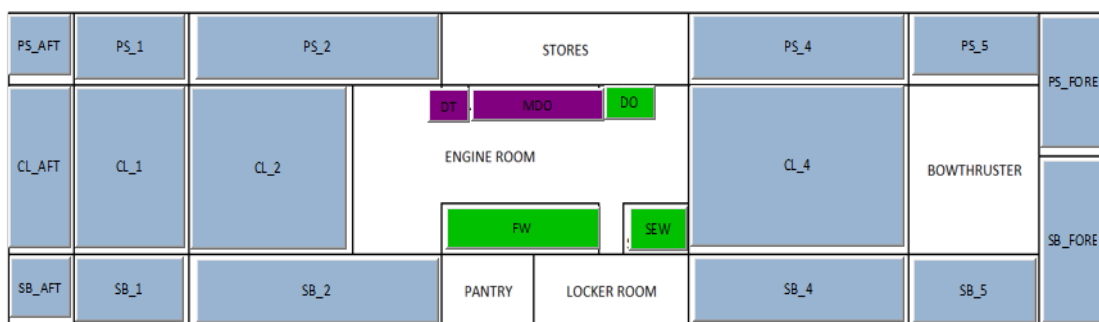
Figuur 73: Startscreen rekenblad Waterduvel

Vorgeprogrammeerde inputparameters

Om de stabiliteit van een kraanponton te verifiëren, zijn er veel gegevens nodig van het ponton. Deze zijn vorgeprogrammeerd in het rekenblad. De vorgeprogrammeerde gegevens zijn onderverdeeld in een reeks tabbladen, die verborgen zijn, maar indien gewenst aangepast kunnen worden. De vorgeprogrammeerde inputparameters worden onderaan weergegeven.

- General information: de algemene gegevens van het ponton die betrekking hebben op de geometrie (LOA, D, B) en het *lightship* gewicht en zwaartepunt.
- Hydrostatic data: de hydrostatische gegevens die afhankelijk zijn van de structuur van het vaartuig en van de trim die optreedt. Voor de initiële trim te berekenen, wordt gebruik gemaakt van de hydrostatische gegevens voor een trim van nul (Bijlage A - *Hydrostatic data: Trim 0 m*). Wanneer de trim gekend is, wordt deze nog geoptimaliseerd door een aangepaste tabel met hydrostatische gegevens voor de correcte trim te gebruiken (*Hydrostatic data: Trim -3m -> 3m*).
- Cross curve data: cross curve van stabiliteit bevatten de nodige informatie over de positie van het metacentrum voor bepaalde *heel* hoeken. Afhankelijk van de transversale locatie van het zwaartepunt zal het vaartuig hellen naar stuurboordzijde of naar bakboordzijde, dit is echter bepalend voor de locatie van het metacentrum. Hierdoor wordt cross curve data voorzien voor *heel* naar stuurboord (*cross curves: Heel SB*) en naar bakboord (*cross curves: Heel PS*).

- Tank Capacities: de tankcapaciteitstabellen bieden informatie over alle vloeistofreservoirs aan de binnenkant van Waterduvel. In deze tabellen zit het gewicht, volume en zwaartepunt van alle tanks vervat indien deze voor 100% gevuld worden. Daarnaast zijn de afmetingen (lengte, breedte en hoogte) en maximale vrije oppervlaktmomenten ook weergegeven. Meer in detail biedt dit tabblad ook de mogelijkheid om voor elke afzonderlijke tank de *sounding* te implementeren. *Tank sounding tables* geven op basis van een percentage vulling, info over de ligging van het zwaartepunt en het gewicht. Ter gemakshalve is op onderstaande Figuur 74 te zien dat alle knoppen die leiden naar de gepaste *tanksounding* verdeeld zijn over het plan van Waterduvel.



Figuur 74: Weergave tanks in rekenblad Waterduvel

- Critical Points: alle kritische punten op de structuur van het ponton geven informatie over de mogelijkheid tot *downflooding* of waterindringing van openingen die niet perfect waterdicht zijn. Alle locaties van *downflooding points* zijn bepaald als een longitudinale, verticale en transversale afstand ten opzichte van de oorsprong van het assenstelsel.
- Windsilhouettes: windsilhouetten zijn tabellen met het extra moment dat geïnduceerd wordt als een gevolg van de winddruk. Omdat de wind aangrijpt op het oppervlak van het vaartuig dat boven het wateroppervlak uitsteekt, hangen de windsilhouetten af van het gebruikte materieel op het ponton. Zo zijn de volgende windsilhouettentabellen geïmplementeerd voor Waterduvel: *Windsilhouette Lightship*, *Windsilhouette Dredging*, *Windsilhouette Construction* en *Windsilhouette Transit*.

Outputs van het rekenblad

Wanneer alle *inputs* geïmplementeerd zijn, kan het rekentool de stabiliteit in zijn geheel verifiëren. Welke stabiliteitscriteria worden geverifieerd, wordt in de volgende paragraaf toegelicht. De *outputs* van het rekenblad bevatten de belangrijkste parameters van de stabiliteitssituatie, namelijk:

Resulterende waterverplaatsing en zwaartepunt van Waterduvel

De totale waterverplaatsing en het bijhorende resulterende zwaartepunt van de volledige structuur wordt bepaald voor elke lastencategorie. Voor de onderverdeling tussen *deadweight* en *lightship weight* worden alle resultaten in onderstaande Tabel 30 weergegeven.

Tabel 30: Output zwaartepunten en gewicht van het rekenblad

Summary deadweight					
Beschrijving	Weight	VCG	LCG	TCG	FSM
	tonnes	m	m	m	t*m
Miscellaneous					
Void					n/a
Fuel					
Engine room					n/a
Waterballast					

Summary: Lightweight					
Beschrijving	Weight	VCG	LCG	TCG	FSM
	tonnes	m	m	m	t*m
Lightship					n/a

Total Waterdisplacement					
Beschrijving	Weight	VCG	LCG	TCG	FSM
	tonnes	m	m	m	t*m
Lightship					n/a
Deadweight					
Displacement					

Hydrostatische gegevens

Eens de totale waterverplaatsing is bepaald, kunnen alle hydrostatische gegevens worden bepaald op basis van de gepaste interpolaties uit de hydrostatische tabellen voor een bepaalde trim. Alle bekomen resultaten zijn:

- *Displacement*: de waterverplaatsing is gelijk aan het totale gewicht van het vaartuig.
- *Mean moulded draft*: de gemiddelde diepgang aan *midship* kan bepaald worden op basis van de hydrostatische tabellen, uitgaande van een bepaalde waarde van de waterverplaatsing.
- *Centre of Buoyancy*: het drukkingspunt, dit wordt bepaald volgens de longitudinale richting (LCB), volgens verticale richting (VCB) en volgens de transversale richting (TCB);
- *Longitudinal centre of floatation*: de longitudinale locatie van het rotatiepunt waar het vaartuig zal roteren, dit punt kan als het ware gezien werken als een scharnier.

- Metacentric height to keel: de metacentrische hoogte ten opzichte van de kiel dient bepaald te worden volgens de longitudinale richting (KML) en volgens de transversale richting (KM_t); KMT zal echter een grotere rol spelen in de stabiliteitsverificatie van KM_l.
- Trim: zoals reeds is vermeld, zal de trim bepaald worden op basis van het trim moment, daarnaast is trim ook het verschil tussen de diepgang aan de voorzijde en de diepgang aan de achterzijde. Deze diepgangen kunnen ook bepaald worden eens de trimhoek en LCF gekend zijn.
- Block coefficient: de vormcoëfficiënt houdt rekening met de blok vorm van een vaartuig.
- Free surface effect correction: indien vloeistoftanks niet volledig gevuld zijn, wordt er rekening gehouden met het vrije vloeistoffenoppervlak. Er wordt een correctie op het zwaartepunt (GG') uitgevoerd.
- Metacentric height to G: de metacentrische hoogte wordt ook bepaald ten opzichte van het zwaartepunt. Indien er geen rekening gehouden wordt met FSE is de metacentrische hoogte GM_{solid} . Is er wel een correctie doorgevoerd, dan wordt de metacentrische hoogte bepaald met GM_{liquid} .
- Initial list: de initiële slagzijhoek waaronder het vaartuig komt te liggen.

Alle resultaten worden weergegeven in onderstaande Tabel 31. Zo is te zien dat de berekening echter tweemaal wordt uitgevoerd. De eerste berekeningen worden uitgevoerd wanneer de trim nog niet gekend is, daarom worden alle gegevens geraadpleegd van de hydrostatische tabel voor een trim van 0,000m. Eens de waarde van trim geoptimaliseerd is, worden alle berekeningen herhaald maar dan wel uitgaande van de hydrostatische tabel voor de geoptimaliseerde trim.

Tabel 31: Weergave hydrostatische gegevens in het rekenblad

Hydrostatic particulars for	Trim: 0,000 m	Trim: ,... m	Units	Remarks
Displacement			tonnes	<i>Displacement</i> : Waterverplaatsing
Mean moulded draught			m	<i>Moulded draft</i> : Diepgang aan midship
LCB			m	<i>Centre of Bouyancy</i> : Drukkingspunt
VCB			m	
TCB			m	
LCF			m	<i>Longitudinal Centre of Floatation</i> : Rotatiepunt
KMT			m	<i>Metacentric Height</i> : Metacentrische hoogte t.o.v. kiel
KMI			m	
MCT			t*m/cm	<i>Trim indicators</i> : Parameters die de trim beïnvloeden
TpCm			t/cm	
Trim			m	<i>Trim and draft at pp</i> : Trim en diepgangen aan loodlijnen
Draught AFT pp			m	
Draught FW pp			m	
Cb			-	<i>Block coefficient</i> : Vorm coëfficiënt
VCG			m	<i>FSE correction</i> : Correctie van VCG voor het vrije oppervlakte effect
GG'			m	
VCG'			m	
GM solid			m	<i>Metacentric Height</i> : Metacentrische hoogte t.o.v. zwaartepunt
GM liquid			m	
Initial list			Degr(°)	<i>Initial list</i> : Initiële slagzij

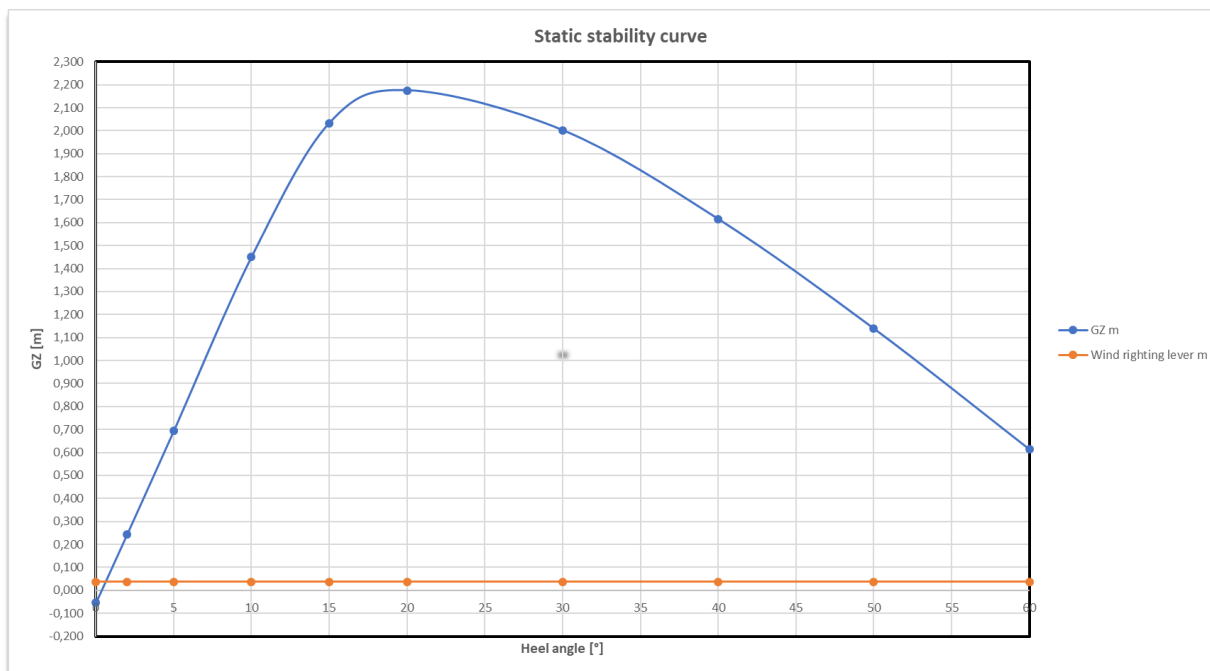
Statische stabiliteitscurve

Alle resultaten die nodig zijn om de statische stabiliteitscurve te plotten, worden voor dit deel berekend en uitgezet in onderstaande Tabel 32. Zo worden de waarden van de richtende hefboomsarm bepaald voor een reeks *heel* hoeken. Daarnaast wordt het windmoment verondersteld als een gevolg van de windbelasting op het geheel. Deze windbelasting is afhankelijk van het oppervlak dat blootgesteld wordt aan de wind, en dus sterk afhankelijk van alle materialen op het dek van het ponton.

Tabel 32: Berekening rekenblad hefboomsarmen GZ

Righting levers								
Heeling angle	Displacement	KN sin(ϕ)	VCG sin(ϕ)	GG' sin(ϕ)	TCG cos(ϕ)	GZ	Wind moment	Wind righting lever
Degr (°)	t	m	m	m	m	m	t*m	m
0								
2								
5								
10								
15								
20								
30								
40								
50								
60								

Het plotten van de GZ-waardes en *wind richting levers* ten opzichte van de *heel* hoeken, levert de statische stabiliteitscurve. Een voorbeeld van deze curve is onderaan afgebeeld in Figuur 75.



Figuur 75: Voorbeeldweergave statische stabiliteitscurve

Maximale GZ-waarde

Grootste waarde van de GZ-curve dient bepaald te worden rekening houdend met de meest kritische *submersion angle* van alle *downflooding points*. Deze meest kritische hoek is de laagste waarde van alle *submersion angles*. Voor het ponton Waterduvel worden deze in Tabel 33 weergegeven.

Tabel 33: Downflooding points Waterduvel

Critical points: Downflooding		
Description	Angle	Dist. WL
	Degr	m
Vent ER in		
Vent ER out		
Vent daytank		
Vent fuel tank		
Vent dirty oil		
Vent sewage		
Vent Fresh water		
Wingtank 3 in		
Wingtank 3 out		
Pantry in		
Pantry out		

Wanneer de meest kritische *submersion angle* kleiner is dan de *heel* hoek die overeenkomt met de grootste GZ-waarde op de curve, dan zal de *GZ-max* gelijk zijn aan de richtende hefboom die overeenkomt met de meest kritische *submersion angle*.

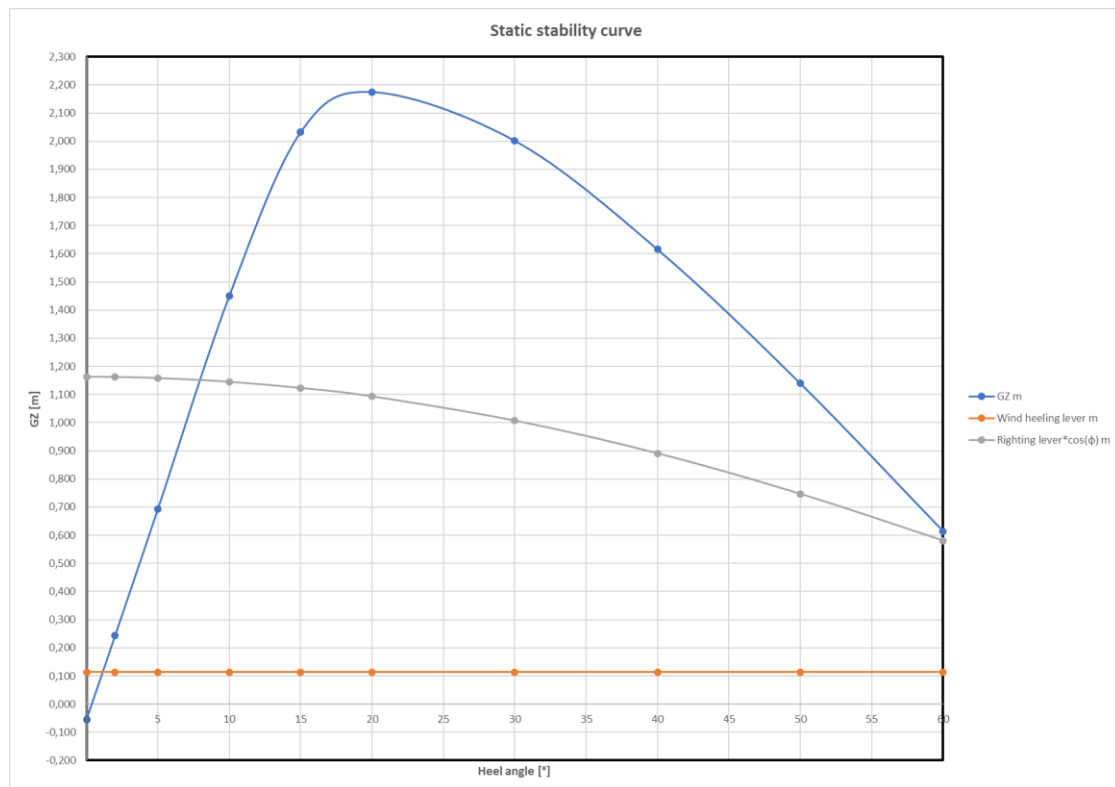
Additioneel heeling moment

Het *Additional heeling moment* wordt aan de curve toegevoegd om de invloed van de kraan op het ponton in rekening te brengen. Omdat er hier strengere veiligheidsmaatregelen worden toegepast, zal er ook een grotere winddruk (40 kg/m^2) en bijgevolg een groter wind moment worden beschouwd. In onderstaande Tabel 34 worden de GZ-waardes weergegeven.

