

Voorwoord	4
Inleiding	5
<u>DEEL I Theoretisch kader</u>	
1. Inleiding deel 1	7
2. Bouwen op water	8
2.1 Aandacht voor drijvende gebouwen	8
2.2 Waterproblematiek van Nederland	8
2.3 Waarom drijven?	9
2.4 Typologie drijflichamen	10
2.5 Conclusie en discussie	13
3. Hydrostatica	15
3.1 Verticale gelijkmatige belasting	15
3.1.1 <i>Diepgang</i>	15
3.1.2 <i>Waterdruk</i>	17
3.1.3 <i>Beddingconstante</i>	17
3.1.4 <i>Drukkingpunt</i>	19
3.2 Moment en excentrische belasting	21
3.2.1 <i>Rotatie</i>	21
3.2.2 <i>Oprichtend moment</i>	21
3.2.3 <i>Veerconstante</i>	24
3.3 Tweede orde effect	25
3.3.1 <i>Inleiding</i>	25
3.3.2 <i>Een oneindig stijve staaf ingeklemd in een verende fundering</i>	25
3.3.3 <i>Het tweede orde moment bij een ponton</i>	27
3.4 Statische stabiliteit	28
3.4.1 <i>Stabiliteit en scheefstand</i>	28
3.4.2 <i>Zwaartepunt, drukkingpunt en metacentrum</i>	28
3.4.3 <i>De hoogte van het metacentrum</i>	29
3.4.4 <i>De hoogte van het metacentrum voor andere vormen drijflichaam</i>	30
3.4.5 <i>Vormen van stabiliteit</i>	35
3.4.6 <i>Vormstabiliteit versus gewichtstabiliteit</i>	37
3.5 Conclusie	39
4. Hydrodynamica	40
4.1 Lineaire golftheorie	41
4.2 Onregelmatige golfvelden	41
4.3 Dynamische stabiliteit van drijvende objecten	43
4.3.1 <i>Eigenfrequentie roll- beweging</i>	44
4.3.2 <i>Eigenfrequentie heave- beweging</i>	45
4.4 Conclusie	45
5. Randvoorwaarden	46
5.1 Technische randvoorwaarden	47
5.2 Overige randvoorwaarden	48
5.3 Conclusie	48
6. Belastingen	49
6.1 Permanente belasting	49
6.2 Variabele belasting	49
6.3 Bijzonder belasting	50
6.4 Windbelasting	50
6.5 Hydrostatische waterdruk	51
6.6 Aanvaarbelasting	51
6.7 Overige belastingen	52
6.8 Conclusie	54
7. Conclusie deel I	55

DEEL 2 Beschrijving ontwerp

8. Inleiding deel II	57
9. Onderzoek basisvarianten	58
9.1 Doelstelling onderzoek basisvarianten	58
9.2 Werkwijze	58
9.3 Uitgangspunten en randvoorwaarden	58
9.4 Beschrijving van de varianten	59
9.5 Resultaten en conclusies	61
9.6 Aanbevelingen en knelpunten	63
10. Verkenning programma	64
10.1 Doelstelling verkenning programma	64
10.2 Werkwijze	64
10.3 Uitgangspunten	64
10.4 Resultaten	64
10.5 Aanbevelingen	67
11. Concept-ontwerp	68
11.1 Doelstelling	68
11.2 Uitgangspunten en randvoorwaarden	68
11.3 Werkwijze	68
11.4 Beschrijving varianten	69
11.5 Beoordeling varianten	71
11.6 Conclusie	71
11.7 Knelpunten	72
12. Aanscherping ontwerp drijflichaam	73
12.1 Doelstelling	73
12.2 Werkwijze	73
12.3 Beschrijving varianten	73
12.4 Resultaten berekening krachtswerking drijflichaam	73
12.5 De bouwvolgorde van het drijflichaam	74
12.6 Conclusie	75
12.7 Knelpunten	75
13. Voorlopig en Definitief Ontwerp	76
13.1 Doelstelling	76
13.2 Architectonische aspecten	76
13.2.1 <i>Gebouwworm</i>	76
13.2.2 <i>Gevelontwerp</i>	77
13.2.3 <i>Ontsluiting gebouw</i>	77
13.3 Bouwtechnische Aspecten	79
13.3.1 <i>Gewichtsbesparing</i>	80
13.3.2 <i>Gewichtontwerp</i>	80
13.3.3 <i>Bouwvolgorde</i>	81
13.3.4 <i>Het koppelen van pontons</i>	83
13.4 Kostenanalyse	85
14. Validatie ontwerp	88
14.1 Statische stabiliteit	88
14.2 Rotatiegevoeligheid	90
14.3 Scheefstandcorrectie	91
14.4 Diepgangfluctuatie	92
14.5 Overige berekeningen	93
15. Evaluatie	94
15.1 Productevaluatie	94
15.2 Procesevaluatie	100
15.3 Conclusie	102

Literatuur	104
Illustratieverantwoording	106
Symbolen	107
Bijlage 1 Newton- Raphson methode	109
Bijlage 2 Het tweede orde - moment bij een drijvende fundering	109
Bijlage 3 Onderzoek basisvarianten	110
Bijlage 4 Programma van eisen	119
Bijlage 5 Relatieschema hotel	120
Bijlage 6 Conceptontwerp variant 1	121
Bijlage 7 Conceptontwerp variant 2	123
Bijlage 8 Conceptontwerp variant 3	125
Bijlage 9 Conceptontwerp variant 4	127
Bijlage 10 Beoordelen varianten conceptontwerp	130
Bijlage 11 Berekening drijflichamen	cd
Bijlage 12 Positie metacentrum gekoppeld ponton	131
Bijlage 13 Tekeningen definitief ontwerp	137
Bijlage 14 Lichtgewicht vloersystemen	145
Bijlage 15 Het koppelen van pontons (film)	cd
Bijlage 16 Rapport kostenanalyse	147
Bijlage 17 Drijftechnologische prestaties definitief ontwerp	161
Bijlage 18 Dynamische stabiliteit	163
Bijlage 19 Gewichtsberekening	cd
Bijlage 20 Stabiliteit in bouw- en gebruiksfase	164
Bijlage 21 Rapport krachswerking	165
Bijlage 22 CD met bijlagen en bestanden	179

Voorwoord

Voor u ligt een scriptie die is geschreven in het kader van een afstudeeronderzoek aan de faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft. Tijdens dit afstudeerproject is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om hogere gebouwen te realiseren op een drijvende fundering. Dit onderzoek is geconcretiseerd in een ontwerp-opgave voor een drijvend hotel, waarbij binnen de gegeven randvoorwaarden gestreefd is naar een zo groot mogelijk aantal bouwlagen. In deze scriptie vindt u de neerslag van dit onderzoeks- en ontwerptraject.

Water is een onderwerp dat Nederland door zijn geografische ligging altijd intensief bezig heeft gehouden. Vanzelfsprekend, want als onze voeten staan op een bodem die grotendeels onder de zeespiegel ligt, is het geen verbazingwekkende zaak dat wij onze hersens moeten gebruiken om het hoofd boven water te houden.

Ook vandaag de dag fascineert en inspireert de waterproblematiek van ons land vele denkers en ontwerpers die zich op verschillende schaalniveau's met ruimtelijke inrichting bezig houden. Prognoses voor de waterhuishouding voorspellen dat Nederland in de toekomst meer water te verwerken krijgt. Drijvend bouwen is een vorm van ruimtelijke inrichting die deze veranderende waterhuishouding niet alleen als een probleem ziet, maar ook als een uitdaging - de uitdaging om in een steeds natter Nederland de weinige ruimte die er is toch effectief en intensief te gebruiken. Deze scriptie wil bijdragen aan het onderzoek naar de mogelijkheden en de beperkingen van deze vorm van ruimtegebruik.

Gedurende de periode van bijna een jaar heb ik met plezier en motivatie gewerkt aan deze afstudeeropdracht. Bouwen op water is een veelzijdig onderwerp waarin afwisseling en diepgang hand in hand kunnen gaan. Tijdens mijn afstudeerwerk hebben verschillende personen mij geadviseerd en mij van de nodige informatie voorzien, waarvoor ik hen erkentelijk ben. Een bijzonder woord van dank aan mijn begeleiders, ir. W. Kamerling en ir. T. Rijcken. Het overleg met hen ervaarde ik steeds als aanscherpend en verrijkend, en het heeft zeker bijgedragen aan een bevredigend resultaat, daarvoor mijn hartelijke dank.

In mijn woord van dank wil ik ook mijn Schepper niet vergeten. Hij die volgens de woorden van Paulus ons het leven, de adem en alle dingen geeft, gaf mij naar mijn overtuiging ook wat nodig was voor het afronden van mijn studie.

Ik hoop een steentje te hebben bijgedragen aan de kennis over drijvende gebouwen. Het is een actueel, veelzijdig en fascinerend onderwerp, dat staat wat mij betreft als een paal boven water.

Martijn van Winkelen

Pijnacker, maart 2007

Inleiding

How high can you float? Dat is de vraag die in deze scriptie centraal zal staan. Het laten drijven van een gebouw is een vorm van bouwen die haar uitdagingen heeft en haar eigen specifieke problemen oproept. Er zijn verschillende deelgebieden waarin nuttig onderzoek kan worden verricht naar deze vorm van bouwen. Men kan onderzoek doen naar stedenbouwkundige, juridische, economische en ecologische aspecten van drijvende gebouwen. Er kan echter ook op het vakgebied van bouwtechniek en architectuur nog relevante kennis ontwikkeld worden; en daar zal in deze scriptie met name de nadruk op liggen.

Drijvende gebouwen zijn er al op verschillende plaatsen in Nederland te vinden. De bouwhoogte bedraagt meestal zo'n 6 tot 10 meter. In deze scriptie wordt een grensverkendend onderzoek gedaan naar de haalbare hoogte voor deze bouwvorm. Nagegaan wordt wat de mogelijkheden en beperkingen zijn van deze minder conventionele bouwvorm, zowel op bouwtechnisch gebied als op hieraan grenzende vakgebieden.

De centrale vraagstelling van deze scriptie luidt als volgt:

Hoe kan men een hoog, lichtgewicht en stabiel gebouw realiseren op een drijvende fundering, waarbij de voordelen van bouwen op water (zowel in de bouw- als gebruiksfase) kunnen worden benut, en waarbij voldaan wordt aan constructieve en gebruikstechnische eisen (t.a.v. sterkte, stijfheid, stabiliteit, scheefstand e.d.)?

De scriptie bestaat uit een theoretisch deel en een ontwerp-beschrijvend deel. In het theoretisch deel wordt theorie behandeld die voor drijvende gebouwen relevant is. De focus zal hierbij liggen bij problemen die ontstaan bij hogere drijvende gebouwen. De kennis die hiermee wordt opgedaan wordt toegepast in een concrete ontwerpopgave voor een drijvend hotel. In het tweede deel wordt het ontwerpproces voor dit gebouw beschreven en geëvalueerd.

Deel I

Theoretisch kader



1. Inleiding deel I

Ter voorbereiding op het ontwerp van een hoog drijvend gebouw is een literatuuronderzoek gedaan waarvan het resultaat te vinden is in dit deel. In de inleiding is reeds de centrale vraagstelling van deze scriptie verwoord: *“Hoe kan men een hoog, lichtgewicht en stabiel gebouw realiseren op een drijvende fundering, waarbij de voordelen van bouwen op water (zowel in de bouw- als gebruiksfase) kunnen worden benut, en waarbij voldaan wordt aan constructieve en gebruikstechnische eisen.”* Vanuit deze vraagstelling is ook het theoretische kader ontwikkeld.

Om een antwoord te vinden op deze vraag zijn enkele deelvragen opgesteld. In dit deel worden de volgende deelvragen beantwoord:

- *Wat zijn de voor- en nadelen van drijvende gebouwen?*
- *Wat voor typen drijflichamen zijn er in omloop en welke daarvan komen in aanmerking voor hoge drijvende gebouwen?*
- *Wat is de theorie voor de krachtswerking van drijvende gebouwen en welke aanbevelingen kunnen daaruit getrokken worden voor het ontwerpen van hoge drijvende gebouwen?*
- *Welke factoren zijn bepalend voor de maximale hoogte van een drijvend gebouw?*
- *Welke randvoorwaarden en welke belastingcombinaties moeten er gehanteerd worden?*

De theorie die wordt behandeld, is eigenlijk een ‘toolkit’ die in het verdere onderzoeks- en ontwerptraject gebruikt kan worden. De nadruk in het theoretische kader ligt op de drijftechnologie voor drijvende gebouwen. Dit volgt eigenlijk uit de centrale vraagstelling.

Om de relatie met de centrale vraagstelling helder te houden, wordt elk hoofdstuk afgesloten met een concluderende paragraaf waarin de consequenties van de behandelde theorie voor het onderzoeks- en ontwerptraject zullen worden belicht.

2. Bouwen op water

Bouwen op water is een onderwerp dat de laatste jaren in de belangstelling staat. In dit hoofdstuk wordt een introductie gegeven op dit thema. Er komen verschillende facetten van dit onderwerp aan de orde zoals: de waterproblematiek van Nederland; vormen van bouwen op water, voor- en nadelen van drijven en dergelijke zaken.

2.1 Aandacht voor drijvende gebouwen

Wonen op water is iets wat al geruime tijd in Nederland voorkomt. In het begin van de twintigste eeuw vond een deel van de armere bevolkingsgroepen een onderkomen in houten schepen, die als gevolg van de opkomst van het stalen schip buiten gebruik raakten. Dat deze woonvorm een onderdeel was van de ruimtelijke problematiek blijkt uit het feit dat in 1918 de Woonwagen- en Woonschepenwet werd uitgevaardigd. Wonen op het water heeft lange tijd het imago gehad van een relatief goedkope woonvorm waar de regelgeving van de overheid weinig grip op had. Woonschepen en arken behoorden bij de bekende beelden van grachten en havens, maar de uitstraling liet dikwijls te wensen over.

Wonen op water is echter iets wat de laatste jaren opnieuw in de belangstelling is gekomen. Ook in de bovenkant van de woningmarkt is er vraag naar drijvende woningen. Daarvan getuigen de projecten met drijvende woningen in Almere, IJburg en Leidse Rijn. De vraag kan gesteld worden wat de aanleiding is van deze belangstelling en wat wonen op water voor mensen aantrekkelijk maakt.



Afb. 2.1 Drijvende woonwijk.



Afb. 2.2. Waterwoning type Atelier (Ooms waterwoningen)

2.2 Waterproblematiek van Nederland

Nederland is een land dat altijd te maken heeft met de strijd tegen water. Dijken, molens, gemalen en de deltawerken zijn de getuigen in het landschap die aan deze strijd herinneren. Het veranderende klimaat zorgt er echter voor dat beleidsmakers en betrokkenen bij het waterbeheer zich opnieuw moeten bezinnen over de vraag hoe wij in de toekomst niet alleen het hoofd boven water houden, maar ook de voeten.

De commissie waterbeheer 21^e eeuw heeft in het jaar 2000 op verzoek van de regering een rapport uitgebracht waarin het (verwachte) wateraanbod voor de komende eeuw in kaart wordt gebracht. De commissie verwacht de volgende tendensen:

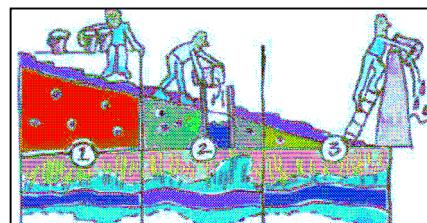
- De zeespiegel zal stijgen.
- In de winterperiode wordt Nederland natter. Zowel de neerslag als de maatgevende afvoer van de rivieren neemt toe.
- In de zomerperiode zal de gemiddelde regenval hetzelfde blijven, maar de spreiding wijzigt. De buien worden intensiever en de droge periodes langer. De maatgevende afvoer van de rivieren neemt in deze periode af.
- Door een toename van de hoeveelheid verhard oppervlak (als gevolg van de verstedelijking) zullen de pieken in de afvoer van water toenemen. Dit betekent dat er een hogere capaciteit van het waterafvoersysteem vereist is.
- De bodem van Nederland zal (blijven) dalen.

De commissie pleit voor een structurele wijziging in het beleid voor waterbeheer. Naar haar oordeel vraagt het hierboven geschetste scenario meer dan de gewoonlijke aanpak van dijken verhogen en de capaciteit van gemalen vergroten. Er moet in de ruimtelijke indeling meer ruimte gereserveerd worden voor water. De strategie die de commissie voorstelt, is samen te vatten in de woorden: *vasthouden – bergen – afvoeren*.

Deze zogenaamde driestapsstrategie ziet er als volgt uit:

1. Overtollig water zoveel mogelijk vasthouden in de bodem en in oppervlaktewater.
2. Indien 1 niet voldoet retentiegebieden¹ aanleggen op strategische plekken langs waterlopen om hier water tijdelijk te kunnen bergen.
3. Indien 1 en 2 niet voldoen water pas afvoeren naar elders.

De commissie stelt dat er in Nederland tot 2050 circa 110.000 hectare land extra nodig is voor waterberging. Hiervoor kunnen (onder andere) retentiepolders worden aangelegd. Hiernaast dienen er calamiteitenpolders te worden aangelegd. Dit zijn gebieden die, indien nodig, als noodoverloopgebied kunnen fungeren. Over de vraag hoeveel waterbergingsgebied er in de toekomst nodig is, zijn de meningen nogal verdeeld. De belangstelling voor drijvende gebouwen is in ieder geval als gevolg van de aanbevelingen van de commissie toegenomen. Ook is het een feit dat we in de toekomst er op moeten rekenen dat ons land meer water te verwerken krijgt.



Afb. 2.3. Driestapsstrategie: 1. vasthouden 2. bergen 3. afvoeren

2.3 Waarom drijven?

Er zijn verschillende zaken te noemen die bouwen op water aantrekkelijk maken. Als eerste kan genoemd worden dat drijven een potentiële vorm is van meervoudig ruimtegebruik. De ruimtebehoefte in Nederland groeit nog steeds. Er is in de toekomst niet alleen meer ruimte nodig voor waterberging, maar ook voor functies als wonen, werken en recreëren. Aangezien ruimte in ons land een schaars goed is, kan meervoudig ruimtegebruik hier een oplossing bieden. Waterbergingsgebieden kunnen voorzien worden van een tweede functie als men gebruik maakt van drijvende objecten. Te denken valt aan drijvende woning, drijvende kassen e.d.

Hiernaast zijn drijvende gebouwen verplaatsbaar. Dit is een bijzondere vorm van flexibiliteit. Het is een zogenaamde flexibiliteit van locatie. Deze verplaatsbaarheid biedt zowel voordelen voor de bouw- als de gebruiksfase. In de bouwfase kan het gebouw bijvoorbeeld voor een kleiner of een groter deel in een scheepsbouwlods gebouwd worden. Dit is gunstig voor de bouwtijd aangezien men geen hinder meer ondervindt van weersinvloeden. Een voorbeeld hiervan is het gebouw 'de Bolder' in Schiedam. Het gebouw is vrijwel geheel op de werf gebouwd en daarna over water naar haar uiteindelijke locatie vervoerd. Dit bouwen in een lods verkorte de bouwtijd aanzienlijk.

De verplaatsbaarheid van het gebouw biedt echter ook voordelen in de gebruiksfase. Indien de waterwegen in de omgeving van het gebouw dit toelaten (waterdiepte, bruggen, sluisen e.d.) kan het gebouw naar een andere locatie gesleept worden. Een voorbeeld waar deze vorm van flexibiliteit wordt benut, zijn de detentieplatforms van het openbaar ministerie. Met een diepgang van zo'n 3,5 meter en een hoogte van circa 10 meter zijn de platforms erop gebouwd dat ze door heel de randstad over de grote waterwegen te verplaatsen zijn. Op deze wijze kunnen de detentie-inrichtingen daar ingezet worden waar dat wenselijk is.

Hiernaast hebben gebouwen in en rond water een bijzondere ruimtelijke kwaliteit die door gebruikers dikwijls gewaardeerd wordt. Vooral voor drijvende woningen lijkt ruimtelijke kwaliteit een belangrijk pluspunt. Marktonderzoek wijst uit dat er verschillende zaken zijn die wonen op water voor potentiële kopers aantrekkelijk maakt. Motivaties die genoemd worden zijn: de exclusiviteit van deze woonvorm, het leven dicht bij de natuur, uitzicht en een gevoel van vrijheid.² Deze zaken maken drijvende woningen tot een aantrekkelijke woonvorm waarvoor op de markt belangstelling te constateren valt.

Behalve dit zijn er echter ook zaken te noemen die kunnen gelden als nadelen voor drijvende gebouwen. Men kan nadelen noemen van technische aard zoals bijvoorbeeld scheefstand en lichte deining. Voor sommige functies zullen deze nadelen overkomelijk zijn, voor andere functies –bijvoorbeeld bij

¹ Retentiegebied: gebied dat permanent onder water staat. Bergingsmogelijkheid ontstaat door peilverhoging.

² Bron [3] par. 2.2

precisiewerk- zullen deze zaken zwaar wegen. Er zijn ook nadelen te noemen van meer functionele aard zoals parkeervoorzieningen, veiligheid bij calamiteiten en veiligheid voor kinderen. Ook economische zaken kunnen een rol spelen, zoals het feit dat het verkrijgen van een hypotheek of verzekering voor drijvende gebouwen momenteel duurder en/of moeilijker is als voor gebouwen op het land.

2.4 Typologie drijflichamen

Drijven is niet de enige manier om op water te bouwen. Om de ruimtelijke kwaliteit van water te benutten, kan men het gebouw neerzetten op een traditionele fundering, terwijl het gebouw door water wordt omringd. Hiernaast kan men het gebouw neerzetten op palen waardoor er ook onder het gebouw water aanwezig is. Het risico op het dichtslippen van het water onder het gebouw is hierbij wel groter dan bij het geval van een drijvende fundering. Tenslotte is er ook een tussenvorm: amfibische funderingen. Deze funderingen drijven bij hoog water, en zakken bij laag water weer terug op een betonnen plaat, zodat het gebouw weer aan de grond staat. Een voorbeeld hiervan zijn de amfibische woningen in Maasbommel (zie afb.2.4).

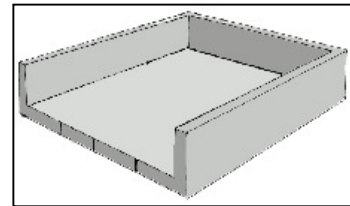


Afb. 2.4. Links gebouw omringd door water; midden bouwen op palen; rechts amfibische woningen (Maasbommel).

Drijven is dus niet de enige mogelijkheid om in- en rond water te bouwen. Drijvende gebouwen kunnen echter ook op verschillende manieren uitgevoerd zijn. Er bestaan verschillende typen drijflichamen. Hieronder volgt overzicht van bestaande typen drijflichamen.

1. Open caisson

Dit systeem bestaat uit een betonnen bak die aan de bovenzijde open is. De ruimte in de bak kan gebruikt worden voor technische installaties, leidingen, en ook eventueel als gebruikruimte. Door de hoge massa van het beton heeft dit systeem een relatief grote diepgang en een laag zwaartepunt. Een diepgang tussen 0,75 m en 2 m is gebruikelijk.



Afb. 2.5. Open caisson.

De wanden en de onderplaat van dit type drijflichaam worden (vanwege de relatief grote diepgang) zwaar belast door de druk van het water. De onderplaat kan (zonder voorspanning) zo'n 7 meter overspannen. Indien een grotere overspanning wenselijk is, dient er een balkenrooster te worden toegepast om de onderplaat te versterken.

Een voordeel van dit type drijflichaam is dat er van binnen uit koppelingen tussen drijflichamen aangebracht en geïnspecteerd kunnen worden. Het is technisch ook mogelijk om verbindingen onder de waterspiegel aan te brengen. Een belangrijk nadeel van dit drijflichaam is de zinkbaarheid. In geval van brand kan de bak bijvoorbeeld vollopen met bluswater en zinken.

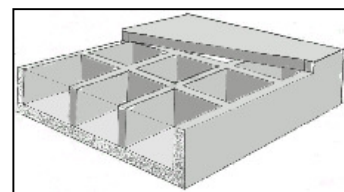


Afb. 2.6. Fabriekshal ABC Arkenbouw, plaats waar caissons worden gebouwd. Open Caissons worden veel toegepast voor woonarken.

2. Gesloten caisson

Een gesloten caisson is zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde gesloten. De ruimte in het ponton is onderverdeeld in compartimenten. De tussenwanden zorgen ervoor dat de overspanningen van de onder- en bovenzijde van het ponton worden beperkt, een soort balkenrooster dus.

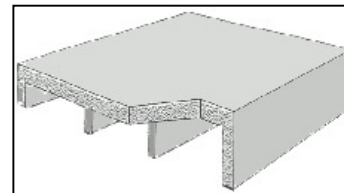
Ten opzichte van een open ponton heeft dit drijflichaam een grotere massa. Dit heeft twee gevolgen. Het systeem heeft een laag zwaartepunt en daarom een hoge gewichtstabiliteit. Maar ten gevolge van de hoge massa moet tegelijkertijd de massa van de bovenbouw beperkt blijven. Hoewel het niet onmogelijk is dat compartimenten lek raken, is het drijflichaam wat betreft de zinkbaarheid toch een stuk veiliger als een open ponton.



Afb. 2.7. Gesloten caisson.

3. Omgekeerde bak

Een variant op de bovenstaande systemen is de omgekeerde-bak. De onderzijde van het ponton is weggelaten. Het systeem ontleent haar drijfvermogen aan de gecomprimeerde lucht die opgesloten zit in de compartimenten van het ponton. Met behulp van de wet van Boyle ($P \cdot V/T = C$) kan de diepgang van de constructie worden bepaald. Een verhoogde luchtdruk in de compartimenten betekent ook meer draagkracht.

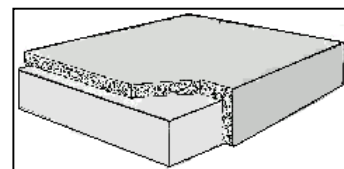


Afb. 2.8. Omgekeerde bak.

De draagkracht van dit systeem is bij gelijk materiaalgebruik minder dan die van het open caisson. Tevens ligt het zwaartepunt hoger, wat minder gunstig is voor de gewichtstabiliteit. Het systeem is zinkbaar en luchtverlies uit de compartimenten (bv. door scheuren in het beton) moet ten allen tijde worden vermeden.

4. Omgekeerde bak met EPS

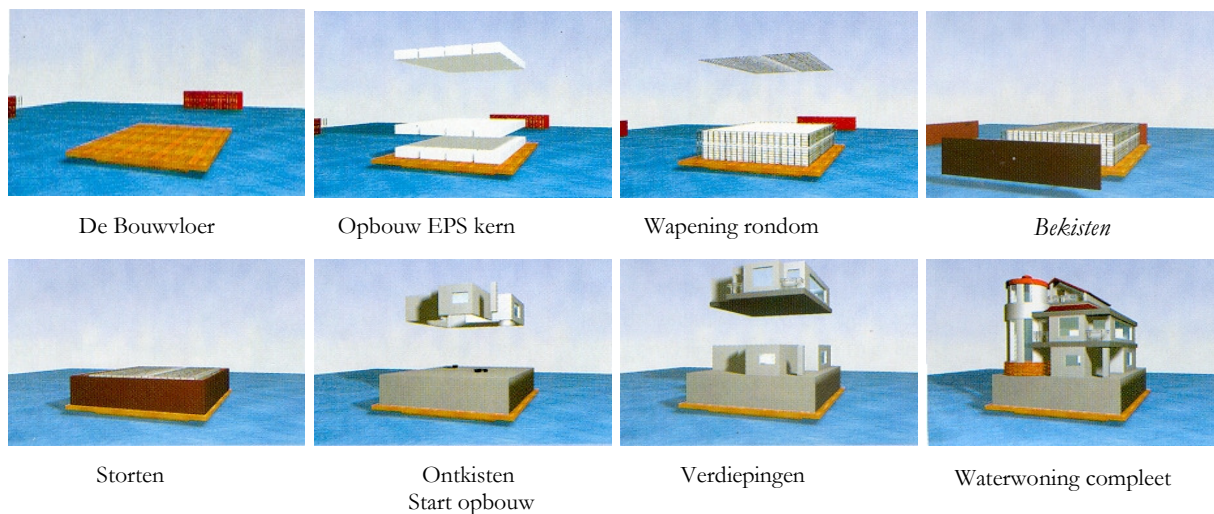
EPS (in de volksmond piepschuim) heeft ten opzicht van water en beton een lage dichtheid ($\rho_{\text{EPS}} = 10 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{beton}} = 2400 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$). Deze lage dichtheid is voor een drijflichaam een gunstige eigenschap, omdat eenzelfde hoeveelheid waterverplaatsing bereikt kan worden met een veel lichter drijflichaam. Anders gezegd: bij eenzelfde diepgang kan de massa van de bovenbouw van een lichter drijflichaam groter zijn dan bij een zwaarder drijflichaam.