Tabel 34: GZ-Waardes voor de verschillende heel-hoeken

Static stability curve							
Heeling angle	Displacement	GZ	Wind moment for 40 kg/m ²	Wind righting lever	Additional crane moment	Calculated moment	Addition righting lever *cos(φ)
Degr	t	m	t*m	m	t*m	t*m	m
0							
2							
5							
10							
15							
20							
30							
40							
50							
60							

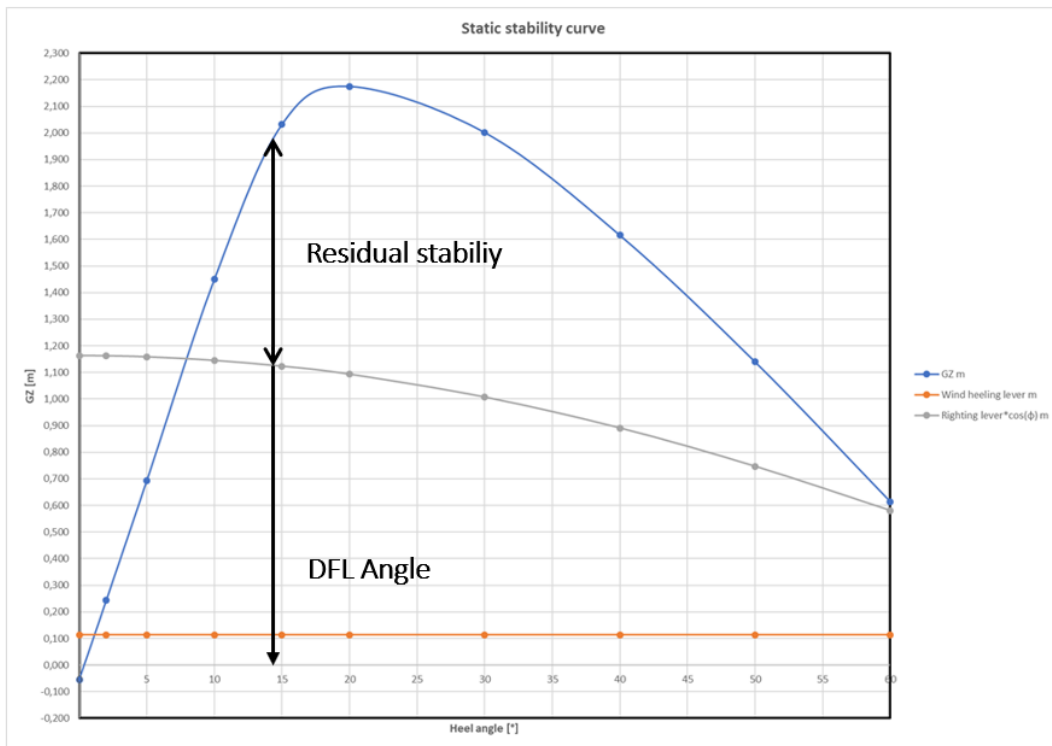
De GZ-waardes, *wind righting levers* en *additional righting levers* worden geplot ten opzichte van de *heel* hoeken zoals afgebeeld in onderstaand voorbeeld (Figuur 76). In de bovenstaande Tabel 34 is te zien dat er een onderscheid gemaakt wordt tussen *additional crane moment* en *calculated moment*. Het berekende additioneel moment wordt bekomen door het wind moment en het kraan moment met elkaar te sommeren, de richtende hefboom wordt bepaald door berekende additioneel moment te delen door de totale waterverplaatsing.



Figuur 76: Additional heeling moment in GZ-curve

Residual stability

De *residual stability* of de overblijvende stabiliteit wordt bepaald zoals is afgebeeld in de figuur. Het is het verschil tussen de maximale GZ-waarde voor de meest kritische *submersion angle* en de additionele hefboomsarm, zoals weergegeven in Figuur 77 op de volgende bladzijde.



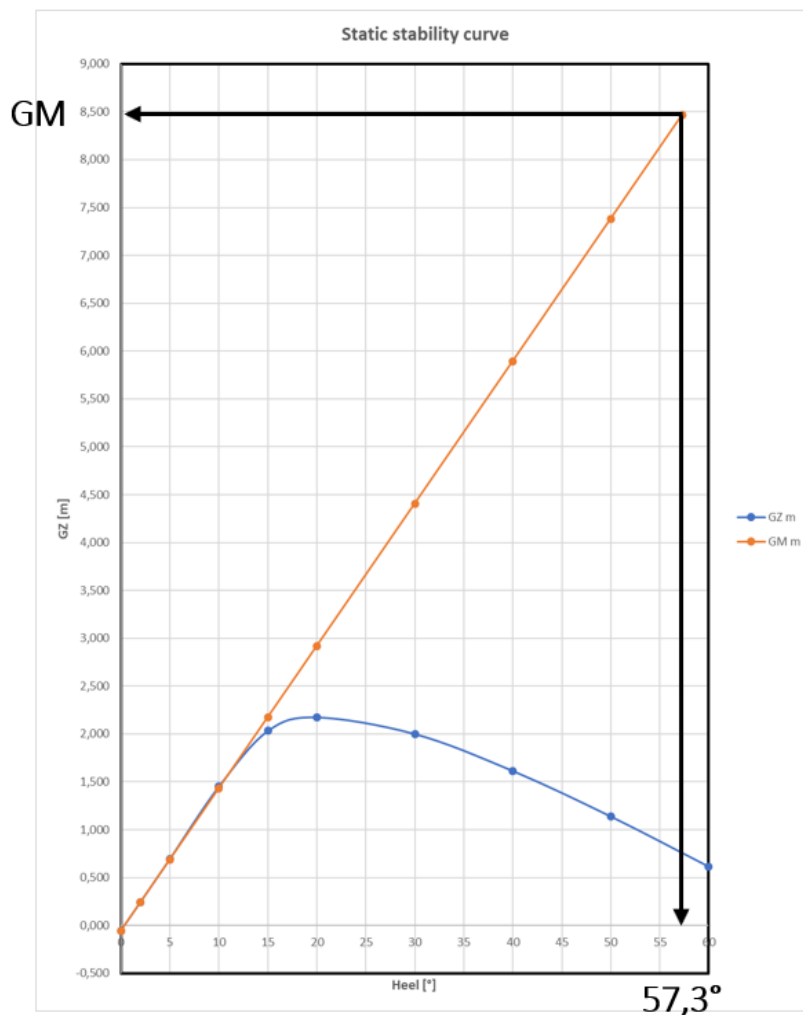
Figuur 77: Residual stability

Metacentrische hoogte

De metacentrische hoogte GM, geeft het punt weer waarrond het ponton denkbeeldig draait tijdens slagzij. De metacentrische hoogte wordt bepaald aan de hand van het snijpunt van de initiële hellingshoek van de GZ-curve met de verticale op een slagzij hoek van 57°. Dit wordt in onderstaande Tabel 35 verduidelijkt en grafisch weergegeven in Figuur 78.

Tabel 35: Rekenblad - bepaling metacentrische hoogte

Static stability curve					
Heeling angle	Displacement	GZ	tan()	Heeling angle	GM
Degr	t	m		m	m
0					
2					
5					
10					
15					
20					
30					
40					
50					
60					



Figuur 78: Bepaling metacentrische hoogte in rekenblad

Vrijboord

Tot slot volgt de bepaling van het vrijboord nog, dit is de afstand van het dek tot aan het wateroppervlak. De vrijboord bepaling van Waterduvel wordt gerealiseerd op de verschillende locaties van het ponton.

- Achterzijde ter plaatse van de centrale as (CL *Aft*);
- Voorkant ter plaatse van de centrale as (CL *Fore*);
- Stuurboordzijde aan de achterzijde van het ponton (*SB Aft*);
- Bakboordzijde aan de achterkant van het ponton (*PS Aft*);
- Stuurboordzijde aan de voorkant van het ponton (*SB Fore*);
- Bakboordzijde aan de voorkant van het ponton (*PS Fore*);

Alle verticale, longitudinale en transversale locaties waar het vrijboord wordt bepaald, zijn tevens ook weergegeven voor alle locaties. Tabel 36 op de volgende bladzijde toont de weergave van het rekenblad van de vrijboorden.

Tabel 36: Weergave vrijboord in rekenblad

Freeboard		
Freeboard Aft (CL)		m
Vertical location	2,500	m
Longitudinal location	0,000	m
Transverse location	0,000	m
Freeboard Fore (CL)		m
Vertical location	2,500	m
Longitudinal location	42,000	m
Transverse location	0,000	m
Freeboard SB Aft		m
Vertical location	2,800	m
Longitudinal location	0,000	m
Transverse location	-5,800	m
Freeboard PS Aft		m
Vertical location	2,800	m
Longitudinal location	0,000	m
Transverse location	5,800	m
Freeboard SB Fw		m
Vertical location	2,800	m
Longitudinal location	42,000	m
Transverse location	-5,800	m
Freeboard PS Fw		m
Vertical location	2,800	m
Longitudinal location	42,000	m
Transverse location	5,800	m

Verificatie van alle Outputs

De verificatie van alle bekomen resultaten wordt verwezenlijkt op basis van de stabiliteitscriteria voor vaartuigen in binnenwaterwegen. Deze criteria houden geen rekening met dynamische effecten, enkel de statische stabiliteit wordt geverifieerd. Op basis van een samenvattend rapport worden alle resultaten afgewogen ten opzichte van de normen en kan er zo een conclusie worden gemaakt. Er wordt echter niet meer in detail ingegaan op elk afzonderlijk criterium, alle criteria zijn echter al besproken in verificatie van de manuele uitwerking.

In de linkerkolommen is het rapport uitgerust met de bekomen resultaten en de rechterkolommen bevatten de waardes waaraan voldaan moet worden. Er dient echter een onderscheid gemaakt te worden tussen twee onderdelen van het rapport:

- Het eerste deel van het rapport: *Criteria for Inland navigation for vessels* concentreert zich rond de stabiliteitseisen voor de vaartuigen zelf in binnenwateren. De mogelijke aanwezigheid van het materieel voor constructie- of baggerdoeleinden is hier niet in rekening gebracht.
- Deel twee van het rapport: *Exceptional declarations for floating construction tools* focust zich wel op de strengere eisen die gesteld worden aan pontons die worden gebruikt als drijvende werktuigen.

De visualisatie van beide delen van het rapport is onderaan weergegeven in Tabel 37 en 38.

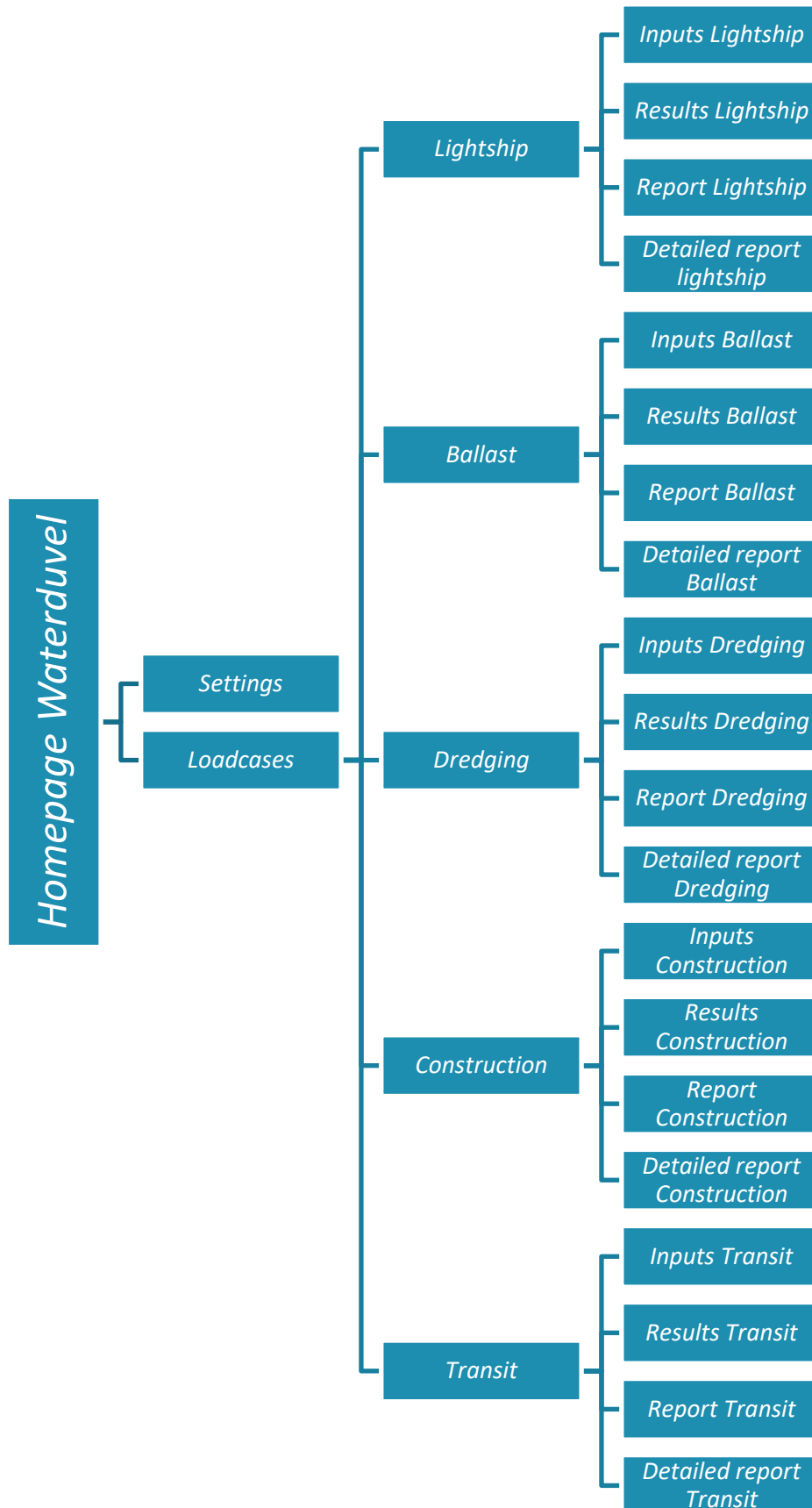
Tabel 37: Verificatierapport uit het rekenblad – *Inland navigation*

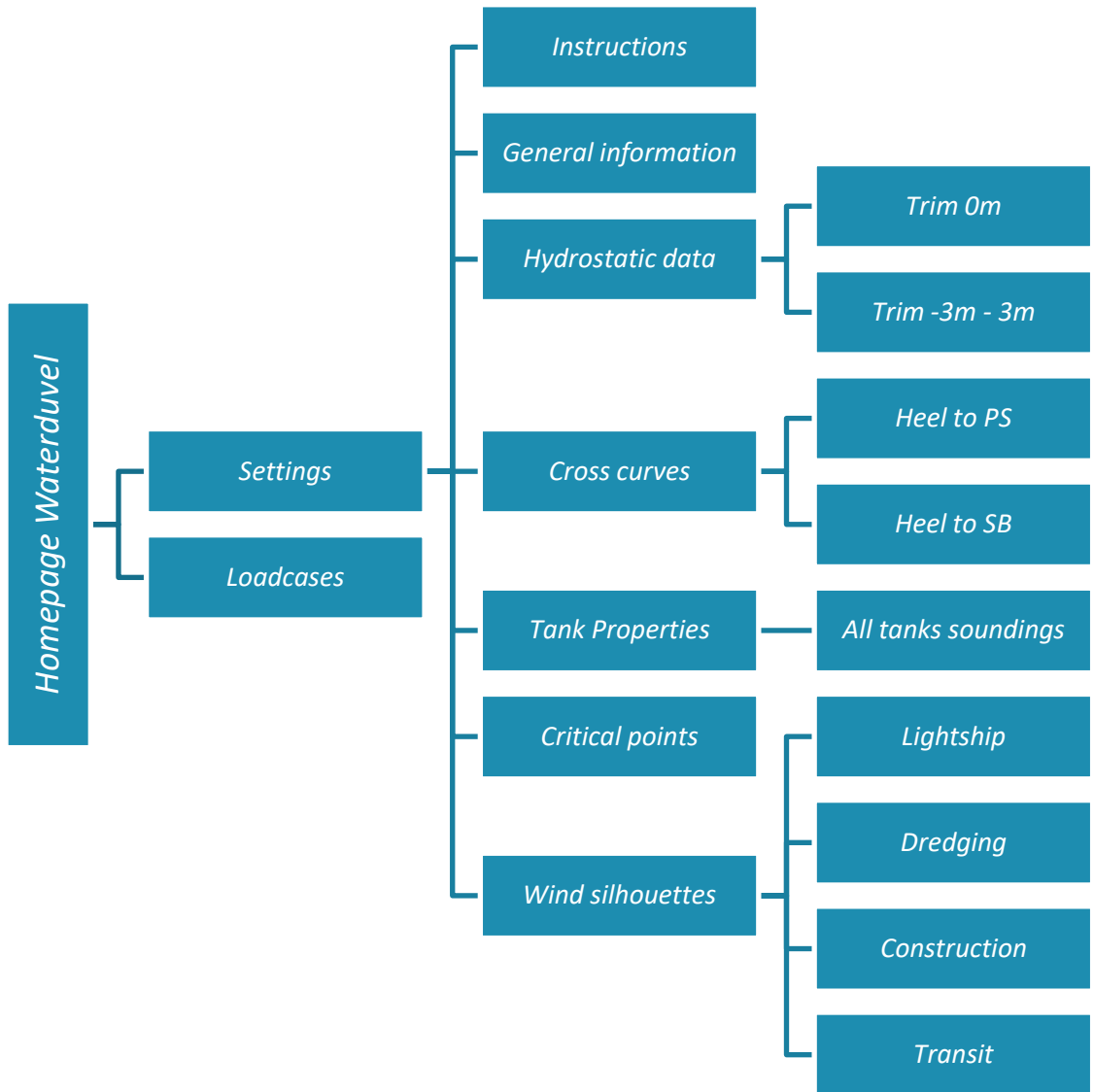
Evaluation of criteria_Loadcase_Lightship						
Criteria for Inland navigation for vessels						
Description	Attained value	Units	Criterion	Required Value	Units	Complies
Freeboard > 150mm		m	>	0,150	m	YES/NO
Windcriterion		Degr.	<	10,000	Degr.	YES/NO
Calculated heeling moment		t*m			t*m	
Required freeboard		m	>	0,150	m	YES/NO
Wind silhouette	Lightship					
Wind pressure		kg/m2			kg/m2	
Wind Area		m2			m2	
Freeboard PS aft		m	>	0,300	m	YES/NO
Calculated location:	PS_Aft					
Longitudinal location	0,000	m		0,000	m	
Vertical location	2,800	m		2,800	m	
Transverse location	5,800	m		5,800	m	
Freeboard SB aft		m	>	0,300	m	YES/NO
Calculated location:	SB_Aft					
Longitudinal location	0,000	m		0,000	m	
Vertical location	2,800	m		2,800	m	
Transverse location	-5,800	m		-5,800	m	
Freeboard PS fw		m	>	0,300	m	YES/NO
Calculated location:	PS_Fw					
Longitudinal location	42,000	m		42,000	m	
Vertical location	2,800	m		2,800	m	
Transverse location	5,800	m		5,800	m	
Freeboard SB fw		m	>	0,300	m	YES/NO
Calculated location:	PS_Fw					
Longitudinal location	42,000	m		42,000	m	
Vertical location	2,800	m		2,800	m	
Transverse location	-5,800	m		-5,800	m	

Tabel 38: Verificatierapport uit het rekenblad

Exceptional declarations for floating construction tools (01 - 01 - 1995)						
Description	Attained value	Units	Criterion	Required Value	Units	Complies
Initial metacentric height		m	>	0,150	m	YES/NO
Trim angle		Degr.			Degr.	
Trim		m	>		m	
Heel angle		Degr.	<	3,000	Degr.	YES/NO
Inland wind criterion		Degr.	<	10,000	Degr.	YES/NO
Calculated heeling moment		t*m			t*m	
Required freeboard		m	>	0,150	m	YES/NO
Wind silhouette	Lightship					
Wind pressure		kg/m2			kg/m2	
Wind Area		m2			m2	
Max GZ at 0° or greater		m	>	0,153	m	YES/NO
Lower angle		Degr.			Degr.	
Upper angle		Degr.			Degr.	
Lower limit for		Degr.			Degr.	
Upper limit for		Degr.			Degr.	
Additional heeling angle		Degr.	<	10,000	Degr.	YES/NO
Additional heeling moment		t*m			t*m	
Wind heeling moment		t*m			t*m	
Total combined heeling moment		t*m			t*m	
Weight		t			t	
Transverse location of weight		m			m	
Residual stability		m	>	0,080		YES/NO
Lower angle		Degr.			Degr.	
Upper angle		Degr.			Degr.	
Lower limit for		Degr.			Degr.	
Upper limit for		Degr.			Degr.	

5.2.2 Overzicht structuur rekenblad Waterduvel



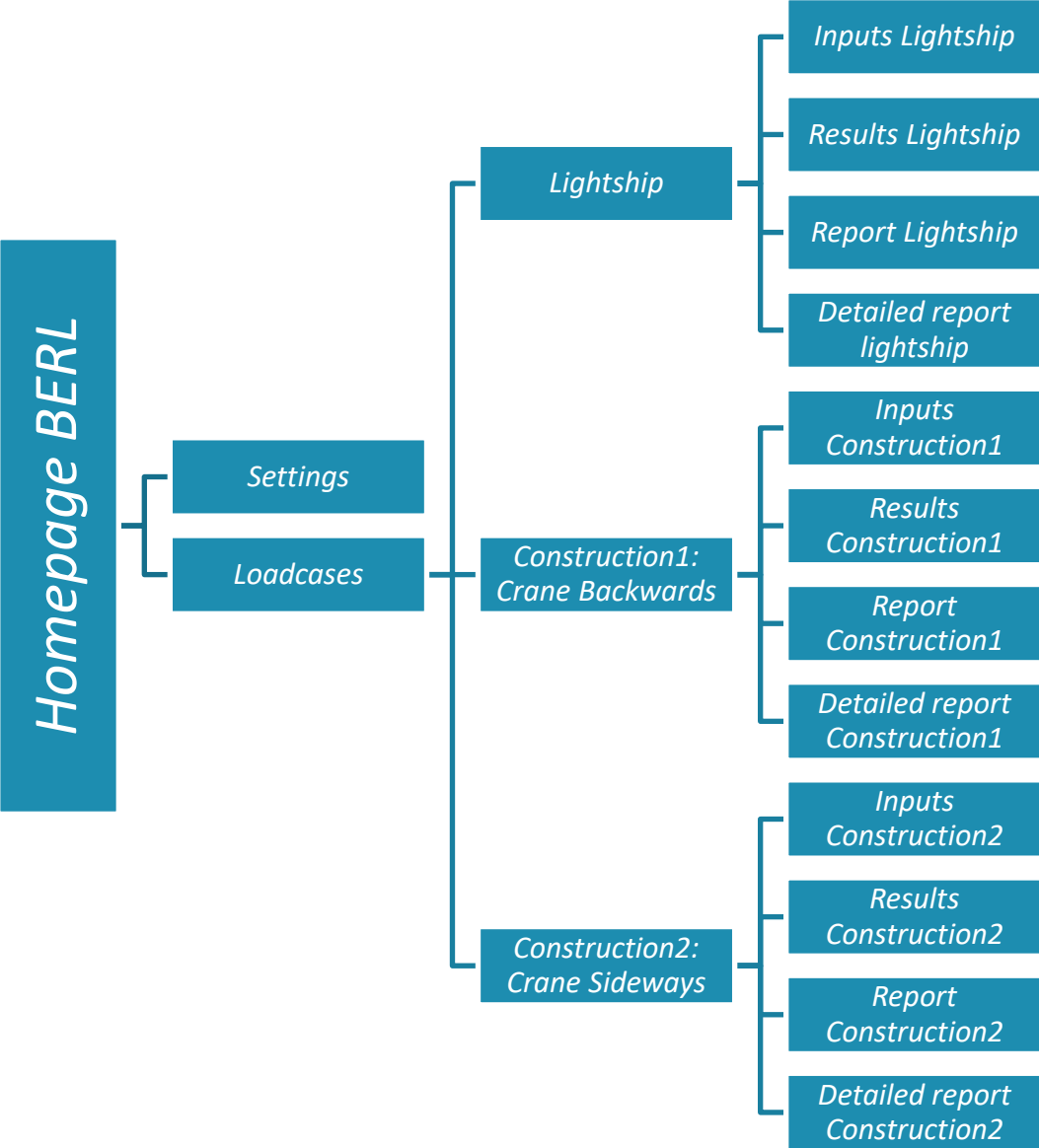


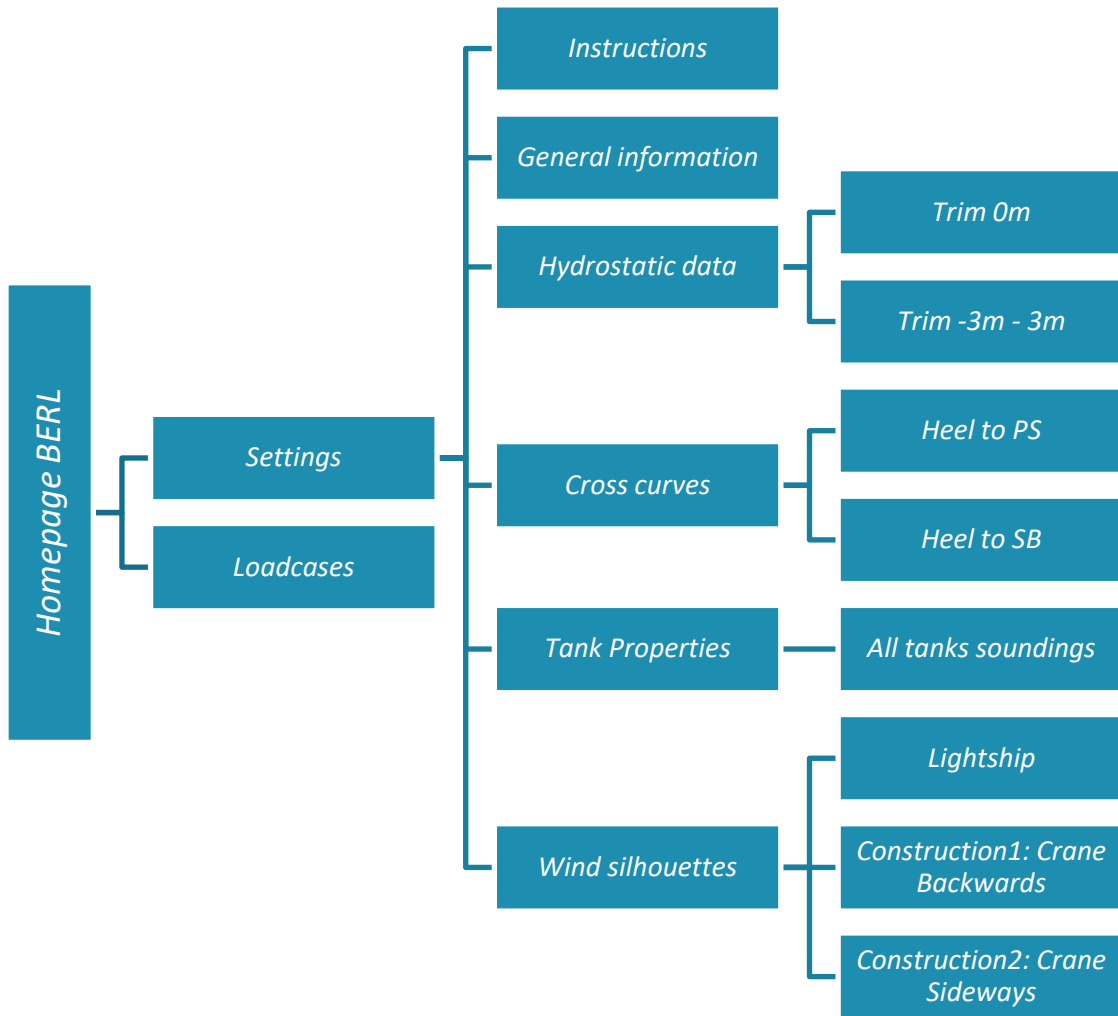
5.2.3 Structuur van rekenblad BERL

Structureel gezien zal het rekenblad van ponton BERL niet veel afwijken aan het rekenblad van Waterduvel. De berekeningen verlopen analoog en de meeste verificatie criteria kunnen op dezelfde manier gehanteerd worden. Enkel de hoeveelheid aan voorgeprogrammeerde inputparameters is aanzienlijk ingekort. Het ponton is ook niet voorzien van een plaats waar een *excavator* geplaatst kan worden, enkel een hijskraan zal op het ponton geplaatst worden. Hierdoor worden de *loadcase: Dredging* niet opgesteld. Daarnaast is de inwendige structuur van BERL niet zo ingewikkeld als die van Waterduvel. BERL heeft namelijk veel minder vloeistofreservoirs waardoor er minder *tank soundings* gegevens gegenereerd worden.

Voor het overige zal de opbouw van het rekenblad wel soortgelijk zijn aan dat van Waterduvel, de gebruiker heeft de mogelijkheid om vanaf de startpagina zijn vereiste *loadcase (Lightship, Ballast en construction)* te selecteren. Het aantal nodige *inputs* zal ook hier beperkter blijven omdat er minder tanks aanwezig zijn. De berekeningen en het rapport worden op dezelfde manier gegenereerd.

5.2.4 Overzicht structuur rekenblad BERL

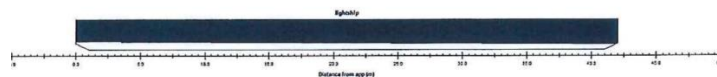




5.3 Gebruik van het rekenblad

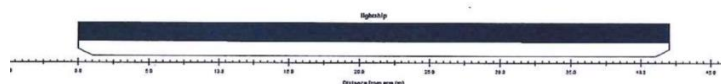
Bij de start van een nieuwe berekening dient eerst gekozen te worden voor het type loadcase dat onderzocht wordt. De vijf mogelijk loadcases die verwerkt zijn in de rekentool zijn:

- 1) **Lightship:** Dit is een onderzoek naar de stabiliteit van het ponton zonder enige belasting op. In de praktijk zal dit weinig gebruikt worden, maar het is een verplichte stabiliteitsverificatie bij de indienststelling van het ponton (Figuur 79).



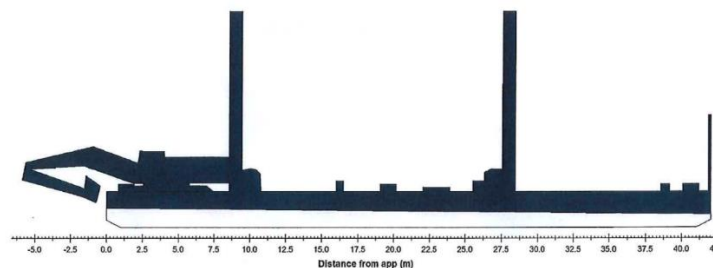
Figuur 79: Lightship loadcase

- 2) **Ballast:** Deze loadcase kan gebruikt worden om het ponton een grotere diepgang te geven zonder extra belastingen. Bijvoorbeeld om het ponton onder een bepaalde constructie te varen die opgetild dient te worden (Figuur 80).



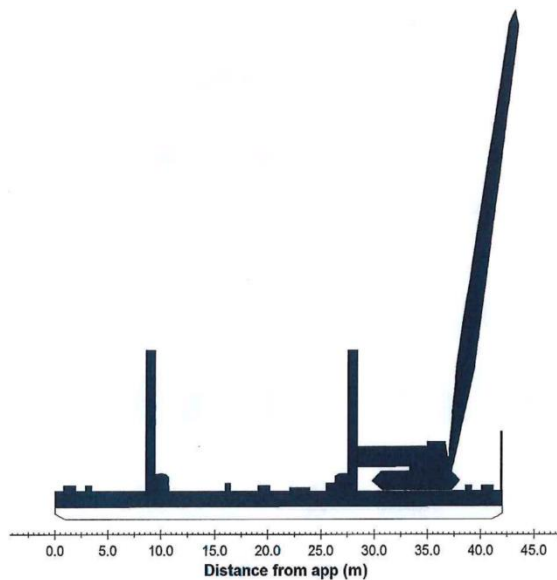
Figuur 80: Ballast loadcase

- 3) **Dredging:** Deze loadcase kan gebruikt worden om de ideale ballastering te berekenen wanneer een graafkraan op het ponton wordt geplaatst om kleine baggerwerken uit te voeren. Met de tool kan bepaald worden wat de beste initiële trim is, zodat de hellingshoeken beperkt blijven voor het personeel aan boord (Figuur 81).



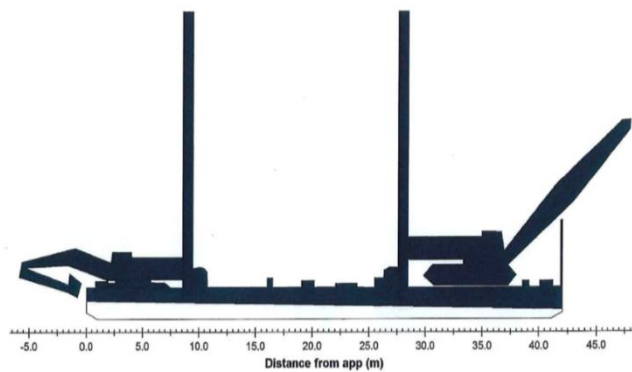
Figuur 81: Dredging loadcase

- 4) **Construction:** Hiermee kan de ideale ballastering bepaald worden voor het uitvoeren van hijsoperaties of funderingswerken (heien met trilblok) met een giekkraan (Figuur 82 op volgende bladzijde).



Figuur 82: Giekkraan loadcase

- 5) **Transit:** Met de loadcase transport kan de nodige ballast bepaald worden om het ponton een vlakke opstelling te geven tijdens het transport (Figuur 83).



Figuur 83: Transport loadcase

Vervolgens dienen de inputparameters ingegeven te worden die in paragraaf 5.2.2 besproken zijn. Daarna kan het rekenblad de berekening uitvoeren. Indien gewenst kan de gebruiker van het rekenblad de verschillende voorgeprogrammeerde gegevens raadplegen en indien nodig aanpassen.

5.4 Voornaamste stabiliteitscriteria

De uiteindelijke verificatie van de stabiliteit van het ponton gebeurt door enkele beperkingen die opgelegd worden door het gebruik van de kranen op de pontons en veiligheidsfactoren.

De belangrijkste stabiliteitscriteria zijn:

- De maximale trim voor een ponton in combinatie met een mobiele kraan wordt opgelegd door de fabrikant van de kranen en wordt bevestigd door diverse onderzoeksrapporten. De maximale toegestane *trim* of slagzij is gelijk aan 3°. De belangrijkste factoren die hiertoe bijdragen zijn de wrijving tussen de kraan en het ponton en ook de vermindering van de lastentabellen van de kraan bij grotere hellingshoeken.
- De last die getild wordt, moet toegestaan zijn om te tillen door die specifieke kraan. Afhankelijk van de hellingshoek (trim en slagzij) zal de vlucht van de last vermeerderen of verminderen, waardoor de maximale last die de kraan mag tillen gunstig of ongunstig beïnvloed wordt.
- Het dek van het ponton dient steeds boven water te blijven en de kiel van het ponton moet op alle plaatsen in contact blijven met het wateroppervlak.

5.5 Toelichting geprogrammeerde code

Het rekenblad is uitgerust met de nodige code om alle berekeningen te laten uitvoeren eens alle inputs zijn ingegeven. In de manuele stabiliteitsverificatie zijn de meeste berekeningsprincipes in detail beschreven, deze zijn dan ook op dezelfde manier geïmplementeerd in het rekenblad. Toch kunnen er nog enkele uitzonderingen voorkomen waarmee er in de programmeercode van het rekenblad rekening mee gehouden moet worden.

Ten eerste verloopt de bepaling van de totale waterverplaatsing en het resulterende zwaartepunt zoals beschreven in de manuele uitwerking. Omdat de hydrostatische data tabellen begrensd zijn met de uiterste waarden van de waterverplaatsing en diepgang, zal het programma dan ook meteen een foutmelding geven wanneer deze waarden overschreden worden. De zwaartepunten van alle afzonderlijke massa's op het dek kunnen manueel worden ingegeven en worden omgevormd tot één resulterend zwaartepunt. Voor vloeistofreservoirs is het niet meteen evident voor de gebruiker om deze zwaartepunten in te geven, om dit probleem uit de baan te helpen voldoet het voor de gebruiker om enkel het vullingspercentage van de betreffende tank in te geven. Alle gegevens worden bepaald op basis van de tank *sounding* tabellen. Voor elke vloeistoftank zijn de *sounding* gegevens geïmplementeerd in het rekentool. Het programma staat in om voor elke tank op basis van het vullingspercentage het effectieve gewicht van de gevulde tank te bepalen. Uitgaande van deze gegevens kunnen de zwaartepuntslocaties en het vrije-oppervlakte moment door een interpolatieproces bepaald worden.