Afb. 2.9. Omgekeerde bak met EPS

Een type drijflichaam waarin EPS wordt toegepast, is de omgekeerde bak met EPS. De holle ruimte van variant 3 is nu gevuld met EPS. Om deze reden kan de betonnen schil dunner worden uitgevoerd als bij variant 3. Omdat de dichtheid van EPS lager is dan die van water, is het drijflichaam nu onzinkbaar geworden. Dit is een belangrijk voordeel van dit type drijflichaam. Het EPS kan in het drijflichaam tegelijkertijd een isolerende functie vervullen.

Het zwaartepunt van dit drijflichaam ligt hoger als bij de voorgaande varianten. Een drijflichaam met EPS zal zijn stabiliteit vaak uit de breedte van het drijflichaam halen. De diepgang van de omgekeerde bak met EPS is relatief gering, meestal rond de 0,5 m. Dit is gunstig voor toepassingen op minder diep water. Een nadeel van dit type drijflichaam is dat de ruimte in het drijflichaam niet toegankelijk is. Dit is ongunstig voor het koppelen van drijflichamen, voor het aanbrengen van leidingen of voor een eventuele functionele bestemming van het drijflichaam. Hoe groter het drijflichaam is, hoe zwaarder dit nadeel zal wegen.



Afb. 2.10. De bouw van een waterwoning.

5. EPS met balkenrooster of frame.

Een andere wijze om een drijflichaam met EPS te maken, is het opnemen van een balkenrooster in het EPS. Hierdoor kan er een stijf en lichtgewicht drijflichaam worden verkregen. In het EPS worden uitsparingen gemaakt die later gevuld worden met beton. Men gebruikt hier vezelversterkt beton voor. In dit beton zijn vezels opgenomen, waardoor het beton taaier wordt.

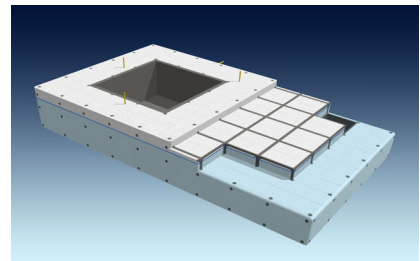
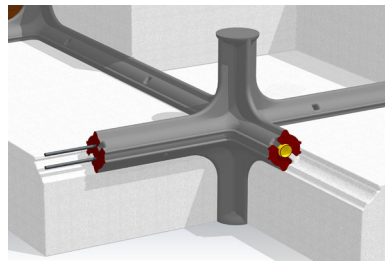
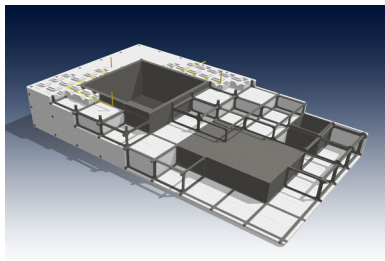
Dit systeem is toegepast bij de drijvende kas die door Dura Vermeer in Naaldwijk is gebouwd. Het drijflichaam is vrijwel geheel op het water gebouwd. Eerst werd een vlot van EPS gemaakt, daarboven werd een nieuwe laag EPS aangebracht waarin uitsparingen waren aangebracht voor het balkenrooster. Vervolgens werd deze uitsparing volgestort en tenslotte werd er een betonvloer op het drijflichaam aangebracht (afb. 2.11).

Een ander systeem dat gebruik maakt van EPS als bekisting is de drijvende bouwsteen, ontwikkeld door Ties Rijcken. Het drijflichaam bestaat uit EPS met een geïntegreerd frame van beton. Het EPS wordt in een mal gevormd, waardoor de geometrie van het betonnen frame bepaald kan worden (afb. 2.12).



Afb. 2.11. Bouw drijflichaam drijvende kas Dura Vermeer.

Door gebruik te maken van hoogwaardig vezelversterkt beton is er geen wapening nodig en kunnen gecompliceerde vormen gemaakt worden. Het EPS zorgt voor het drijfvermogen en het beton zorgt voor de sterkte. Hierdoor kan een sterk en stijf drijflichaam worden ontwikkeld met een relatief laag eigengewicht. De modulaire opbouw van dit systeem is ook een gunstige eigenschap.

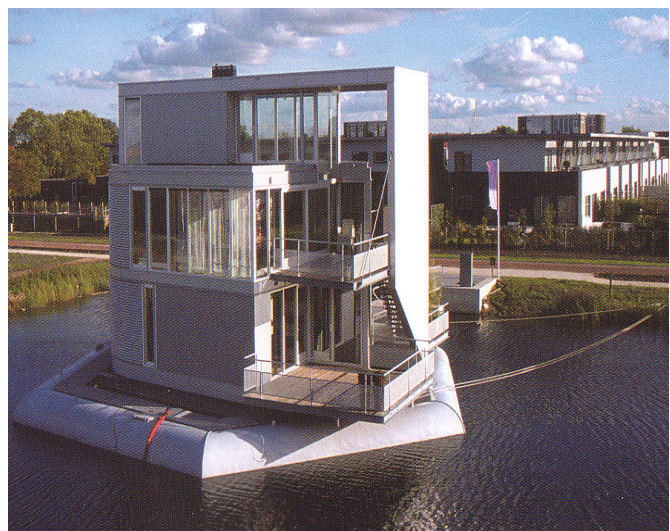


Afb. 2.12. De drijvende bouwsteen, een modulaair systeem voor een drijflichaam.

6. Drijflichaam met stalen buizen.

Ook staal wordt, met name in de offshore wereld, gebruikt om drijflichamen te construeren. Hoewel staal zelf een hoge soortelijke massa heeft, is het materiaal zo sterk dat met weinig materiaal een licht drijflichaam vervaardigd kan worden. Een afgesloten stalen buis bevat veel lucht en heeft daarom een hoog drijfvermogen.

Een nadeel van staal is dat het relatief veel onderhoud vergt. Dit is voor een drijvend gebouw zowel kostbaar als hinderlijk voor het gebruik. Hiernaast zorgt het lage gewicht van het drijflichaam ervoor dat het zwaartepunt van het drijvende object als geheel een relatief hoog zwaartepunt heeft wat ongunstig is voor de stabiliteit. In offshore projecten wordt dit

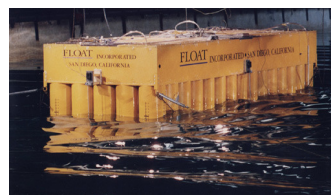
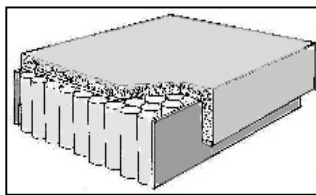


Afb. 2.13. Drijvende woning Middelburg. Drijflichaam met buisprofielen.

probleem vaak opgelost door het drijflichaam dieper onder het wateroppervlak te positioneren. Voor drijvende gebouwen is dit vanwege beperkte diepte van het water echter niet mogelijk. Het drijflichaam van de drijvende villa in Middelburg moest met betongranulaat worden verzwaard om de stabiliteit te verbeteren (afb 2.13).

7. *Pneumatically Stabilized Platform (PSP)*

Dit systeem lijkt wat betreft het principe op de omgekeerde bak variant, het is echter meer geavanceerd. Het systeem bestaat uit cilinders die aan de bovenzijde worden afgesloten door een plaat. Evenals bij het systeem van de omgekeerde bak variant wordt het drijfvermogen ontleend aan de luchtdruk die ontstaat door het samenpersen van de lucht.



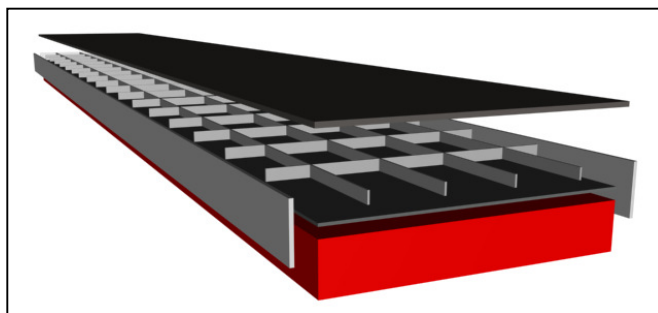
Afb. 2.14. Pneumatically Stabilized Platform.

In tegenstelling tot de omgekeerde bak variant zijn de cilinders nu echter aan de bovenzijde met elkaar verbonden zodat de lucht van de ene cilinder naar de andere kan stromen. Door waterbeweging komt de lucht in beweging. Omdat de cilinders met elkaar verbonden zijn, kan de lucht zich over het gehele systeem verplaatsen. In plaats dat de golfenergie ervoor zorgt dat het platform gaat deinen, wordt er lucht verplaatst tussen de verschillende cilinders van het platform. Ook wordt er golfenergie omgezet in warmte. Hierdoor ontstaat er een stabiel platform.

Dit systeem is relatief kostbaar en wordt vooral toegepast in offshore projecten. Omdat de profielen (vaak) van staal zijn, is isolatie een punt van aandacht.

8. *Gecombineerde systemen.*

Soms worden oplossingen gecombineerd zoals het hiernaast afgebeelde drijflichaam van de werkgroep Aqua Struenda van de hogeschool Zuyd. Om te voldoen aan de randvoorwaarde van onzinkbaarheid werd EPS toegepast. Hiernaast was er veel ruimte voor leidingen nodig, terwijl de leidingen ook bereikbaar moesten blijven. Het resultaat was een combinatie van variant 2 en 4. De tussenwanden van het systeem vervullen een belangrijke rol in de stijfheid van het drijflichaam.



Afb. 2.15. Drijflichaam ontwikkeld door werkgroep Aqua Struenda. Een combinatie van EPS en een gesloten caisson. Het drijflichaam moest onder andere fungeren als fundering voor een drijvende weg.

2.5 Conclusie en discussie

A. *Waterproblematiek Nederland*

Ten aanzien van de waterproblematiek in Nederland worden twee zaken geconcludeerd:

- De commissie waterbeheer 21^e eeuw stelt dat Nederland 110.000 hectare moet reserveren voor waterberging. Hiernaast is er in de toekomst meer ruimte nodig voor functies als wonen, werken en recreëren. Deze twee zaken maken dat meervoudig ruimtegebruik in de vorm van drijvende gebouwen een oplossing kan zijn om in de ruimtebehoefte te voorzien.
- Retentiepolders zullen in de meeste gevallen voor *hoge* drijvende gebouwen geen geschikte locatie zijn, omdat de waterdiepte van de polders hiervoor te beperkt is. In het kader van dit onderzoek is het voordeel van meervoudig ruimtegebruik dus eigenlijk niet van toepassing.

Meervoudig ruimtegebruik wordt vaak genoemd als een argument voor de stelling dat we in Nederland in de nabije toekomst naar een grootschalige toepassing van drijvende gebouwen toe moeten. Hierbij zijn echter wel twee kanttekeningen te plaatsen:

- Over de vraag hoeveel hectare retentiegebied er in de toekomst nodig is, zijn de meningen nogal verdeeld. Terecht wordt door verschillende bronnen opgemerkt dat we wat betreft de benodigde hoeveelheid waterberging niet moeten denken in vierkante meters, maar in kubieke meters. De capaciteit van een retentiepolder wordt immers bepaald door de oppervlakte van de polder *en* de

maximale peilfluctuatie. Hoeveel ruimte er in de toekomst vrijkomt die potentieel geschikt is voor drijvende toepassingen is, dus nog de vraag.

- Drijvende toepassingen zijn, indien zij worden toegepast in een retentiegebied, een geschikte vorm van meervoudig ruimtegebruik, maar niet de enige vorm van meervoudig ruimtegebruik. In steden zijn genoeg voorbeelden te vinden van intensief meervoudig ruimtegebruik zonder dat men gebruik maakt van drijvende toepassingen. Men kan dus niet zomaar een optelsom maken van de ruimtebehoefte in de toekomst en hieruit concluderen dat drijven in de toekomst echt noodzakelijk is. Hiervoor dient ook onderzoek gedaan te worden naar de aard van de ruimte behoefte (hoe groot is bijvoorbeeld de woningbehoefte naar eengezinswoningen met eigen tuin) en naar de economische kant van de zaak (door bijvoorbeeld de kosten van andere vormen van meervoudig ruimtegebruik te vergelijken met de kosten van drijvende toepassingen in een retentiegebied).

B. Voor- en nadelen van drijven.

- Voordelen van drijven zijn de potentiële mogelijkheid voor meervoudig ruimtegebruik zoals de verplaatsbaarheid van het gebouw in bouw en gebruiksfase, de mogelijkheid om met grotere bouwcomponenten te werken en de ruimtelijke kwaliteit die een omgeving met water biedt. Voor hogere drijvende gebouwen zijn twee van deze voordelen in mindere mate van toepassing namelijk het voordeel van meervoudig ruimtegebruik en het verplaatsen van het gebouw in de gebruiksfase. Algemeen kan worden gesteld dat een hoger gebouw in de gebruiksfase minder makkelijk verplaatst kan worden. Hiervoor zijn zowel technische redenen voor aan te voeren (breedte en hoogte van bruggen en sluizen, diepgang waterwegen) als economische redenen (de kosten van het verplaatsen van het gebouw, inrichting ligplaats e.d.).
- Nadelen van drijvende gebouwen zijn de mogelijkheid van scheefstand, deining (hoe zwaar dit weegt is afhankelijk van functie), veiligheid (calamiteiten, kinderen) en nadelen van economische aard (verzekeringen e.d.). Deze nadelen worden niet onoverkomelijk of onoplosbaar geacht.

C. Typologie drijflichamen

- De verschillende typen drijflichamen zijn niet allenmaal even geschikt voor hogere drijvende gebouwen. Van sommige drijflichamen is dat al bij voorbaat te zeggen, van andere drijflichamen zal de geschiktheid nader onderzocht moeten worden.
- De met lucht gevulde omgekeerde bak wordt te kwetsbaar geacht voor een hoog drijvend gebouw. Het Pneumatically Stabilized Platform wordt buiten beschouwing gelaten vanwege de hoge kosten van het systeem (aanschaf en onderhoud). Ook een drijflichaam met stalen buizen wordt ongeschikt geacht voor een hoog drijvend gebouw (grote loze ruimte en kosten onderhoud).
- De drijflichamen met EPS hebben twee belangrijke voordelen, te weten een laag eigengewicht en de onzinkbaarheid. Er is echter een nadeel wat voor een hoog drijvend gebouw behoorlijk zwaar weegt. Aan het drijflichaam kan namelijk geen functionele bestemming gegeven worden. Een hoog drijvend gebouw veronderstelt een groot drijflichaam en als deze geheel gevuld is met EPS is dit eigenlijk loze ruimte. De geschiktheid van dit type drijflichaam zal later nader onderzocht worden. Wellicht is een hybride-drijflichaam een oplossing.
- Het open caisson en het gesloten caisson worden potentiële geschikt geacht voor een hoog drijvend gebouw. Voor de zinkbaarheid van deze drijflichamen moet een oplossing worden gevonden.

3. Hydrostatica

In dit hoofdstuk staat de krachtwerving van drijvende gebouwen centraal. Gebouwen die drijven kunnen beschouwd worden als objecten die gefundeerd zijn op een vloeistof. Een vloeistof kan slechts op druk belast worden. Er kunnen noch schuifkrachten noch trekkrachten worden opgenomen. Dit roept een aantal specifieke problemen op, waaraan in dit hoofdstuk aandacht zal worden gegeven.

Om inzicht te geven in de krachtwerving van drijvende gebouwen wordt stapsgewijs het gedrag nagegaan onder verschillende belastingen. Er wordt begonnen met een eenvoudige situatie en stap voor stap wordt de belastingssituatie gecompliceerder gemaakt.

3.1 Verticale gelijkmatige belasting

3.1.1. Diepgang

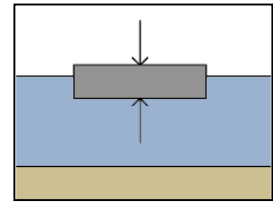
Een voorwerp dat in een vloeistof wordt gelegd, zakt er voor een kleiner of een groter deel in weg. Hoe ver het wegzakt is afhankelijk van de massa van het object. Een kubieke decimeter lood geplaatst op een wateroppervlak zakt geheel weg onder de waterspiegel, terwijl een kubieke decimeter hout slechts voor een deel in de vloeistof wegzakt.

De wet van Archimedes beschrijft hoever een voorwerp met een bepaalde massa in een vloeistof zakt. De wet luidt als volgt:

De opwaartse kracht die een lichaam in een vloeistof ondervindt, is gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.

Aangezien een drijvend voorwerp zich in een evenwichtstoestand bevindt, kan gesteld worden dat deze opwaartse kracht gelijk is aan de zwaartekracht van het object (afb. 3.1). De wet kan dus ook als volgt geformuleerd worden:

Het gewicht van het volume van het verplaatste water is gelijk aan de zwaartekracht die op het object werkt.



Afb. 3.1. Evenwichtssituatie: opwaartse kracht gelijk aan zwaartekracht.

Met deze wet kan de diepgang bepaald worden voor drijflichamen met verschillende vormen.

A. Rechthoekig drijflichaam

$$F_{\text{opw}} = \gamma_w \cdot \nabla$$

∇	= waterverplaatsing	(m ³)
F_{opw}	= opwaartse kracht	(kN)
γ_w	= soortelijke massa water	(kN/m ³)
	(voor binnenwater geldt: $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$)	

$$\nabla = d \cdot b \cdot l$$

d	= diepgang drijflichaam	(m)
b	= breedte drijflichaam	(m)
l	= lengte drijflichaam	(m)

$$F_{\text{opw}} = F_z$$

$$F_z = 10 \cdot b \cdot d \cdot l$$

$$d = \frac{F_z}{10b \cdot l}$$

(3.1)

B. Drijflichaam met driehoekvormige doorsnede

Voor een drijflichaam waarvan de doorsnede een gelijkbenige driehoek is, kan de waterverplaatsing berekend worden met:

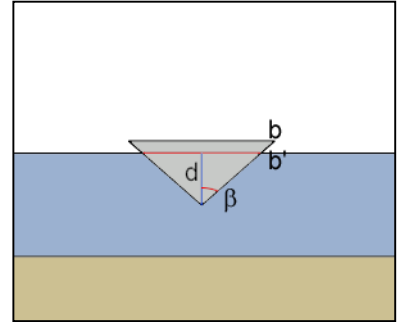
$$\nabla = l \cdot d^2 \cdot \tan \beta$$

$$\beta = \text{halve hoek top driehoek (zie afb. 3.2)}$$

$$F_{\text{opw}} = \gamma_w \cdot l \cdot d^2 \cdot \tan \beta$$

$$F_z = 10 \cdot l \cdot d^2 \cdot \tan \beta$$

$$d = \sqrt{\frac{F_z}{10 \cdot l \tan \beta}} \quad (3.2)$$



Afb. 3.2. Symbolen driehoek.

$$b' = 2d \tan \beta$$

$$\nabla = l \cdot d^2 \cdot \tan \alpha$$

C. Cilindervormig drijflichaam

De waterverplaatsing van een drijflichaam met de vorm van een halve cilinder kan op twee manieren benaderd worden.

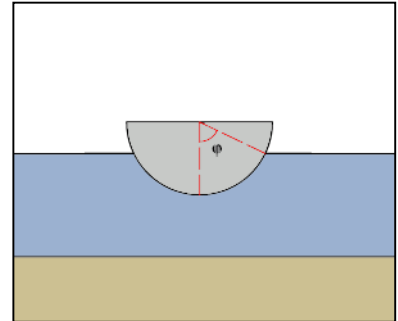
1. Newton- Raphson methode.

De waterverplaatsing van dit drijflichaam kan analytisch beschreven worden als:³

$$\nabla = \frac{1}{2} r^2 l (2\varphi - \sin 2\varphi)$$

r = straal cilinder

φ = middelpuntshoek (afb. 3.3)



Afb. 3.3. Middelpuntshoek.

Als de vereiste waterverplaatsing bekend is, kan met de Newton-Rapson methode de hoek worden benaderd, waarmee vervolgens de bijbehorende diepgang kan worden bepaald. Deze methode is uitgewerkt in bijlage 1.

2. methode van Simpson.

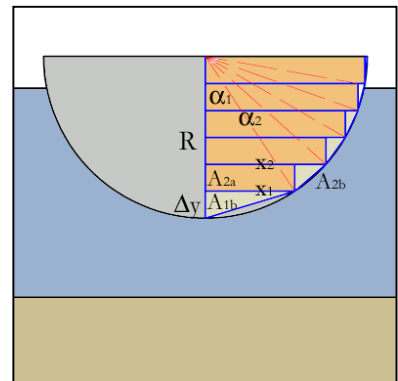
Met de methode van Simpson kan de diepgang van dit drijflichaam numeriek worden bepaald. Het oppervlakte wordt in stukjes gedeeld waarvan het oppervlakte berekend kan worden en vervolgens wordt het totaal gesommeerd (zie afb. 3.4).

$$A_{1a} = 0$$

$$A_{1b} = \frac{1}{2} \Delta y \cdot x_1 \quad \text{met: } x_1 = r \sin \alpha_1 \quad \text{en} \quad \alpha_1 = \cos^{-1} \left(\frac{r - \Delta y}{r} \right)$$

$$A_{2a} = \Delta y \cdot x_1$$

$$A_{1b} = \frac{1}{2} \Delta y \cdot (x_2 - x_1) \quad \text{met: } x_2 = r \sin \alpha_2 \quad \text{en} \quad \alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{r - 2\Delta y}{r} \right)$$

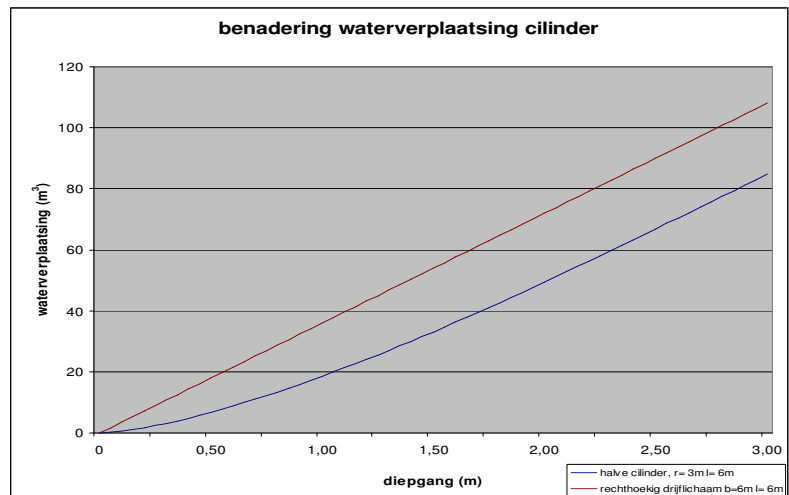


Afb. 3.4. Methode van Simphon.

Dit wordt gedaan voor alle deelgebieden. Als de oppervlakten van deze deelgebieden worden gesommeerd, wordt het oppervlakte van de rechterhelft van het drijflichaam gevonden. Vermenigvuldigen met $2 \cdot l_{\text{drijflichaam}}$ levert de waterverplaatsing op. Hoe kleiner Δy wordt genomen, hoe nauwkeuriger de methode is.

³ Bron[9] par. 4.3.4.

In grafiek 3.1 is deze methode gebruikt om de waterverplaatsing van een halve cilinder met een straal van 3 m te bepalen. Indien men nu de diepgang van deze cilinder wil bepalen bij een bepaalde belasting, berekent men eerst de voor deze belasting benodigde waterverplaatsing, vervolgens leest men uit de grafiek af welke diepgang hiermee correspondeert. Om het verschil met een rechthoekig drijflichaam aan te geven is ook de waterverplaatsing van een ponton van 6*6 m aangegeven.



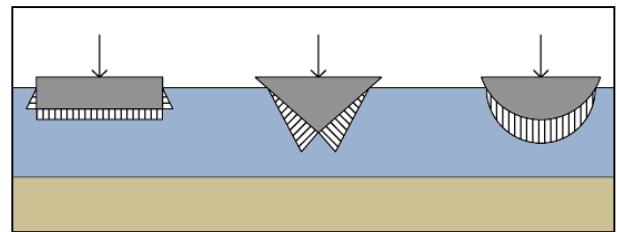
Grafiek 3.1. De waterverplaatsing van een halve cilinder met een straal van 3m en een lengte van 6m; vergeleken met de waterverplaatsing van een rechthoekig ponton van 6 x 6 x 3 m.

3.1.2 Waterdruk

Het water oefent een drukkracht op de constructie uit. De verticale component van de waterdruk maakt evenwicht met de zwaartekracht, de horizontale component van de waterdruk compenseert zichzelf (afb. 3.5). De waterdruk wordt gegeven door de volgende formule:

$$p = \gamma_w \cdot d \quad (3.4)$$

p = waterdruk (kN/m³)



Afb. 3.5. Waterdruk op een ponton.

3.1.3 Beddingconstante

De beddingconstante beschrijft het verband tussen vervorming en de (centrische) verticale belasting. Deze constante wordt gebruikt voor funderingen op een slappe ondergrond. Eerst zal de beddingconstante voor een fundering op staal worden afgeleid, vervolgens zal analoog daaraan de beddingconstante voor een drijvende fundering worden berekend.

1. Fundering op staal

De beddingconstante k voor een fundering op staal kan worden bepaald door de constructie te belasten met een kracht F , de spanning σ op de ondergrond te bepalen en vervolgens de zetting u te meten.

$$k = \frac{\sigma}{u}$$

k = beddingconstante (kN/m³)

σ = spanning (kN/m²)

u = zetting (m)

$$\sigma = \frac{F}{l \cdot b}$$

Hieruit volgt:

$$k = \frac{F}{l \cdot b \cdot u} \quad (3.5)$$

Voor een fundering op staal op een zandgrond varieert de grote van de beddingconstante tussen de $k = 10.000$ kN/m³ en $k = 50.000$ kN/m³.

2. Drijvende fundering

De beddingconstante voor een ponton komt overeen met die van een fundering op staal. De zetting u wordt vervangen door de diepgang d .

$$k = \frac{F}{l \cdot b \cdot d} \quad (3.6)$$

Hiermee kan de beddingconstante voor een ponton worden berekend.

a. Rechthoekig ponton

De diepgang voor een rechthoekig ponton kan worden berekend met (3.1):

$$d = \frac{F}{10 \cdot b \cdot l}$$

Substitueren van deze vergelijking in (3.6) levert op:

$$k = 10 \text{ kN/m}^3$$

Een drijvende fundering is dus ten minste duizend maal slapper dan een fundering op een zandgrond.

b. Driehoekvormige doorsnede

De diepgang voor een ponton met een driehoekvormige doorsnede kan worden berekend met (3.2):

$$d = \sqrt{\frac{F}{10 \cdot l \cdot \tan \alpha}}$$

Substitueren van deze vergelijking in (3.6) levert op:

$$k = \frac{\sqrt{10F}}{2d\sqrt{l \cdot \tan \alpha}}$$

c. Cilindervormige doorsnede

Voor de diepgang d van een cilinder is geen formule opgesteld. Deze wordt numeriek benaderd. Er zal daarom geen analytische beschrijving van de waarde van een beddingconstante voor een cilinder worden gegeven.

3. Vergelijken van de waarde voor k verschillende ponton vormen

Voor een rechthoekig ponton bleek k altijd een waarde van 10 te hebben. We vergelijken de waarde van k voor 3 soorten drijflichamen:

1. een ponton met een doorsnede van een *gelijkebenige* driehoek (hoek top driehoek: $\alpha = 60^\circ$)
2. een ponton met de doorsnede van een *gelijkzijdige* driehoek (hoek top driehoek: $\alpha = 120^\circ$)
3. een ponton met een doorsnede van een halve cilinder en een straal van 6 m. De waterverplaatsing van dit ponton is af te lezen uit grafiek 3.1.

De lengte van het drijflichaam bedraagt steeds 6,0 m. De voor k gevonden waarden staan in tabel 3.1.

vorm	F (kN)	d (m)	r (m)	b' (m)	α (graden)	k (kN/m ³)
driehoek-1	100	1,7	-	-	60	5,0
	200	2,4	-	-	60	5,0
	1000	5,4	-	-	60	5,0
driehoek-2	100	1,0	-	-	120	5,0
	200	1,4	-	-	120	5,0
	1000	3,1	-	-	120	5,0
halve cilinder	100	0,7	3,0	3,7	-	6,9
	200	1,1	3,0	4,6	-	7,0
	850	3,0	3,0	6,0	-	7,9

Tabel 3.1. De beddingconstante voor verschillende pontonvormen.