Vervolgens zal het programma de hydrostatische parameters een eerste maal berekenen voor een aangenomen *trimwaarde*, om dan over te gaan tot een optimalisatie van de *trim*. Het bepalen van *trim* verloopt als een iteratief proces. Eerst wordt de trim bepaald door een aanname te maken om vervolgens stapsgewijs een meer nauwkeurige waarde te berekenen. Na de eerste trim berekening volgt een de optimalisatie waar de parameters in de trim formule opnieuw worden bepaald, maar dan wel uit de hydrostatische tabellen van de berekende *trim*. Hiervoor zal het rekenblad elke hydrostatische tabel controleren om te bepalen welke tabellen gepast zijn als onder- en bovengrens waartussen de berekende *trim* ligt. Er wordt als het ware een loop gegenereerd die alle tabellen zal nagaan, tot de laatste is bereikt. Voldoen twee opeenvolgende tabellen als onder- en bovengrens niet, dan worden de grenzen met één waarde opgeschoven. Wanneer de gepaste trim grenzen bereikt zijn, worden LCB en MCT voor onder- en bovengrens bepaald. Op basis van deze waardes kan de trim geoptimaliseerd worden. Er dient nog een laatste maal geïnterpoleerd te worden, tot LCB en MCT bepaald zijn voor de gepaste trim waarde. Eens deze optimalisatie is verwezenlijkt, worden de hydrostatische parameters een tweede maal bepaald, uitgaande van de effectieve trim.

Voor de bepaling van de statische stabiliteitscurves dient er rekening gehouden te worden met de tekenconventie van *heel*. Indien TCG een positieve waarde zal aannemen wordt er een *heel* naar bakboordzijde (PS) verondersteld, een negatieve waarde van TCG zal aanleiding geven tot een *heel* naar stuurboordzijde (SB). Dit is belangrijk voor de bepaling van de metacentrische hoogte op basis van de cross curve tabellen. Zo zijn de cross tabellen voor *heel* naar bakboord verschillend aan de tabellen voor een *heel* naar stuurboord. De code is voorzien van deze voorwaarde en zal de gegevens uit de correcte tabel halen. De GZ-curve kan dan worden opgesteld door voor elke *heel* hoek de nodige parameters in de GZ formule te bepalen.

Alle bijkomende curves zoals de *wind levers*, *additional heeling levers* en initiële metacentrische hoogte zijn bepaald zoals is weergegeven in de manuele uitwerking. Tot slot is er nog de uitzondering voor de bepaling van de maximale GZ – waarde. In het geval er *downflooding points* aanwezig zijn, dan kan de GZ-waarde altijd beperkt worden. Toch moet het programma voorzien zijn van de mogelijkheid indien er geen *downflooding points* aanwezig zijn. In dat geval dient de maximale GZ-waarde rechtstreeks van de curve bepaald te worden.

Voor de stabiliteitsverificatie worden de criteria voor de *wind levers*, *additional heeling levers* op basis van het intersectiepunt dat deze curves maken met de GZ-curve. De code is voorzien van een methode die in staat is om de intersectiepunten van de curves te lokaliseren en zo te linken aan een overeenkomstige *heel* hoek.

6 VERIFICATIE VAN HET REKENBLAD

In vorige hoofdstukken is uitvoerig de totstandkoming, de werking en de opbouw van de rekentool besproken. Echter kan er niet automatisch vanuit gegaan worden dat de resultaten van de rekentool betrouwbaar zijn. Tijdens het ontwerp van dit rekenblad zijn er stelselmatig controles uitgevoerd op tussentijdse resultaten, door de resultaten van het rekenblad te vergelijken met de resultaten van de stabiliteitsstudies van de pontons. Echter bieden deze beperkte controles niet voldoende zekerheid.

In deze paragraaf wordt daarom het rekenblad op twee manieren intensief getest. Ten eerste worden enkele loadcases opgesteld die enerzijds worden doorgerekend met het rekenblad en anderzijds met een professioneel softwareprogramma genaamd '*DELFTship*'. Vervolgens zullen de beide resultaten vergeleken worden en zal bekeken worden of de eventuele verschillen aanvaardbaar zijn. Een verklaring dient gezocht te worden indien er grote verschillen optreden. Ten tweede wordt voor beide pontons een meting van de hellingshoek in trim en slagzij (*list*) in de praktijk gedaan. Het rekentool rekt vervolgens de praktijksituatie na, voor de hellingshoeken wordt zo de theorie met de praktijk vergeleken.

6.1 Verificatie met DELFTship

6.1.1 Verificatie 1: Waterduvel in combinatie met een giekkraan

Voor de eerste verificatie worden de gebruikte *inputs* van de manuele berekening in Hoofdstuk 4 in het rekenblad en DELFTship ingegeven. De bekomen resultaten van de drie berekeningsmethodes worden dan met elkaar vergeleken. Alle resultaten zijn in onderstaande Tabellen 39, 40 en 41 op de volgende pagina's samengevat.

De loadcase die gebruikt is voor de manuele stabiliteitsverificatie in Hoofdstuk 4 is Waterduvel in combinatie met een giekkraan die een last achterwaarts optilt van 48 ton op 6m van de achterzijde van het ponton. Hiervoor wordt de nodige ballast achteraan voorzien.

Verificatie: Resulterende waterverplaatsing en zwaartepunt

De eerste verificatie die gedaan wordt is het vergelijken van de berekende totale waterverplaatsing en het resulterende zwaartepunt. In onderstaande Tabel 25, 26 en 27 zijn de waterverplaatsingen voor de drie berekeningsmethodes samengevat. Het is duidelijk te zien dat deze waarden zeer kort bij elkaar liggen, en geen afwijking vertonen.

Tabel 39: Verificatie 1 - Waterverplaatsing manueel

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	<i>t · m</i>
<i>Miscellaneous</i>	139,360	4,811	40,917	-0,088 (SB)	0,513
<i>Void</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
<i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
<i>Fuel tanks</i>	10,472	0,824	20,000	1,800(PS)	0,762
<i>Waterballast</i>	125,646	1,148	3,231	0,000(CL)	0,000
<i>Deadweight</i>	275,478	2,989	22,933	0,024(PS)	1,275
<i>Lightship</i>	284,148	1,549	19,837	0,106(PS)	0,000
Waterverplaatsing	559,626	2,258	21,361	0,066(PS)	1,275

Tabel 40: Verificatie 1 - Waterverplaatsing rekenblad

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	<i>t · m</i>
<i>Miscellaneous</i>	139,360	4,811	40,917	-0,088 (SB)	0,513
<i>Void</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
<i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
<i>Fuel tanks</i>	10,472	0,824	20,000	1,800(PS)	0,762
<i>Waterballast</i>	125,646	1,148	3,231	0,000(CL)	0,000
<i>Deadweight</i>	275,478	2,989	22,933	0,024(PS)	1,275
<i>Lightship</i>	284,148	1,549	19,837	0,106(PS)	0,000
Waterverplaatsing	559,625	2,258	21,361	0,066(PS)	1,28

Tabel 41: Verificatie 1 - Waterverplaatsing DELFTship

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>t · m</i>
<i>Miscellaneous</i>	139,360	4,811	40,917	-0,088 (SB)	0,510
<i>Void</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
<i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
<i>Fuel tanks</i>	10,472	0,824	20,000	1,800(PS)	0,760
<i>Waterballast</i>	125,646	1,148	3,231	0,000(CL)	0,000
<i>Deadweight</i>	275,478	2,989	22,933	0,024(PS)	1,280
<i>Lightship</i>	284,148	1,549	19,837	0,106(PS)	0,000
Waterverplaatsing	559,626	2,258	21,361	0,066(PS)	1,280

Verificatie: Hydrostatische parameters

Een volgende vergelijking die uitgevoerd is, zijn de hydrostatische parameters. In onderstaande Tabel 42 zijn de berekende hydrostatische parameters opgesomd. Het valt meteen op dat ook deze waarden bijna niet verschillen. De kleine verschillen zijn enkel te wijten aan afrondingen die anders gehanteerd worden in het rekenblad.

Tabel 42: Verificatie 1 - Hydrostatische parameters vergelijking

Omschrijving	Manueel berekend	Rekentool	DELFTship
Initiële <i>List</i>	0,36° (PS)	0,36° (PS)	0,4° (PS)
Trim	0,103 (m)	0,103 (m)	0,104 (m)
<i>Mean moulded draft</i>	1,139 (m)	1,139 (m)	1,139 (m)
<i>Draft Aft pp</i>	1,087 (m)	1,088 (m)	1,087 (m)
<i>Draft Fore pp</i>	1,190 (m)	1,191 (m)	1,191 (m)
VCG	2,258 (m)	2,258 (m)	2,258 (m)
GG'	0,002 (m)	0,002 (m)	0,002 (m)
VCG'	2,260 (m)	2,260 (m)	2,260 (m)

Resultaten met betrekking tot de stabiliteitsverificatie

In onderstaande tabel 43 zijn de belangrijkste parameters voor de stabiliteitscriteria van de drie berekeningsmethodes samengevat. Ook hier zijn de verschillen miniem.

Tabel 43: Verificatie 1 - Vergelijking van stabiliteitscriteria

Omschrijving	Manueel berekend	Rekentool	DELFTship
Vrijboord			
Vrijboord SB Aft	1,750 (m)	1,749 (m)	1,676 (m)
Vrijboord PS Aft	1,677 (m)	1,676 (m)	1,676 (m)
Vrijboord SB Fore	1,646 (m)	1,646 (m)	1,572 (m)
Vrijboord PS Fore	1,574 (m)	1,573 (m)	1,572 (m)
Meest kritische Vrijboord: FB _{PSFore}	1,274 (m)	1,273 (m)	1,271 (m)
<i>Inland wind criterion</i> (Wind druk: 13kg/m²)			
Criterion	0,61°	0,61°	0,6°
<i>Inland wind criterion</i> (Wind druk: 40kg/m²)			
Criterion	1,13°	1,13°	1,1°
<i>Inclination angles</i>			
<i>Trim angle</i>	0,14°	0,14°	0,14°
<i>Heel angle</i>	0,36°	0,36°	0,4°
Maximale GZ-waarde, gelimiteerd door de mogelijkheid tot <i>Downflooding</i>			
<i>GZ-Max</i>	2,050 (m)	2,048 (m)	2,098 (m)
<i>Additional heeling moment</i>			
Criterion	8,0°	8,0°	8,0°
Initiële metacentrische hoogte			
GM	8,484 (m)	8,469 (m)	8,534 (m)
<i>Residual stability</i>			
<i>Residual stability</i>	0,930 (m)	0,928 (m)	1,089 (m)

Uit bovenstaande verificatie is gebleken dat de waardes bekomen met het rekentool zeer goed overeenkomen met de bekomen waarde van een professionele software. Voor de vrijboord bepalingen met DELFTship is te bemerken dat de waardes voor stuurboord en bakboord gelijk zijn aan elkaar. Hier zal DELFTship meteen uitgaan van de meest kritische waardes en omdat het vaartuig initieel naar bakboordzijde geheld is, zal het vrijboord aan bakboordzijde het meest kritisch zijn.

De windcriteria worden hier altijd in hoeken uitgedrukt, zoals beschreven in de manuele uitwerking worden deze hoeken bepaald door het intersectiepunt tussen de GZ-curve en de richtende wind hefboomscurve te bepalen. De *heel* hoek die overeenkomt met dit intersectiepunt omvat het windcriterium. Voor het criterium van het additioneel hellend moment ten gevolge van de giekkraan, wordt de dezelfde methode gehanteerd. Het intersectiepunt is hier bekomen door de kruising van de GZ-curve met de additionele richtende hefboomscurve te vinden.

Een kleine afwijking is echter wel te bemerken bij de bepaling van de maximale GZ-waarde. Dit heeft te maken doordat er enkel afwijkingen voorkomen bij de bepaling van alle *submersion angles* van de *downflooding points*. De *submersion angles* worden bekomen door de slagzij hoek te bepalen waaronder een *downflooding point* gelijk met het wateroppervlak komt te liggen. De afwijking is vooral te wijten doordat het metacentrum zal verschuiven van de centrale as voor grotere *heel* hoeken. Het rekenblad houdt hier geen rekening mee terwijl DELFTship deze uitwijking van het metacentrum wel zal aannemen. Problematisch is de afwijking van GZ-max zeker niet aangezien de afwijking in de eerste plaats niet groot is (afwijking van 3%). Daarnaast is gebleken dat de *submersion angles* een grootteorde hebben van 15° à 20°, omwille van de invloed van de kraan zullen deze slagzijhoeken toch nooit aanvaard worden.

Na de eerste verificatie kunnen er vastgesteld worden dat de verschillen overal vrij beperkt zijn, en dat bijgevolg het rekenblad betrouwbaar is. Extra testen zijn evenwel noodzakelijk om het hele spectrum aan belastingen te testen.

6.1.2 Verificatie 2: Waterduvel in combinatie met een graafkraan

Voor de tweede verificatie zal de belasting ten gevolge van een graafkraan aangrijpen op het ponton Waterduvel, zoals eerder al is besproken zal de graafkraan op het verlaagd deel van het dek worden gepositioneerd. De lasten op het dek zijn weergegeven in Tabel 44 op volgende bladzijde.

Tabel 44: Verificatie 2 – lasten op het dek

Omschrijving	Massa	VCG	LCG	TCG
	t	m	m	m
<i>Excavator</i>	114,000	5,330	3.300	0,000 (CL)
<i>Digging Force</i>	18.710	5,330	-10,450	0,000(CL)

De graafkraan is nu aan de achterzijde gepositioneerd, om een tegengewicht te bieden zal de nodige ballast vooraan voorzien zijn. Daarnaast zijn de gebruikelijke vloeistofreservoirs ook gevuld, samengevat in Tabel 45.

Tabel 45: Verificatie 2 - Vullingspercentage ballastkamers

Lastencategorie: <i>Miscellaneous</i>	
Omschrijving	Fill (%)
Fresh water tank (FW)	97,0
Dirty oil tank (DO)	10,0
Sewage tank (SEW)	10,0
Lastencategorie: <i>Fuel</i>	
Omschrijving	Fill (%)
Marine diesel oil tank (MDO)	97,0
<i>Daytank</i> (DT)	97,0
Lastencategorie: <i>Waterballast</i> (WB)	
Omschrijving	Fill (%)
PS ₅	100,0
SB ₅	100,0
PS _{Fore}	100,0
SB _{Fore}	100,0

Deze lasten worden vervolgens onder de lastencategorie *dredging* van het rekenblad geïmplementeerd. Alle resultaten worden samengevat in onderstaande tabellen.

Verificatie: Resulterende waterverplaatsing en zwaartepunt

De eerste verificatie die gedaan wordt is het vergelijken van de berekende totale waterverplaatsing en het resulterende zwaartepunt. In onderstaande Tabellen 46 en 47 zijn de waterverplaatsingen voor de drie berekeningsmethodes samengevat. Het is duidelijk te zien dat deze waarden zeer kort bij elkaar liggen, en geen afwijking vertonen.

Tabel 46: Verificatie 2 - Waterverplaatsing rekenblad

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	$t \cdot m$
<i>Miscellaneous</i>	138,970	5,126	2,170	-0,088(SB)	0,510
<i>Void</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
<i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
<i>Fuel tanks</i>	10,472	0,824	20,000	1,800(PS)	0,770
<i>Waterballast</i>	123,529	1,275	39,318	0,000(CL)	0,000
<i>Deadweight</i>	272,970	3,218	19,665	0,024(PS)	1,280
<i>Lightship</i>	284,148	1,549	19,837	0,106(PS)	0,000
Waterverplaatsing	557.118	2,367	19,753	0,066(PS)	1,280

Tabel 47: Verificatie 1 - Waterverplaatsing DELFTship

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	$t \cdot m$
<i>Miscellaneous</i>	138,970	5,126	2,170	-0,088(SB)	
<i>Void</i>	0,000	0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000
<i>Engine room</i>	0,000	0,000	0,000	0,000(CL)	0,000
<i>Fuel tanks</i>	10,472	0,824	20,000	1,800(PS)	0,760
<i>Waterballast</i>	123,529	1,275	39,318	0,000(CL)	0,000
<i>Deadweight</i>	272,971	3,218	19,665	0,024(PS)	1,280
<i>Lightship</i>	284,148	1,549	19,837	0,106(PS)	0,000
Waterverplaatsing	557.119	2,367	19,753	0,066(PS)	1,280

Verificatie: Hydrostatische parameters

Een volgende vergelijking die uitgevoerd is, zijn de hydrostatische parameters. In onderstaande Tabel 48 zijn de berekende hydrostatische parameters opgesomd. Het valt meteen op dat ook deze waarden bijna niet verschillen. De kleine verschillen zijn enkel te wijten aan afronding die anders gehanteerd worden in het rekenblad.

Tabel 48: Verificatie 2 - Hydrostatische parameters vergelijking

Omschrijving	Rekentool	DELFTship
Initiële <i>List</i>	0,37°	0,4°
Trim	-0,419 (m)	-0,424 (m)
<i>Mean moulded draft</i>	1,134 (m)	1,135 (m)
<i>Draft Aft pp</i>	1,344 (m)	1,347 (m)
<i>Draft Fore pp</i>	0,925 (m)	0,923 (m)
VCG	2,367 (m)	2,367 (m)
GG'	0,002 (m)	0,002 (m)
VCG'	2,369 (m)	2,369 (m)

Resultaten met betrekking tot de stabiliteitsverificatie

In Tabel 49 op de volgende bladzijde zijn de belangrijkste parameters voor de stabiliteitscriteria van de drie berekeningsmethodes samengevat. Ook hier zijn de verschillen miniem.

Tabel 49: Verificatie 2 - Vergelijking van stabiliteitscriteria

Omschrijving	Rekentool	DELFTship
Vrijboord		
Vrijboord SB Aft	1,493 (m)	1,414 (m)
Vrijboord PS Aft	1,418 (m)	1,414 (m)
Vrijboord SB Fore	1,912 (m)	1,838 (m)
Vrijboord PS Fore	1,837 (m)	1,838 (m)
Meest kritische Vrij boord: FB _{PSFore}	1,118 (m)	1,118 (m)
<i>Inland wind criterion</i> (Wind druk: 13kg/m²)		
Criterium	0,44°	0,4°
<i>Inland wind criterion</i> (Wind druk: 40kg/m²)		
Criterium	0,56 °	0,6°
<i>Inclination angles</i>		
<i>Trim angle</i>	-0,57°	-0,58°
<i>Heel angle</i>	0,37°	0,4°
Maximale GZ-waarde, gelimiteerd door de mogelijkheid tot <i>Downflooding</i>		
<i>GZ-Max</i>	1,970 (m)	1,886 (m)
<i>Additional heeling moment</i>		
Criterium	7,60°	7,6°
Initiële metacentrische hoogte		
GM	8,361 (m)	8,399 (m)
<i>Residual stability</i>		
<i>Residual stability</i>	0,928 (m)	0,864 (m)

Uit deze controle is gebleken dat alle parameters berekend met het rekentool goed overeenkomen met alle parameters bepaald aan de hand van DELFTship. Uit de tabel van de hydrostatische gegevens is gebleken dat de waarde van trim hier een grotere afwijking vertoont dan in de eerste verificatie. Dit is te wijten aan de oplopende onnauwkeurigheid van de toegepaste methode naargelang de trim waarde groter zal worden. Door de

parameters LCB en MCT in de trim formule te bepalen op basis van de hydrostatische gegevens van een vaartuig, zullen de resultaten onnauwkeuriger worden naargelang trim een grotere waarde zal aannemen. Dit is zeker niet problematisch voor deze stabiliteitsstudie aangezien het vaartuig slecht een beperkte trim waarde mag aannemen. Voor beperkte *trim* waardes zal de toegepaste methode hier wel nog nauwkeurige waardes opleveren. De *trim* waarde bepaald met de rekentool (-0,419 m) wijkt slechts 5 mm af van de waarde bekomen met DELFTship (-0,424 m), omgerekend naar een waarde voor de trim hoek zal dit verschil nog beperkter zijn.

6.1.3 Verificatie 3: BERL in combinatie met een giekkraan

De verificatie van het ponton BERL zal worden uitgevoerd door een giekkraan van 230 ton op het ponton te plaatsen. Daarnaast is het dek ook nog belast met lasten afkomstig van lieren, kabelschijven en dergelijke. De lasten op het dek zijn weergegeven in onderstaande Tabel 50.

Tabel 50: Verificatie 3 - lasten op het dek

Omschrijving	Massa	VCG	LCG	TCG
	Ton	m	m	m
Giekkraan	230,000	5,700	5,500	0,000 (CL)
Lieren	25,000	3,500	47,500	0,000 (CL)
Kabelschijven	4,200	3,100	40,800	0,000 (CL)
Dragline en varia	78,000	3,000	24,500	0,000 (CL)

Voor deze test is er bewust gekozen om het ponton niet van ballast te voorzien, dit om hogere trim waardes te bekomen en de nauwkeurigheid hiervan te bepalen.

Verificatie: Resulterende waterverplaatsing en zwaartepunt

Uit de bepaling van het resulterende zwaartepunt zal blijken dat deze waardes ook voor dit rekenblad vrij nauwkeurig zijn bepaald. In Tabel 51 en 52 zijn de waardes voor de waterverplaatsing van de rekentool en DELFTship gegeven.

Tabel 51: Verificatie 3 – resulterende waterverplaatsing rekentool

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	$t \cdot m$
<i>Deadweight</i>	337,200	4,800	13,449	0,000(CL)	0,000
<i>Lightship</i>	500,000	3,900	25,000	0,000 (CL)	0,000
Waterverplaatsing	837,200	4,295	20,347	0,000(CL)	0,000

Tabel 52: Verificatie 3 – resulterende waterverplaatsing DELFTship

Categorie	Gewicht	VCG	LCG	TCG	FSM
	t	m	m	m	$t \cdot m$
<i>Deadweight</i>	337,200	4,800	13,449	0,000(CL)	0,000
<i>Lightship</i>	500,000	3,900	25,000	0,000 (CL)	0,000
Waterverplaatsing	837,200	4,295	20,347	0,000(CL)	0,000

Resultaten met betrekking tot de stabiliteitsverificatie

De berekening uitgevoerd met DELFTship is voor het ponton BERL, door het studiebureau aanzienlijk ingekort. Er is namelijk geen additioneel hellend moment ten gevolge van een kraanlast voorzien, hierdoor zal dit criterium samen met de bepaling van de *residual stability* niet gecontroleerd worden. Daarnaast wordt het vrijboord niet bepaald op de vier hoekpunten van het ponton, enkel het resulterende vrijboord is berekend. Daarnaast zal de maximale GZ-waarde hier niet gelimiteerd worden omdat er geen *downflooding points* aanwezig zijn.

Tabel 53: Verificatie 3 - Vergelijking van stabiliteitscriteria

Omschrijving	Rekentool	DELFTship
Vrijboord		
Meest kritische Vrij boord: FB _{PSFore}	1,019 (m)	1,197 (m)
<i>Inland wind criterion</i> (Wind druk: 40kg/m ²)		
Criterion	0,54°	0,5°
<i>Inclination angles</i>		
<i>Trim angle</i>	1,58°	1,49°
<i>Heel angle</i>	0,04°	0,03°
Maximale GZ-waarde		
<i>GZ-Max</i>	2,566 (m)	2,571 (m)
Initiële metacentrische hoogte		
GM	12,803 (m)	12,757 (m)

Uit deze resultaten is gebleken dat het rekenblad ook voor BERL vrij nauwkeurig de berekening zal uitvoeren. De *trim* hoek die hier is bepaald, zal zoals voorspeld een groter afwijking hebben naargelang de *trim* waardes groter worden. Maar ook deze afwijking is vrij beperkt. De afwijking voor het resulterende vrijboord is ook hier groter dan in de vorige stabiliteitsverificaties. Dit is te wijten aan de afwijking van de *trim* waarde.

6.2 Verificatie met een praktijkstudie

Na in vorige paragraaf een theoretische verificatie van het rekenblad gedaan te hebben, kunnen de resultaten nog geverifieerd worden met enkele praktijkmetingen. Hierbij wordt de evenwichtspositie van het ponton BERL gemeten en vergeleken met de resultaten van het rekenblad. De praktijkmetingen zijn uitgevoerd op de site van ArcelorMittal in de haven van Gent. Hier is HYE nv in onderaanneming van Stadsbader nv de funderingen aan het bouwen van de toekomstige *All Wheeler Terminal* (AWT). Een AWT is een overdekte laadkade waar staal 24/7 kan geladen en gelost worden van vrachtschepen, terwijl dit bij een klassieke open laadkade enkel mogelijk is bij droog weer. In onderstaande Figuur 84 is een impressie van de toekomstige AWT-terminal weergegeven.

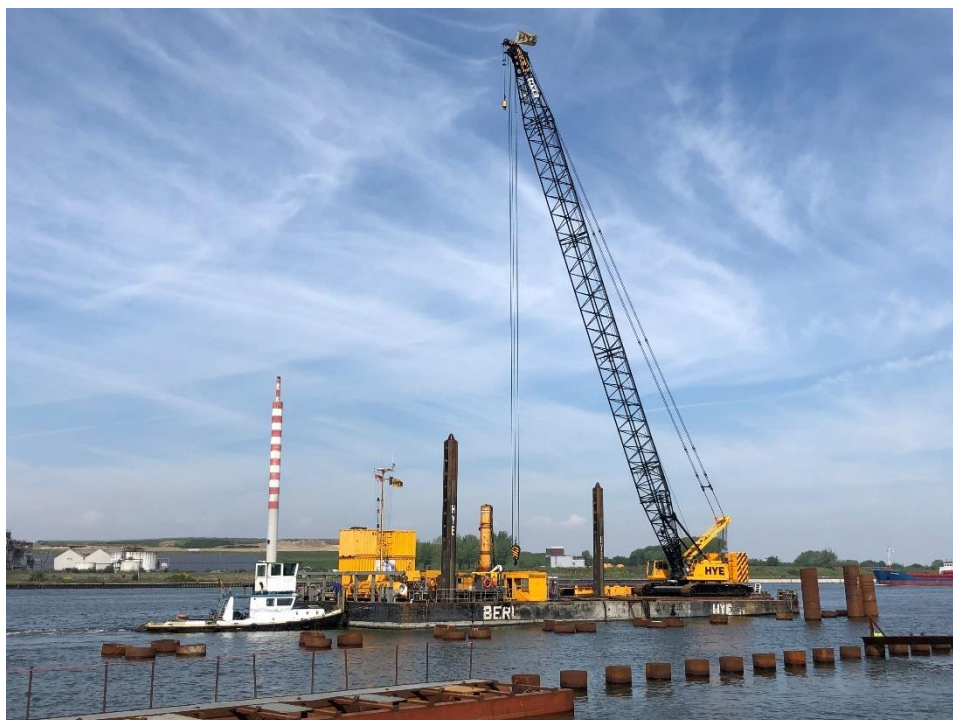


Figuur 84: Toekomstige AWT-Terminal bij ArcelorMittal Gent [31]

HYE nv is verantwoordelijk voor het plaatsen van alle funderingssokkels op het water door middel van groepen buispalen. Op deze buispalen wordt een betonnen sokkel gegoten die de aanzet vormt van de terminal. Daarnaast wordt ook een damwand geplaatst die bestaat uit *sheet piles*. Alle buizen en palen worden tot aan het ponton getransporteerd met behulp van een duwbak ponton. Eens dat vaartuig langs het ponton komt te liggen, worden de buizen en *sheet piles* één voor één afgeladen en ingetrild op de correcte positie met behulp van een trilblok. Door gebruik te maken van een trilblok worden alle palen goed aangedrukt tot ze vast in de grond komen te staan. Om dit uit te voeren zal de kraan de palen moeten verplaatsen, en zal het ponton dus afhankelijk van de positie van de kraan en last een andere evenwichtssituatie hebben. Voor deze situatie wordt de vrijboord gemeten op de vier hoeken van het ponton, waaruit de slagzij en trim kan afgeleid worden. Vervolgens worden de resultaten van de meting vergeleken met de theoretische waarden voor de trim en slagzij uit de rekentool en de software DELFTship.

6.2.1 Proefopstelling

Deze proef wordt uitgevoerd met het ponton BERL, het grootste ponton van HYE nv. De bevindingen van de proef kunnen ook een idee geven over de correctheid van het rekenblad van de Waterduvel, aangezien beide rekenbladen analoog opgebouwd zijn. In onderstaande Figuur 85 is de proefopstelling van het ponton BERL in combinatie met de eerder besproken Hitachi SCX-2800 rupskraan te zien.



Figuur 85: Proefopstelling BERL

Zoals ook te zien is op de bovenstaande foto zijn er aan de achterzijde van het ponton verschillende extra lasten aanwezig zoals containers, een heihamer, hydraulische groepen enz. Deze extra lasten beïnvloeden de stabiliteit van het ponton en om alle berekeningen zo nauwkeurig mogelijk te laten verlopen, worden alle aanwezige lasten op het ponton opgemeten. Van al deze lasten wordt het zwaartepunt opgemeten ten opzichte van een vaste referentie. Onze referentie van het rekenblad voor LCG is de achterzijde van het ponton, waar de kraan staat. TCG wordt weergegeven ten opzichte van de middellijn van het ponton, en VCG ten opzichte van de onderzijde van het ponton (de kiel). In onderstaande Tabel 54 zijn alle opmetingen opgesomd met het gewicht en het zwaartepunt.

Tabel 54: Extra lasten op het dek van de proefopstelling

Type belasting	Gewicht	VCG	LCG	TCG
	t	m	m	m
Lieren	25,000	3,900	47,450	0,000(CL)
Container 1	3,000	5,175	43,600	-4,700 (SB)
Container 2	1,000	9,600	45,500	-4,700 (SB)
Container 3	1,000	9,600	41,900	-4,700 (SB)
Mobiele brandstoftank	1,125	4,450	41,450	4,985 (PS)
Dieselgenerator	1,750	4,575	39,85	4,985 (PS)
Trilblok contra	10,000	3,600	10,600	-10,100 (SB)
Hydraulisch aggregaat 1	13,000	4,125	32,247	4,008 (PS)
Hydraulisch aggregaat 2	7,000	4,350	32,829	-4,550 (SB)
Heihamer	23,00	6,100	32,217	-0,700 (SB)

De ballastkamers waren op het moment van de opmeting allemaal leeg. Enkel in de achterste ballastkamers “WB *Fore*” en “WB *Center Fore*” de vaste ballast van 70 ton aanwezig die verdeeld is over de drie ballastkamers.

Zwaartepunt kraan

Het grote voordeel van een moderne kraan zoals de Hitachi SCX-2800 is dat deze automatisch de vlucht en het gewicht van de last kunnen weergeven. Voor deze praktijkmeting zijn er twee situaties onderzocht namelijk de kraan achterwaarts en de kraan zijwaarts gericht naar bakboord (PS). Beide opmetingen zijn uitgevoerd met een gieklenkte van 57,9 m, een vlucht van 14,70 m en een last van 30 ton. De positie van de rotatie-as van de kraan is in het midden van de breedte op een afstand van 7,463 m van de voorzijde. Het zwaartepunt van de kraan is echter afhankelijk van de gieklenkte en de rotatiehoek ten opzichte van het onderstel. Eerder is de tool al besproken voor het berekenen van het zwaartepunt van de kraan. In Figuur 86 op volgende bladzijde is de berekening voor de kraan achterwaarts voorgesteld.

BERL - COG crane Hitachi SCX2800	
Boom length (mm):	57912
Working radius (m):	14,7
Angle of crane to lower:	0
Calculate	
Total weight:	226211,57 kg
LCG (x):	0,51
VCG (y):	2,97
TCG (z):	0,00

Figuur 86: Bepaling zwaartepunt kraan achterwaarts

Natuurlijk zijn de waardes van het zwaartepunt die de tool weergeeft ten opzichte van het assenstelsel met de oorsprong op het dek in de rotatie-as van de kraan. Deze dient omgezet te worden naar het globale assenstelsel op het ponton. In Tabel 55 is het zwaartepunt voor beide situaties ten opzichte van het globale assenstelsel weergegeven.

Tabel 55: Praktijkmeting - Zwaartepunt en gewicht samenstel

	Gewicht (ton)	VCG (m)	LCG (m)	TCG (m)
1) Kraan achterwaarts	226,211	5,970	50- 43,047=6,953	0
2) Kraan zijwaarts	226,211	5,970	50- 42,477=7,523	0,560 (PS)

Zwaartepunt last

De last die gebruikt werd, was een buispaal die gedeeltelijk ondergedompeld werd in het water tot deze een gewicht aan de kraan had van 30 ton. De vlucht van de last ten opzichte van de rotatie-as van de kraan is 14,70 m. Hiermee kan de positie van het zwaartepunt van de last ten opzichte van het ponton bepaald worden. Het zwaartepunt van de last voor beide situaties is weergegeven in Tabel 56 op volgende bladzijde.

Tabel 56: Praktijkmeting - Zwaartepunt last

	Gewicht (ton)	VCG (m)	LCG (m)	TCG (m)
1) Kraan achterwaarts	30	5	50-57,237=-7.237	0
2) Kraan zijwaarts	30	5	50-42,477=7.523	14,70 (SB)

Vaste ballast

Zoals eerder aangehaald, is er in het ponton BERL een vaste ballast aangebracht van 70 ton in de achterste ballastkamers. Deze vaste ballast bestaat uit oude treinsporen en remschoenen die permanent in de ballastkamers “WB Fore” en “WB Center Fore” is geplaatst en evenredig verdeeld is over deze drie ballastkamers. De vaste ballast is voor deze praktijkverificatie in DELFTship en in de rekentool ingegeven als drie belastingen onderaan in de ballasttanks, zoals weergegeven in onderstaande Tabel 57 .

Tabel 57: Praktijkmeting – Vaste ballast in BERL

	Gewicht (ton)	VCG (m)	LCG (m)	TCG (m)
Vaste ballast <i>mid</i>	25,000	0,300	47,972	0
Vaste ballast PS	22,500	0,300	47,972	-5,088 (PS)
Vaste ballast SB	22,500	0,300	47,972	5,088 (SB)

6.2.2 Resultaten

In deze paragraaf worden de methode en resultaten toegelicht van de praktijkopmeting en de resultaten uit de rekentool en de software DELFTship. In de volgende paragraaf zullen de resultaten vergeleken en besproken worden.

Resultaten praktijkopmeting

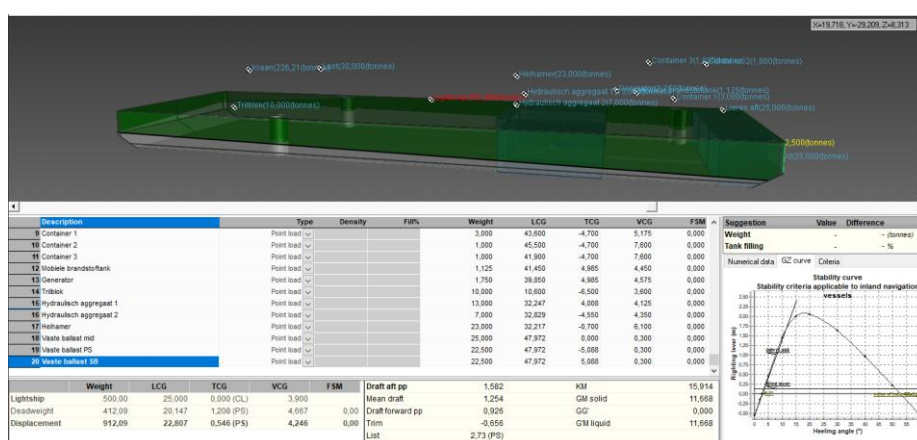
Voor beide situaties is in de evenwichtstoestand de vrijboord, of de afstand van het dek tot het wateroppervlak, gemeten op de vier hoekpunten. Door de gemiddelde van het verschil te nemen van deze, kan de *trim* en *heel* berekend worden. De resultaten voor de trim en heel hoeken zijn samengevat in Tabel 58 op de volgende bladzijde.

Tabel 58: Praktijkmeting - Meetresultaten

	1) Kraan achterwaarts	2) Kraan zijwaarts
Trim (°)	- 0,7°	- 0,660°
Heel (°)	- 0,4° (SB)	1,6° (PS)

Resultaten DELFTship:

In het commercieel softwareprogramma DELFTship zijn de gegevens ook ingevoerd en is de trim en heel berekend. In onderstaande Figuur 87 is de berekening van DELFTship weergegeven voor de situatie waar de kraan zijwaarts werkt op het ponton.



Figuur 87: Resultaten DELFTship praktijkmeting kraan zijwaarts

In onderstaande Tabel 60 zijn de resultaten van DELFTship voor beide situaties weergegeven.

Tabel 59: Resultaten DELFTship praktijkmeting

	1) Kraan achterwaarts	2) Kraan zijwaarts
Trim	-0,97°	-0,75°
Heel	-0,33° (SB)	2,73° (PS)

Resultaten rekentool:

In Tabel 60 op de volgende bladzijde worden de door de rekentool berekende trim- en heel-hoeken samengevat voor beide situaties.