Het resultaat laat zich gemakkelijk verklaren. Als $k = 10$ is de waterverplaatsing voor een gegeven diepgang maximaal. Het drijflichaam heeft dan een rechthoekige vorm. Heeft een vergelijkbaar drijflichaam een driehoekvormige doorsnede, dan bedraagt de waterverplaatsing voor een even grote diepgang exact de helft ($A_{\text{driehoek}} = \frac{1}{2} A_{\text{rechthoek}}$). Bij eenzelfde belasting zal de ‘zetting’ dus twee maal zo groot zijn als die van een rechthoekig ponton. Een driehoekig ponton is dus tweemaal zo slap, de waarde van k bedraagt dus 5. De waarde van k voor een drijflichaam met een cilindervormige doorsnede zit hier tussen in, omdat zij meer water verplaatst dan een driehoek en minder dan een vierkant. Merk op dat de waarde voor k bij dit drijflichaam afhankelijk is van de belasting.

3.1.4 Drukingspunt

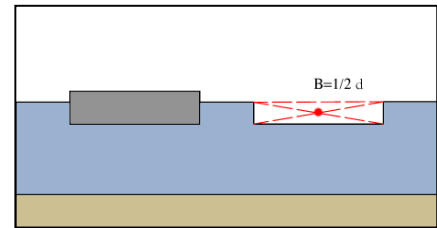
Een drijvend object zorgt voor een bepaalde waterverplaatsing. Het drukingspunt is het zwaartepunt van het verplaatste watervolume. Het drukingspunt is van belang, omdat in dit punt de resulterende oprijvende kracht aangrijpt. Voor de verschillende drijflichamen zal de positie van dit drukingspunt berekend worden, uitgaande van een centrisch of gelijkmatig belast drijflichaam.

a. rechthoekig drijflichaam

Het drukingspunt bevindt zich in het zwaartepunt van het verplaatste watervolume, hieruit volgt:

$$B_{\text{rechthoek}} = \frac{1}{2} d \quad (3.7)$$

B = drukingspunt, in (m) gemeten vanaf waterlijn.



Afb. 3.6. Drukingspunt rechthoekig ponton.

b. drijflichaam met driehoekvormige doorsnede

Het zwaartepunt van een driehoek wordt als volgt berekend:

$$z = \frac{S_y}{A}$$

z = positie zwaartepunt (m)
 S_y = statisch moment in het x-y vlak (m^3)

$$A_{\text{driehoek}} = \frac{1}{2} bh$$

$$S_y = \frac{1}{3} bh^2 \quad (\text{zie voor de afleiding: Bron [12] par. 3.1.4})$$

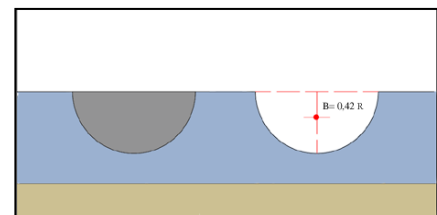
Substitueren van deze twee vergelijkingen levert $z = \frac{2}{3}h$ op (gemeten van top driehoek). Het drukingspunt van een gelijkbenige driehoek bevindt zich dus, vanaf de basis gezien, op een derde van de hoogte.

$$B_{\text{driehoek}} = \frac{1}{3} d \quad (3.8)$$

c. drijflichaam met cilindervormige doorsnede

Het zwaartepunt van een gedeelte van een halve cilinder bedraagt $\frac{4r}{3\pi}$, en kan worden benadert met $0,42r$.⁴

$$B_{\text{halve.cilinder}} = \frac{4r}{3\pi} \approx 0,42r \quad (3.9)$$



Afb. 3.8. Drukingspunt cilindervormig ponton.

Deze formule geldt in eerste instantie alleen als het cilindervormig drijflichaam tot aan het middelpunt van de cirkel in het water ligt (afb. 3.8).

⁴ Bron [12] par. 3.1.4

Indien het drijflichaam maar voor een deel in het water ligt, kan het drukingspunt worden bepaald met de met de regel van Simpson. Het zwaartepunt van de waterverplaatsing kan worden berekend met:

$$z = \frac{S_y}{A_{\text{doorsnede waterverplaatsing}}}$$

In par. 3.2.1. is aangegeven hoe het oppervlakte van deze doorsnede bepaald kan worden. Het statisch oppervlaktemoment S_y kan bepaald worden met de verschuivingsregel.

De deelgebieden in het beschouwde oppervlak hebben elk een eigen zwaartepunt. Eerst wordt het statisch moment van elk deelgebied t.o.v. M bepaald, vervolgens wordt het statisch moment van het totale oppervlak t.o.v. M bepaald (zie afb 3.9).

$$S_z^{1b} = A_{1b} \cdot a_{1b}$$

$$S_z^{2a} = A_{2a} \cdot a_{2a}$$

$$S_z^n = A_n \cdot a_n$$

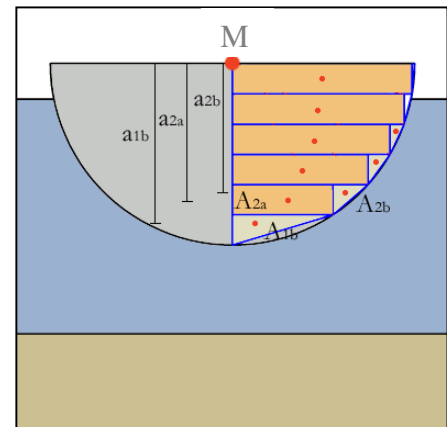
$$z_c = \frac{S_{\text{tot}}}{A_{\text{tot}}} = \frac{S_z^{1b} + S_z^{2a} + S_z^n}{A_{1b} + A_{2b} + A_n}$$

Dit kan niet alleen gedaan worden voor punt M, maar voor elke diepgang. Alleen de afstand van de het zwaartepunt van de deelgebieden tot de waterlijn zal hierbij veranderen.

Deze methode is toegepast om het drukingspunt te bepalen voor een cilindervormig drijflichaam met een straal van 3 m. Het resultaat is zichtbaar in grafiek 3.2. Het verband tussen de diepgang en de positie van het drukingspunt blijkt lineair te zijn.

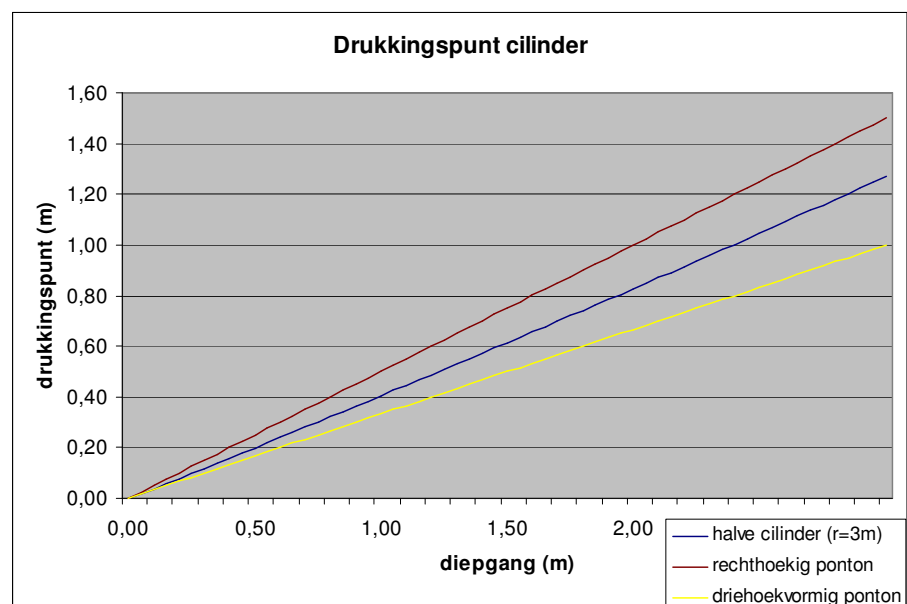
Er kan daarom uit deze numerieke analyse geconcludeerd worden dat de diepgang voor een cilindervormig drijflichaam benaderd kan worden met:

$$B_{\text{halve.cilinder}} \approx 0,42r \quad (3.10)$$



Afb. 3.9. Zwaartepunt bepalen met verschuivingsregel.

Bovendien is uit grafiek 3.2 af te lezen dat het drukingspunt voor een drijflichaam met een driehoekvormige doorsnede het dichtst onder het wateroppervlak ligt. Daarna volgt de cilinder. Het drukingspunt van een rechthoekig drijflichaam ligt het diepst.



Grafiek 3.2. Het drukingspunt voor een ponton met de doorsnede van een halve cilinder ($R=3\text{m}$, $l=6\text{m}$).

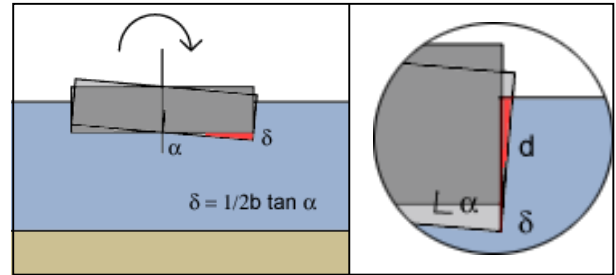
3.2 Moment en excentrische belasting

3.2.1 Rotatie

Als er een excentrische belasting of een moment op de constructie wordt uitgeoefend, zal het ponton roteren. Bij een rotatie onder een hoek α kan voor een rechthoekig ponton de minimale en maximale diepgang als volgt worden berekend:

$$\begin{aligned} d_{\min} &= (d - \delta) \cos \alpha \\ d_{\max} &= (d + \delta) \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.11)$$

met $\delta = \frac{1}{2} b \tan \alpha$, zie afbeelding 3.10



Afb. 3.10. Maximale diepgang: $(d + \delta) \cos$

De maximale en minimale waterdruk op de onderzijde wordt dan:

$$\begin{aligned} p_{\min} &= 10(d - \delta) \cos \alpha \\ p_{\max} &= 10(d + \delta) \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.12)$$

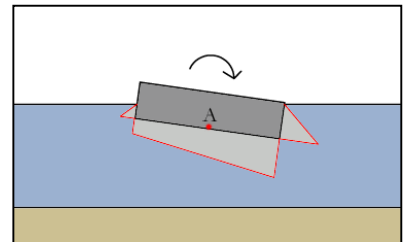
3.2.2 Oprichtend moment

Als het ponton roteert, volgt uit formule (3.12) dat de waterdruk op de onderzijde van het ponton niet meer constant is. Als gevolg van deze ongelijke waterdruk ontstaat er een oprichtend moment, dat evenwicht maakt met het opgelegde moment. De grootte van dit oprichtende moment wordt hieronder afgeleid.

Er worden eerst een tweetal aannames gedaan die de situatie vereenvoudigen. Aanvankelijk gaan we ervan uit dat het ponton roteert om de kiel⁵ (punt A in afb. 3.11), en dat het zwaartepunt van het object met dit punt samenvalt. In werkelijkheid ligt het zwaartepunt hoger en roteert het ponton niet om de kiel, maar om het waterlijnzwaartepunt.⁶ In par. 3.4.2 zal worden gezien welke consequenties het heeft als er uitgegaan van een correcte positie van het zwaartepunt en het rotatiecentrum

Stap 1

Als gevolg van de scheefstand ontstaat een ongelijke waterdruk aan de onderzijde en de zijkanten van het ponton. De resulterende kracht van de waterdruk zorgt voor een oprichtend moment. Eerst wordt de verticale component bekeken en vervolgens de horizontale bijdrage.



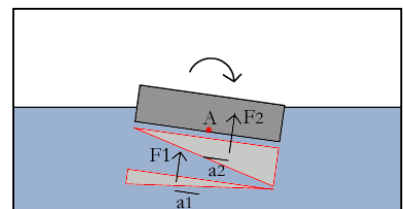
Afb. 3.11. Ongelijke waterdruk ten gevolge van rotatie.

Stap 2

De van de waterdruk op de onderzijde van het ponton aan het moment wordt gesplitst in twee driehoeken (afb. 3.12).

Bijdrage driehoek 1

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2} b \cdot l \cdot p_{\min} \\ F_1 &= \frac{1}{2} b \cdot l \cdot 10(d - \delta) \cos \alpha \end{aligned}$$



Afb. 3.12. Het bepalen van de verticale component van M_{opr} .

⁵ Kiel: laagste punt van een onderwaterschip (in horizontale toestand)

⁶ Bron [18] par. 4.6.

F_1 grijpt aan in het zwaartepunt van de driehoek (afb. 3.13):

$$a_1 = \frac{1}{2}b - \frac{1}{3}b = \frac{1}{6}b$$

$$M_1 = -F_1 \cdot a_1$$

$$M_1 = -\frac{b^2 \cdot l \cdot 10(d - \delta) \cos \alpha}{12}$$

Bijdrage driehoek 2

$$F_2 = \frac{1}{2}b \cdot l \cdot p_{\max}$$

$$F_2 = \frac{1}{2}b \cdot l \cdot 10(d + \delta) \cos \alpha$$

$$a_2 = \frac{1}{6}b$$

$$M_2 = F_2 \cdot a_2$$

$$M_2 = \frac{b^2 \cdot l \cdot 10(d + \delta) \cos \alpha}{12}$$

Stap 3

Nu M_1 en M_2 bekend zijn, kan M_{vert} berekend worden

$$M_{\text{vert}} = M_1 + M_2$$

$$M_{\text{vert}} = -\frac{b^2 \cdot l \cdot 10(d - \delta) \cos \alpha}{12} + \frac{b^2 \cdot l \cdot 10(d + \delta) \cos \alpha}{12}$$

$$M_{\text{vert}} = \frac{b^2 \cdot l \cdot 10 \cdot \delta \cos \alpha}{6}$$

Stap 4

Door de waterdruk aan de zijanten van het ponton ontstaat ook een moment (afb. 3.14). De bijdrage hiervan wordt hieronder berekend.

Bijdrage driehoek 1

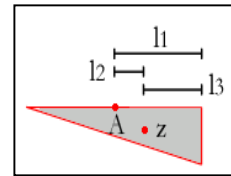
$$F_3 = \frac{1}{2}(d - \delta) \cdot l \cdot p_{\min}$$

$$b_1 = \frac{1}{3}(d - \delta)$$

$$M_3 = -F_3 \cdot b_1$$

$$M_3 = -\frac{(d - \delta)^2 l \cdot p_{\min}}{6}$$

$$M_3 = -\frac{10 \cdot l (d - \delta)^3 \cos \alpha}{6}$$

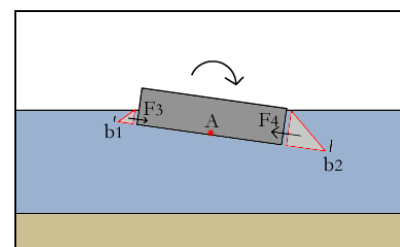


Afb. 3.13. Afstand AZ

$$AZ = L1 - L3$$

$$L1 = \frac{1}{2}b \quad L3 = \frac{1}{6}b$$

$$AZ = \frac{1}{6}b$$



Afb. 3.14. De invloed van de horizontale

$$F_4 = \frac{1}{2}(d + \delta) \cdot l \cdot p_{\max}$$

$$M_4 = F_4 \cdot b_2$$

$$M_4 = \frac{10 \cdot l (d + \delta)^3 \cos \alpha}{6}$$

Nu kan het moment M_{hor} worden berekend.

Deze term substitueren geeft:

Nu M_{vert} en M_{hor} bekend zijn, kan M_{opr} worden berekend. M_{vert} en M_{hor} maken samen evenwicht met M_{uitw} (afb.3.15).

Hierin wordt vervolgens (3.1) gesubstitueerd: $10 = F/dbl$

De volgende stap is het substitueren van formule (3.5): $\delta = \frac{1}{2} b \tan \alpha$. Met $\tan \alpha = \sin \alpha / \cos \alpha$ kan dit ook geschreven worden als:

Afb. 3.15. Evenwichtsituatie.

$$M_{opr} = \frac{F \cdot \sin \alpha \cdot (b^2 + 6d^2 + 2\delta^2)}{12d}$$

$$M_{opr} = F \sin \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d + \frac{\delta^2}{6d} \right)$$

Opnieuw wordt $\delta = \frac{1}{2} b \tan \alpha$ gesubstitueerd. $\delta^2 = \frac{1}{4} b^2 (\tan \alpha)^2$

$$M_{opr} = F \sin \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d + \frac{b^2 (\tan \alpha)^2}{24d} \right) \quad (3.13)$$

Hier moet worden opgemerkt dat bij de bovenstaande afleiding ervan uit is gegaan dat de belasting aangrijpt in de kiel van het ponton. Als het zwaartepunt hoger ligt, geldt een andere formule, deze zal in par 3.4.1 worden afgeleid.

3.2.3 Veerconstante

Een veerconstante beschrijft het verband tussen de grootte van het opgelegde moment en de rotatiehoek van de fundering.

$$C = \frac{M}{\alpha} \quad (3.14)$$

C = veerconstante (kNm/rad)

α = hoekverdraaiing (rad)

Met (3.13) en (3.14) kan C voor een drijvend ponton bepaald worden.

$$C \cdot \alpha = F \sin \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d + \frac{b^2 (\tan \alpha)^2}{24d} \right)$$

Voor kleine hoeken kan gesteld worden dat $\alpha \approx \tan \alpha \approx \sin \alpha$ (zie tabel 3.2). De bovenstaande formule kan dus ook als volgt worden geschreven:

$$C = F \cdot \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d + \frac{b^2 (\tan \alpha)^2}{24d} \right)$$

α (deg)	α (rad)	$\sin \alpha$	$\tan \alpha$	$(\tan \alpha)^2$
1	0,017	0,017	0,017	0,000
3	0,052	0,052	0,052	0,003
5	0,087	0,087	0,087	0,008
10	0,175	0,174	0,176	0,031
15	0,262	0,259	0,268	0,072
20	0,349	0,342	0,364	0,132
50	0,873	0,766	1,192	1,420

Tabel 3.2. De waarden van de sinus en tangus van α voor kleine hoeken.

De grootte van de veerconstante is blijkens de bovenstaande formule ook afhankelijk van de hoekverdraaiing. Uit tabel 3.1 blijkt echter dat de term $(\tan \alpha)^2$ voor kleine hoeken ongeveer nul bedraagt. Aangezien het ponton in de UGT maximaal 5° mag roteren,⁷ is de bijdrage van deze term zo klein dat deze kan worden verwaarloosd. De veerconstante wordt dan gegeven met:

$$C = F \cdot \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d \right) \quad (3.15)$$

⁷ Zie hoofdstuk 5 par. 5.1.

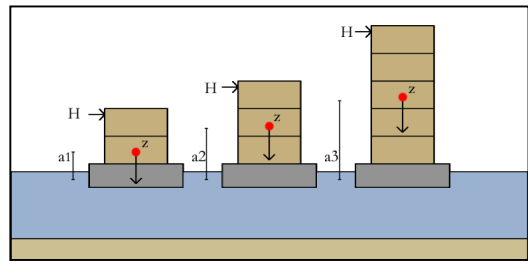
3.3 Tweede orde effect

Tot nog toe is ervan uitgegaan dat de belasting aangrijpt in de kiel van het ponton. Die aanname gaat in de praktijk echter niet op. De zwaartekracht grijpt aan in het zwaartepunt van de constructie. De invloed van de hoogte van het zwaartepunt wordt in deze paragraaf onderzocht.

3.3.1 Inleiding

De positie van het zwaartepunt Z wordt bepaald door de massa van de bovenbouw en de massa van het drijflichaam. Hoe hoger men bouwt, des te hoger ligt het zwaartepunt van de constructie.

We bestuderen de volgende belastingssituatie: Een drijvende gebouw wordt belast met een horizontale kracht H (afbeelding 3.16). Indien het zwaartepunt van de constructie in de kiel van het ponton zou liggen –hetgeen tot nu toe steeds werd aangenomen– dan zou het totale opgelegde moment slechts $H \cdot l$ bedragen (met l afstand werklijn kracht en de kiel).



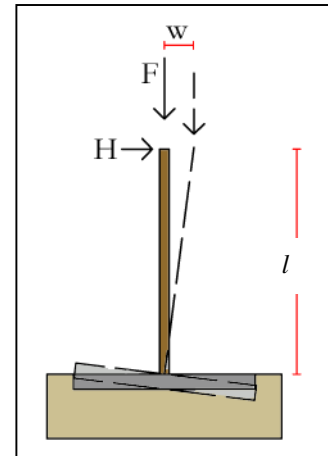
Afb. 3.16. Hoe hoger het zwaartepunt ligt, hoe groter de consequenties zullen zijn als het zwaartepunt zich verplaatst.

Indien het zwaartepunt echter hoger dan de kiel ligt, zal het volgende gebeuren: Als gevolg van de horizontale kracht roteert het gebouw, hierdoor verplaatst de resulterende zwaartekracht F_z , waardoor er een extra moment ontstaat. Uit afbeelding 3.16 blijkt dat dit ‘extra moment’ zal toenemen naarmate het zwaartepunt hoger ligt, omdat de arm van het moment als gevolg van de rotatie zal toenemen.

Om het gedrag van het zich verplaatsende zwaartepunt te bepalen, zal eerst de theorie behandeld worden van een oneindig stijve staaf, die is ingeklemd in een verende constructie. Deze theorie is relevant, omdat een drijvend gebouw ook als zodanig geschematiseerd zou kunnen worden. Vervolgens wordt deze theorie toegepast op een drijvend gebouw.

3.3.2 Een oneindig stijve staaf ingeklemd in een verende fundering

Stel dat een oneindig stijve staaf met een lengte l verend wordt ingeklemd in een fundering met een veerconstante C . De staaf wordt op de top centrisch belast met kracht een F en een horizontale kracht H (afbeelding 3.17).



Afb. 3.17. Een oneindig stijve staaf, ingeklemd in een verende fundering.

Stap 1

De fundering wordt belast met een moment $M = H \cdot l$

Als gevolg hiervan roteert de fundering onder een hoek α :

$$\alpha = \frac{M}{C}$$

Stap 2

Als gevolg hiervan ondergaat de top van de staaf een horizontale verplaatsing w ter grote van:

$$w = l \cdot \sin \alpha \approx l \cdot \alpha$$

(voor kleine hoeken, indien α in radialen, zie tabel 3.2)

Met deze verplaatsing ontstaat een extra moment:

$$\delta M_1 = F \cdot w$$

Stap 3

Het toegenomen moment zorgt voor een grotere hoekverdraaiing:

$$\delta \alpha_1 = \frac{\delta M_1}{C}$$

Als gevolg hiervan neemt de verplaatsing toe met: $\delta w_1 = l \cdot \delta \alpha_1$

Stap 4

$$\delta M_2 = F \cdot \delta w_1$$

$$\delta a_2 = \frac{\delta M_2}{C}$$

$$\delta w_2 = l \cdot \delta \alpha_2$$

Het bepalen van het maximaal moment.

Dit proces zal blijven doorgaan totdat de constructie bezwijkt of totdat δw_n oneindig klein is geworden. De toename van het moment ten gevolge van vervormingen wordt het tweede orde effect genoemd. Om na te gaan of de constructie als gevolg van het tweede orde effect bezwijkt, wordt de verhouding tussen w en δw_1 gedefinieerd als n .

$$\delta w_1 = \frac{w}{n}$$

Hieruit volgt:

$$\delta w_2 = \delta w_1 / n = w / n^2$$

$$\delta w_3 = w / n^3$$

Er zijn hier drie situaties denkbaar:

- $n < 1$ De toename van het moment wordt iedere stap kleiner
- $n = 1$ De toename van het moment is ieder stap gelijk
- $n > 1$ De toename van het moment wordt ieder stap groter

$n=1$ is hier de kritische situatie. De groei van het moment is constant, dus uiteindelijk zal de constructie bezwijken. Als $n < 1$ groeit het moment naar een bepaalde waarde die benaderd kan worden. Als de constructie dit totale moment kan opnemen, is zij stabiel. Om dit totale moment te benaderen moet de som van de verplaatsingen worden berekend:

$$\sum w = w + \frac{w}{n} + \frac{w}{n^2} + \frac{w}{n^3} + \dots$$

$$\sum w = \frac{n}{n-1} w$$

$$M_{\text{tot}} = H \cdot l + F \cdot \frac{n}{n-1} w$$

$$\boxed{M_{\text{tot}} = \frac{n}{n-1} M_0} \quad (3.16)$$

De term $n/n-1$ wordt de vergrotingsfactor genoemd.

Het bepalen van n

Hierboven is δw_1 gedefinieerd als w/n . Als we in deze vergelijking de formules $\delta w_1 = l \cdot \delta \alpha_1$ $\delta \alpha_1 = \delta M_1 / C$ en $\delta M_1 = F \cdot w$ substitueren, levert dit het volgende op:

$$l \cdot \delta a_1 = \frac{w}{n}$$

$$l \cdot \frac{F \cdot w}{C} = \frac{w}{n}$$

$$n = \frac{C}{F \cdot l} \quad (3.17)$$

Hieruit blijkt dat n afhankelijk is van de veerconstante, de kracht en de hoogte waarop deze kracht aangrijpt. Als $n = 1$ bezwijkt de constructie. Hiermee kan de kritische hoogte en de kritische kracht berekend worden.

$$l_{\text{krit}} = \frac{C}{F} \quad (3.18)$$

$$F_{\text{krit}} = \frac{C}{l} \quad (3.19)$$

Worden deze formules in (3.17) gesubstitueerd dan blijkt dat n ook als volgt bepaald kan worden:

$$n = \frac{F_{\text{krit}}}{F} \quad (3.20)$$

$$n = \frac{l_{\text{krit}}}{l} \quad (3.21)$$

3.3.3 Het tweede orde effect bij een ponton

De bovenstaande theorie kan ook gebruikt worden voor een ponton. De veerconstante van een drijvend object is vele malen kleiner dan die van een conventioneel gefundeerd gebouw. Het gebouw staat eigenlijk op een extreem slappe fundering. Als gevolg hiervan wordt het tweede orde effect voornamelijk bepaald door de rotatie van het ponton. De bijdrage van vervormingen van de bovenbouw zijn in vergelijking hiermee zo klein dat ze doorgaans verwaarloosbaar zijn.

Bij de in paragraaf 3.3.2 behandelde theorie bleek dat afstand l van belang was voor het bepalen van het tweede orde effect. Afstand l was de van het aangrijpingspunt van de belasting tot het rotatiecentrum van de fundering. Bij de onderstaande afleiding is de kiel van het ponton genomen als het rotatiecentrum.

Als voor een drijvende constructie met een belasting F bepaald moet worden wat de kritische hoogte van het zwaartepunt is, kan dit worden bepaald met (3.18):

$$l_{\text{krit}} = \frac{C}{F}$$

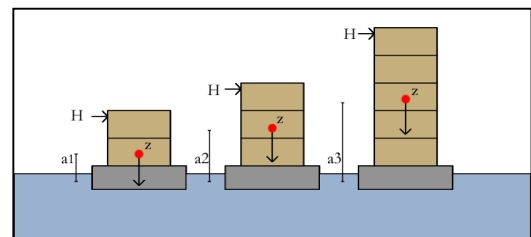
In par. 3.2.3 is afgeleid dat voor een rechthoekig ponton C berekend kan worden met:

$$C = F \cdot \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d \right)$$

Wordt dit gesubstitueerd in formule (3.18) dan krijgen we voor l_{krit} (gemeten van de kiel van het ponton):

$$l_{\text{krit}} = \frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d \quad (3.22)$$

Uit deze formule blijkt dat l_{krit} afhankelijk is van de diepgang van het ponton en de breedte van het ponton waarbij de laatste parameter een kwadratische invloed heeft. Als l_{krit} bekend is, kan met formule (3.21) n worden bepaald. Als n bekend is, kan de vergrotingsfactor worden berekend en met (3.16) M_{tot} worden bepaald.



Afb. 3.18. Wat is de kritische hoogte van het zwaartepunt bij een bepaald ponton?