Tabel 60: resultaten rekentool praktijkmeting

	1) Kraan achterwaarts	2) Kraan zijwaarts
Trim (°)	-0,97°	-0,75°
Heel (°)	-0,33° (SB)	2,73° (PS)

Bespreking resultaten

Uit deze resultaten kan afgeleid worden dat de rekentool zo goed als gelijke waarden uitkomt als het commercieel programma DELFTship, wat ook al opgemerkt is in vorige paragraaf. De verschillen met de praktijkopmeting zijn wel groter, waarbij vooral de *heel*-hoeken afwijken. Ook de trim hoek wijkt lichtjes af ten opzichte van het theoretisch model wanneer de kraan achterwaarts werkt. Wanneer de kraan zijwaarts werkt, wijkt de trimhoek minder af. Deze afwijking kan te wijten zijn aan fouten in het bepalen van de extra lasten op het dek, die weergegeven zijn in Tabel 54 (p. 154). Op het ponton BERL zijn veel extra belastingen aan de voorsteven geplaatst, die allemaal invloed hebben op de stabiliteit. De meeste van deze deklasten kan zeer nauwkeurig bepaald worden, maar anderen dienen zo nauwkeurig mogelijk ingeschat te worden.

6.3 Analyse

Zowel uit de verificatie met DELFTship als de verificatie met de praktijkmeting is gebleken dat de resultaten van de rekentool en die van DELFTship zeer nauw overeenkomen. Het is hierbij dan ook geverifieerd dat de rekentool correct is en conform de regelgeving. In de vergelijking met de praktijkmeting is echter opgemerkt dat er verschillen zijn tussen de theoretische resultaten van beide softwaretools en de gemeten resultaten. De kleine verschillen in *trim* en *heel* voor de situatie waarbij de kraan achterwaarts op het ponton wordt gebruikt zijn verwaarloosbaar, aangezien de optredende trim en heel lager lag dan de theoretische berekening deed vermoeden. Dit maakt het een veilige interpretatie. De *heel* hoek bij de situatie met de kraan zijwaarts wijkt in de praktijk echter wel af. Een éénduidige verklaring hiervoor vinden is moeilijk. Maar de grootste oorzaak is te zoeken bij het inschatten van de extra deklasten. Op het moment van de praktijkmeting waren er veel extra deklasten aanwezig die ingeschat zijn en waarvan het zwaartepunt bepaald is. Indien deze inschatting niet zou kloppen, kunnen de waarden al snel afwijken.

6.4 Verbeteren stabiliteit van kraanponton

Zoals eerder besproken is de stabiliteit van vaartuigen, en hier specifiek voor pontons afhankelijk van zeer veel factoren. In de eerste fase van het ontwerp van een ponton of vaartuig kan de vorm van de boeg ontworpen worden voor een ideale stabiliteit te garanderen. De slagzij kan beperkt worden door de breedte van het ponton aan te bassen, en eventueel zijballasten bij te voegen. De trim kan dan weer beperkt worden door de breedte te laten variëren van voor naar achter, waardoor het Buoyancy-punt zal verschuiven. Maar er dient rekening mee gehouden worden dat dit de totale weerstand van het ponton zal verminderen.

De in vorige paragraaf besproken methodes zijn vooral toepasbaar bij het ontwerp van een nieuw vaartuig. Bij het gebruik van de vaartuigen kan de stabiliteit en het helling gedrag ook sterk verbeterd worden door het rekening houden met verschillende factoren. Deze mogelijkheden zullen in de volgende paragrafen worden toegelicht.

6.4.1 Aanpassen lading en belastingen

Het effect van het aanpassen van de belastingen hangt sterk af van het percentage van de belasting ten opzichte van het totaal gewicht van het ponton en de mogelijkheden die er zijn om de belastingen te verplaatsen. Een vrachtschip is een voorbeeld waarbij er veel kan veranderd worden in de stabiliteitstoestand door het verplaatsen van lasten, waardoor het zwaartepunt van het geheel sterk zal veranderen. Een ander voorbeeld waarbij er bijna geen aanpassing kan gedaan worden, zijn vaartuigen die bijna geen lading meenemen, zoals bijvoorbeeld sleepboten.

Een belangrijke parameter voor de stabiliteit en de hellingen is het symmetrisch verdelen van de belasting. Op voorhand dient het effect van elke belasting op de stabiliteit bepaald te worden. Hierbij dient rekening gehouden te worden dat de achtersteven voldoende diepgang heeft om het vaartuig te kunnen voortbewegen en de voorsteven om botsen op de golven te beperken. Een parameter die hierbij wel eens onderschat wordt, is het verbruik van consumeerbare belastingen, zoals eten, drinken en brandstofvoorraad. Het verbruik van deze dient voor langere reizen in rekening gebracht te worden. Tegenwoordig zijn er zeer uitgebreide commerciële softwareprogramma's die de volledig stabiliteit kunnen verifiëren aan de hand van opgelegde beperkingen en zo ook ladingsinstructies kunnen maken. Deze ladingsinstructies dienen door de *loaders* en *riggers* die de lading inladen steeds nauwgezet opgevolgd te worden. Indien er toch afwijkingen zouden nodig zijn door variërende afmetingen, dienen deze steeds geverifieerd te worden.

6.4.2 Permanente ballast

Permanente ballast is een tweede mogelijkheid om de stabiliteit van een vaartuig of ponton te verbeteren. Door de locatie van permanente ballast goed te bepalen, kan het gebruikt worden om trim of slagzij weg te werken die anders in onbelaste toestand al aanwezig zou zijn. Ook kan permanente ballast gebruikt worden om een initiële trim te geven aan het ponton waardoor het ponton gaat afvlakken wanneer het belast wordt met bijvoorbeeld een kraan. De kraan gaat immers bijna permanent op het ponton staan, waardoor de permanente ballast beter is dan gewone ballastkamers te vullen. De ballastkamers kunnen dan gebruikt worden voor het aanpassen van de stabiliteit bij hijsoperaties.

Als het doel van het plaatsen van permanente ballast is om de stabiliteit te verbeteren, is het aangeraden om een materiaal te gebruiken met een hoge dichtheid. Immers, zo veel te hoger de dichtheid van het materiaal, zo veel te kleiner het volume dat dient gebruikt te worden en zo veel te lager het zwaartepunt van de permanente ballast komt te liggen. Voorbeelden van veelgebruikte materialen met een hoge dichtheid zijn lood, ijzer en beton. Als het doel van de permanente ballast enkel is om de diepgang te verbeteren of de trim aan te passen en het verlagen van het zwaartepunt van het schip is niet nodig, dan kunnen minder dure materialen gebruikt worden.

6.4.3 Verwijderen gewicht

Het verwijderen van gewicht aan de bovenzijde is de meest effectieve methode om de stabiliteit te verbeteren. Deze methode verlaagt zowel het zwaartepunt als het Buoyancy-punt dat zal verschuiven naar de lagere zijde als het schip helt. Door de verlaging van de *displacement*, zal de *righting arm GZ* stijgen. Ook is het verwijderen van gewicht goed voor het verbeteren van de weerstand na schade aan de romp.

7 CONCLUSIE

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste aannames herhaald en de vaststellingen van de rekentool samengevat. Daarna worden nog enkele mogelijke verbeteringen opgesomd die eventueel voor toekomstige onderzoeksonderwerpen kunnen dienen.

Het bedrijf HYE nv, die dit masterproefonderwerp aangereikt heeft, gebruikt momenteel drie pontons voor diverse werkzaamheden die zij uitvoeren vanop het water, zoals het heien van palen, plaatsen van damwanden, hijswerkzaamheden en kleine bagger- en uitgravingswerken. Vooraleer pontons in dienst genomen worden, dient er een stabiliteitsstudie verwezenlijkt te worden. Deze stabiliteitsstudie focust zich echter enkel op enkele specifieke loadcases om het gedrag van het ponton te bepalen. Voor de projectingenieurs van HYE nv is deze studie niet van grote meerwaarde, daar dat ze geen inzicht geeft in het gedrag en de nodige ballastmethodes voor andere belastingen. Hier is het idee ontstaan voor het ontwikkelen van een rekentool waarmee snel en eenvoudig de stabiliteit van een bepaalde hijsconfiguratie kan gecontroleerd worden in combinatie met de ideale ballastering van het ponton kan bepaald worden.

7.1 Rekentool

De ontwikkelde rekentool voldoet in de mate van het mogelijke aan alle gestelde eisen van HYE nv. De doelstelling om een rekentool te ontwikkelen dat de stabiliteit van een kraanponton kan verifiëren, is uitgevoerd voor twee van de drie pontons, namelijk de BERL en de Waterduvel. Doordat er zeer weinig informatie over het derde ponton Sebastian gekend is, en ook geen eerdere studies over gevoerd zijn, was het niet mogelijk om voor dit ponton ook een rekenblad te ontwerpen.

De rekentool werd op het einde getest en correct bevonden aan de hand van een vergelijking met een commerciële software genaamd DELFTship en een vergelijking met een praktijkmeting. De resultaten van een berekening met de ontwikkelde rekentool en de resultaten van de commerciële software zijn ondanks kleine verwaarloosbare afwijkingen gelijk. Bij de vergelijking met de praktijkmeting bleken er wel afwijkingen aanwezig. De afwijking in de trim-hoeken is voor zowel de situatie kraan achterwaarts als zijwaarts klein en ook veilig aangezien de opgemeten trim-hoek lager is dan de voorspelde *trim* hoek die zou optreden. Bij de situatie kraan zijwaarts wijkt de *heel*, of slagzij-hoek wel substantieel af. Deze afwijking zou te wijten zijn aan een foute inschatting van de extra deklasten. Op het dek van de BERL waren tijdens de meting veel extra deklasten aanwezig, die de stabiliteit kunnen beïnvloeden. Het kan dat het gewicht van elementen aan stuurboordzijde

(SB) onderschat is, waardoor de waardes afwijken wanneer de kraan zijwaarts een last oppikt. Ook een meetfout zou de oorzaak hiervan kunnen zijn.

Aangezien de waarden van de rekentool zeer goed overeenstemmen met een commercieel softwareprogramma en met enige kleine afwijking ten opzichte van de praktijksituatie, kan er geconcludeerd worden dat de ontworpen rekentool betrouwbaar is. Desondanks zijn er bij het opstellen van de rekentool wel enkele aannames gemaakt die belangrijk zijn te vermelden:

- De pontons worden enkel gebruikt in binnenwateren, waar de golfwerking verwaarloosd kan worden.
- Bij delicate hijsoperaties waar er op de grenzen wordt gewerkt, dient de waterweg gesloten te worden voor andere vaartuigen, om deining te voorkomen.
- Een aanvaring door een ander vaartuig tijdens een hijsoperatie zal altijd desastreuze gevolgen hebben, en wordt daarom niet in rekening gebracht in de stabiliteitscontrole.
- De pontons verschuiven niet horizontaal tijdens het uitvoeren van hijswerken door het neerlaten van de spuds. Er wordt verondersteld dat de spuds geen enkele verticale belasting opnemen, en dus geen invloed hebben op het gedrag van het ponton.
- De kranen verschuiven niet op het ponton tijdens het hijsen of baggeren, zodat hun vooropgesteld zwaartepunt gelijk blijft. De door de kranen beperkte hellingshoeken van het ponton verzekeren dit.
- De sterkte van het ponton zelf wordt niet geverifieerd, daar dat het ponton verondersteld wordt ontworpen te zijn voor de krachten die voortvloeien uit het gebruik van de kranen op het ponton.

Daarnaast zijn er ook enkele beperkingen van de rekentool die aangehaald zijn, namelijk:

- De gehanteerde berekeningsmethode is enkel geldig voor hellingshoeken tot ongeveer 5°. Wanneer de hellingshoeken groter worden, zullen de afwijkingen ook vergroten. Aangezien de hellingshoeken door de kranen wordt beperkt tot 3°, vormt dit geen probleem.
- Ondanks dat de rekentool zo eenvoudig mogelijk opgesteld is, is een basiskennis van sterkteleer en scheepsstabiliteit nodig om de resultaten correct te interpreteren. Zeker voor hijsoperaties op de limieten van het kraanponton is dit zeker aan te raden.

- Voor het meest accurate resultaat moeten de zwaartepunten van alle lasten en deklasten op het ponton zo nauwkeurig mogelijk gekend zijn. Ook het vullingspercentage van de ballasttanks dient gekend te zijn en indien nodig nauwkeurig aangepast te worden.

In de praktijk zal deze rekentool vooral nuttig blijken voor het bepalen van een ideale ballastering voor een bepaald hijswerk. Het is daarnaast mogelijk de ideale positie van de kraan met de last te testen. Het is bijvoorbeeld zo dat het diagonaal aangrijpen van de last, het hijsvermogen van de combinatie zal verhogen, daar dat de afstand tot de ballastruimte verhoogt. Echter zal dit verschil miniem zijn, en in de praktijk weinig verschil opleveren. De stabiliteit van het geheel kan het meest effectief verbeterd worden door het aanpassen of verplaatsen van de ballast en de ladingen. Ook het eventueel aanbrengen van extra permanente belasting met een hoger eigengewicht dan water in de ballasttanks, komt de stabiliteit in de meeste gevallen ten goede. Bij het ponton BERL is er al een vaste ballast van 70 ton aanwezig, maar bij het ponton Waterduvel is dit moeilijker toe te passen daar dat er aan beide zijden van het ponton een kraan kan geplaatst worden. Indien de stabiliteit negatief zou zijn, kan het verwijderen van gewicht ook een goede oplossing zijn. Een voorbeeld hiervan is een zwaar gewicht dat aan de achtersteven staat bij de kraan. Deze extra belasting op het ponton veroorzaakt een extra helling, die negatief is. Het verwijderen van dit gewicht verbetert de stabiliteit. Indien grote extra belastingen niet in rekening zouden gebracht worden in de voorbereiding kan dit desastreuze gevolgen hebben. Dit is enkele jaren geleden gebeurd in Nederland waar een grote extra deklust die niet voorzien was, in combinatie met andere factoren, geleid heeft tot een groot ongeval.

7.2 Verbeteringen en extra onderzoek

Eén van de toekomstige uitbreidingen zou het maken van het rekenblad voor het ponton Sebastian zijn. Hiervoor dient eerst een uitgebreide opmeting van alle parameters van het ponton uitgevoerd te worden om zo de hydrostatische parameters van het ponton te bepalen. Vervolgens kunnen alle tabellen ingevoegd worden in een nieuwe rekentool, en mits kleine aanpassingen van de code, kan de rekentool ook voor dit ponton gebruikt worden. Identiek kan de rekentool later ook uitgebreid worden naar nieuwe pontons en kranen van HYE nv.

Als verbetering zou de gebruiksvriendelijkheid van de rekentool kunnen verbeterd worden door het elimineren van de tussenstappen voor het controleren van de berekening. Echter waren wij van mening dat de tussenstap toch nodig is, aangezien de berekeningen ook inzicht geven in eventuele fouten in de inputparameters. Eventueel het nog meer visueel voorstellen van de opstelling met een interactief beeld kan in de toekomst interessant zijn.

Verder onderzoek in de toekomst zou zich kunnen manifesteren op het uitbreiden van de rekentool voor deze nauwkeurig te kunnen toepassen op grotere hellingshoeken dan 5° . Dit behoorde niet tot de doelstelling van deze masterproef, aangezien de hellingshoek van kraanpontons beperkt is tot 3° . Maar indien de rekentool voor andere vaartuigen uitgebreid wordt, dienen de Bonjean-curves toegevoegd te worden. Dit vereist echter zeer veel extra berekeningswerk, waar Excel minder geschikt voor is.

Bibliografie

- [1] Wax! Interactive, „Home - Over ons,” HYE nv, [Online]. Available: <http://www.hye.be/nl/pages/over-ons/show/10/>. [Geopend 2019].
- [2] M. Stuards, „The World’s Biggest Shear-leg Floating Crane in Operation,” 11 06 2015. [Online]. Available: <https://www.vesselfinder.com/news/3590-The-Worlds-Biggest-Shear-leg-Floating-Crane-in-Operation->. [Geopend 25 01 2019].
- [3] Van der Spek, „Een nieuwe mobiele telescoopkraan voor de firma Govar,” 13 08 2015. [Online]. Available: https://www.vanderspek.be/nieuws/7/1795/5/Een_nieuwe_mobiele_telescoopkraan_voor_de_firma_Govar.php. [Geopend 25 01 2019].
- [4] W. Hendrix, „Aanleg van pontonbrug over Schelde is begonnen,” 15 09 2014. [Online]. Available: https://www.gva.be/cnt/dmf20140925_01286549/aanleg-van-pontonbrug-over-schelde-is-begonnen. [Geopend 25 01 2019].
- [5] Travelers Indemnity Company, „Guidelines for mobile cranes on barges,” 2014. [Online]. Available: https://www.travelers.com/iw-documents/business-insurance/A0558_GuidelinesforMobileCranesonBarges.pdf. [Geopend 25 01 2019].
- [6] J. M. J. Journée, „Static stability of floating structures,” Delft University of Technology, Delft, 1997.
- [7] J. Journée en W. Massie, Offshore hydromechanics, Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [8] B. van de Biezen en I. Koenen, „De harde lessen van het kraanongeluk Alphen aan den Rijn,” 17 10 2017. [Online]. Available: https://www.cobouw.nl/infra/nieuws/2017/10/niemand-wil-zoiets-meemaken-maar-als-het-dan-toch-gebeurt-101253621?vakmedianet-approve-cookies=1&_ga=2.197146536.683625900.1551639166-1928196409.1551639166. [Geopend 28 02 2019].
- [9] T. Joustra, E. Muller, M. van Asselt en H. Noy, „Hijsongeval Alphen aan den Rijn,” Onderzoeksraad voor Veiligheid, Den Haag, 2016.
- [10] C. S. More, The principles of Naval Architecture Series, vol. 1e ed. , Jersey City, New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [11] IADC, „BACKHOE DREDGERS,” [Online]. Available: <https://www2.iadc-dredging.com/subject/equipment/backhoe-dredgers>. [Geopend 25 04 2019].