3.4 Statische stabiliteit

Er kan wat betreft de stabiliteit van een gebouw onderscheid gemaakt worden tussen statische en dynamische stabiliteit. Statische stabiliteit heeft te maken met een (langdurige) horizontale of excentrische verticale belasting. Als een drijvend gebouw statisch stabiel is, betekent dit dat het gebouw onder invloed van de te verwachten belastingen niet zal kapseizen of bezwijken. Dynamische stabiliteit heeft daarentegen te maken met golfbewegingen op het wateroppervlak. Als gevolg daarvan kan een gebouw in beweging komen. Indien een gebouw dynamisch stabiel is, zal het gebouw onder invloed van de golfbewegingen niet hoog worden opgeslingerd. In deze paragraaf komt de statische stabiliteit aan de orde, in par. 4.4 wordt de dynamische stabiliteit behandeld

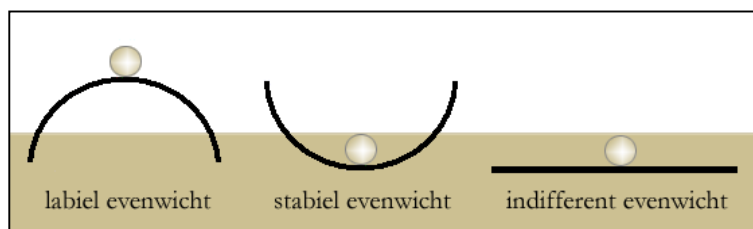
3.4.1 Stabiliteit en scheefstand

Als een stilstaand lichaam in evenwicht is, zijn er drie evenwichtvoorwaarden waaraan voldaan wordt:

$\Sigma F_{\text{hor}}=0$, $\Sigma F_{\text{vert}}=0$ en $\Sigma M=0$. Wanneer dit evenwicht wordt verstoord, zijn er drie reacties mogelijk:

- o het lichaam zal terug keren naar de evenwichtstoestand (stabiel evenwicht)
- o het lichaam zal niet terugkeren naar de evenwichtstoestand (labiel evenwicht)
- o het lichaam zal een nieuw evenwicht vinden in de verplaatste toestand (indifferent evenwicht)

Voor een drijvend gebouw is een stabiel evenwicht vereist. Stabiliteit kan beschreven worden als de mate waarin een object wil terugkeren naar de stabiele evenwichtstoestand. Een drijvend gebouw moet verstoringen van het evenwicht kunnen opvangen.



Afb. 3.19. Drie vormen van evenwicht.

Als een drijvend gebouw stabiel is, kan er als gevolg van opgelegde belastingen wel een scheefstand ontstaan, maar zal het gebouw niet kapseizen. Tevens zal het gebouw bij het verwijderen van deze belastingen weer terugkeren naar de eerdere evenwichtstoestand. Scheefstand is een begrip dat de maat van rotatie onder een bepaalde belasting beschrijft, terwijl stabiliteit een begrip is dat beschrijft of een drijvend gebouw een bepaalde belasting al dan niet kan verdragen.

3.4.2 Zwaartepunt, drukingspunt en metacentrum

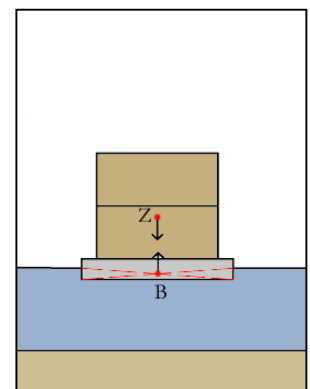
Wanneer een drijvende constructie belast wordt met een centrische of gelijkmatige verticale belasting, kan van de evenwichtstoestand het volgende gezegd worden:

$$\Sigma F_{\text{hor}}=0$$

$$\Sigma F_{\text{vert}}=0 \quad F_{\text{opw}}=F_z$$

$$\Sigma M=0 \quad M_{\text{uitw}}=0 \text{ en } M_{\text{opr}}=0$$

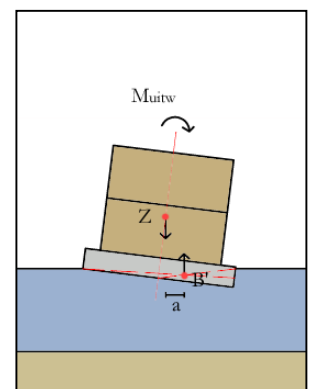
Het drukingspunt ligt exact onder het zwaartepunt van de constructie (afb. 3.20)



Afb. 3.20. Evenwichtssituatie.

Indien we een uitwendig moment op de constructie aanbrengen, zal de constructie roteren. Hierdoor verplaatsen het zwaartepunt en het drukingspunt naar links of naar rechts. Het drukingspunt verplaatst zich echter meer dan het zwaartepunt, waardoor F_z en F_{opw} samen een koppel vormen dat zorgt voor een oprichtend moment. Uit afb. 3.21 blijkt dat dit moment tegengesteld is aan M_{uitw} , waardoor er een evenwichtssituatie ontstaat. In par. 3.2.2 is reeds met behulp van de waterdruk afgeleid dat dit oprichtend moment, indien het zwaartepunt in de kiel ligt, berekend kan worden met:

$$M_{\text{opr}} = F_z \sin \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d + \frac{b^2 (\tan \alpha)^2}{24d} \right) \quad (3.13)$$



Afb. 3.21. Als de constructie roteert vormen F_z en F_{opw} samen een koppel.

Indien er nu vanuit wordt gegaan dat het zwaartepunt op zijn eigenlijke positie ligt (en dus niet meer in de kiel), blijkt uit afbeelding 3.21 dat we de grootte van het oprichtend koppel ook kunnen bepalen met:

$$M_{opr} = F_z \cdot a \quad (3.23)$$

Deze afstand a kan als volgt berekend worden: Het snijpunt van de werklijn van de opdrijvende kracht met de symmetrieas noemen we het metacentrum M . De afstand tussen het zwaartepunt Z en het metacentrum M noemen we h_m (afbeelding 3.22).

Hieruit volgt:

$$a = \sin \alpha \cdot h_m$$

$$M_{opr} = F_z \cdot \sin \alpha \cdot h_m \quad (3.24)$$

Hoe h_m kan worden berekend, komt in par. 3.4.3 aan de orde.

In afbeelding 3.22 is te zien dat de krachten F_z en F_{opw} een oprichtend koppel vormen. Indien er nu op het gebouw een aantal bouwlagen worden toegevoegd, zal het zwaartepunt hoger komen te liggen. Stel dat er zoveel bouwlagen worden toegevoegd dat het zwaartepunt en het metacentrum samenvallen (afbeelding 3.23). Dit zou tot gevolg hebben dat F_z en F_{opw} geen koppel meer vormen. Het gevolg is een situatie van indifferent evenwicht (de waterdruk zorgt nog wel voor een M_{opw}).

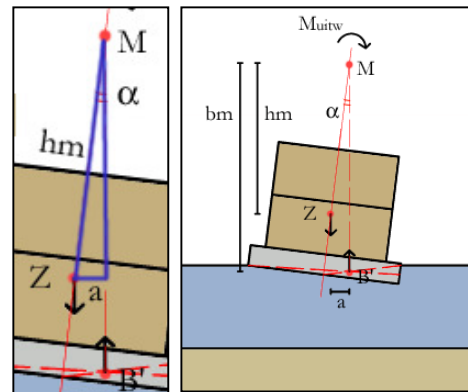
Indien er nu nog meer bouwlagen worden toegevoegd, zal het zwaartepunt boven het metacentrum komen te liggen. Het gevolg is dat F_z en F_{opw} wel een koppel vormen, maar dat dit koppel nu met M_{uitw} gaat meewerken (afbeelding 3.24). Het gevolg is dat M_{uitw} en het moment $F_z \cdot a$ zorgen ervoor dat de constructie kapseist. Als Z boven M ligt, krijgt de metacentrumhoogte h_m daarom een negatieve waarde.

Uit het bovenstaande kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

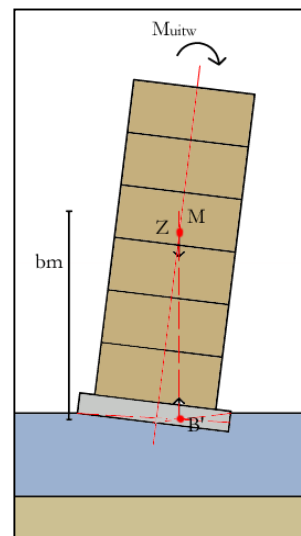
- Voor een stabiele constructie dient het metacentrum (M) boven het zwaartepunt (Z) te liggen.
- Hoe groter de afstand h_m is, hoe meer moeite het kost het ponton te roteren, hoe kleiner de scheefstand van het ponton bij een bepaald opgelegd moment zal zijn.
- Een hoog metacentrum en een laag zwaartepunt levert een hogere waarde van h_m op wat gunstig is voor de stabiliteit.

3.4.3 De hoogte van het metacentrum

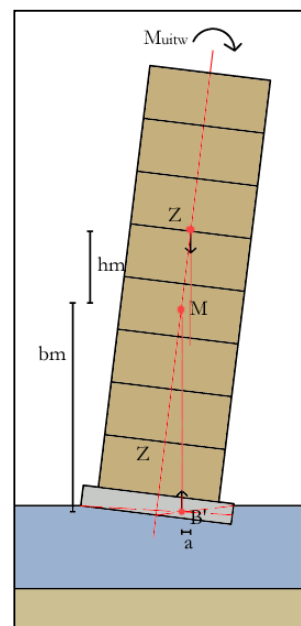
Het metacentrum blijkt een belangrijk gegeven te zijn voor de statische stabiliteit van een drijvend object. Hierboven is het metacentrum gedefinieerd als snijpunt van de opdrijvende kracht met de symmetrieas. Deze definitie geeft echter meer aan hoe het punt gevonden wordt dan dat het duidelijk maakt wat het voorstelt. De bovenstaande beschouwing laat echter zien dat het metacentrum eigenlijk de kritische hoogte van het zwaartepunt voorstelt. Als het zwaartepunt boven dit punt ligt, is de constructie instabiel geworden en zal zij kapseizen.



Afb. 3.22. Het metacentrum: snijpunt symmetrieas en werklijn opwaartse kracht.



Afb. 3.23. Het metacentrum en het zwaartepunt vallen samen, geen oprichtend koppel meer van F_z en F_{opw} .



Afb. 3.24. Het zwaartepunt ligt boven het metacentrum. Er ontstaat nu een koppel dat met M_{uitw} mee gaat werken.

In par 3.3.3 is met behulp van de theorie voor een oneindig stijf verend ingeklemde staaf het gedrag van een drijvende fundering beschreven. Dit leverde een kritische hoogte van het zwaartepunt voor een drijvend object op. Vanaf dit punt zou het tweede-orde effect ervoor zorgen dat het moment bleef aangroeien ($n > 1$). De in paragraaf 3.4.1 gegeven beschouwing is hiermee analoog. Boven het metacentrum M zorgen M_{uitw} en het koppel $F_z \cdot a$ voor een steeds toenemend moment waardoor de constructie kapseist. De kritische hoogte van het zwaartepunt werd met formule (3.22) gedefinieerd als:

$$l_{krit} = \frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d$$

l_{krit} wordt hierbij vanaf de kiel gemeten. Hieronder zal worden aangetoond dat de kritische hoogte van het zwaartepunt overeenkomt met de positie van het metacentrum.

Het metacentrum is een uit de scheepsbouw afkomstig begrip. De hoogte van het metacentrum kan worden bepaald met de formule van Scribanti:

$$BM = \frac{J_u}{\nabla} \left(1 + \frac{1}{2} (\tan \alpha)^2 \right) \quad (3.25)$$

BM = afstand drukingspunt – metacentrum (m)
 J_u = kwadratisch oppervlaktemoment van de waterlijndoorsnede om de langsas (m^4)
 ∇ = waterverplaatsing (m^3)

$$\text{Met: } J_u = \frac{1}{12} b^3 l$$

Indien de formule van Scribanti wordt gebruikt voor een rechthoekig drijflichaam, wordt de positie van het metacentrum gegeven door:

$$BM = \frac{b^3 l}{12 \cdot d \cdot b \cdot l} \left(1 + \frac{1}{2} (\tan \alpha)^2 \right)$$

$$BM = \frac{b^2}{12d} \left(1 + \frac{1}{2} (\tan \alpha)^2 \right)$$

De laatste term geeft aan dat de positie van het metacentrum enigszins afhankelijk is van de rotatiehoek. Aangezien echter voor drijvende gebouwen slechts een beperkte rotatiehoek is toegestaan (5°), kan deze laatste term daarom blijkens tabel 3.2 verwaarloosd worden.

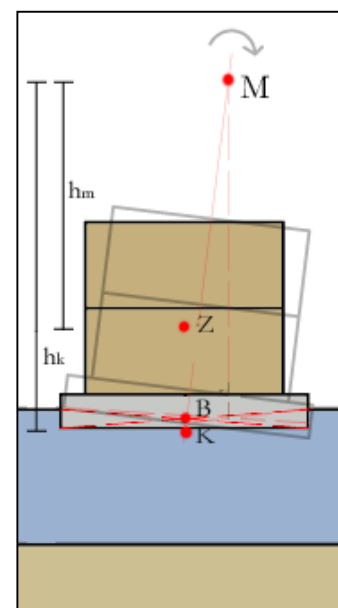
$$BM = \frac{b^2}{12d}$$

Merk op dat de positie van het metacentrum in deze formule wordt gemeten vanuit het drukingspunt. Indien we de hoogte van het metacentrum willen weten ten opzichte van de kiel dan levert dit voor een rechthoekig drijflichaam de volgende formule op:

$$KM = \frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d \quad (3.26)$$

Het drukingspunt ligt bij een rechthoekig ponton immers op $\frac{1}{2}d$. Merk op dat het drukingspunt bij een rotatie een kleine verticale verplaatsing ondergaat. Deze verplaatsing mag voor kleine rotaties echter worden verwaarloosd.

Formule (3.26) komt overeen met de in par. 3.3.3 afgeleide hoogte van l_{krit} . In 3.4.1 is de afstand tussen Z en M h_m genoemd. In overeenstemming hiermee wordt de afstand tussen het metacentrum en de kiel als h_k



Afb. 3.25 Afstand h_m en h_k .

gedefinieerd (afb. 3.25).

$$h_k = \frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d$$

$$h_{m \text{ rechthoek}} = \frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z \quad (3.27)$$

h_m = afstand zwaartepunt-metacentrum (m)

h_z = afstand zwaartepunt- kiel (m)

Merk op dat formule (3.27) geldt voor een richting. Als de breedte en de lengte van een ponton verschillend zijn, zal dit voor de verschillende richtingen (x en y) ook een verschillende metacentrumhoogte opleveren.

Tenslotte komen we nog even terug op formule (3.24), omdat deze in de literatuur ook in een andere variant voorkomt. Sommige bronnen werken met de formule $M_{opr} = F_z \cdot \sin \alpha \cdot h_m$, terwijl andere bronnen werken met de formule $M_{opr} = F_z \cdot \sin \alpha \cdot h_k$. De term h_k is hier de afstand tussen de kiel en het metacentrum.

In de eerste formule is de werkelijke positie van het zwaartepunt reeds verdisconteerd, terwijl de tweede formule ervan uitgaat dat het zwaartepunt in de kiel ligt. In feite zijn beide varianten correct, maar het verschil zit hierin dat in de eerste formule het tweede orde effect al wordt meegenomen, terwijl bij de tweede variant het uitwendige moment nog met een vergrotingsfactor vermenigvuldigd zal moeten worden. Deze twee verschillende manieren om het tweede orde effect mee te nemen zijn weergegeven in bijlage [2]. Dit verschil dient men zich te realiseren om te voorkomen dat het tweede orde effect twee keer wordt meegenomen.

3.4.4 De hoogte van het metacentrum voor andere vormen drijflichaam

Nu de positie van het metacentrum voor een rechthoekig drijflichaam berekend is, zal met de formule van Scribanti ook de hoogte van het zwaartepunt voor andere vormen drijflichaam berekend worden.

A. Driehoekvormige doorsnede

1. Metacentrumhoogte in x-richting

$$BM = \frac{J_u}{\nabla}$$

$$J_u = \frac{1}{12} b'^3 l$$

b' = waterlijnbreedte

β = halve hoek top driehoek (afbeelding 3.23).

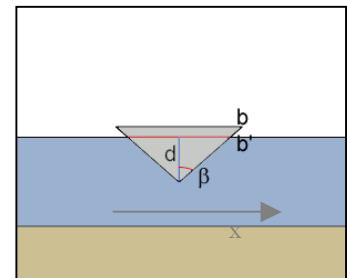
$b' = 2d \tan \beta$ (zie afb. 3.26) en $\nabla = ld^2 \tan \beta$

$$BM = \frac{1 \cdot (2d \tan \beta)^3}{12 \cdot ld^2 \tan \beta}$$

$$BM = \frac{2d (\tan \beta)^2}{3}$$

$$h_k = \frac{2d (\tan \beta)^2}{3} + \frac{2}{3}d$$

$$h_{m \text{ driehoek } x} = \frac{2d (\tan \beta)^2}{3} + \frac{2}{3}d - h_z \quad (3.28)$$



Afb. 3.26 Drijflichaam met driehoekvormige doorsnede.

2. Metacentrumhoogte in y-richting

$$BM = \frac{J_u}{\nabla}$$

$$J_u = \frac{1}{12} b' l^3$$

$$BM = \frac{2d \tan \beta \cdot l^3}{12 \cdot l d^2 \tan \beta}$$

$$h_k = \frac{l^2}{6d} + \frac{2}{3}d$$

$$\boxed{h_{m \text{ driehoek } y} = \frac{l^2}{6d} + \frac{2}{3}d - h_z} \quad (3.29)$$

B. Cilindervormige doorsnede

1. Metacentrumhoogte in x-richting

$$BM = \frac{J_u}{\nabla}$$

$$J_u = \frac{1}{12} b'^3 l$$

$$b' = 2r \sin \varphi$$

$$\nabla = \frac{1}{2} r^2 l (2\varphi - \sin 2\varphi)$$

$$BM = \frac{16r^3 l \cdot (\sin \varphi)^3}{12r^2 l (2\varphi - \sin 2\varphi)}$$

$$BM = \frac{4r (\sin \varphi)^3}{3(2\varphi - \sin 2\varphi)}$$

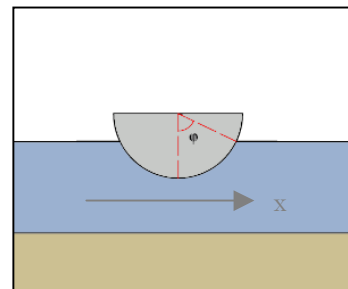
$$h_k = \frac{4r (\sin \varphi)^3}{3(2\varphi - \sin 2\varphi)} + 0,58r$$

$$\boxed{h_{m \text{ cilinder } x} = \frac{4r (\sin \varphi)^3}{3(2\varphi - \sin 2\varphi)} + 0,58r - h_z} \quad (3.30)$$

2. Metacentrumhoogte in y-richting

Op eenzelfde wijze kan de positie van het metacentrum in de andere richting afgeleid worden. Het resultaat is dan:

$$\boxed{h_{m \text{ cilinder } y} = \frac{\sin \varphi \cdot l^2}{3r(2\varphi - \sin 2\varphi)} + 0,58r - h_z} \quad (3.31)$$



Afb. 3.27. Middelpuntshoek φ .

C. Catamaran

1. Metacentrumhoogte in x-richting

Uitgangspunt voor deze afleiding is dat de twee drijflichamen identiek zijn.

$$BM = \frac{J_u}{\nabla}$$

$$\nabla = b_{\text{tot}} \cdot d \cdot l$$

$$b_{\text{tot}} = \text{totale breedte (} b_{\text{tot}} = 2b_1, \text{ zie afb. 3.28)}$$

Het kwadratisch oppervlaktemoment van het drijflichaam kan berekend worden met de regel van Steiner.

$$J_{u \text{ eigen}} = J_{u \text{ drijflichaam 1}} + a_1^2 \cdot A_{\text{drijflichaam 1}} + J_{u \text{ drijflichaam 2}} + a_2^2 \cdot A_{\text{drijflichaam 2}}$$

a_1 = afstand tussen het gezamenlijke zwaartepunt en zwaartepunt drijflichaam 1

$A_{\text{dr. 1}}$ = oppervlakte van de waterdoorsnede

Omdat de drijflichamen identiek zijn kan dit vereenvoudigd worden tot:

$$J_{u \text{ eigen}} = 2J_{u \text{ drijflichaam 1}} + 2(a_1^2 \cdot A_{\text{drijflichaam 1}})$$

$$J_{u \text{ eigen}} = \frac{1}{6} b_1^3 l + 2a_1^2 \cdot b_1 \cdot l$$

$$BM = \frac{b_1^3 l + 12a_1^2 \cdot b_1 \cdot l}{12b_1 \cdot d \cdot l}$$

$$h_{m \text{ catamaran } x} = \frac{b_1^2 + 12a_1^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z \quad (3.32)$$

2. Metacentrumhoogte in y-richting

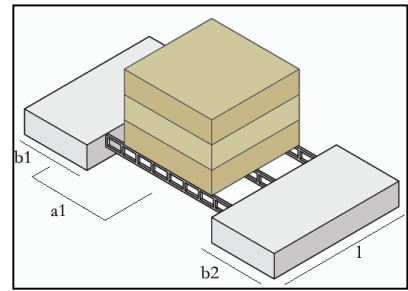
$$J_{u \text{ eigen}} = 2J_{u \text{ drijflichaam 1}}$$

$$J_{u \text{ eigen}} = \frac{1}{6} b_1 l^3$$

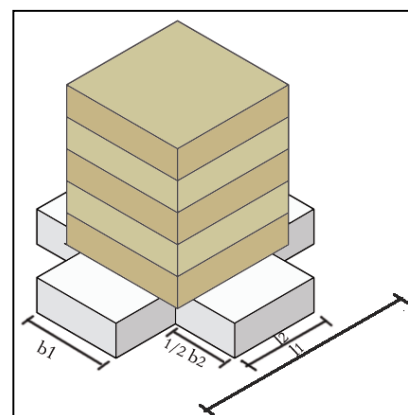
$$h_{m \text{ catamaran } y} = \frac{l^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z \quad (3.33)$$

D. Kruisvormig ponton

Op een soortgelijke manier kan de metacentrumhoogte van een ponton in kruisvorm worden afgeleid. Uitgangspunt voor deze afleiding is dat de armen van het ponton allemaal even lang zijn, zodat de positie van het metacentrum voor beide richtingen gelijk is.



Afb. 3.28. Catamaran.



Afb. 3.29. Kruisvormig ponton.

Deze afleiding levert de volgende formule op:

$$h_{m \text{ kruisvorm}} = \frac{l_1 b_1^3 + l_2 b_2^3}{12d(l_1 b_1 + l_2 b_2)} + \frac{1}{2}d - h_z \quad (3.34)$$

Zie voor de betekenis van h_1 en h_2 afbeelding 3.29.

F. Rechthoekig ponton met holle kern

De afleiding van de metacentrumhoogte van deze geometrische vorm levert het volgende op:

$$J_u = \frac{1}{12}b_1^3 l_1 - \frac{1}{12}b_2^3 l_2$$

$$h_{m \text{ kruisvorm}} = \frac{b_1^3 l_1 - b_2^3 l_2}{12d(b_1 l_1 - b_2 l_2)} + \frac{1}{2}d - h_z \quad (3.35)$$

b_1 en l_1 zijn hierbij de buitenafmeting, b_2 en l_2 de binnenafmeting van het ponton.

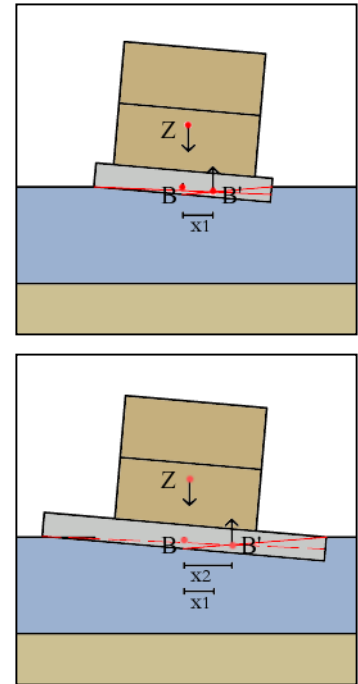
3.4.5 Vormen van statische stabiliteit

Stabiliteit is een belangrijk ontwerpaspect voor een drijvend gebouw. De mate van (statische) stabiliteit komt tot uiting in de metacentrumhoogte h_m , de afstand tussen M en Z. Uit (3.27) blijkt dat h_m beïnvloed wordt door drie gegevens: de breedte van het ponton, de diepgang en de positie van het zwaartepunt. De parameters b en h_z vormen de basis voor het onderscheid tussen vormstabiliteit en gewichtstabiliteit.

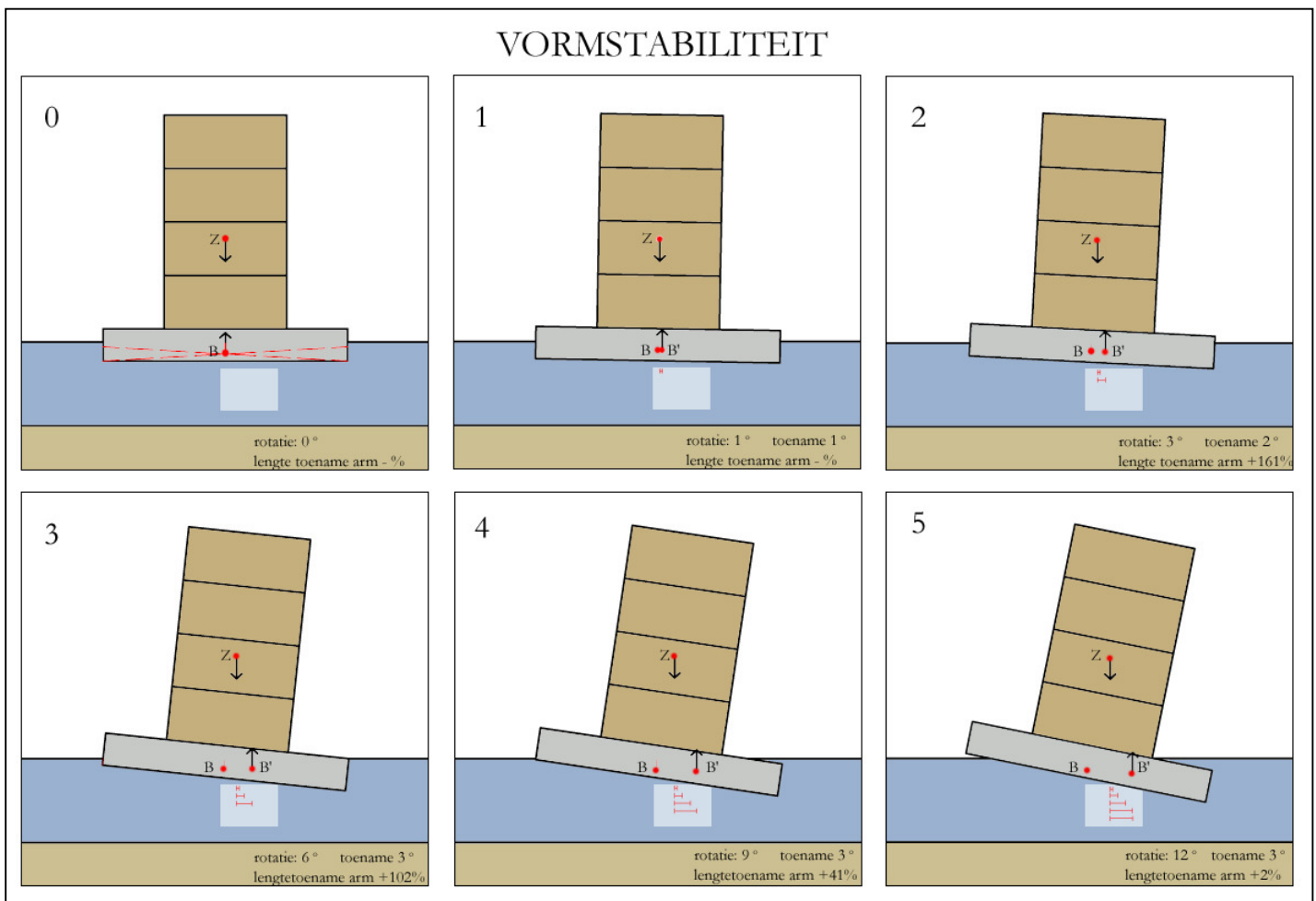
Vormstabiliteit

In paragraaf 3.4.1 is reeds geconstateerd dat een rotatie van het ponton leidt tot het verschuiven van het drukingspunt. De mate waarin het drukingspunt verschuift, is afhankelijk van de breedte van het drijflichaam. Hoe breder het drijflichaam, hoe meer het drukingspunt verschuift. Voor de vormstabiliteit is de horizontale verschuiving van het drukingspunt van belang (afbeelding 3.30). Hoe breder het ponton, hoe groter de afstand tussen B en B' is, en hoe groter ook de arm van het koppel F_z en F_{opw} .

Als op een drijvend gebouw een moment wordt uitgeoefend, zal het gebouw een rotatie ondergaan. Hoe groot die rotatie bij een bepaald opgelegd moment zal zijn, wordt bepaald door de vereiste arm van het koppel F_z en F_{opw} . Deze krachten veranderen zelf immers als gevolg van de rotatie niet van grote.

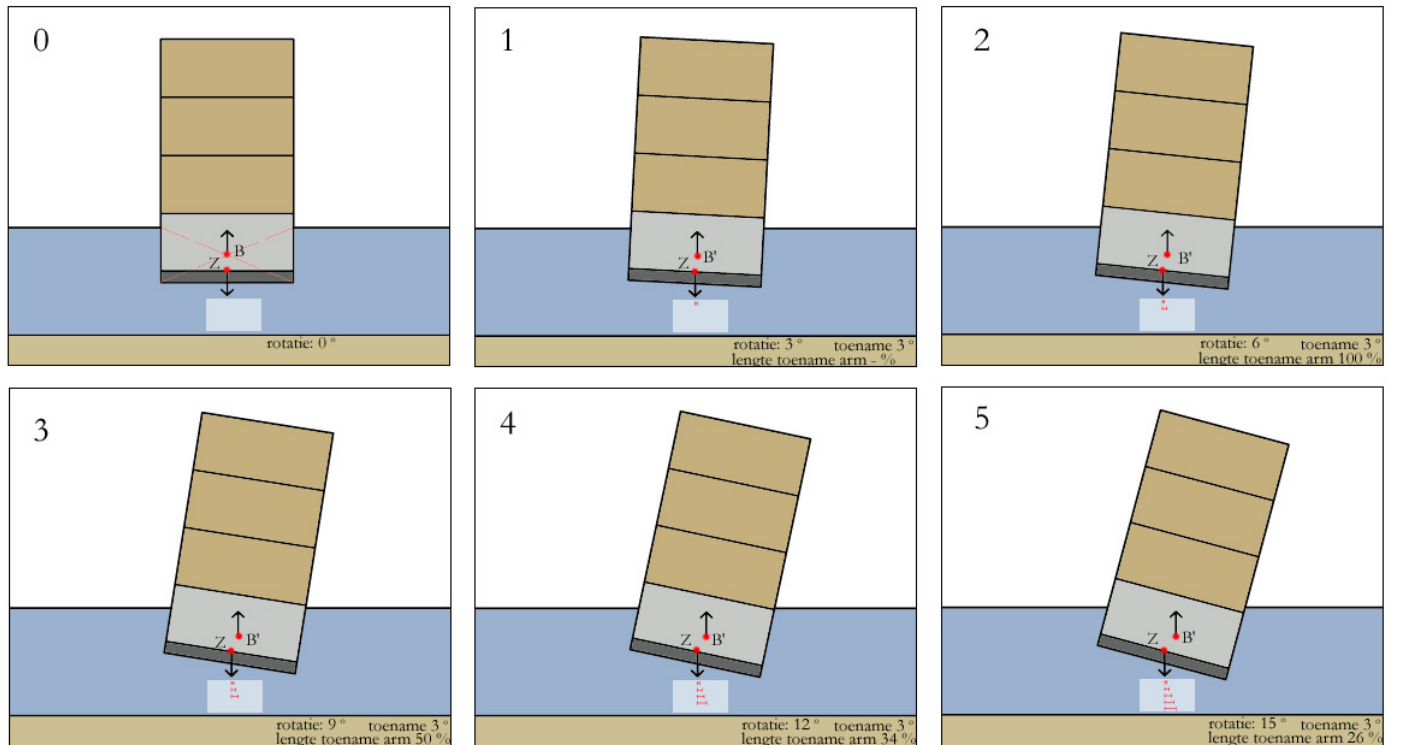


Afb. 3.30. Hoe breder het ponton, hoe groter de afstand tussen B en B' bij eenzelfde rotatie, hoe beter de vormstabiliteit van het object is.



Afb. 3.31. De toename van de arm bij een toenemende rotatie van een gebouw met een breed drijflichaam. De positie van het drukingspunt is steeds exact bepaald. De toename van de arm is uitgedrukt als percentage van de arm van de stap ervoor.

GEWICHTSTABILITEIT



Afb. 3.32. De toename van de arm bij een toenemende rotatie van een gebouw met een laag zwaartepunt. Het drijflichaam is aan de onderzijde verzwaaard. De positie van het drukingspunt is steeds exact bepaald. De toename van de arm is uitgedrukt als percentage van de stap ervoor.

In afbeelding 3.31 is voor een gebouw met een breed drijflichaam onderzocht wat het gedrag van het object is onder een steeds toenemend opgelegd moment. De arm van het moment groeit de eerste stappen erg snel. De lengte van de arm in situatie 2 is 261% ten opzichte van situatie 1. Hoe meer het opgelegde moment echter toeneemt, hoe langzamer de arm van het koppel groeit.

Indien we dus deze constructie in 10 gelijkmatige stappen zouden belasten tot een maximaal moment M_x , zou de eerste stap de toename van de arm veel groter zijn dan de laatste stap. Als gevolg hiervan zou de toename van de rotatie de eerste stap veel kleiner zijn dan de laatste stap. Een gebouw met een breed drijflichaam heeft dus een hoge aanvangsstabiliteit, maar zal bij een groeiend moment steeds meer roteren. Dit wordt vormstabiliteit genoemd. De basis voor vormstabiliteit is het verschuiven van het drukingspunt. Hoe meer dit punt verschuift, hoe groter de arm van het oprichtend koppel is.

Gewichtsstabiliteit

Behalve de breedte van het drijflichaam is ook de positie van het zwaartepunt van de constructie belangrijk voor de statische stabiliteit van het gebouw. Evenals een breder drijflichaam de arm van het koppel F_z en F_{opw} doet toenemen, zorgt ook een lager zwaartepunt voor een toename van deze arm. De positie van het zwaartepunt beïnvloedt de stabiliteit van het drijflichaam, echter wel op een andere wijze.

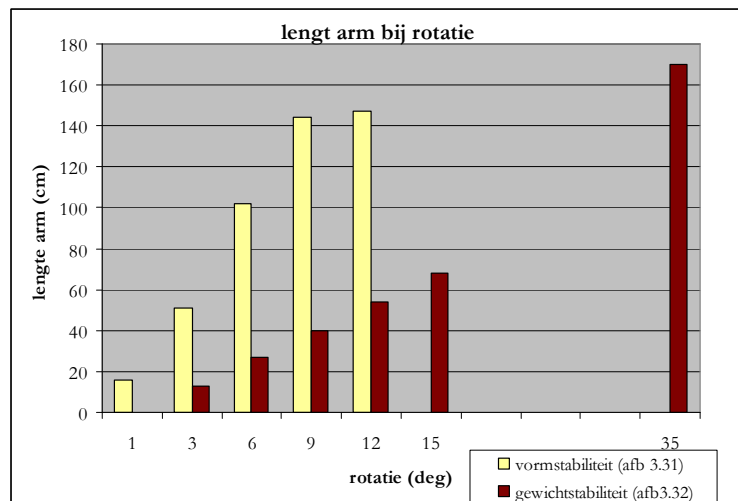
In afbeelding 3.32 is voor een gebouw met een extreem laag zwaartepunt onderzocht wat het gedrag is onder een steeds toenemend opgelegd rotatie. Het drijflichaam heeft een verzwaaarde kiel.

Als het gedrag van dit object wordt vergeleken met afbeelding 3.31, blijkt dat arm bij een toenemende belasting minder snel groeit, maar dat de groei van de arm veel minder uitdooft. Groeide de arm bij afb. 3.31 tussen stap 4 en 5 nog maar 2%, in afb. 3.32 was de toename van de arm bij een corresponderende rotatie 34%.

	afb. 3.31	afb. 3.32
rotatie(deg)	a (cm)	a (cm)
1	16	-
3	51	13
6	102	27
9	144	40
12	147	54
15	-	68
35	-	170

Tabel 3.3. De lengte van de arm.

Deze gegevens zijn kenmerkend voor gewichtstabiliteit. Bij kleine rotaties levert de constructie maar een klein oprichtend koppel, maar bij grote rotaties is dit koppel groot vanwege de doorzettende toename van de arm. Gewichtstabiliteit heeft dus een lage aanvangstabiliteit (de eerste graden rotatie kosten weinig inspanning), maar een groot stabiliteitsgebied. Bij grote rotaties blijft de constructie zich als een duikelaar oprichten, omdat het zwaartepunt t.o.v. het metacentrum relatief laag ligt.



Grafiek 3.3. De groei van de arm bij toenemende rotatie.

3.4.6 Vormstabiliteit versus gewichtstabiliteit

Vorm- en gewichtstabiliteit gaan beide over de arm van het koppel F_z en F_{opw} . Vormstabiliteit betekent een grote aanvangstabiliteit en een relatief klein stabiliteitsgebied. Gewichtstabiliteit betekent een lage aanvangstabiliteit en een groot stabiliteitsgebied. Hierboven is dit verschil met een voorbeeld toegelicht, nu zal de verschil tussen vorm en gewichtstabiliteit analytisch worden bepaald. In formule (3.24) is M_{opr} gedefinieerd als:

$$M_{opr} = F_z \cdot a$$

met:

$$a = \sin \alpha \cdot h_m$$

$$h_m = \frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z$$

Vormstabiliteit

Om de invloed van de vorm op de stabiliteit te bepalen, wordt de relatie tussen de rotatiehoek α en de breedte van het drijflichaam b beschreven bij een bepaalde arm a .

$$a = \sin \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z \right) \quad (3.36)$$

Uit formule (3.36) blijkt dat in de beschrijving van de arm van het moment⁸ de breedte van het ponton kwadratisch meetelt. Dat verklaart de tendens die eerder reeds geconstateerd is, namelijk dat een breed ponton bij eenzelfde rotatie een groter oprichtend moment zal leveren.

Om vormstabiliteit nader te analyseren, wordt de afgeleide van formule (3.36) bepaald.

$$\frac{da}{d\alpha} = \cos \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z \right) \quad (3.37)$$

Deze formule verklaart de snelle afname van de toename van de arm bij toenemende rotaties voor een gebouw met een breed drijflichaam. De toename van het oprichtend moment wordt kleiner naarmate de rotatie groter wordt. De maat waarin de toename afneemt, is afhankelijk van het kwadraat van de breedte.

⁸ De arm van het koppel $F_z \cdot a$ is representatief voor het opgelegde moment. Als F_z constant wordt gehouden geldt er immers: $M_{opr} = F_z \cdot a$ en $M_{uitw} = M_{opr}$;

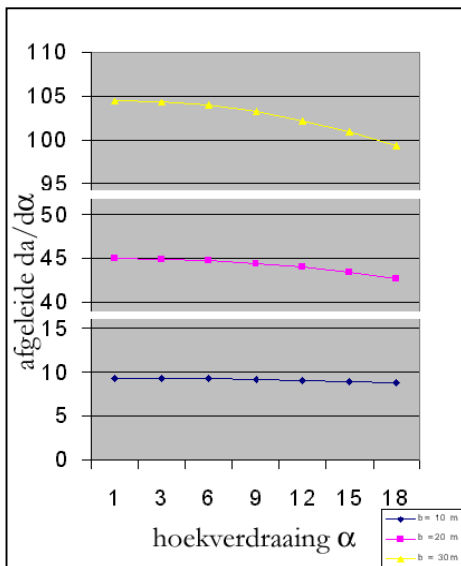
Dit verklaart de in afb. 3.31 geconstateerde snelle afname van de groei van de arm bij een breed ponton ten opzichte van een smaller ponton. Deze tendens is ook gevisualiseerd in grafiek 3.4. Hoe breder het ponton, hoe sneller de groei van de arm afneemt bij grotere rotaties.

Gewichtstabiliteit

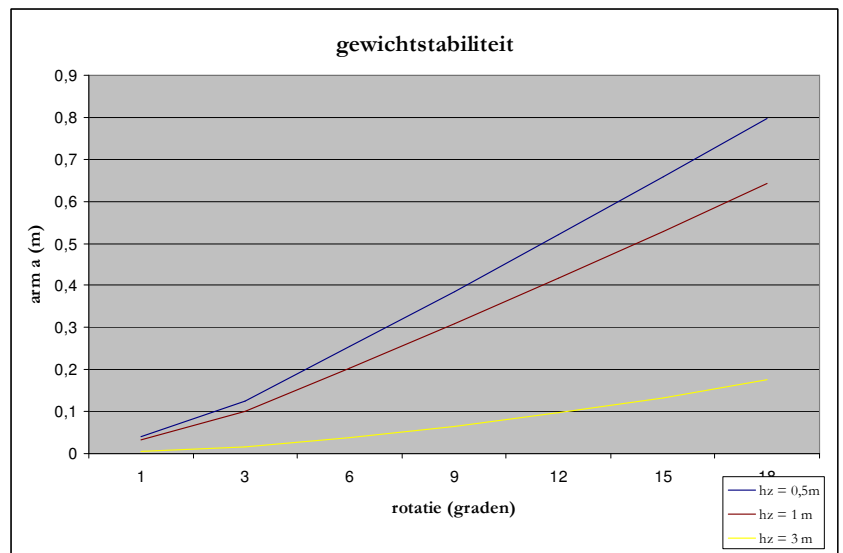
Uit formule (3.36) blijkt dat de grootte van de arm ook afhankelijk is van de hoogte van het zwaartepunt.

$$a = \sin \alpha \left(\frac{b^2}{12d} + \frac{1}{2}d - h_z \right) \quad (3.36)$$

Hoe groter de term tussen de haakjes is, hoe groter de arm bij een bepaalde rotatie, hoe gunstiger dit is voor de statische stabiliteit. Een kleine h_z is dus wenselijk. Als we de invloed onderzoeken van h_z bij een toenemende rotatie, blijkt dat de invloed van h_z bij kleine rotaties klein is, maar steeds groter wordt als de rotatiehoek toeneemt. Dit blijkt uit grafiek 3.5, waar de grootte van de arm is uitgezet als functie van de rotatie voor een ponton van 8 m breed en een diepgang van 3 m. Bij kleine rotaties is het verschil in de grootte van de arm klein, maar hoe groter de rotatie is, hoe groter de gunstige invloed van een laag zwaartepunt merkbaar is. Dit is een eigenschap van gewichtstabiliteit, zij wordt pas effectief bij grote rotaties.



Grafiek 3.4. Afgeleide $da/d\alpha$. De toename van de arm bij een toenemende rotatie. $d = 0,7\text{ m}$; $h_z = 3\text{ m}$.



Grafiek 3.5. De grote van de arm bij een ponton van 8 m breed en een diepgang van 3 m bij een verschillende hoogte van het zwaartepunt.

3.5 Conclusie

Aan het einde van dit hoofdstuk worden de consequenties van de behandelde theorie voor het ontwerp van een hoog drijvend gebouw op een rijtje gezet.

A. De sterkte van een drijvende fundering

In par. 3.1.3 is de beddingconstante uitgerekend voor verschillende pontonvormen.

Fundering op zand:	$k = 10.000 - 50.000 \text{ kN/m}^3$
Rechthoekig ponton:	$k = 10 \text{ kN/m}^3$
Cilindervormig ponton:	$k = 7,5 \text{ kN/m}^3 \text{ (+/-)}$
Driehoekvormig ponton:	$k = 5 \text{ kN/m}^3$

Uit deze gegevens kunnen de volgende zaken worden geconcludeerd:

- Een drijvende fundering is in vergelijking met een fundering op zand minstens duizend maal zo slap.
- Dit betekent dat scheefstand een potentieel probleem is voor drijvende gebouwen.
- De draagconstructie van een hoog drijvend gebouw moet zodanig gedimensioneerd worden dat het bestand is tegen de gevolgen van deze scheefstand (tweede orde effect). Bij een hoog drijvend gebouw is dit effect sterker dan bij een laag drijvend gebouw.
- Een driehoekvormig ponton en een cilindervormig ponton met een vergelijkbare grootte hebben een grotere diepgang dan een rechthoekig ponton. Als deze pontons met eenzelfde belasting belast worden zijn ze aan te merken als slappere funderingen.

B. Haalbare bouwhoogte

- Wat betreft de stabiliteit van het gebouw wordt de haalbare bouwhoogte bepaald door de positie van het metacentrum en de positie van het zwaartepunt. Dit zijn voor een hoog drijvend gebouw belangrijke ontwerpgegevens.
- Factoren die de positie van het metacentrum beïnvloeden zijn de breedte van het ponton, de vorm van het ponton en de diepgang.
- De mate waarin de vorm van het ponton de haalbare bouwhoogte gunstig kan beïnvloeden, is nog niet duidelijk. In het ontwerpgedeelte zal dit nader onderzocht worden. In de literatuur wordt gesteld dat een driehoekvormig ponton theoretisch gunstiger is als een rechthoekig ponton.⁹ De pontonvorm is in ieder geval een belangrijk ontwerpaspect voor een hoog drijvend gebouw.

C. Stabiliteitsvoorwaarde

- Voor een stabiele constructie dient het metacentrum (M) boven het zwaartepunt (Z) te liggen.
- Een hoog metacentrum en een laag zwaartepunt levert een hogere waarde van h_m op, wat gunstig is voor de stabiliteit.
- Hoe groter de afstand h_m , hoe groter het oprichtend moment is dat de drijvende constructie kan leveren, hoe minder het ponton bij een bepaald opgelegd moment zal roteren.
- Ontwerpaanbeveling: streven naar een grote positieve waarde van h_m .

D. Vormstabiliteit vs. gewichtstabiliteit.

- In par. 3.4.4 en par. 3.4.5 is het onderscheid tussen vorm- en gewichtstabiliteit behandeld. Vormstabiliteit bleek een grote aanvangstabiliteit te hebben, maar een klein stabiliteitsgebied. Gewichtstabiliteit heeft daarentegen een kleine aanvangstabiliteit, maar wordt pas effectief bij grotere rotaties.
- Bij drijvende gebouwen zijn slechts kleine rotaties toegestaan. Hieruit volgt dat een grote aanvangstabiliteit voor een drijvend gebouw gunstig is.
- Hieruit volgt de ontwerpaanbeveling dat men voor een hoog drijvend gebouw vooral de vormstabiliteit van belang is. De breedte en de lengte van het ponton zijn dus belangrijke ontwerpgegevens.

⁹ Bron [8] par. 4.3.3

4. Hydrodynamica

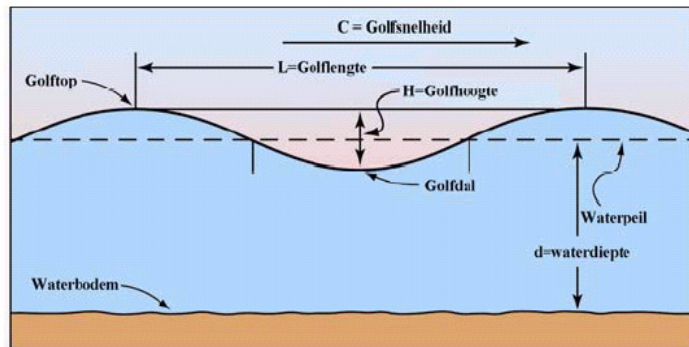
Een drijvende constructie wordt dynamisch belast door golfslag. De bewegingen die als gevolg van deze belasting in de constructie ontstaan, dienen beperkt te blijven. De constructie mag niet in eigenfrequentie komen. Het effect van golfslag op een drijvend gebouw komt dit hoofdstuk aan de orde. Eerst komen golven aan de orde, vervolgens de invloed van golven op een drijvend gebouw.

4.1 Lineaire golftheorie

Eerst zal de situatie bekeken worden voor een enkele golf, daarna zal beschreven worden wat er in een onregelmatig golfveld gebeurt.

Uitwijking, amplitude, hoekfrequentie en golfgetal

Wanneer een wateroppervlak wordt blootgesteld aan wind, ontstaan er (wind) golven. Eerst wordt een enkele golf beschouwd die zich voortplant langs een lijn in de X-richting. Het wateroppervlak wordt voorgesteld als een sinus-vorm. De uitwijking van de gemiddelde waterlijn wordt η genoemd en is een functie van x en t . De positie van een bepaald punt op het wateroppervlak kan nu beschreven worden door:



Afb. 4.1. Enkele grootheden die betrekking hebben op golven.

$$\eta(x, t) = \frac{1}{2} H \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{2\pi}{L} x\right)$$

η	= momentane uitwijking van de waterstand uit het midden van de waterlijn (m).
H	= golfhoopte, het hoogteverschil tussen top en dal van de golf (m)
x	= afstand golf in voortplantingsrichting (m)
L	= golflengte, de afstand tussen twee opeenvolgende toppen of dalen (m)
t	= tijd (s)
T	= golfperiode, de tijd die een waterdeeltje nodig geeft om zich een golflengte in de x-richting te verplaatsen (m)

De bovenstaande formule kan herschreven worden als:

$$\eta(x, t) = a \sin(\omega t + kx) \quad (4.1)$$

met:

$$a = \frac{1}{2} H$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

a	= amplitude (m)
ω	= hoekfrequentie (s^{-1})
k	= golfgetal (m^{-1})

Golfsnelheid

De voortplantingssnelheid van de golf kan bepaald worden met periode T en golflengte L :

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (4.2)$$

De golfsnelheid kan volgens bron [2] ook berekend worden met de formule:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (4.3)$$

c = voortplantingssnelheid (m/s)
 d = waterdiepte (m)

Voor ondiep water ($d/L < 1/25$) kan de golfsnelheid benaderd worden met:

$$c = \sqrt{gd} \quad (4.4)$$

Golfenergie

Een golf heeft ook een bepaalde hoeveelheid energie, een deel hiervan is kinetische energie en een deel hiervan is potentiële energie. De kinetische energie betreft de energie als gevolg van de orbitaalbeweging van de waterdeeltjes, de potentiële energie heeft te maken met de uitwijking van de waterdeeltjes ten opzichte van het wateroppervlak. Voor een golf met een lengte L kan de energie per strekkende meter golfkam bepaald worden met:

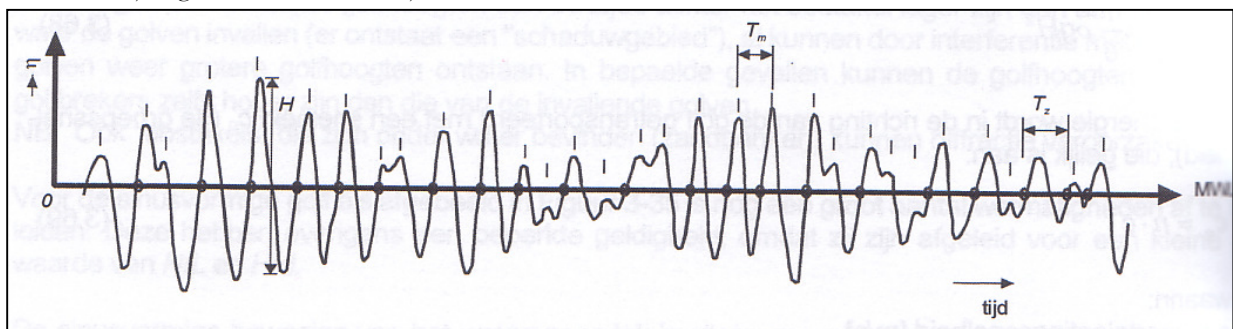
$$E = E_k + E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 L + \frac{1}{16} \rho g H^2 L$$

De energie per strekkende meter oppervlak bedraagt dan:

$$\underline{E} = \frac{E}{L} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4.5)$$

4.2 Onregelmatige golfvelden

In de praktijk komt de regelmatige sinusvormige golf niet voor, hooguit in laboratorium-omstandigheden. Het golfveld van een wateroppervlak bestaat uit een sommatie van enkelvoudige golven met verschillende frequenties en amplitudes, richtingen en fasen. Er treedt daarom een onregelmatig golfveld op, zoals blijkt uit de uitwijking van een waterdeeltje in afb. 4.2.



Afb. 4.2. Een onregelmatig golfbeeld. De uitwijking van een waterdeeltje als functie van de tijd.

Het gedrag van het onregelmatige golfveld is minder goed voorspelbaar als bij een sinusvormige golf. We zijn geïnteresseerd in de golfhogte die op een bepaald wateroppervlak verwacht kan worden. Deze is immers niet meer constant. Om de verwachte golfhogte te bepalen, maakt men gebruik van een overschrijdingskans. De overschrijdingskans geeft aan hoe groot de kans is dat een bepaalde waarde van de golfhogte zal worden overschreden.

Een aanduiding die gehanteerd wordt om een golfhoogte met een bepaalde overschrijdingskans uit te drukken, is de significante golfhoogte. Dit is de golfhoogte met een overschrijdingskans van 13,5%. Dit komt overeen met de gemiddelde golfhoogte van de 1/3 hoogste golven. Hier beperken we ons tot de waarde van de significante golfhoogte en kijken niet naar de waarde van de golfhoogte bij een lagere overschrijdingskans.¹⁰

De golfhoogte H in een bepaald windveld is afhankelijk van de volgende factoren:

- De strijklengte F van de wind over het wateroppervlak (de fetch) (m of km)
- De waterdiepte d (m)
- De windsnelheid U (m/s)
- De duur van de wind t (s)

Om het gedrag van het golfveld voor een bepaald wateroppervlak te voorspellen, kunnen verschillende methoden gebruikt worden:

1. Nomogrammen van Groen en Dorrestein

Er zijn door het KNMI nomogrammen ontwikkeld om de golfhoogte te bepalen. De nomogram voor ondiep water en het overgangsgebied naar diep water is afgebeeld in afb. 4.3.

Voorwaarde om dit nomogram toe te passen is dat geldt: $d/L < 1/2$

Voorbeeld:

$$U = 20 \text{ m/s}$$

$$F = 6 \text{ km}$$

$$d = 3 \text{ m}$$

$$\frac{U}{\sqrt{d}} = \frac{20}{\sqrt{3}} = 11,5$$

$$\frac{F}{d} = \frac{6.000}{3} = 2.000$$

We lezen dus af langs de bovenste gestippelde lijn. Voor H_s vinden we $0,28 \cdot d = 0,84 \text{ m}$.

De bijbehorende golfperiode is dan $T_s = 2,4 \cdot \sqrt{d} = 4,2 \text{ s}$.

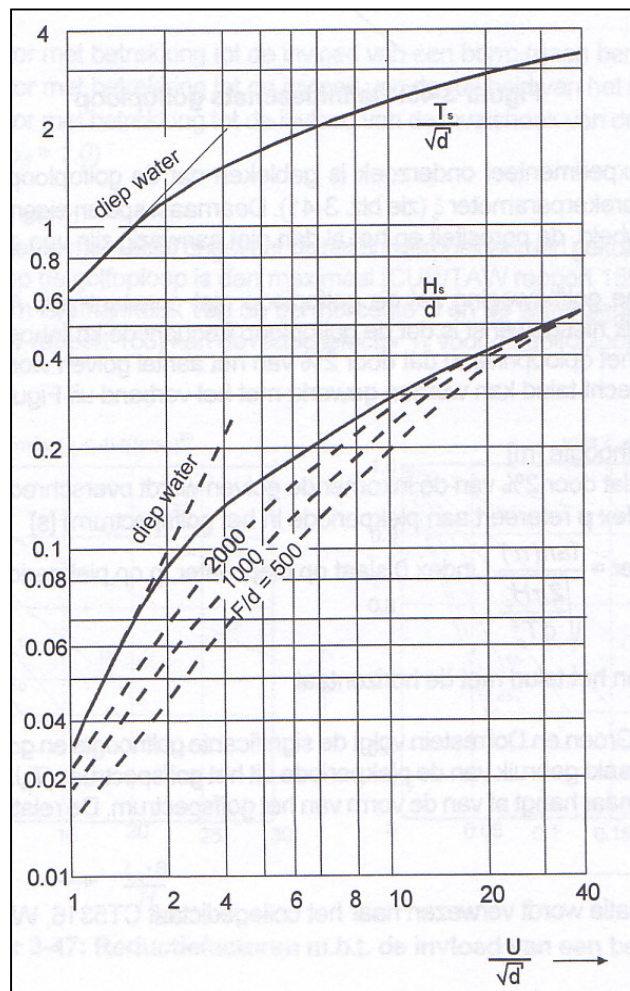
$$H_s = 0,84 \text{ m}$$

$$T_s = 4,2 \text{ s}$$

H_s = significante golfhoogte
 T_s = golfperiode (s)

Controle:

$$d/L = 3/22,8 = 0,13 \rightarrow 0,13 < 0,5$$



Afb. 4.3. Nomogram voor ondiep water, T_s en H_s kunnen worden afgelezen.

¹⁰ Indien men de constructie van een drijvend gebouw wil dimensioneren voor dynamische belasting in de UGT, dan dient men ook rekening te houden met meer extreme situaties. Men moet dan rekening houden met een lagere overschrijdingskans, wat betekent dat men uit moet gaan van een grotere golfhoogte.