- [12] Jan De Nul Groep, „Backhoe dredger,” [Online]. Available: <https://www.jandenul.com/en/equipment/fleet/backhoe-dredger>. [Geopend 25 04 2019].
- [13] Jan De Nul GROUP, „RAMBIZ - Hijsschip,” 2013. [Online]. Available: https://www.jandenul.com/sites/default/files/equipment-item/pdfs/07.HeavyLiftVessels_NL_-_V2013-2_-_Rambiz.pdf.
- [14] SeaBoats, „Floating Sheerleg Crane,” 28 10 2016. [Online]. Available: <http://www.seaboats.net/ProductPDFs/1308582-52637ec9f5b5.pdf>.
- [15] GeoSea - DEME, „Apollo - Offshore heavy Lift DP2 Jack-Up Vessel,” [Online]. Available: https://www.deme-group.com/sites/default/files/apollo_0.pdf. [Geopend 12 04 2019].
- [16] Science Channel, „This Floating Crane Can Lift Up To 3,600 Tons!,” 18 11 2016. [Online]. Available: This Floating Crane Can Lift Up To 3,600 Tons!. [Geopend 10 05 2019].
- [17] M. White, „Site-Specific Assessment of Jack-Ups,” DNV GL, 2016.
- [18] Pro Lift's Blog, „Different Types of Mobile Cranes Explained,” [Online]. Available: <https://proliftcrane.com/different-types-mobile-cranes-explained/>. [Geopend 06 05 2019].
- [19] A. v. Beem, Artist, Hitachi Sumitomo SCX2800-2 owned by HYE. [Art]. WikiPedia, 2009.
- [20] W. Rodriquez H. en G. D. Harington, Artists, Diagram of a modern mobile crane with outriggers. [Art]. BY-SA 3.0, 2007.
- [21] R. Kohner, „Is that crane tipping?,” 2012. [Online]. Available: <https://wheco.com/2012/08/is-that-crane-tipping/>. [Geopend 06 05 2019].
- [22] Crane Tech, „All Blog Posts - Mobile Crane Stability: Part 1 - 6,” 2017 - 2018. [Online]. Available: <https://www.cranetech.com/blog/all-posts/>. [Geopend 05 2019].
- [23] HITACHI SUMITOMO, „SCX2800-2 Hydraulic crawler crane - Specifications - European Issue,” Hitachi Sumitomo Heavy Industries Construction Crane Co., Ltd., Yaito-ku, Tokyo, Japan.
- [24] Hitachi Sumitomo, „SCX2800-2 Rated Load on Barge (EN Rating),” Hitachi Sumitomo Heavy Industries Construction Crane Co., Ltd, Japan, 2014.
- [25] V. Koster, K. J. Vermeulen en P. Kortehaas, „Offshore use of floating sheerlegs,” Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE, Rotterdam, The Netherlands, 2011.

- [26] C. S. Moore, The Principles of Naval Architecture Series, New Jersey, United States: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [27] K. van Dokkum, H. ten Katen, K. Koomen en J. Pinkster, Ship Stability, Enkhuizen, The Netherlands: DOKMAR, Maritime Publishers, 2008.
- [28] R. Gort, Design of an autonomous loading & unloading inland barge, Delft / antwerp: TU Delft, 2009.
- [29] M/S Spar Scorpio, „Stability Information manual - Diamond 53 - handymax Bulk Carrier,” Carl Bro - Intelligent Solutions, Chengxi Shipyard, 2006.
- [30] TU Delft, „Stabiliteit,” in Hydromechanica, pp. 5.1 - 5.19.
- [31] North Sea Port, „All Weather Terminal’ van ArcelorMittal primeur in North Sea Port,” 25 07 2018. [Online]. Available: <https://www.northseaport.com/all-weather-terminal-van-arcelormittal-primeur-in-north-sea-port#>. [Geopend 24 05 2019].
- [32] R. Jassal, „What is block coefficient of a ship ?,” MySeaTime, [Online]. Available: <https://www.myseatime.com/discussion/what-is-block-coefficient-of-a-ship>. [Geopend 13 05 2019].
- [33] Transport Canada - Safety and Security, „Bulletin No.: 05/2007,” 02 08 2007. [Online]. Available: <https://www.tc.gc.ca/eng/marinesafety/bulletins-2007-05-eng.htm>. [Geopend 15 05 2019].
- [34] A. B. Biran, R. Lopez-Pulido en J. de juana Gamo, Ship Hydrostatics and Stability, Oxford, United Kingdom: Elsevier Ltd., 2014.
- [35] Anish, „How and Why to Take Manual Sounding On Ship?,” 19 02 2019. [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/guidelines/how-and-why-to-take-manual-sounding-on-a-ship/>. [Geopend 31 05 2019].
- [36] NEN, „EN13000:2010: Kranen - Mobiele kranen,” 2010.

Bijlagen

Bijlage A – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,000m)	172
Bijlage B – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,100m).....	173
Bijlage C – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,200m).....	174
Bijlage D – Cross curve data (PS) Waterduvel (trim 0,100m)	175
Bijlage E – Cross curve data (PS) Waterduvel (trim 0,200m).....	176
Bijlage F – Wind silhouette Waterduvel: Construction.....	177

Bijlage A – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,000m)

<i>Trim: 0,000 (m)</i>													
Trim	Draft	Volume	Displ FW	Displ.	LCB	VCB	TCB	Aw	LCF	KMt	KMI	MCT	TpCm
(m)	(m)	(m ³)	(tonnes)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(t*m/cm)	(t/cm)
0,000	0,100	50,969	50,969	50,969	21,042	0,050	0,012	474,050	21,042	115,804	1368,700	16,609	4,741
0,000	0,150	74,742	74,742	74,742	21,042	0,075	0,012	476,420	21,042	77,439	923,910	16,440	4,764
0,000	0,200	98,634	98,634	98,634	21,042	0,100	0,012	478,780	21,041	58,267	701,570	16,473	4,788
0,000	0,250	122,644	122,644	122,644	21,042	0,126	0,012	481,140	21,041	46,774	568,230	16,589	4,811
0,000	0,300	146,772	146,772	146,772	21,042	0,151	0,012	483,510	21,041	39,121	479,380	16,747	4,835
0,000	0,350	171,018	171,018	171,018	21,042	0,176	0,012	485,870	21,041	33,660	415,960	16,930	4,859
0,000	0,400	195,382	195,382	195,382	21,041	0,201	0,012	488,230	21,041	29,571	368,430	17,130	4,882
0,000	0,450	219,865	219,865	219,865	21,041	0,227	0,012	490,600	21,040	26,396	331,490	17,341	4,906
0,000	0,500	244,465	244,465	244,465	21,041	0,252	0,012	492,960	21,040	23,860	301,970	17,562	4,930
0,000	0,550	269,114	269,114	269,114	21,041	0,277	0,012	492,960	21,040	21,692	273,960	17,536	4,930
0,000	0,600	293,762	293,762	293,762	21,041	0,303	0,012	492,960	21,040	19,896	250,710	17,514	4,930
0,000	0,650	318,410	318,410	318,410	21,041	0,328	0,012	492,960	21,040	18,386	231,110	17,496	4,930
0,000	0,700	343,058	343,058	343,058	21,041	0,353	0,012	492,960	21,040	17,098	214,360	17,480	4,930
0,000	0,750	367,706	367,706	367,706	21,041	0,378	0,012	492,960	21,040	15,989	199,890	17,467	4,930
0,000	0,800	392,354	392,354	392,354	21,041	0,404	0,012	492,960	21,040	15,024	187,250	17,455	4,930
0,000	0,850	417,002	417,002	417,002	21,041	0,429	0,012	492,960	21,040	14,177	176,130	17,445	4,930
0,000	0,900	441,650	441,650	441,650	21,041	0,454	0,012	492,960	21,040	13,428	166,270	17,436	4,930
0,000	0,950	466,298	466,298	466,298	21,041	0,479	0,012	492,960	21,040	12,761	157,450	17,428	4,930
0,000	1,000	490,946	490,946	490,946	21,041	0,504	0,012	492,960	21,040	12,165	149,530	17,420	4,930
0,000	1,050	515,594	515,594	515,594	21,041	0,529	0,012	492,960	21,040	11,628	142,380	17,414	4,930
0,000	1,100	540,242	540,242	540,242	21,041	0,554	0,012	492,960	21,040	11,143	135,890	17,408	4,930
0,000	1,150	564,891	564,891	564,891	21,041	0,579	0,011	492,960	21,040	10,703	129,960	17,402	4,930
0,000	1,200	589,539	589,539	589,539	21,041	0,604	0,011	492,960	21,040	10,302	124,540	17,397	4,930
0,000	1,250	614,187	614,187	614,187	21,041	0,629	0,011	492,960	21,040	9,936	119,560	17,392	4,930
0,000	1,300	638,835	638,835	638,835	21,041	0,654	0,011	493,270	21,040	9,591	114,970	17,387	4,933
0,000	1,350	661,967	661,967	661,967	21,088	0,678	0,012	456,580	22,421	9,205	92,920	14,538	4,566
0,000	1,400	684,786	684,786	684,786	21,133	0,701	0,012	456,080	22,437	8,942	89,690	14,509	4,561
0,000	1,450	707,580	707,580	707,580	21,176	0,725	0,012	455,580	22,454	8,697	86,680	14,480	4,556
0,000	1,500	730,350	730,350	730,350	21,216	0,748	0,012	455,090	22,470	8,469	83,860	14,453	4,551
0,000	1,550	753,094	753,094	753,094	21,254	0,772	0,012	454,580	22,486	8,257	81,220	14,425	4,546
0,000	1,600	775,814	775,814	775,814	21,291	0,795	0,012	454,090	22,501	8,059	78,740	14,398	4,541
0,000	1,650	798,508	798,508	798,508	21,326	0,819	0,012	453,590	22,517	7,874	76,410	14,371	4,536
0,000	1,700	821,178	821,178	821,178	21,359	0,843	0,012	453,090	22,533	7,701	74,210	14,344	4,531
0,000	1,750	843,823	843,823	843,823	21,391	0,867	0,012	452,590	22,549	7,539	72,140	14,319	4,526
0,000	1,800	866,443	866,443	866,443	21,421	0,890	0,012	452,090	22,564	7,386	70,170	14,293	4,521
0,000	1,850	889,038	889,038	889,038	21,451	0,914	0,012	451,590	22,580	7,243	68,320	14,268	4,516
0,000	1,900	911,608	911,608	911,608	21,479	0,938	0,012	451,100	22,595	7,109	66,560	14,244	4,511
0,000	1,950	934,153	934,153	934,153	21,506	0,962	0,012	450,600	22,611	6,982	64,890	14,220	4,506
0,000	2,000	956,673	956,673	956,673	21,533	0,986	0,012	450,100	22,626	6,863	63,310	14,196	4,501
0,000	2,050	979,169	979,169	979,169	21,558	1,010	0,012	449,600	22,641	6,750	61,800	14,172	4,496
0,000	2,100	1001,639	1001,639	1001,639	21,582	1,034	0,012	449,100	22,656	6,644	60,360	14,149	4,491
0,000	2,150	1024,085	1024,085	1024,085	21,606	1,058	0,012	448,600	22,671	6,544	58,990	14,126	4,486
0,000	2,200	1046,505	1046,505	1046,505	21,629	1,082	0,012	448,100	22,686	6,449	57,680	14,103	4,481
0,000	2,250	1068,901	1068,901	1068,901	21,652	1,106	0,012	447,600	22,701	6,359	56,430	14,081	4,476
0,000	2,300	1091,271	1091,271	1091,271	21,673	1,130	0,012	447,110	22,716	6,274	55,240	14,059	4,471
0,000	2,350	1113,617	1113,617	1113,617	21,695	1,154	0,012	446,610	22,730	6,194	54,100	14,038	4,466

Bijlage B – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,100m)

Trim: 0,100 (m)													
Trim	Draft	Volume	Displ FW	Displ.	LCB	VCB	TCB	Aw	LCF	KMt	KMI	MCT	TpCm
(m)	(m)	(m ³)	(tonnes)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(t*m/cm)	(t/cm)
0,100	0,100	51,071	51,071	51,071	24,294	0,054	0,014	474,070	21,139	115,563	1365,800	16,607	4,741
0,100	0,150	74,845	74,845	74,845	23,239	0,078	0,013	476,430	21,139	77,332	922,590	16,439	4,764
0,100	0,200	98,737	98,737	98,737	22,710	0,102	0,013	478,790	21,139	58,208	700,820	16,473	4,788
0,100	0,250	122,747	122,747	122,747	22,393	0,127	0,013	481,160	21,140	46,737	567,750	16,589	4,812
0,100	0,300	146,876	146,876	146,876	22,182	0,152	0,012	483,520	21,140	39,095	479,050	16,747	4,835
0,100	0,350	171,123	171,123	171,123	22,031	0,177	0,012	485,880	21,140	33,642	415,710	16,930	4,859
0,100	0,400	195,488	195,488	195,488	21,918	0,202	0,012	488,250	21,140	29,557	368,240	17,130	4,882
0,100	0,450	219,971	219,971	219,971	21,830	0,228	0,012	490,610	21,141	26,385	331,340	17,342	4,906
0,100	0,500	244,536	244,536	244,536	21,757	0,253	0,012	491,790	21,090	23,797	299,720	17,436	4,918
0,100	0,550	269,161	269,161	269,161	21,693	0,278	0,012	492,960	21,040	21,689	273,910	17,536	4,930
0,100	0,600	293,809	293,809	293,809	21,637	0,303	0,012	492,960	21,040	19,894	250,670	17,514	4,930
0,100	0,650	318,457	318,457	318,457	21,590	0,329	0,012	492,960	21,040	18,384	231,080	17,496	4,930
0,100	0,700	343,105	343,105	343,105	21,550	0,354	0,012	492,960	21,040	17,097	214,340	17,481	4,930
0,100	0,750	367,753	367,753	367,753	21,516	0,379	0,012	492,960	21,040	15,988	199,860	17,467	4,930
0,100	0,800	392,401	392,401	392,401	21,486	0,404	0,012	492,960	21,040	15,023	187,240	17,456	4,930
0,100	0,850	417,049	417,049	417,049	21,459	0,429	0,012	492,960	21,040	14,176	176,110	17,445	4,930
0,100	0,900	441,697	441,697	441,697	21,436	0,454	0,012	492,960	21,040	13,427	166,250	17,436	4,930
0,100	0,950	466,345	466,345	466,345	21,415	0,479	0,012	492,960	21,040	12,761	157,440	17,428	4,930
0,100	1,000	490,994	490,994	490,994	21,396	0,505	0,012	492,960	21,040	12,164	149,520	17,420	4,930
0,100	1,050	515,642	515,642	515,642	21,378	0,530	0,012	492,960	21,040	11,628	142,370	17,414	4,930
0,100	1,100	540,290	540,290	540,290	21,363	0,555	0,012	492,960	21,040	11,143	135,880	17,408	4,930
0,100	1,150	564,938	564,938	564,938	21,349	0,580	0,012	492,960	21,040	10,703	129,950	17,402	4,930
0,100	1,200	589,586	589,586	589,586	21,336	0,605	0,012	492,960	21,040	10,302	124,530	17,397	4,930
0,100	1,250	614,234	614,234	614,234	21,324	0,630	0,012	492,960	21,040	9,935	119,550	17,392	4,930
0,100	1,300	638,882	638,882	638,882	21,313	0,655	0,012	492,960	21,040	9,599	114,960	17,388	4,930
0,100	1,350	663,498	663,498	663,498	21,311	0,680	0,012	456,980	22,411	9,188	92,810	14,555	4,570
0,100	1,400	686,333	686,333	686,333	21,348	0,703	0,012	456,400	22,427	8,926	89,590	14,525	4,564
0,100	1,450	709,143	709,143	709,143	21,383	0,726	0,012	455,900	22,443	8,682	86,580	14,497	4,559
0,100	1,500	731,928	731,928	731,928	21,416	0,750	0,012	455,400	22,459	8,455	83,770	14,468	4,554
0,100	1,550	754,688	754,688	754,688	21,448	0,774	0,012	454,900	22,476	8,244	81,140	14,440	4,549
0,100	1,600	777,423	777,423	777,423	21,479	0,797	0,012	454,390	22,492	8,046	78,660	14,413	4,544
0,100	1,650	800,133	800,133	800,133	21,508	0,821	0,012	453,890	22,508	7,862	76,330	14,386	4,539
0,100	1,700	822,818	822,818	822,818	21,536	0,845	0,012	453,390	22,523	7,690	74,140	14,359	4,534
0,100	1,750	845,478	845,478	845,478	21,563	0,868	0,012	452,890	22,539	7,528	72,070	14,333	4,529
0,100	1,800	868,113	868,113	868,113	21,588	0,892	0,012	452,390	22,555	7,376	70,110	14,307	4,524
0,100	1,850	890,722	890,722	890,722	21,613	0,916	0,012	451,890	22,570	7,234	68,260	14,282	4,519
0,100	1,900	913,307	913,307	913,307	21,637	0,940	0,012	451,390	22,586	7,100	66,500	14,257	4,514
0,100	1,950	935,867	935,867	935,867	21,660	0,964	0,012	450,890	22,602	6,974	64,840	14,232	4,509
0,100	2,000	958,402	958,402	958,402	21,683	0,988	0,012	450,390	22,617	6,855	63,250	14,208	4,504
0,100	2,050	980,911	980,911	980,911	21,704	1,012	0,012	449,880	22,632	6,743	61,750	14,184	4,499
0,100	2,100	1003,396	1003,396	1003,396	21,725	1,036	0,012	449,380	22,648	6,637	60,310	14,161	4,494
0,100	2,150	1025,855	1025,855	1025,855	21,746	1,060	0,012	448,880	22,663	6,537	58,940	14,138	4,489
0,100	2,200	1048,290	1048,290	1048,290	21,766	1,084	0,012	448,380	22,678	6,442	57,640	14,115	4,484
0,100	2,250	1070,699	1070,699	1070,699	21,785	1,108	0,012	447,880	22,693	6,353	56,390	14,093	4,479
0,100	2,300	1093,084	1093,084	1093,084	21,804	1,132	0,012	447,380	22,708	6,268	55,200	14,071	4,474
0,100	2,350	1115,443	1115,443	1115,443	21,822	1,156	0,012	446,880	22,722	6,188	54,060	14,049	4,469

Bijlage C – Hydrostatics Table Waterduvel (trim 0,200m)