2. Methode van Bretschneider

De frequentie en de golfhoogte van het onregelmatige golfveld worden nu beschouwd als stochastisch verdeelde parameters, die afhankelijk zijn van de strijklengte, de waterdiepte en de windsnelheid. Met deze gegevens kan men aan de hand van de methode van Bretschneider de waarde van H_s en T_p inschatten.

$$\bar{H} = 0,283 \tanh(0,53\bar{d}^{0,75}) \tanh\left(\frac{0,0125\bar{F}^{0,42}}{\tanh(0,53\bar{d}^{0,75})}\right) \quad (4.7)$$

$$\bar{T} = 7,54 \tanh(0,833\bar{d}^{0,375}) \tanh\left(\frac{0,077\bar{F}^{0,25}}{\tanh(0,833\bar{d}^{0,375})}\right) \quad (4.8)$$

$$\text{met:} \quad \bar{H} = \frac{gH_s}{U^2}, \quad \bar{T} = \frac{gT_s}{U}, \quad \bar{F} = \frac{gF}{U^2}, \quad \bar{d} = \frac{gd}{U^2}$$

U is hier de windsnelheid op 10 meter hoog. H_s en T_s zijn de gezochte variabelen.

Voorbeeld :

(zelfde situatie genomen als bij methode 1)

$U = 20 \text{ m/s}$

$F = 6 \text{ km}$

$d = 3 \text{ m}$

uitkomst:

$H_s = 0,76 \text{ m}$

$T_s = 3,3 \text{ s}$

De waarde voor H_s vinden, komt redelijk goed overeen met de waarde die met de eerste methode is gevonden ($H_s = 0,84 \text{ m}$). De waarde voor de golfperiode verschilt wel aanzienlijk: 4,2 tegenover 3,3 seconde.

In bron [4] wordt opgemerkt dat de methode van Bretschneider en de methode van Dorrestein en Groen niet gebaseerd zijn op hetzelfde dataset. Hieruit volgt dat de gevonden waarden voor H_s en T_s van elkaar kunnen verschillen.¹¹ In het vervolg van het onderzoek zal de methode van Bretschneider gebruikt worden om significante golfhoogte en golfperiode in te schatten.

4.3 Dynamische stabiliteit van drijvende objecten

Een gebouw is dynamisch instabiel als het gebouw als gevolg van de golfbewegingen de eigenfrequentie bereikt. De eigenfrequentie is de frequentie waarbij een systeem in resonantie komt. Het systeem gaat sterker meetrillen dan we op grond van de aangebrachte belasting zouden verwachten. Dit betekent voor een drijvend gebouw dat het als gevolg van golven of deining hoog kan worden opgeslingerd. Wil men dit voorkomen, dan dient de eigenperiode van het element (aanzienlijk) te verschillen van die van de golven. Dit is de randvoorwaarde waaraan voldaan moet worden, wil het gebouw dynamisch stabiel zijn.

Een drijvende gebouw heeft een zestal vrijheidsgraden te weten translaties in drie richtingen en rotaties om drie assen. In de scheepvaart worden deze bewegingen als volgt benoemd:

- translatie in x-richting: surge
- translatie in y- richting: sway
- translatie in z-richting: heave
- rotatie om x-as: roll
- rotatie om y-as: pitch
- rotatie om z-as: yaw

Afhankelijk van de vrijheidsgraad heeft een drijvend gebouw meer of minder bewegingsvrijheid. Als het gebouw ligt aangemeerd, zullen de translaties in het horizontale vlak (surge en sway) worden verhinderd hoewel de afmeerconstructie daar wel op gedimensioneerd zal moeten worden. Translatie in de z-richting (heave) zal daarentegen nauwelijks verhinderd worden.

¹¹ Bron [4] Par. 9-45

De rotatie om de z-as (yaw) zal door de aanmeerconstructie ook grotendeels worden verhinderd. Afhankelijk van de positie van de aanmeerconstructie zal er wel rotatie om de x-as of de y-as mogelijk zijn (roll en pitch).

Indien we een vierkant ponton beschouwen met een loodrechte aanstroming van de golven in de y-richting, zijn de eigenfrequenties voor de volgende bewegingen van belang namelijk de heave- en de roll-beweging. In werkelijkheid zal de rotatie om de x-as (roll) door de aanmeerconstructie in meerdere of mindere mate verhinderd worden. Voor het bepalen van de eigenfrequentie wordt deze invloed verwaarloosd.

4.3.1 Eigenfrequentie roll-beweging

Een systeem kan in eigenfrequentie komen voor de rotatie om de y-as, de roll-beweging. Het gebouw zal dan een slingerbeweging maken om de y-as. In bron [18] wordt de eigenfrequentie voor de roll-beweging afgeleid.¹² Deze eigenfrequentie wordt gevonden door een bewegingsvergelijking op te stellen en deze vervolgens gelijk te stellen aan nul. Hiermee vindt men de eigenfrequentie van het systeem:

$$w_0 = \sqrt{\frac{g \cdot h_m}{j_p^2}} \quad (4.9)$$

w_0	= eigenfrequentie (hertz)
j_p	= polaire massatraagheidsstraal (m)
g	= versnelling van de zwaartekracht (m/s)

Met $w_0 \cdot T_0 = 2\pi$ kan ook de eigenperiode voor de roll-beweging bepaald worden:

$$T_0 = \frac{2\pi j_p}{\sqrt{g \cdot h_m}} \quad (4.10)$$

T_0 = eigenperiode (s)

Er moet hierbij worden opgemerkt dat deze formule uitgaat van een vereenvoudigde situatie. Als het gebouw gaat trillen, trilt een gedeelte van het water dat zich om het gebouw bevindt, mee. Als gevolg hiervan is de massa van het trillende systeem iets groter als in de bovenstaande afleiding wordt verondersteld. Deze toegevoegde massa water, de hydrodynamische massa genaamd, wordt in de formules (4.9) en (4.10) verwaarloosd. De formules voldoen echter wel om een indicatie te geven van de eigenfrequentie van het beschouwde systeem.

Een gebouw komt in eigenfrequentie als de eigenperiode van de golven gelijk is aan de eigenperiode van het gebouw. Om deze reden moet de eigenperiode van het gebouw (aanzienlijk) groter zijn als de eigenperiode van de golven. Uit formule (4.10) blijkt dat een grote eigenperiode wordt verkregen door een grote traagheidsstraal. Een grote metacentrumhoogte zorgt voor een kleine eigenperiode. Een grote metacentrumhoogte is dus wel gunstig voor de statische stabiliteit, maar minder gunstig voor de dynamische stabiliteit.

De grote van de polaire traagheidsstraal moet voor elk drijvend object berekend worden. Voor de orde van grote van de traagheidsstraal kan voor verschillende drijvende objecten echter wel een indicatie gegeven worden:¹³

- Vracht- en passagiersschepen: j heeft een waarde tussen 0,35 - 0,45B (B= drukkingspunt)
- Zeiljachten: j heeft een waarde tussen 0,55 - 0,65B
- Pontons: j heeft een waarde tussen 0,45 - 0,55B

¹² Bron [18] par. 5.4

¹³ Bron [18] par. 5.4

De polaire traagheidstraal j_p is de som van de traagheidstalen j_y en j_z . (Het polaire traagheidsmoment is immers de som van de traagheidsmomenten I_y en I_z).

$$j_p = j_y + j_z$$

$$j_p = \sqrt{\frac{I_y}{A}} + \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (4.11)$$

I_y = kwadratisch oppervlaktemoment om de z-as (m^4)

I_z = kwadratisch oppervlaktemoment om de y-as (m^4)

4.3.2 Eigenfrequentie heave-beweging

Een gebouw kan niet alleen slingeren om de y-as, maar ook in de z-richting opgeslingerd worden, de zogenaamde heave-beweging. Een voorbeeld hiervan is het stampen van een mattenrol bij de bouw van de Oosterschelde-stormvloedkering. Deze mattenrol woog 9000 ton en ging 60 cm op en neer bij een licht deinende zee ($H_s=0,20$ m; $T_s=9$ sec).¹⁴ Het zal duidelijk zijn dat dergelijke bewegingen in een drijvend gebouw niet zijn toegestaan.

De eigenfrequentie voor de roll-beweging werd bepaald door een bewegingsvergelijking van het object op te stellen en deze gelijk te stellen aan nul. Op een gelijksoortige manier kan de eigenfrequentie van de heave-beweging worden bepaald. In bron [20] wordt afgeleid wat de eigenfrequentie is voor de heave-beweging:¹⁵

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{d + \frac{1}{8}\pi B}} \quad (4.12)$$

De eigenperiode kan bepaald worden met:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{d + \frac{1}{8}\pi B}}} \quad (4.13)$$

Een grote diepgang en een laaggelegen drukkingspunt bevorderen dus een grote eigenperiode, wat gunstig is voor de dynamische stabiliteit.

4.4 Conclusie

- Het wateroppervlak rond het drijvende gebouw moet beschouwd worden als een onregelmatig golfveld. Twee gegevens van dit golfveld zijn voor het ontwerp van belang te weten de significante golfhoogte en de golfperiode.
- Voorwaarde voor de dynamische stabiliteit is dat de eigenfrequentie van het gebouw aanzienlijk verschilt van de optredende golfperiode.
- De eigenfrequentie moet getoetst worden voor de relevante vrijheidsgraden (de heave- en roll-beweging).

¹⁴ Bron [4] Par. 3-17

¹⁵ Bron [20] Par. 9.4

5. Randvoorwaarden

Bij het doen van onderzoek naar de mogelijke hoogte van drijvende gebouwen is het noodzakelijk dat vooraf wordt bepaald aan welke randvoorwaarden er voldaan moet worden. Er zijn randvoorwaarden te formuleren op verschillende deelgebieden. Men kan spreken van technische, juridische, maatschappelijke en economische randvoorwaarden. Voor het onderzoek naar de haalbare hoogte is met name de eerste categorie van belang.

5.1 Technische randvoorwaarden

In Nederland is voor drijvende gebouwen nog geen algemeen geldende regelgeving opgesteld. Elke bouwer of vergunningverlener bedenkt tot nu toe zijn eigen eisen. Het bouwbesluit richt zich op gebouwen op het vasteland en geeft daarom geen voorschriften voor problemen die specifiek voor drijvende gebouwen van toepassing zijn. In Canada is er wel een regelgeving voor drijvende gebouwen ontwikkeld. Enkele richtlijnen van deze regelgeving zullen als randvoorwaarden worden gehanteerd.

Diepgang

Volgens de Canadese wetgeving moet de resterende diepgang onder het ponton ten minste 0,6 m zijn. Dit is onder andere van belang voor de waterkwaliteit rond het ponton. Geringe resulterende diepgang vermindert de mogelijkheid tot doorstroming. Door een te geringe diepgang kan het zuurstofrijke water (afhankelijk van daglicht en plantengroei) zich niet meer goed mengen met het zuurstofarme water onder het ponton, wat kan leiden tot een onaangename geur.

Bebouwingsoppervlak

Maximaal 40% van wateroppervlak mag bebouwd worden. Ook dit is van belang voor de waterkwaliteit, om het ecologisch evenwicht in het water in stand te kunnen houden.

Vrijboord

De Canadese wetgeving schrijft voor dat het minimale hoogteverschil tussen de eerste watervoerende opening en de waterlijn minimaal 0,3 m moet bedragen. De afstand tussen de eerste watervoerende opening en de waterlijn noemt men het vrijboord. Voor hogere drijvende gebouwen is een afstand van 0,3 m aan de lage kant. Hierom wordt voor deze opgave uitgegaan van een minimaal vrijboord van 0,4 m.¹⁶ Dit is een vaak gehanteerde waarde voor het benodigde vrijboord.

Resterend drijfvermogen

Het drijflichaam moet altijd een resterend drijfvermogen hebben. Dit betekent dat het drijflichaam in een toestand van *maximale belasting* een resterend vrijboord moet hebben. Deze grootheid heeft dus betrekking op de uiterste grenstoestand (UGT). Het resterende vrijboord moet volgens de Canadese wetgeving minimaal 0,1 m bedragen. Dit is met name van belang voor een open caisson, omdat dit drijflichaam zinkbaar is.

Scheefstand

Als gevolg van een horizontale of een niet-centrische verticale belasting kan een drijvend gebouw scheef komen te liggen. Over de vraag wat de maximaal toelaatbare scheefstand is verschillen de meningen nogal:

- NEN 6702 hanteert als eis dat de scheefstand voor gebouwen op het vasteland maximaal $1/300$ per bouwlaag mag bedragen, terwijl de maximale uitwijking van een gebouw met meerdere bouwlagen op $1/500$ van de hoogte wordt vastgesteld.
- De Canadese wetgeving bepaalt dat de maximale scheefstand van een drijvend gebouw 5° bedraagt, of 50% van het vrijboord.
- Dennis Linq stelt de maximaal toelaatbare scheefstand vast op een waarde van $0,57^\circ$.¹⁷
- Projectgroep Aqua Struenda stelt de maximaal toelaatbare scheefstand vast op een waarde van 2° .¹⁸

Dat de eis van de NEN-norm voor een drijvend gebouw te strikt is, wordt door verschillende bronnen erkent. Gesteld dat men een maximale scheefstand van $1/300$ hanteert, dan bedraagt de maximale rotatiehoek $0,2^\circ$. Algemeen zullen de bewoners of gebruikers van een drijvend gebouw meer accepteren, enige deining en enige scheefstand zijn eigen aan drijvende gebouwen.

¹⁶ Een vrijboordeis van 0,5 m werd bijvoorbeeld gehanteerd door Aqua Struende (drijfsysteem voor een drijvende woonwijk); en door M. Kuijper (de drijvende fundering). Ook in de NVAF richtlijnen voor drijvend funderingsmaterieel wordt voor een ponton deze waarde gehanteerd. Een vrijboordeis van 0,4 m werd gehanteerd bij de Detentieplatforms van het openbaar ministerie. A. Spliet hanteert voor drijvende kassen –in de UGT– een minimale waarde van het vrijboord van 0,2 m.

¹⁷ Bron [22]

¹⁸ Bron [3] par. 2.2

Om meer inzicht te krijgen in de vraag wat nog een acceptabele scheefstand is, zijn in tabel 5.1 de hoogteverschillen uitgerekend voor een ponton van 5 m en een ponton van 15 m breed bij verschillende rotatiehoeken. Een rotatie van 5 graden betekent voor een ponton van 15 m breed een hoogteverschil van 1,3 m!

Om te bepalen wat nog een acceptabele scheefstand voor een drijvend gebouw is, is het zinvol om onderscheid te maken tussen een maximale rotatie in de uiterste grenstoestand (UGT) en de maximale rotatie in de bruikbaarheids-grenstoestand (BGT). In de UGT houdt men rekening met een extreme belastingsituatie die in de praktijk zelden voorkomt. In dergelijke uitzonderlijke situaties is een grotere scheefstand toelaatbaar. In de BGT wordt er gekeken wat er wenselijk is voor het gebruik van het gebouw en dan gelden striktere eisen.

scheefstand (graden)	hoogteverschil (cm)	
	b = 5 m	b = 15 m
0,2	1,7	5,2
0,6	5,2	15,7
1,5	13,1	39,3
2,0	17,4	52,3
5,0	43,6	130,7

Tabel 5.1. Hoogteverschil bij maximale rotatie.

In de UGT wordt een scheefstand van 5° toelaatbaar geacht, in de BGT wordt uitgegaan van 1,0°.

Stabiliteit

Het criterium voor de stabiliteit van een drijvend gebouw is de metacentrumhoogte. De betekenis van dit begrip is uitgelegd in par. 3.5.2. In de scheepvaart wordt meestal een minimum metacentrumhoogte van 0,15 m gehanteerd.¹⁹ Dit is nog enigszins afhankelijk van het soort schip. Voor pontons wordt een minimale metacentrumhoogte van 0,5 m aanbevolen.²⁰ Aangezien er nog geen richtlijnen voor deze grootte zijn opgesteld, wordt deze waarde gehanteerd.

Eigenfrequentie

Het gebouw mag onder invloed van te verwachten golfbewegingen niet in eigenfrequentie komen.

Overige technische randvoorwaarden

Algemeen kan worden gesteld dat de constructie sterk genoeg moet zijn om de optredende belastingen te kunnen weerstaan. De constructie als geheel moet voldoen aan eisen t.a.v. sterkte, stijfheid en stabiliteit.

5.2 Overige randvoorwaarden

Juridische randvoorwaarden

- Drijvende woningen en gebouwen worden momenteel door hypotheekverstrekkers en verzekeraars aangemerkt als schepen. Dit betekent dat de verzekeringen voor dit type gebouw vanwege de zinkbaarheid aanzienlijk duurder zijn, en dat een hypotheek daarom moeilijker te verkrijgen is. Dit maakt het moeilijker het product in de markt te introduceren. *Onzinkbaarheid* van een drijvend gebouw is daarom een belangrijk ontwerpaspect.
- Ook de status van onroerend goed is voor een drijvend gebouw belangrijk. Voor onroerend goed is makkelijker een hypotheek te krijgen als voor roerend goed. Het burgerlijk wetboek geeft de volgende definitie aan onroerend goed:
*Onroerend goed zijn de grond, de nog niet gewonnen delfstoffen in de grond, de met de grond verenigde beplanting, alsmede gebouwen en werken die duurzaam met de grond verenigd zijn, hetzij rechtstreeks, hetzij door vereniging met andere gebouwen.*²¹
Of drijvende gebouwen als roerend of als onroerend goed worden aangemerkt, hangt af van een interpretatie van deze definitie. Drijvende gebouwen zijn middels de meerpaal met de grond



Afb.5.1. Meerpaal detenreinrichting Zaandam



Afb.5.2. Detail meerpaal drijvend restaurant Amsterdam.

¹⁹ Bron [18] par. 8.6.

²⁰ Journee, J.M.J., *offshore hydromechanics* (Delft)

²¹ Burgerlijk Wetboek art. 3.3 lid 1.

verbonden. Er is horizontale fixatie, terwijl verticaal beweging mogelijk is. Hoe de jurisprudentie zich verder ontwikkelt, zal de toekomst uitwijzen. Het lijkt er echter op dat drijvende gebouwen als onroerend goed worden aangemerkt. Met het oog op deze kwestie kan de randvoorwaarde worden geformuleerd dat de verbinding met de meerpaal dusdanig moet zijn dat er sprake is van horizontale fixatie.

Milieutechnische randvoorwaarde

- De waterkwaliteit onder en rond het drijvend gebouw moet gewaarborgd kunnen worden. (Bijvoorbeeld: voorkomen sterke algengroei, voorkomen geur rottend waterplanten e.d.)
- Het drijflichaam moet dusdanig worden gematerialiseerd dat schadelijke stoffen voor het oppervlakte water niet of zeer beperkt uitlogen (bv. zware metalen).

Uitvoeringstechnische randvoorwaarde

- Het gebouw moet maakbaar zijn.
- Het bouwproces moet veilig zijn.
- Het in acht nemen van de mogelijkheden en beperkingen van de locatie.

Gebruikstechnische randvoorwaarde

- Het gebouw moet over water verplaatsbaar zijn.

Economische randvoorwaarde

- Het minimaliseren van de kosten voor bouw- en gebruiksfase (bijvoorbeeld onderhoud gevel, drijflichaam).

5.3 Conclusie

- Voor de technische randvoorwaarden voor een drijvend gebouw is in Nederland nog geen regelgeving opgesteld.
- De randvoorwaarden die worden gehanteerd, verschillen daarom per project.
- De haalbare bouwhoogte, die bijvoorbeeld afhankelijk kan zijn van de scheefstandseis, is daarom een gegeven dat men altijd moet relateren aan de randvoorwaarden die men zichzelf heeft opgelegd.
- Voor de kernvraag van deze scriptie zijn vooral de technische randvoorwaarden van belang. De overige randvoorwaarden zijn voor het ontwerp als zodanig wel relevant.

6. Belastingen

Bij het ontwerpen van een drijvend gebouw moet rekening gehouden worden met verschillende soorten belastingen, waarbij sommige belastingen ook van toepassing zijn voor gebouwen op het vasteland en sommige belastingen alleen gelden voor drijvende gebouwen. In dit hoofdstuk zal beschreven worden welke belastingen de constructie moet opnemen en hoe de grootte van deze belastingen bepaald kan worden.

6.1. Permanente belasting

De permanente belastingen zijn de belastingen die in de referentieperiode van het gebouw nauwelijks variëren. De belangrijkste permanente belasting is het eigengewicht van de constructie dat met behulp van de volumieke gewichten van de bouwmaterialen kan worden bepaald. De permanente belastingen moeten vermenigvuldigd worden met een belastingfactor om een veiligheidsmarge te verdisconteren. De belastingfactor voor de bruikbaarheidsgrenstoestand ($\gamma_{f;g;ser}$) bedraagt 1,0. De belastingfactor voor de uiterste grenstoestand ($\gamma_{f;g;u}$) bedraagt 0,9 indien de belasting gunstig werkt en 1,2 indien de belasting ongunstig werkt. De rekenwaarde voor permanente belasting is overeenkomstig NEN 6702:

$$G_{d;u} = \gamma_{f;g;u} \times G_{rep;u} \quad (\text{UGT}) \quad (6.1)$$

$$G_{d;ser} = \gamma_{f;g;ser} \times G_{rep;ser} \quad (\text{BGT}) \quad (6.2)$$

$G_{d;u}$ en $G_{d;ser}$ staan voor de rekenwaarde van de permanente belasting, respectievelijk voor UGT en BGT. G_{rep} is de representatieve waarde van de permanente belasting.

6.2. Variabele belasting

Veranderlijke belastingen zijn die belastingen waarvan de grootte gedurende de referentieperiode sterk wisselt. Het betreft belastingen van personen, meubilair, wind e.d. Ook de variabele belasting moet met een belastingfactor vermenigvuldigd worden. Voor de BGT bedraagt de belastingfactor ($\gamma_{f;q;ser}$) 1,0.

De grootte van de belastingfactor voor variabele belasting voor de UGT is afhankelijk van de veiligheidsklasse van het gebouw. De veiligheidsklasse is afhankelijk van het risico op veel slachtoffers en grote schade indien de constructie bezwijkt. Hoe hoger dit risico, hoe groter de belastingfactoren. Er zijn 3 veiligheidsklassen. Klasse 2 geldt bijvoorbeeld voor eengezinswoningen, klasse 3 voor kantoren, logies- en woongebouwen, horeca. In welke veiligheidsklasse een gebouw valt, kan worden afgelezen uit tabel 1 van NEN 6702. De grootte van de belastingfactor $\gamma_{f;q;u}$ kan worden afgelezen uit tabel 4.1. De rekenwaarde voor variabele belasting is overeenkomstig NEN 6702:

$$Q_{d;u} = \gamma_{f;q;u} \times Q_{rep;u} \quad (\text{UGT}) \quad (6.3)$$

$$Q_{d;ser} = \gamma_{f;q;ser} \times Q_{rep;ser} \quad (\text{BGT}) \quad (6.4)$$

$Q_{d;u}$ en $Q_{d;ser}$ staan voor de rekenwaarde van de variabele belasting, respectievelijk voor UGT en BGT. Q_{rep} is de representatieve waarde van de variabele belasting.

De waarde van de variabele belasting wordt ook voorgeschreven door NEN 6702 (tabel C.3). De waarde van deze belasting is afhankelijk van de functie van het gebouw, de positie in het gebouw en dergelijke zaken. In tabel 6.2. is de variabele belasting op de vloeren weergegeven voor enkele gebouwfuncties. Behalve met een gelijkmatige belasting moet men ook rekening houden met een geconcentreerde belasting F_{rep} .

	$\gamma_{f;q;ser}$	$\gamma_{f;q;u}$
klasse 1	1,0	1,2
klasse 2	1,0	1,3
klasse 3	1,0	1,5

Tabel 61. Belastingfactoren en veiligheidsklasse.

functie	p_{rep} (kN/m ²)	ψ	F_{rep} (kN)
	<i>extreem</i>	<i>momentaan</i>	<i>geconcentreerd</i>
woning	1,75	0,4	3
kantoor	2,5	0,5	3
onderwijs	2,5	0,5	3
winkels	4	0,4	7

Tabel 6.2. Veranderlijke belasting voor verschillende functies.

Bij variabele belasting wordt ook onderscheid gemaakt tussen de extreme en de momentane waarde van de belasting. Bij het bepalen van de rekenwaarde van de belasting houdt men er rekening mee dat de belasting niet overal tegelijkertijd een extreme waarde zal hebben. Plaatselijk kan daarom gerekend worden met de momentane veranderlijke belasting. Deze wordt gevonden door $Q_{d;u}$ of $Q_{d;ser}$ te vermenigvuldigen met de reductiefactor ψ . In GTB 1990 is voorgeschreven hoeveel vloeren men momentaan belast mag rekenen voor verschillende gebouwfuncties.

6.3 Bijzondere belastingen

Bijzondere belastingen zijn belastingen die ontstaan bij een calamiteit zoals brand, of – specifiek voor een drijvend gebouw- een aanvaring door een schip. Voor een bijzondere belasting bedraagt de belastingfactor altijd 1,0. De rekenwaarde voor variabele belasting is overeenkomstig NEN 6702:

$$\Lambda_{d;u} = \gamma_{f;a;u} \times \Lambda_{rep;u} \quad (\text{UGT}) \quad (6.5)$$

$$\Lambda_{d;ser} = \gamma_{f;a;ser} \times \Lambda_{rep;ser} \quad (\text{BGT}) \quad (6.6)$$

$\Lambda_{d;u}$ en $\Lambda_{d;ser}$ staan voor de rekenwaarde van de bijzondere belasting, respectievelijk voor UGT en BGT. Λ_{rep} is de representatieve waarde van de variabele belasting.

Een samenvattend overzicht van de grootte van de belastingfactoren wordt gegeven in tabel 6.3.

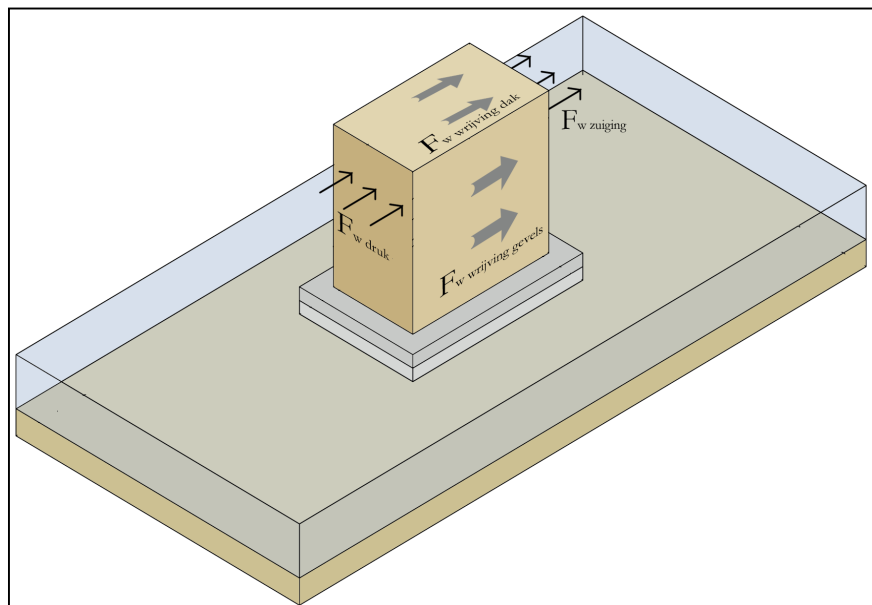
	Uiterste grenstoestand		Bruikbaarheidsgrenstoestand
Permanente belasting	ongunstig	gunstig	1,0
	1,2	0,9	
Variabele belasting (klasse 3)	1,5		1,0
Bijzondere belasting	1,0		1,0

Tabel 6.3. Overzicht belastingfactoren.

6.4 Windbelasting

Windbelasting is een vorm van een variabele belasting. In deze paragraaf wordt er gekeken naar de componenten van de windbelasting die invloed hebben op de scheefstand van een drijvend gebouw.

De componenten van de windbelasting die relevant zijn voor de scheefstand zijn weergegeven in afbeelding 4.1. Het betreft de windzuiging en winddruk op de gevels die loodrecht staan op de windrichting en windwrijving op het dak en de gevels die evenwijdig zijn aan de windrichting.



Afb. 6.1. Windbelasting die de rotatie van een drijvend gebouw beïnvloed.

Algemeen kan de windbelasting voor de verschillende componenten berekend worden met:

$$p_{rep} = C_{index} \cdot C_{dim} \cdot C_{ex} \cdot \Phi_1 \cdot p_w \quad (6.8)$$

$$F_{index} = A \cdot p_{rep} \quad (6.9)$$

- p_{rep} = windbelasting ten gevolge van winddruk, windzuiging of windwrijving (kN/m²)
- C_{index} = windvormfactoren voor druk, wrijving, zuiging enz.
- C_{dim} = een factor die de afmetingen van het bouwwerk in rekening neemt.
- C_{ex} = een drukvereffeningsfactor.
- Φ_1 = een vergrotingsfactor die de dynamische invloeden van wind in de windrichting op het bouwwerk in rekening neemt
- p_w = de extreme waarde van de winddruk (kN/m²)
- F_{index} = representatieve waarde van de windbelasting op een oppervlak.

Hiermee kan de voor scheefstand relevante windbelasting worden bepaald:

$$F_{w \text{ tot}} = F_{w \text{ druk}} + F_{w \text{ zuiging}} + F_{w \text{ wrijving gevels}} + F_{w \text{ wrijving dak}} \quad (6.10)$$

$$F_w \text{ druk} = p_w \cdot C_{pe} \cdot C_{dim} \cdot C_{ex} \cdot \Phi_1 \cdot A_{voorgevel} \quad (6.11)$$

$$F_w \text{ zuiging} = p_w \cdot C_{pe} \cdot C_{dim} \cdot C_{ex} \cdot \Phi_1 \cdot A_{achtergevel} \quad (6.12)$$

$$F_w \text{ wrijving gevels} = p_w \cdot C_f \cdot C_{dim} \cdot C_{ex} \cdot \Phi_1 \cdot A_{zijgevels} \quad (6.13)$$

$$F_w \text{ wrijving dak} = p_w \cdot C_f \cdot C_{dim} \cdot C_{ex} \cdot \Phi_1 \cdot A_{dak} \quad (6.14)$$

C_{pe} = windvormfactoren voor winddruk of zuiging

C_f = windvormfactoren voor wrijving

De volgende waarden kunnen hierbij voor C_{pe} gehanteerd worden:

- $C_{pe} = 0,4$ voor windzuiging
- $C_{pe} = 0,8$ voor winddruk

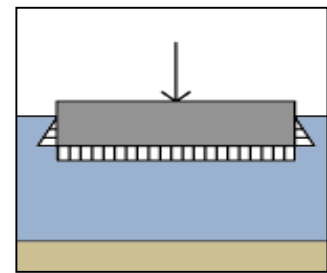
De waarde van C_f voor verschillende oppervlakten:

- $C_f = 0,01$ voor gladde oppervlakten
- $C_f = 0,02$ voor oppervlakten met uitsteeksels van kleiner dan 40 mm
- $C_f = 0,04$ voor oppervlakten met uitsteeksels van groter dan 40 mm

De belastingregels voor windbelasting zijn bepaald voor gebouwen op het land. In werkelijkheid heeft wind niet zo een statisch karakter als deze normen suggereren. Voor een drijvend gebouw is dit niet-statische karakter van wind belangrijker als voor gebouwen op het land (wat gebeurt er bijvoorbeeld met het gebouw tijdens windvlagen?). Eigenlijk zijn voor de windbelasting op drijvende gebouwen aangepaste normen nodig. Omdat deze echter niet beschikbaar zijn, zijn de gebruikelijke normen voor gebouwen op het land gehanteerd.

6.5 Hydrostatische waterdruk

Het gedeelte van het ponton dat zich onder water bevindt, wordt belast door waterdruk. De wet van pascal beschrijft dat de waterdruk in een (stilstaande) vloeistof in alle richtingen gelijk is. Hiernaast geldt, hoe dieper onder de waterspiegel, hoe hoger de waterdruk. De hydrostatische waterdruk zal leiden tot interne spanningen in de constructie. De verticale component van de waterdruk zal evenwicht maken met de zwaartekracht. Indien het ponton een caisson betreft, zal de vloer van het ponton sterk genoeg moeten zijn om niet te bezwijken onder deze hydrostatische waterdruk.



Afb. 6.2 Hydrostatische waterdruk.

Merk op dat de hydrostatische waterdruk een reactiekracht is. Als de actiekrachten met de juiste belastingfactoren vermenigvuldigd zijn, kan men hiemee de rekenwaarde van de hydrostatische waterdruk bepalen. Als men deze belasting wel met een belastingfactor vermenigvuldigd, komt men niet tot een rekenkundig evenwicht.

6.6 Aanvaarbelasting

Afhankelijk van de plaats waar het drijvende gebouw gesitueerd is, kan het gebouw worden aangevaren door een kleiner of een groter schip. Aanvaarbelasting is een vorm van een bijzondere belasting. Om de rekenwaarde te bepalen kunnen (6.5) en (6.6) worden gebruikt. De grootte van deze belasting kan als volgt worden bepaald. Er geldt:

$$F_{aanvaring} = k \cdot dx \quad (6.15)$$

$$E_{kin} = \frac{F_{aanvaring}}{2} \quad (6.16)$$

Substitueren van (6.15) in (6.16) levert het volgende op:

$$E_{kin} = \frac{k \cdot dx^2}{2}$$

$$dx = \sqrt{\frac{2E}{k}} \quad (6.17)$$

Als (6.17) wordt gesubstitueerd in (6.15) levert dit de volgende formule op:

$$F_{\text{aanvaring}} = \sqrt{2kE_{\text{kin,max}}} \quad (6.18)$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_s v_s^2 \cdot C_H \cdot C_E \cdot C_s \cdot C_C$$

- m = Massa maatgevend schip (ton)
- k = Constructiestijfheid: (MN/m)
- v = Aanvaarsnelheid (m/s)
- C_H = Hydrodynamische coëfficiënt
- C_E = Excentriciteitcoëfficiënt
- C_s = Zachtheidcoëfficiënt
- C_c = Configuratiecoëfficiënt

Hydrodynamische coëfficiënt C_H

De hydrodynamische coëfficiënt brengt de meebewegende watermassa ten opzichte van de massa van het schip in rekening.

Voor C_H geldt bij benadering: $C_H = 1 + \frac{d}{b}$

Met d voor de diepgang en b voor de breedte van het drijflichaam.

Excentriciteitcoëfficiënt C_E

De excentriciteitcoëfficiënt brengt de energiedissipatie in rekening die ontstaat doordat het schip bijdraait tijdens het afmeren. Aangezien het echter om een aanvaring gaat, wordt er vanuit gegaan dat er geen bijsturing plaats vind. C_E bedraagt dus 1.

Zachtheidcoëfficiënt C_s

Deze coëfficiënt verdisconteert de elasticiteit van de scheepswand. Voor een slappe scheepswand geldt: $C_s = 1$, voor een stijve scheepswand geldt, $C_s = 0,9$.

Configuratiecoëfficiënt C_C

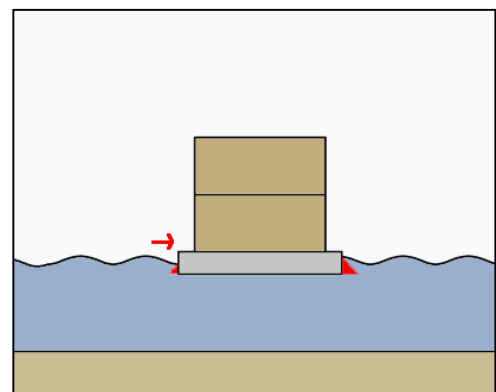
De configuratiecoëfficiënt brengt de hydrodynamische wrijving in rekening. Er ontstaat als het ware een dempende waterkussen tussen constructie en schip vlak voor het moment van aanvaring. C_C kan variëren tussen 0,8 en 1,0.

6.7 Golfbelasting

Golven kunnen voor een extra belasting op een drijvende constructie zorgen. We onderscheiden een horizontaal effect dat relevant is voor de aanmeerconstructie en een verticaal effect dat relevant is voor de belasting op de onderzijde van het ponton.

Horizontaal effect golfbelasting.

Als gevolg van golfbewegingen in de omgeving van het ponton kan er een drukverschil ontstaan. Als er aan de ene zijde van het ponton een golftop aanwezig is en aan de andere zijde zich een golfdal bevindt, maakt de horizontale waterdruk geen evenwicht meer. De resulterende kracht moet daarom opgenomen worden door de meerpaal (afb. 6.3).



Afb. 6.3 Het horizontale effect van golfbelasting.

Het is mogelijk om de grootte van een golfkracht op een constructie te bepalen. Als golven een obstakel ontmoeten dan kunnen zij of breken of reflecteren. De grootte van de golfkracht op een constructie is hiervan afhankelijk. De kracht die op de constructie wordt uitgeoefend, heeft een hydrostatische en een hydrodynamische component.

Reflectie

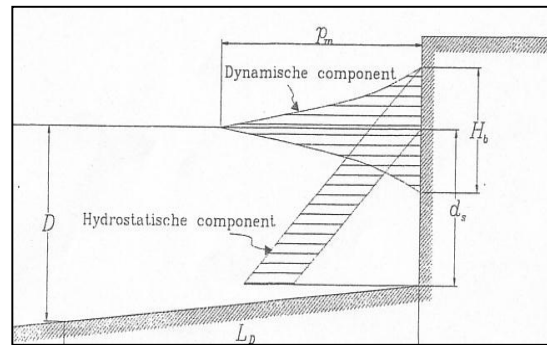
Indien een golf reflecteert, kan deze reflectie gedeeltelijk of volledig zijn. Het gevolg van reflectie is dat de golfhoogte rond het obstakel toeneemt. Reflectie kan voorkomen bij een beperkte golfhoogte. Er zijn verschillende methoden om de golfdruk op het obstakel uit te rekenen. Bron [4] geeft een vuistregel om de bovengrenswaarde van deze belasting te bepalen (dit is de situatie waarin er sprake is van volledige reflectie):²²

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho g H_i^2 + d \rho g H_i \quad (6.19)$$

H_i = de golfhoogte van de inkomende golf (m)
 d = de diepte van de golfbreker

Breking

Indien de golven breken, wordt er in een zeer korte duur een drukkracht op de constructie uitgeoefend. Bij reflecteerde golven is de drukverdeling in de golf een maat voor de kracht op de wand, maar bij een brekende golf wordt de belasting vooral bepaald door de snelheid waarmee de waterdeeltjes het obstakel raken. In bron [4] wordt vermeld dat deze belasting vanwege de korte duur ervan (ca. 1/100 s) niet representatief is voor de stabiliteit van een constructie (als gevolg van massa traagheid van het object)²³. Wel kan deze belasting van belang zijn als de sterkte van de constructie wordt gedimensioneerd. Er zijn verschillende methoden om een ruwe schatting te maken van de grootte van deze belasting (zie afb. 6.5.).²⁴



Afb. 6.5. De hydrostatische en de hydrodynamische component van de golfbelasting voor een brekende golf volgens de Minikin methode.

Of een golf reflecteert dan wel breekt, is afhankelijk van de verhouding tussen de golfhoogte en de waterdiepte. Hoe groter deze breuk is hoe groter de kans is dat de golf breekt. Bron [4] geeft een vuistregel voor de kritieke verhouding voor een onregelmatig golfveld:²⁵

$$\frac{H_s}{d} = 0,4 - 0,5 \quad (6.20)$$

H_s = significante golfhoogte (m)
 d = waterdiepte (m)

DiffRACTIE

Behalve dat de golven een obstakel raken aan de aanstroomzijde zal er ook golfbeweging plaatsvinden aan de schaduwzijde van het object. De golfkammen buigen zich om het object heen. Dit verschijnsel noemt men met diffractie. De golven aan de schaduwzijde zijn lager dan de golven aan de aanstroomzijde. Hierdoor kan er een horizontaal drukverschil optreden dat door de afmeerconstructie opgevangen moet worden.

²² Bron [4] par. 12.1

²³ Bron [4] par. 13.1

²⁴ Zie hiervoor bron [4] par. 13.2-13.5

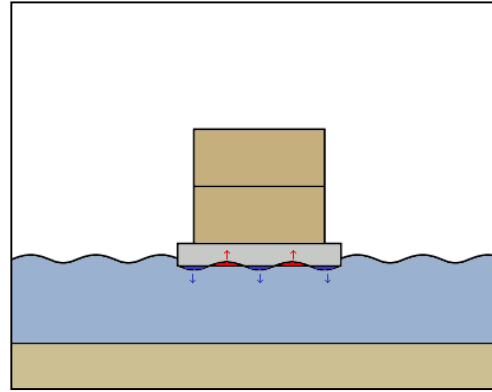
²⁵ Dit begrip is in par. 4.2 toegelicht. Voor formule (6.20) zie bron [4] par. 10.3

Verticaal effect golfbelasting

De golf loopt, hoewel uitgedempt, aan de aan de onderzijde van het ponton door. Hierdoor wordt de onderzijde van het ponton belast met een sinusvormige belasting waar overdruk en onderdruk elkaar afwisselen. Het ponton dient deze belasting op te kunnen vangen.

Belasting als gevolg van stroming

Stromend water zal ervoor zorgen dat het gebouw wil wegdrijven, wat leidt tot een horizontale belasting op de aanmeerconstructie. Bij het ontwerpen van de aanmeerconstructie moet de grootte van deze kracht worden bepaald.



Afb. 6.6. Het verticale effect van golfbelasting.

6.8 Conclusie

- Voor het doorrekenen van drijvende gebouwen zijn nog geen aangepaste normen beschikbaar daarom worden normen voor gebouwen op het land gebruikt.
- Deze normen zijn in sommige gevallen minder geschikt voor drijvende gebouwen. Te denken valt aan de rekenregels voor windbelasting en de voorschriften voor de variabele belasting.
- Van de in dit hoofdstuk benoemde belastinggevallen zijn sommige gevallen relevant voor de kernvraag (bijvoorbeeld permanente belasting, variabele belasting en windbelasting), terwijl andere belastinggevallen hiervoor minder van belang zijn en slechts betrekking hebben op het ontwerp als geheel (aanvaarbelasting en golfbelasting).

7. Conclusie deel I

Conclusies

Een samenvatting van eerder genoemde conclusies.

- Voordelen van drijven zijn de potentiële mogelijkheid voor meervoudig ruimtegebruik, de verplaatsbaarheid van het gebouw in bouw- en gebruiksfase, de mogelijkheid om met grotere bouwcomponenten te werken en de ruimtelijke kwaliteit die een omgeving met water biedt. Voor hogere drijvende gebouwen zijn twee van deze voordelen in mindere mate van toepassing, namelijk het voordeel van meervoudig ruimtegebruik en het verplaatsen van het gebouw in de gebruiksfase.
- Nadelen van drijvende gebouwen zijn de mogelijkheid van scheefstand, deining (hoe zwaar dit weegt is afhankelijk van functie), veiligheid (calamiteiten, kinderen) en nadelen van economische aard (verzekeringen en hypotheek). Deze nadelen worden niet onoverkomelijk of onoplosbaar geacht.
- Een drijvende fundering is in vergelijking met een fundering op zand minstens duizend maal zo slap. Dit betekent dat scheefstand een potentieel probleem is voor drijvende gebouwen waaraan bij het ontwerpen aandacht moet worden gegeven.
- Voor een stabiele drijvende constructie dient het metacentrum (M) boven het zwaartepunt (Z) te liggen. De afstand tussen deze punten is de metacentrumhoogte h_m .
- Wat betreft de stabiliteit van het gebouw wordt de haalbare bouwhoogte bepaald door de positie van het metacentrum en de positie van het zwaartepunt. Factoren die de positie van het metacentrum beïnvloeden zijn de breedte van het ponton, de vorm van het ponton en de diepgang.
- Betreffende de statische stabiliteit van een drijvend gebouw wordt er onderscheid gemaakt tussen twee vormen van stabiliteit. *Vormstabiliteit* heeft een grote aanvangstabiliteit, maar een klein stabiliteitsgebied. *Gewichtstabiliteit* heeft daarentegen een kleine aanvangstabiliteit, maar wordt pas effectief bij grotere rotaties. Voor drijvende gebouwen is daarom vooral de vormstabiliteit van belang.
- Voorwaarde voor de dynamische stabiliteit is dat de eigenfrequentie van het gebouw aanzienlijk verschilt van de optredende golfperiode. De eigenfrequentie moet getoetst worden voor de relevante vrijheidsgraden (de heave- en roll- beweging).
- Voor de technische randvoorwaarden voor een drijvend gebouw is in Nederland nog geen regelgeving opgesteld. De randvoorwaarden die worden gehanteerd verschillen daarom per project.
- Vanwege het ontbreken van normen voor drijvende gebouwen worden de normen voor gebouwen op het land gebruikt. In sommige gevallen zijn deze echter minder geschikt. Te denken valt aan de rekenregels voor windbelasting en de voorschriften voor de variabele belasting.

Aanbevelingen voor het ontwerp

- Het open caisson, het gesloten caisson en drijflichamen met EPS worden op basis van het literatuuronderzoek in potentie geschikt geacht als fundering voor een hoog drijvend gebouw.
- Streven naar een grote positieve waarde van h_m . Dat betekent streven naar een laag zwaartepunt en een hoog metacentrum.
- Belangrijke ontwerpgegevens voor de metacentrumhoogte zijn, de breedte van het ponton, de vorm van het ponton en de diepgang.
- Streven naar een hoge aanvangsstabiliteit (vormstabiliteit).

Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Onderzoek naar de vraag wat voor hoge drijvende gebouwen het optimale type drijflichaam is. Maakbaarheid, functionaliteit en krachtswerking zijn hierbij punten van aandacht (wordt opgepakt in ontwerpgedeelte).
- Onderzoek naar de invloed van pontonvorm, pontonbreedte, de positie van het zwaartepunt op de stabiliteit en de haalbare bouwhoogte (wordt opgepakt in ontwerpgedeelte).
- Onderzoek naar de belastingregels voor drijvende gebouwen. Punten van aandacht kunnen hierbij zijn de windbelasting, de veranderlijke belasting en de belastingfactoren.

Deel II

Beschrijving ontwerp



8. Inleiding deel II

In dit deel wordt nader ingegaan op de ontwerpopgave voor een hoog drijvend gebouw: een hotel. De kennis die in het theoretische deel is verzameld, wordt nu vertaald naar een concreet ontwerp. Tijdens het ontwerpen wordt ook het inzicht in de thematiek verdiept.

Voor dit deel van de scriptie zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- *Hoe functioneert een hotel en welke typologieën bestaan er voor dit gebouw?*
- *Wat is een efficiënte basisvorm voor een hoog drijvend gebouw (drijflichaam en bovenbouw)?*
- *Wat is de haalbare bouwhoogte binnen het gegeven programma?*
- *Welke problemen en kansen ontstaan doordat men op een drijvende fundering bouwt, en hoe worden deze respectievelijk opgelost en benut?*
- *Welke consequenties heeft het bouwen op een drijvende fundering voor de bouwvolgorde?*

Om inzicht te geven in de ontwerpbeslissingen die ten grondslag liggen aan het definitieve ontwerp wordt vrij uitvoerig ingegaan op de verschillende fasen in het ontwerpproces. Tijdens dit ontwerpproces zijn mogelijkheid en beperkingen, kansen en knelpunten gesignaleerd en geanalyseerd. Door het ontwerpproces toe te lichten, wordt vanzelf in deze aspecten inzicht gegeven.

Het ontwerpproces dat in de navolgende hoofdstukken wordt behandeld is onderverdeeld in de hieronder genoemde fasen:

- Onderzoek basisvarianten
- Verkenning programma
- Ontwikkelen varianten conceptontwerp
- Aanscherping ontwerp drijflichaam
- Voorlopig ontwerp
- Definitief ontwerp

De verschillende fasen worden zoveel mogelijk volgens dezelfde systematiek behandeld. Eerst wordt de doelstelling van de fase beschreven, vervolgens komen uitgangspunten aan de orde. Hierna wordt de gehanteerde werkwijze beschreven en tenslotte komen resultaten, conclusies aanbevelingen en knelpunten aan de orde.

Elke fase wordt dus afgesloten met een korte evaluatie. Bij de laatste fase gebeurt dit uitgebreider, dan wordt zowel het ontwerpproduct als het ontwerpproces geëvalueerd. Hiernaast wordt in een van de laatste hoofdstukken een rekenkundige validatie van het ontwerp gegeven.

9. Onderzoek basisvarianten

Een van de conclusies van het literatuuronderzoek was dat de vorm en de afmetingen van het ponton belangrijke ontwerpgegevens zijn die invloed hebben op de maximaal haalbare bouwhoogte. Hiernaast is de positie van het zwaartepunt van belang. De eerste stap naar een concreet ontwerp is gemaakt door nader onderzoek te doen naar deze ontwerpgegevens. In deze fase wordt gezocht naar de ideale basisvorm voor een drijvend gebouw, geredeneerd vanuit het oogpunt van drijftechnologie.

9.1 Doelstelling onderzoek basisvarianten

Bij het ontwikkelen van concepten voor hoge drijvende gebouwen rijst vanzelfsprekend de vraag welke pontonvorm en welke afmetingen van het ponton gekozen moeten worden en welke invloed deze keuzes hebben op de haalbare bouwhoogte. In het theoretische deel was al duidelijk geworden dat deze ontwerpgegevens van belang waren, maar over de mate waarin kon nog weinig zinnigs gezegd worden. Om een antwoord op deze vraag te vinden, is onderzoek gedaan naar de ideale basisvorm van het gebouw.

Voor dit onderzoek zijn de volgende doelstellingen geformuleerd:

- *De maximale bouwhoogte bepalen die haalbaar is voor verschillende pontonvormen bij een gegeven pontonoppervlak.*
- *Op basis hiervan bepalen welke pontonvormen potentieel geschikt zijn voor het ontwerp van een hoog drijvend gebouw.*
- *Bestuderen wat de invloed is van de afmetingen van het ponton op de haalbare bouwhoogte.*

9.2 Werkwijze

Om de invloed van de pontonvorm en afmetingen van het ponton op de haalbare bouwhoogte te bepalen, zijn een aantal basisvormen voor drijvende gebouwen ontwikkeld. De varianten zijn dusdanig gekozen dat ze goed met elkaar vergeleken kunnen worden. Om zowel de invloed van de pontonvorm als de invloed van de gebouwafmetingen te bepalen, zijn de varianten ontwikkeld in sets van drie. Voor een bepaalde pontonvorm werd een klein, een middelgroot en een groot ponton bestudeerd.

Bewust zijn bij het ontwikkelen van de varianten esthetische, economische en functionele aspecten niet in overweging genomen, omdat dit vertroebelend voor het onderzoek zou werken (men kan hierbij denken aan de functionaliteit van een driehoekig drijflichaam, de bruikbaarheid van de gebouwafmetingen e.d.). Uiteraard zijn deze aspecten in latere fasen van het ontwerpproces wel in overweging genomen.

De bestudeerde varianten zijn dus op basis van één aspect geoptimaliseerd, namelijk ten aanzien van de drijftechnologie. De conclusies die uit het vergelijken van deze varianten volgen, geven inzicht in dit aspect van een drijvend gebouw.

De verschillende varianten zijn ingevoerd in een excelsheet waarmee de prestaties berekend konden worden. Naar de volgende aspecten is in deze berekening gekeken:

- De prestaties in de relevante belastingcombinaties (UGT en BGT) zijn berekend.
- De variant is getoetst aan de vooraf bepaalde randvoorwaarden (t.a.v. scheefstand, metacentrumhoogte, vrijboord e.d.).
- Het maximaal aantal lagen binnen de gegeven randvoorwaarden en uitgangspunten is bepaald.
- Indien van toepassing zijn de prestaties in verschillende richtingen berekend.

9.3 Uitgangspunten en randvoorwaarden

Randvoorwaarden

- Voor het onderzoek zijn de technische randvoorwaarden gebruikt die in par. 5.1 zijn vastgesteld.

Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn voor het onderzoek gehanteerd:

- De waterdiepte is geen beperkende factor voor de maximale bouwhoogte.
- De oppervlakte van de verschillende pontonvormen die met elkaar vergeleken worden is steeds constant. Dit geldt uiteraard alleen binnen de categorieën klein, middelgroot en groot.

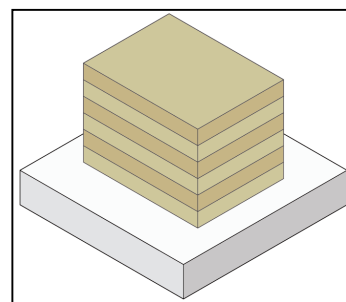
- De hoogte van het ponton is afhankelijk van het gebouwsvolume en de hiervoor vereiste waterverplaatsing.
- De bebouwingsgraad van de pontons bedraagt 50% of 100%.
- De bebouwing op het ponton is steeds vierkant (dus in beide richtingen eenzelfde geveloppervlak).
- De bovenbouw van het ponton heeft een verdiepingshoogte van 3,5 m.
- De gehanteerde veranderlijke belasting voor de bovenbouw bedraagt $1,75 \text{ kN/m}^2$ (woonfunctie).
- Het eigengewicht van de bovenbouw is afhankelijk van de bouwhoogte en berust op een schatting:
 - tot en met 4 lagen $2,0 \text{ kN/m}^3$
 - van 5 tot 8 lagen $2,5 \text{ kN/m}^3$
 - 9 lagen en hoger $3,0 \text{ kN/m}^3$
- Het eigengewicht van het drijflichaam is afhankelijk van de diepgang en berust op een ruwe schatting. Hoe groter de diepgang, hoe hoger de hydrostatische druk, hoe zwaarder het drijflichaam. De volgende waarden zijn gehanteerd:
 - Diepgang $< 7 \text{ m}$; eigengewicht $3,0 \text{ kN/m}^3$
 - Diepgang $7\text{-}14 \text{ m}$; eigengewicht $3,5 \text{ kN/m}^3$
 - Diepgang $> 14 \text{ m}$; eigengewicht $4,0 \text{ kN/m}^3$

9.4 Beschrijving van de varianten

Hieronder volgt een beschrijving van de onderzochte varianten. De varianten hebben wat betreft opbouw zoveel mogelijk overeenkomsten, zodat de prestaties van de verschillende varianten goed met elkaar vergeleken kunnen worden.

1. Rechthoekig ponton – bebouwingsoppervlak 50%

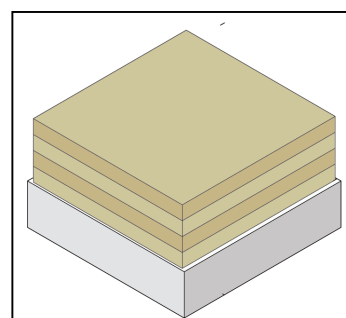
- variant 1a:* ponton van $20 \times 20 \text{ m}$ (opp. 400 m^2)
bebouwing: $14 \times 14 \text{ m}$
- variant 1b:* ponton van $40 \times 40 \text{ m}$ (opp. 1600 m^2)
bebouwing: $28 \times 28 \text{ m}$
- variant 1c:* ponton van $60 \times 60 \text{ m}$ (opp. 3600 m^2)
bebouwing: $42 \times 42 \text{ m}$



Afb. 9.1. Variant 1b.

2. Rechthoekig ponton – bebouwingsoppervlak 100%

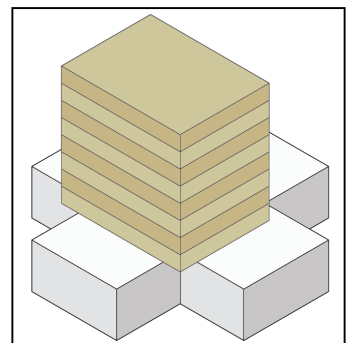
- variant 2a:* ponton van $20 \times 20 \text{ m}$ (opp. 400 m^2)
bebouwing: $20 \times 20 \text{ m}$
- variant 2b:* ponton van $40 \times 40 \text{ m}$ (opp. 1600 m^2)
bebouwing: $40 \times 40 \text{ m}$
- variant 2c:* ponton van $60 \times 60 \text{ m}$ (opp. 3600 m^2)
bebouwing: $60 \times 60 \text{ m}$



Afb. 9.2. Variant 2b.

3. Kruisvormig ponton – bebouwingsoppervlak 50%

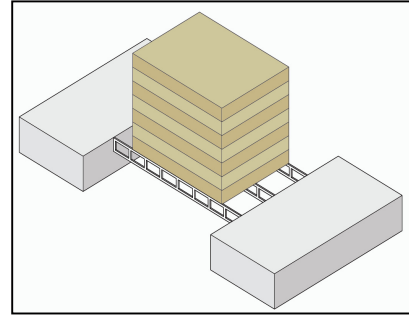
- variant 3a:* 2 rechthoeken van $10 \times 25 \text{ m}$ (opp. 400 m^2)
bebouwing: $14 \times 14 \text{ m}$
- variant 3b:* 2 rechthoeken van $20 \times 50 \text{ m}$ (opp. 1600 m^2)
bebouwing: $28 \times 28 \text{ m}$
- variant 3c:* 2 rechthoeken van $30 \times 100 \text{ m}$ (opp. 3600 m^2)
bebouwing: $42 \times 42 \text{ m}$



Afb. 9.3. Variant 3b.