<i>Trim: 0,200 (m)</i>													
Trim	Draft	Volume	Displ FW	Displ.	LCB	VCB	TCB	Aw	LCF	KMT	KMI	MCT	TpCm
(m)	(m)	(m ³)	(tonnes)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(t*m/cm)	(t/cm)
0,200	0,100	51,282	51,282	51,282	27,518	0,066	0,016	474,100	21,236	115,068	1359,940	16,604	4,741
0,200	0,150	75,058	75,058	75,058	25,422	0,086	0,014	476,460	21,236	77,114	919,990	16,440	4,765
0,200	0,200	98,952	98,952	98,952	24,372	0,109	0,014	478,830	21,237	58,088	699,370	16,475	4,788
0,200	0,250	122,964	122,964	122,964	23,740	0,132	0,013	481,190	21,238	46,661	566,820	16,591	4,812
0,200	0,300	147,094	147,094	147,094	23,319	0,157	0,013	483,560	21,239	39,043	478,400	16,749	4,836
0,200	0,350	171,342	171,342	171,342	23,018	0,181	0,013	485,920	21,239	33,604	415,240	16,933	4,859
0,200	0,400	195,709	195,709	195,709	22,792	0,206	0,013	488,280	21,240	29,529	367,880	17,133	4,883
0,200	0,450	220,158	220,158	220,158	22,614	0,231	0,013	489,450	21,190	26,302	328,710	17,218	4,895
0,200	0,500	244,665	244,665	244,665	22,467	0,256	0,012	490,620	21,140	23,731	297,440	17,312	4,906
0,200	0,550	269,232	269,232	269,232	22,342	0,281	0,012	491,790	21,090	21,634	271,890	17,411	4,918
0,200	0,600	293,856	293,856	293,856	22,233	0,306	0,012	492,960	21,040	19,893	250,640	17,515	4,930
0,200	0,650	318,504	318,504	318,504	22,140	0,331	0,012	492,960	21,040	18,383	231,050	17,496	4,930
0,200	0,700	343,152	343,152	343,152	22,060	0,356	0,012	492,960	21,040	17,097	214,310	17,481	4,930
0,200	0,750	367,800	367,800	367,800	21,991	0,381	0,012	492,960	21,040	15,988	199,850	17,468	4,930
0,200	0,800	392,448	392,448	392,448	21,930	0,406	0,012	492,960	21,040	15,023	187,220	17,456	4,930
0,200	0,850	417,096	417,096	417,096	21,877	0,431	0,012	492,970	21,040	14,176	176,100	17,446	4,930
0,200	0,900	441,745	441,745	441,745	21,830	0,456	0,012	492,960	21,040	13,427	166,240	17,436	4,930
0,200	0,950	466,393	466,393	466,393	21,788	0,481	0,012	492,960	21,040	12,761	157,430	17,428	4,930
0,200	1,000	491,041	491,041	491,041	21,750	0,506	0,012	492,960	21,040	12,165	149,510	17,421	4,930
0,200	1,050	515,689	515,689	515,689	21,716	0,531	0,012	492,960	21,040	11,628	142,360	17,414	4,930
0,200	1,100	540,337	540,337	540,337	21,685	0,556	0,012	492,960	21,040	11,143	135,870	17,408	4,930
0,200	1,150	564,985	564,985	564,985	21,657	0,581	0,012	492,960	21,040	10,703	129,950	17,402	4,930
0,200	1,200	589,633	589,633	589,633	21,631	0,606	0,012	492,960	21,040	10,302	124,530	17,398	4,930
0,200	1,250	614,281	614,281	614,281	21,607	0,631	0,012	492,960	21,040	9,936	119,550	17,393	4,930
0,200	1,300	638,929	638,929	638,929	21,585	0,656	0,012	492,960	21,040	9,599	114,960	17,388	4,930
0,200	1,350	663,577	663,577	663,577	21,565	0,681	0,012	492,970	21,040	9,290	110,710	17,385	4,930
0,200	1,400	687,869	687,869	687,869	21,561	0,705	0,012	492,960	22,417	8,910	89,500	14,542	4,568
0,200	1,450	710,696	710,696	710,696	21,589	0,729	0,012	492,960	22,433	8,667	86,500	14,513	4,562
0,200	1,500	733,496	733,496	733,496	21,616	0,752	0,012	492,960	22,449	8,441	83,690	14,484	4,557
0,200	1,550	756,272	756,272	756,272	21,641	0,776	0,012	492,960	22,465	8,231	81,060	14,456	4,552
0,200	1,600	779,023	779,023	779,023	21,666	0,800	0,012	492,960	22,482	8,035	78,590	14,428	4,547
0,200	1,650	801,748	801,748	801,748	21,689	0,823	0,012	492,960	22,498	7,851	76,260	14,401	4,542
0,200	1,700	824,448	824,448	824,448	21,712	0,847	0,012	492,960	22,514	7,679	74,070	14,374	4,537
0,200	1,750	847,124	847,124	847,124	21,734	0,871	0,012	492,960	22,530	7,518	72,010	14,348	4,532
0,200	1,800	869,773	869,773	869,773	21,755	0,895	0,012	492,960	22,546	7,367	70,050	14,322	4,527
0,200	1,850	892,398	892,398	892,398	21,775	0,919	0,012	492,960	22,561	7,225	68,200	14,296	4,522
0,200	1,900	914,998	914,998	914,998	21,795	0,942	0,012	492,960	22,577	7,091	66,450	14,271	4,517
0,200	1,950	937,572	937,572	937,572	21,814	0,966	0,012	492,960	22,593	6,966	64,780	14,246	4,512
0,200	2,000	960,121	960,121	960,121	21,832	0,990	0,012	492,960	22,608	6,847	63,200	14,221	4,507
0,200	2,050	982,645	982,645	982,645	21,850	1,014	0,012	492,960	22,624	6,735	61,700	14,198	4,502
0,200	2,100	1005,144	1005,144	1005,144	21,868	1,038	0,012	492,960	22,639	6,630	60,260	14,174	4,497
0,200	2,150	1027,618	1027,618	1027,618	21,885	1,062	0,012	492,960	22,654	6,530	58,900	14,150	4,492
0,200	2,200	1050,067	1050,067	1050,067	21,902	1,086	0,012	492,960	22,669	6,436	57,590	14,127	4,487
0,200	2,250	1072,490	1072,490	1072,490	21,918	1,110	0,012	492,960	22,684	6,347	56,350	14,105	4,482
0,200	2,300	1094,888	1094,888	1094,888	21,934	1,135	0,012	492,960	22,699	6,263	55,150	14,082	4,477
0,200	2,350	1117,262	1117,262	1117,262	21,949	1,159	0,012	492,960	22,714	6,183	54,010	14,060	4,472

Bijlage D – Cross curve data (PS) Waterduvel (trim 0,100m)

<i>Trim = 0,100</i>											
Trim (m)	Displ.	0,0°	2,0°	5,0°	10,0°	15,0°	20,0°	30,0°	40,0°	50,0°	60,0°
0,100	0,100	0,000	5,178	5,438	5,520	5,499	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,100	25,100	0,016	3,718	4,508	4,881	4,992	4,994	4,803	4,424	3,901	3,269
0,100	50,100	0,014	3,083	4,110	4,610	4,787	4,835	4,715	4,397	3,931	3,359
0,100	75,100	0,013	2,496	3,743	4,361	4,596	4,686	4,632	4,371	3,960	3,439
0,100	100,100	0,013	1,998	3,426	4,144	4,430	4,556	4,559	4,347	3,984	3,482
0,100	125,100	0,013	1,614	3,143	3,951	4,283	4,441	4,493	4,325	3,993	3,487
0,100	150,100	0,012	1,348	2,886	3,776	4,149	4,336	4,434	4,305	3,979	3,468
0,100	175,100	0,012	1,160	2,650	3,615	4,026	4,240	4,379	4,277	3,945	3,437
0,100	200,100	0,012	1,020	2,429	3,464	3,911	4,150	4,328	4,235	3,900	3,398
0,100	225,100	0,012	0,911	2,223	3,323	3,803	4,065	4,279	4,182	3,848	3,354
0,100	250,100	0,012	0,824	2,030	3,189	3,700	3,985	4,226	4,121	3,792	3,308
0,100	275,100	0,012	0,752	1,856	3,062	3,603	3,909	4,165	4,054	3,731	3,260
0,100	300,100	0,012	0,692	1,708	2,940	3,510	3,837	4,096	3,984	3,669	3,210
0,100	325,100	0,012	0,641	1,583	2,823	3,421	3,767	4,022	3,910	3,604	3,158
0,100	350,100	0,012	0,597	1,475	2,711	3,335	3,700	3,944	3,835	3,538	3,106
0,100	375,100	0,012	0,560	1,382	2,602	3,252	3,632	3,863	3,757	3,470	3,052
0,100	400,100	0,012	0,527	1,301	2,498	3,172	3,560	3,780	3,677	3,402	2,998
0,100	425,100	0,012	0,498	1,229	2,397	3,095	3,484	3,694	3,596	3,332	2,942
0,100	450,100	0,012	0,472	1,165	2,299	3,019	3,403	3,606	3,514	3,260	2,883
0,100	475,100	0,012	0,450	1,109	2,204	2,945	3,318	3,515	3,429	3,184	2,820
0,100	500,100	0,012	0,429	1,058	2,111	2,872	3,231	3,422	3,341	3,105	2,757
0,100	525,100	0,012	0,411	1,012	2,021	2,795	3,140	3,327	3,249	3,025	2,693
0,100	550,100	0,012	0,394	0,971	1,937	2,714	3,047	3,228	3,155	2,944	2,629
0,100	575,100	0,012	0,379	0,933	1,861	2,629	2,951	3,126	3,060	2,863	2,565
0,100	600,100	0,012	0,366	0,897	1,791	2,542	2,852	3,021	2,964	2,781	2,500
0,100	625,100	0,012	0,353	0,865	1,726	2,451	2,750	2,915	2,867	2,699	2,435
0,100	650,100	0,012	0,340	0,834	1,667	2,357	2,646	2,808	2,771	2,617	2,370
0,100	675,100	0,012	0,328	0,806	1,613	2,262	2,539	2,701	2,674	2,535	2,306
0,100	700,100	0,012	0,318	0,781	1,562	2,164	2,430	2,594	2,578	2,453	2,242
0,100	725,100	0,012	0,309	0,757	1,515	2,063	2,319	2,487	2,482	2,371	2,177
0,100	750,100	0,012	0,301	0,736	1,466	1,961	2,207	2,379	2,385	2,289	2,113
0,100	775,100	0,012	0,293	0,717	1,416	1,860	2,095	2,271	2,288	2,207	2,049
0,100	800,100	0,012	0,286	0,699	1,363	1,760	1,982	2,163	2,190	2,125	1,985
0,100	825,100	0,012	0,280	0,683	1,309	1,662	1,868	2,054	2,093	2,044	1,922
0,100	850,100	0,012	0,274	0,667	1,252	1,564	1,754	1,946	1,997	1,963	1,860
0,100	875,100	0,012	0,268	0,653	1,193	1,468	1,642	1,838	1,900	1,882	1,798
0,100	900,100	0,012	0,262	0,639	1,131	1,374	1,534	1,730	1,805	1,803	1,737
0,100	925,100	0,012	0,257	0,627	1,066	1,280	1,428	1,622	1,710	1,724	1,675
0,100	950,100	0,012	0,253	0,614	0,997	1,188	1,325	1,515	1,616	1,645	1,614
0,100	975,100	0,012	0,248	0,599	0,925	1,097	1,224	1,409	1,522	1,566	1,553
0,100	1000,100	0,012	0,244	0,575	0,851	1,007	1,126	1,306	1,429	1,488	1,492
0,100	1025,100	0,012	0,240	0,544	0,775	0,917	1,030	1,207	1,335	1,409	1,431
0,100	1050,100	0,012	0,237	0,503	0,697	0,828	0,935	1,110	1,242	1,330	1,370
0,100	1075,100	0,012	0,233	0,453	0,617	0,738	0,842	1,016	1,152	1,251	1,309
0,100	1100,100	0,012	0,226	0,392	0,534	0,648	0,749	0,924	1,066	1,174	1,247
0,100	1125,100	0,012	0,204	0,323	0,448	0,556	0,656	0,834	0,983	1,101	1,186
0,100	1150,100	0,012	0,160	0,244	0,358	0,463	0,562	0,744	0,902	1,032	1,131

Bijlage E – Cross curve data (PS) Waterduvel (trim 0,200m)

Trim= 0,200											
Trim (m)	Displ.	0,0°	2,0°	5,0°	10,0°	15,0°	20,0°	30,0°	40,0°	50,0°	60,0°
0,200	0,100	0,000	5,153	5,426	5,515	5,506	<->	<->	<->	<->	<->
0,200	25,100	0,018	3,345	4,281	4,729	4,877	4,904	4,753	4,410	3,921	3,324
0,200	50,100	0,016	2,842	3,965	4,513	4,712	4,776	4,681	4,385	3,942	3,388
0,200	75,100	0,014	2,379	3,669	4,310	4,558	4,656	4,615	4,365	3,965	3,438
0,200	100,100	0,014	1,953	3,378	4,112	4,406	4,537	4,548	4,344	3,981	3,469
0,200	125,100	0,013	1,609	3,108	3,928	4,265	4,427	4,486	4,323	3,982	3,475
0,200	150,100	0,013	1,349	2,859	3,758	4,136	4,326	4,428	4,298	3,967	3,459
0,200	175,100	0,013	1,160	2,628	3,600	4,015	4,231	4,375	4,267	3,936	3,429
0,200	200,100	0,013	1,020	2,412	3,452	3,902	4,143	4,324	4,225	3,892	3,391
0,200	225,100	0,013	0,910	2,209	3,313	3,795	4,059	4,273	4,173	3,841	3,348
0,200	250,100	0,012	0,823	2,022	3,180	3,694	3,980	4,217	4,113	3,785	3,302
0,200	275,100	0,012	0,751	1,854	3,054	3,597	3,905	4,156	4,047	3,725	3,254
0,200	300,100	0,012	0,692	1,708	2,933	3,505	3,833	4,089	3,977	3,663	3,205
0,200	325,100	0,012	0,641	1,582	2,817	3,417	3,764	4,015	3,904	3,598	3,153
0,200	350,100	0,012	0,598	1,475	2,706	3,331	3,695	3,938	3,828	3,532	3,101
0,200	375,100	0,012	0,560	1,382	2,598	3,249	3,626	3,857	3,751	3,465	3,048
0,200	400,100	0,012	0,527	1,301	2,493	3,169	3,554	3,774	3,672	3,397	2,994
0,200	425,100	0,012	0,498	1,229	2,393	3,092	3,478	3,688	3,591	3,327	2,939
0,200	450,100	0,012	0,473	1,166	2,295	3,017	3,398	3,600	3,509	3,257	2,883
0,200	475,100	0,012	0,450	1,109	2,200	2,943	3,314	3,511	3,426	3,184	2,823
0,200	500,100	0,012	0,430	1,058	2,109	2,868	3,227	3,419	3,340	3,108	2,761
0,200	525,100	0,012	0,411	1,012	2,021	2,791	3,137	3,325	3,251	3,029	2,697
0,200	550,100	0,012	0,395	0,971	1,938	2,711	3,045	3,229	3,159	2,949	2,634
0,200	575,100	0,012	0,380	0,933	1,862	2,627	2,950	3,129	3,064	2,868	2,570
0,200	600,100	0,012	0,366	0,899	1,792	2,540	2,852	3,026	2,969	2,787	2,506
0,200	625,100	0,012	0,353	0,866	1,728	2,450	2,752	2,921	2,874	2,705	2,441
0,200	650,100	0,012	0,342	0,836	1,669	2,358	2,649	2,814	2,777	2,623	2,376
0,200	675,100	0,012	0,330	0,808	1,614	2,262	2,543	2,707	2,680	2,541	2,311
0,200	700,100	0,012	0,319	0,782	1,563	2,165	2,435	2,600	2,584	2,459	2,247
0,200	725,100	0,012	0,309	0,758	1,515	2,065	2,325	2,493	2,487	2,377	2,183
0,200	750,100	0,012	0,301	0,737	1,466	1,964	2,213	2,385	2,390	2,295	2,118
0,200	775,100	0,012	0,294	0,717	1,415	1,864	2,101	2,277	2,293	2,213	2,054
0,200	800,100	0,012	0,286	0,700	1,363	1,765	1,988	2,168	2,196	2,130	1,989
0,200	825,100	0,012	0,280	0,683	1,309	1,667	1,874	2,060	2,098	2,048	1,925
0,200	850,100	0,012	0,274	0,668	1,252	1,570	1,760	1,951	2,001	1,966	1,862
0,200	875,100	0,012	0,268	0,653	1,194	1,474	1,647	1,842	1,904	1,885	1,800
0,200	900,100	0,012	0,263	0,640	1,132	1,379	1,538	1,734	1,808	1,805	1,738
0,200	925,100	0,012	0,258	0,627	1,068	1,285	1,432	1,626	1,712	1,725	1,676
0,200	950,100	0,012	0,253	0,613	1,001	1,193	1,328	1,518	1,617	1,646	1,615
0,200	975,100	0,012	0,248	0,596	0,930	1,101	1,227	1,411	1,523	1,567	1,554
0,200	1000,100	0,012	0,244	0,573	0,855	1,010	1,129	1,307	1,429	1,488	1,492
0,200	1025,100	0,012	0,240	0,542	0,779	0,920	1,032	1,207	1,335	1,409	1,431
0,200	1050,100	0,012	0,237	0,502	0,700	0,830	0,936	1,110	1,242	1,330	1,370
0,200	1075,100	0,012	0,232	0,453	0,619	0,739	0,842	1,016	1,152	1,251	1,309
0,200	1100,100	0,012	0,221	0,394	0,535	0,648	0,749	0,924	1,066	1,174	1,247
0,200	1125,100	0,012	0,197	0,323	0,448	0,556	0,655	0,833	0,983	1,101	1,187
0,200	1150,100	0,012	0,154	0,243	0,356	0,461	0,561	0,744	0,902	1,033	1,132

Bijlage F – Wind silhouette Waterduvel: Construction

Wind silhouette: Construction								
Wind pressure	25,000	kg/m ²	Waterduvel					
Bilge type	Round Bilges							
Bilge keel area	0,000							
Draught	Lateral Area	LCE	VCE	Wind Area	LCE	VCE	Windlever	Windmoment
m	m ²	m	m	m ²	m	m	m	t*m
0,200	8,066	21,034	0,101	208,500	27,240	8,236	0,430	42,408
0,400	16,312	21,024	0,202	200,250	27,496	8,563	0,214	41,861
0,600	24,697	21,020	0,303	191,870	27,780	8,916	0,141	41,312
0,800	33,102	21,018	0,404	183,460	19,090	9,292	0,104	40,766
1,000	41,506	21,016	0,504	175,060	28,430	9,695	0,082	40,222
1,200	49,911	21,015	0,605	166,650	28,804	10,128	0,067	39,679
1,400	58,315	21,015	0,705	158,250	29,218	10,597	0,057	39,136
1,600	66,720	21,014	0,805	149,850	29,678	11,107	0,050	38,594
1,800	75,124	21,014	0,905	141,440	30,193	11,666	0,044	38,052
2,000	83,528	21,013	1,005	133,040	30,773	12,283	0,039	37,510
2,200	91,933	21,013	1,105	124,630	31,432	12,970	0,035	36,968
2,350	98,232	21,013	1,180	118,330	31,986	13,539	0,033	36,562