4. Catamaran – bebouwingsoppervlak 50 %

- variant 4a:* 2 pontons van 10 x 20 m (opp. 400 m²)
afstand drijflichamen 20 m
bebouwing: 14 x 14 m
- variant 4b:* 2 pontons van 20 x 40 m (opp. 1600 m²)
afstand drijflichamen 40 m
bebouwing: 28 x 28 m
- variant 4c:* 2 pontons van 30 x 60 m (opp. 3600 m²)
afstand drijflichamen 60 m
bebouwing: 42 x 42 m

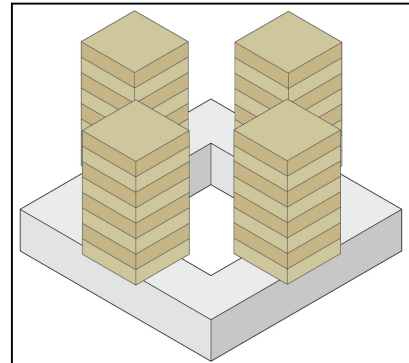


Afb. 9.4. Variant 4b

Opmerking: Deze variant is onderzocht in zijn beste richting, omdat hij in de andere richting gelijke prestaties levert als variant 1.

5. Vierkant ponton met holle kern – bebouwingsoppervlak 50%

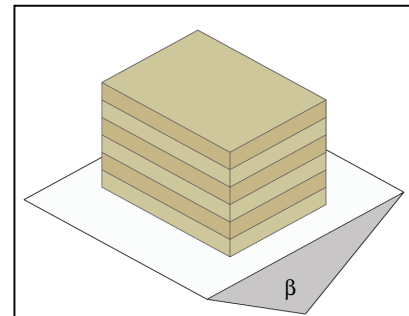
- variant 5a:* vierkant ponton 25 x 25 m;
holle kern 15x15 m (opp. 400 m²)
bebouwing: 4 x 7 x 7 m
- variant 5b:* vierkant ponton 50 x 50 m
holle kern 30 x 30 m (opp. 1600 m²)
bebouwing: 4 x 14 x 14 m
- variant 5c:* vierkant 75 x 75 m;
hollekern 45 x 45 m (opp. 3600 m²)
bebouwing: 4 x 21 x 21 m



Afb. 9.5. Variant 5b.

6. Scherp driehoekvormig ponton – bebouwingsoppervlak 50%

- variant 6a:* ponton van 20 x 20 m (opp. 400 m²)
hoek β : 120°
bebouwing: 14 x 14 m
- variant 6b:* ponton van 40 x 40 m (opp. 1600 m²)
hoek β : 104°
bebouwing: 28 x 28 m
- variant 6c:* ponton van 60 x 60 m (opp. 3600 m²)
hoek β : 85°
bebouwing: 42 x 42 m

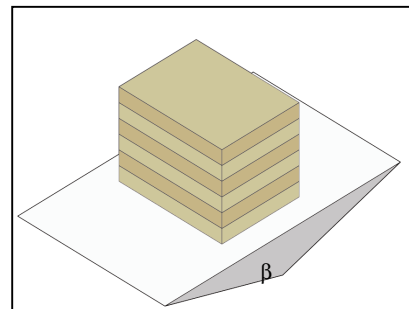


Afb. 9.6. Variant 6b.

Opmerking: Deze varianten hebben steeds dezelfde waterverplaatsing en bouwhoogte als de variantenserie 1. Het bepalen van het maximaal aantal bouwlagen is voor dit ponton zinloos. Het ponton wordt immers bij een toenemende bouwhoogte steeds breder, en daarmee ook stabiel. Daarom is gekeken naar de rotatie bij een overeenkomstige belastingsituatie als variant 1. Hetzelfde geldt voor de variantenserie 7.

7. Stomp driehoekvormig ponton – bebouwingsoppervlak 50%

- variant 7a:* ponton van 20 x 30 m (opp. 600 m²)
hoek β : 150°
bebouwing: 14 x 14 m
- variant 7b:* ponton van 40 x 60 m (opp. 2400 m²)
hoek β : 141°
bebouwing: 28 x 28 m
- variant 7c:* ponton van 60 x 100 m (opp. 6000 m²)
hoek β : 138°
bebouwing: 42 x 42 m



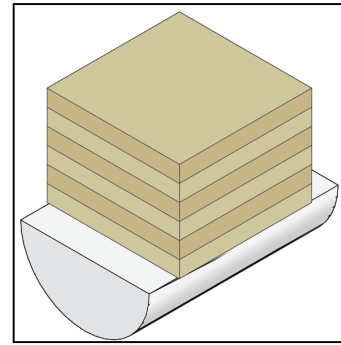
Afb. 9.7. Variant 7b.

Opmerking: Het oppervlak van dit ponton is groter dan bij de andere varianten.

8. Klein cilindervormig ponton – bebouwingsoppervlak 50%

<i>variant 8a:</i>	ponton: $l = 20$ m; $r = 6,1$ m (opp. 245 m ²) bebouwing: 14×14 m
<i>variant 8b:</i>	ponton: $l = 40$ m; $r = 13,6$ m (opp. 1090 m ²) bebouwing: 28×28 m
<i>variant 8c:</i>	ponton: $l = 60$ m; $r = 21,4$ m (opp. 2570 m ²) bebouwing: 42×42 m

Opmerking: Om een vergelijking te kunnen maken met variant 1 is de maximale waterverplaatsingen en het aantal bouwlagen gelijk gehouden, terwijl het oppervlakte van het ponton –als gevolg daarvan– kleiner is.

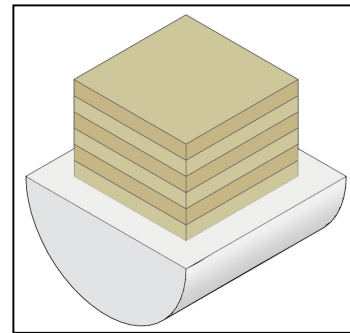


Afb. 9.8. Variant 8b

9. groot cilindervormig ponton – bebouwingsoppervlak 50%

<i>variant 9a:</i>	ponton: $l = 20$ m; $r = 10$ m (opp. 400 m ²) bebouwing: 14×14 m
<i>variant 9b:</i>	ponton: $l = 40$ m; $r = 20$ m (opp. 1600 m ²) bebouwing: 28×28 m
<i>variant 9c:</i>	ponton: $l = 60$ m; $r = 30$ m (opp. 3600 m ²) bebouwing: 42×42 m

Opmerking: Om een vergelijking te kunnen maken met variant 1 is de oppervlakte van het ponton en het aantal bouwlagen gelijk gehouden. De maximale waterverplaatsing van het ponton is als gevolg daarvan aanzienlijk groter.



Afb. 9.9. Variant 9b

9.5 Resultaten en conclusies

De resultaten van dit onderzoek zijn te vinden in bijlage [3]. De volgende conclusies kunnen op basis van het onderzoek worden getrokken:

Bebouwingspercentage

1. Een lager bebouwingspercentage verhoogt de mogelijke bouwhoogte. Het gezamenlijke zwaartepunt ligt lager. Hiernaast leidt een lager bebouwingspercentage tot een geringere diepgang.²⁶

De capaciteit van het drijflichaam

2. Hoe groter de bouwmassa en de veranderlijke belasting, hoe groter het verschil in diepgang tussen de UGT en de BGT is. Dit verschil kan wel 3 m bedragen (variant 3c en 5c)! Dit betekent dat het drijflichaam een grote reservecapaciteit moet hebben. Een dergelijke diepgangfluctuatie is niet reëel, maar een gevolg van het gebruik van belastingfactoren.
3. De belastingvoorschriften voor gebouwen op het land zijn om deze reden niet optimaal geschikt om de benodigde capaciteit van het drijflichaam te bepalen.
4. Een grote breedte van het drijflichaam vergt ook een grote extra capaciteit van het drijflichaam, omdat bij een kleine rotatiehoek al een aanzienlijk hoogteverschil ontstaat. De randvoorwaarde van een minimaal resterend drijfvermogen van 0,2 m is dan bepalend voor de capaciteit van het drijflichaam.
5. Indien een grotere capaciteit van het drijflichaam nodig is, kan het ponton beter in de breedte worden uitgebreid dan in de diepte. Een uitbreiding van het ponton in de breedte is gunstig voor de vormstabiliteit.²⁷

²⁶ Conclusie 1 en 5 zullen later nader aangescherpt worden, zij zijn niet zondermeer waar.

Pontonafmeting en pontonvorm

7. Een breder ponton betekent een hogere haalbare bouwhoogte.
8. Een catamaran-ponton is in zijn breedste richting minder rotatiegevoelig als een vergelijkbaar vierkant ponton. Toch is de catamaran geen wenselijke pontonvorm, want:
 - a. Er is een zware overgangsconstructie nodig (of verbidingsconstructie).
 - b. Het ponton heeft in verschillende richtingen verschillende prestaties en is het zwakst in de meest wenselijke bebouwingsrichting.
 - c. Ten opzichte van een vierkant ponton levert de variant geen extra bouwhoogte op (zwakste richting is maatgevend).
9. Als de varianten gesorteerd worden op de haalbare bouwhoogte, blijkt dat een vierkant met een holle kern de meest effectieve pontonvorm is. Daarna volgt de kruisvorm. Ten opzichte van een vergelijkbaar vierkant ponton kan het gebouw voor de varianten *vierkant met holle kern* en *kruisvorm* meer bouwlagen tellen. Door het materiaal naar de buitenkant van het drijflichaam te brengen, neemt de haalbare bouwhoogte dus toe.
10. Een driehoekvormig ponton presteert beter naarmate de top van het drijflichaam stomper wordt (het gevolg daarvan is dat het drijflichaam breder wordt).
11. Een belangrijk nadeel van een driehoekvormig ponton is dat het in één richting slechter presteert in de BGT dan in de UGT (terwijl de belastingsituatie dan gunstiger is). Dit komt omdat het ponton dan minder diep ligt en op dat moment eigenlijk minder breed geworden is.
12. Hoewel een driehoekvormig ponton een hoger metacentrum heeft dan een vierkant ponton met vergelijkbare afmetingen, betekent dit niet per definitie dat het drijflichaam ook minder rotatiegevoelig is. Het effect van een hogere metacentrum wordt door twee zaken vertroebeld:
 - a. Het zwaartepunt van het drijflichaam ligt hoger.
 - b. Het drijflichaam presteert slechter bij geringere diepgang (conclusie 11).
13. Als vuistregel kan gesteld worden dat een driehoekvormig ponton *in principe* beter presteert dan een rechthoekig drijflichaam, indien het materiaal t.o.v. de rechthoek naar de zijkant (en niet naar de onderkant) wordt verplaatst (afb. 9.10). De hoek aan de onderzijde van het ponton dient dus stomp te zijn.
14. De beide onderzochte varianten van een cilindervormig drijflichaam presteren slechter dan een vergelijkbaar rechthoekig drijflichaam. Bij variant 8 is de kleinere breedte van het drijflichaam hier de oorzaak van. Bij variant 9 is er sprake van een onevenredig grote waterverplaatsing. Indien men niet uitgaat van een halve cilinder, maar van een kleinere deel met een grotere straal zullen de prestaties verbeteren (afb. 9.11).

Afb. 9.10 Varianten van een driehoekig drijflichaam.

Afb. 9.11 Varianten van een cilindervormig drijflichaam.

Tenslotte nog een opmerking over het maximaal haalbare aantal bouwlagen dat bepaald is. Het is belangrijk om te beseffen dat de gevonden waarden voor de maximale bouwhoogte in belangrijke mate afhankelijk zijn van de gekozen randvoorwaarden en uitgangspunten. Gaat men uit van een andere massaverdeling en van andere maximale rotaties dan zal men ook andere waarden vinden voor de maximale bouwhoogte.

9.6 Aanbevelingen en knelpunten

Op basis van het onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen voor het ontwerp worden gedaan:

- Binnen de mogelijkheden van het programma moet het drijflichaam een zo groot mogelijk oppervlak hebben, omdat dit mogelijkheid biedt om hoger te gaan bouwen.
- De volgende pontonvormen zijn potentieel geschikt voor een hoog drijvend gebouw: Het rechthoekig ponton (1), het vierkant met de hollekern (5) en het kruisvormig ponton. (3). De laatste twee leveren een hogere maximale bouwhoogte op dan de eerste.
- De theoretische voordelen van een driehoekige en cilindervormige pontonvorm vallen in de praktijk tegen. Gezien het feit dat deze pontonvormen voor een functionele bestemmingen ook niet aantrekkelijk zijn, worden deze pontonvormen in het vervolg buiten beschouwing gelaten.
- De catamaran is geen aantrekkelijke pontonvorm voor een drijvend gebouw.

Aan het einde van deze fase worden de volgende knelpunten gesignaleerd:

- De massa-bepaling van drijflichaam en bovenbouw is nog erg grof, dit vermindert de betrouwbaarheid van de gevonden maximale bouwhoogte.
- Er is nog niet gekeken naar de krachtswerking in het drijflichaam zelf, alleen naar het gebouw als geheel. Het drijflichaam is tot nu toe beschouwd als een homogene massa.
- De volume-opbouw van de varianten is in deze fase slechts vanuit één aspect ontwikkeld. Er is nog geen rekening gehouden met esthetische, economische, bouwtechnische en functionele overwegingen.

10. Verkenning programma

In het voorgaande hoofdstuk is onderzoek gedaan naar abstracte gebouwvormen. De volgende stap in het ontwerpproces is het verkennen van het programma van een hotel. Deze fase zal in dit hoofdstuk worden belicht.

10.1 Doelstelling verkenning programma

Voordat de stap naar een concreet conceptontwerp gemaakt kan worden, is een verkenning van het programma vereist. Voor deze fase zijn de volgende doelstellingen geformuleerd:

- Kennis vergaren over het gebouwtype hotel (typologie plattegronden)
- Het bepalen van de verschillende functies die in een hotel (kunnen) worden ondergebracht, het bepalen van de ruimtevraag van deze functies en hun onderlinge relaties.
- Op basis hiervan een programma van eisen en een relatieschema ontwikkelen.
- Het zoeken van een geschikte locatie voor de ontwerpopgave.

10.2 Werkwijze

Om het bovengenoemde doel te bereiken, zijn de volgende middelen gebruikt:

- Een literatuuronderzoek naar het gebouwtype 'hotel' en de ontwerpopgave hiervan. Met name is hierbij gebruik gemaakt van het boek: *'Hotels, planning en ontwerp'* van T. de Jong
- Het bestuderen van een aantal voorbeelden van hotels die wat betreft omvang overeenkomen met deze ontwerpopgave.
- Hiernaast is er een klein onderzoek gedaan naar potentiële locaties voor het ontwerp.

10.3 Uitgangspunten

Voor het ontwikkelen van het programma van eisen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Er is reeds een marktstudie gedaan waaruit blijkt dat op de gegeven locatie het programma voor het hotel financieel haalbaar is.
- De grote van de nevenvoorzieningen (restaurant; congreszalen e.d.) zijn afgestemd op de plaatselijke markt.

10.4 Resultaten

De belangrijkste resultaten van het verkennen van het programma zijn hieronder per onderwerp weergegeven.

Functionies

In een hotel zijn drie functie-zones te onderscheiden te weten het logiesgedeelte, het publieke gedeelte en het dienstgedeelte. De invulling van deze zones wordt hieronder toegelicht.

Logiesgedeelte

Het logiesgedeelte bestaat vanzelfsprekend uit de kamers van de hotelgasten. Meestal is deze zone duidelijk afgegrenst van het publieke gedeelte zodat ongewenste gasten in het logiesgedeelte zoveel mogelijk worden voorkomen.

De grote van de hotelkamers wordt grotendeels bepaald door het beoogde kwaliteitsniveau en de locatie. Hotelkamers zijn tegenwoordig allemaal voorzien van een eigen badkamer. De differentiatie in kamergrote is ook een punt van aandacht bij het ontwerp van een hotel. Gewoonlijk zijn er in een hotel kamers beschikbaar in verschillende prijsklassen. Een tweepersoonskamer is de meestvoorkomende eenheid. Deze kamer heeft een grootte van rond de 20 m². De grootte van de kamer is uiteraard in belangrijke mate afhankelijk van de gewenste kwaliteit. Een hotelkamer dient minimaal 3,5 m breed te zijn.²⁷ Een hotelkamer is gemiddeld zo'n 2,6 m hoog.

Belangrijk is de aanbeveling om in het ontwerp uit te gaan van één type kamer met een zo algemeen mogelijke toepasbaarheid. Om die reden is er ook een tendens binnen het hotelwezen te signaleren dat er geen aparte eenpersoonskamers meer worden gebouwd. In plaats daarvan zorgt men ervoor dat een deel van de tweepersoonskamers optioneel als eenpersoonskamers kunnen worden ingericht. Hiernaast maakt men ook gebruik van de mogelijkheid om kamers te schakelen en zo bijvoorbeeld een gecombineerde kamer te maken met een woon- en werkvertrek.²⁸ Tenslotte wordt opgemerkt dat de geluidsisolatie een belangrijk aspect is voor het logiesgedeelte.

²⁷ Bron [14] par. 5.1.1.

²⁸ Bron [14] par. 5.1.2.

Publieke gedeelte

Het publieksgedeelte van een hotel bestaat uit een aantal functies waarvan de meeste ook geschikt zijn voor gebruik door niet- hotelgasten. Functies die in het publieke gedeelte worden ondergebracht, zijn bijvoorbeeld het restaurant, de receptie, een bar, de lounge. Hiernaast kunnen zaken als congreszalen, sportfaciliteiten en winkels in deze zone zijn ondergebracht. De publieke functies kunnen een versterking zijn voor de kwaliteit van het hotel als geheel. De omvang van de het publieke gedeelte hangt niet alleen af van de grootte van het logiesgedeelte, maar ook van de mate waarin de publieke faciliteiten in het hotel een trekpleister vormen voor niet- hotelgasten.

Het restaurant is een voorbeeld van een functie die zich op een breder publiek richt dan enkel hotelgasten. In sommige gevallen heeft het restaurant ook een aparte ontsluiting. De grootte van het restaurant en de bijbehorende keuken is afhankelijk van het beoogde kwaliteitsniveau. De volgende getallen kunnen echter als richtlijn worden gehanteerd:²⁹

- De verhouding verdienend oppervlak t.o.v. niet verdienend oppervlak (keuken; sanitair e.d.) bedraagt bij een luxe restaurant ca. 1:1 en bij een normaal restaurant ca. 1:0,6.
- Het oppervlakte per stoel bedraagt in een luxe restaurant ca. 1,9m² en in een normaal restaurant ca. 1,3 m².
- Het magazijnoppervlak per stoel bedraagt bij een luxe restaurant ca. 0,5 m², en bij een normaal restaurant 0,3 m².

Om een indicatie te krijgen van de grootte van andere publieke functies wordt verwezen naar bron [14]. Bij het ontwerp van deze zone is het publieke karakter ervan een belangrijk gegeven. Over de scheiding van deze zone met de rest van het hotel moet goed worden nagedacht.

Dienstruimten

De dienstruimten zijn de ruimtes die nodig zijn om het functioneren van het hotel mogelijk te maken. Deze ruimtes worden onderverdeeld in administratieve ruimtes, huishoudelijke ruimtes, technische ruimtes en personeelsvoorzieningen.

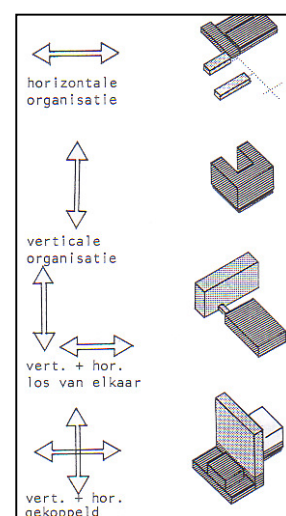
Administratieve ruimtes zijn de kantoren voor de administratie van hotel, restaurant en ondersteunende functies. Huishoudelijke ruimtes zijn de opslagruimtes en de gedecentraliseerde huishoudelijke dienstruimten in het het logiesgedeelte. Per 16-21 kamers moet er een dergelijke ruimte aanwezig zijn (t.b.v. opslag linnegoed, schoonmaakartikelen e.d.). De technische ruimtes betreffen een werkplaats en de ruimtes die gereserveerd zijn voor installaties. De personeelsruimtes zijn ruimtes met functies als personeelskantine en personeelssanitair.

Er bestaan richtlijnen die een indicatie geven voor de ruimtevraag van de hierboven genoemde functies, hiervoor wordt verwezen naar bron [14]. In deze bron worden tevens veel grondiger dan hierboven ingegaan op het programma van een hotel. Hier worden slechts de voornaamste zaken genoemd om in hoofdlijnen een beeld te geven van het functioneren van een hotel.

Gebouwstructuur

De verschillende zones van een hotel kunnen op verschillende manieren ten opzichte van elkaar georganiseerd worden. Er kan gekozen worden voor een verticale of voor een horizontale organisatie, of een gecombineerde vorm (afb. 10.1).

Ten aanzien van de ontwerpopgave voor een hoog drijvend gebouw, is het een vanzelfsprekende keus om ernaar te streven om de functies zoveel als mogelijk te stapelen. Dit biedt tegelijkertijd de mogelijkheid om het logiesgedeelte en het publieke gedeelte op een heldere wijze van elkaar te scheiden. De maatsystematiek van de verschillende functies dient hiertoe wel op elkaar afgestemd te worden.



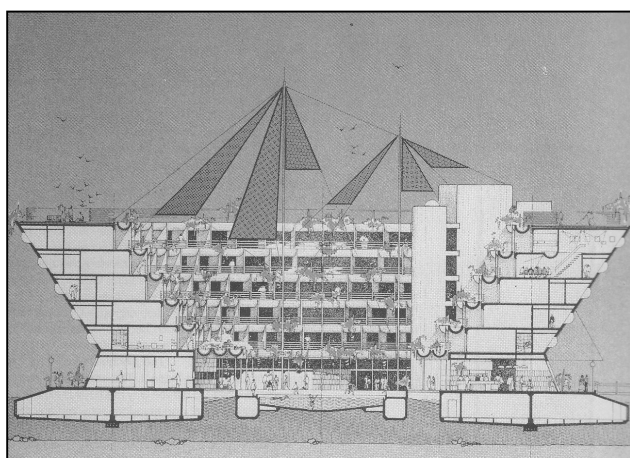
Afb. 10.1. Het schakelen van functies.

²⁹ Bron [14] par. 5.3.1.

Typologie plattegronden

Voor het logiesgedeelte zijn verschillende typologieën van plattegronden te onderscheiden die elk hun eigen voor- en nadelen hebben. De volgende typologieën kunnen onderscheiden worden (afb. 10.2):

- Gang met kamers aan een zijde.
Voordeel: veel daglicht in de hotelkamers, brandveiligheid goed op te lossen. *Nadeel:* veel geveloppervlak.
- Gang met kamers aan twee zijden, eventueel in offset configuratie.
Voordeel: efficiënte organisatievorm, brandveiligheid goed op te lossen.
- Centrale configuratie (rechthoek, cirkel of driehoek).
Nadeel: brandveiligheid moeilijker op te lossen, lastige en onpraktische hoeken.
- Configuratie rond atrium.
Voordeel: Gunstig voor daglichttoetreding, brandveiligheid goed op te lossen. *Nadeel:* hogere bouwkosten.



Afb. 10.3. Ontwerp voor een drijvend hotel bij Caïro. Een configuratie rond een atrium. De vraag kan gesteld worden of de diepgang correspondeert met de bouwmassa.

De gang met aan twee zijden kamers is de meest gebruikte typologie voor een hotelplattegrond.

Het logiesgedeelte heeft dan, afhankelijk van de kamerdiepte, een breedte tussen de 14 en de 18 meter.

Configuration	Rooms per floor
Single-loaded slab	Varies 12-30+
Double-loaded slab	Varies 16-40+
Offset slab	Varies 24-40+
Rectangular tower	16-24
Circular tower	16-24
Triangular tower	24-30
Atrium	24+

Afb. 10.2. typologieën van hotelplattegronden.

Welk type plattegrond voor een specifieke ontwerpogave het meest geschikt is, hangt niet alleen af van de functionaliteit van een bepaald type, maar ook van de beschikbare kavel, het uitzicht en dergelijke overwegingen.

De verkenning van het gebouwtype hotel heeft geresulteerd in een programma van eisen en een relatieschema. Deze zijn te vinden in bijlage [4] en [5]. Deze documenten vormen samen het uitgangspunt voor het ontwerp.

Locatie ontwerpogave

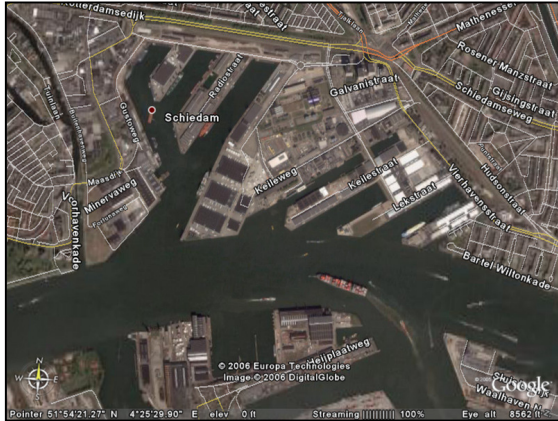
Het programma van een hotel wordt uiteraard ook beïnvloed door haar directe omgeving. Tijdens deze fase is er onderzoek gedaan naar een geschikte locatie voor een hoog drijvend hotel. Potentiële locaties voor drijvende gebouwen zijn oude havengebieden met herstructureringsplannen, plangebieden voor buitendijks bouwen, kanalen, retentiegebieden, zandwinplassen en grindaftgravingen.

Verschillende locaties zijn geselecteerd en beoordeeld op de volgende criteria:

- De waterdiepte en de optredende peilfluctuatie.
- De stedelijkheid van het gebied (een hoog drijvend gebouw suggereert een stedelijk gebied).
- De bereikbaarheid over waterwegen (gunstig voor bouwphase en eventueel voor gebruiksfase)
- De bereikbaarheid ten aanzien van de stedelijke infrastructuur.
- De veiligheid van de locatie (gevaar op aanvaring).

Deze criteria wogen niet allemaal even zwaar. De waterdiepte was een belangrijk criterium, omdat een geringe waterdiepte al snel de beperkende factor is voor de haalbare bouwhoogte. Hiernaast heeft het derde criterium ook redelijk zwaar gewogen, omdat een goede ligging ten opzichte van de waterwegen het mogelijk maakt om de voordelen van drijvende gebouwen in de bouwphase te benutten.

Uit dit onderzoek kwamen twee locaties als aantrekkelijke mogelijkheden naar voren, te weten de Houthavens in Amsterdam en het stadshavengebied in Rotterdam. Beiden gebieden liggen in een stedelijke omgeving. Ook liggen de locaties gunstig ten opzichte van belangrijke vaarwegen en hebben ze een aanzienlijke waterdiepte (rond de 10 meter). Voor zowel de Houthavens als voor het stadshavengebied worden herinrichtingsplannen ontwikkeld waarbij aandacht is voor de potentiële mogelijkheid voor drijvende gebouwen. Voor de Houthavens was er een meer uitgewerkt stedenbouwkundig plan beschikbaar, terwijl de plannen voor het stadshavengebied zich nog in een beginstadium bevinden.



Afb. 10.4. Stadshavengebied Rotterdam.

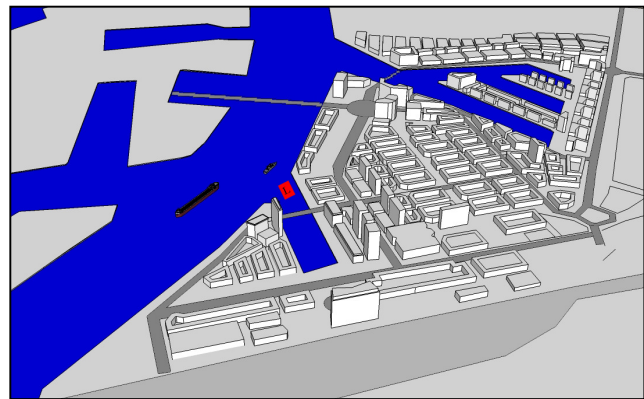


Afb. 10.5. Plan voor Houthavens Amsterdam.

Omdat echter de beoogde schaal van het hotel niet goed paste binnen het stedenbouwkundig plan voor de Houthavens, is er gekozen voor het stadshavengebied in Rotterdam. Uitgangspunt is hierbij dat het gebouw een plaats krijgt in het herontwikkelde gebied met een verbeterde infrastructuur. Omdat veel havenactiviteiten steeds meer naar de kust worden verplaatst, kampt het gebied met leegstand en verloederding. De herstructureringsplannen moeten hier een einde aan maken door een juist evenwicht te vinden tussen verschillende functies.

Binnen het stadshavengebied is het vierhavengebied uit gekozen als de definitieve locatie voor het drijvende hotel. Dit aan de noordoever gelegen gebied ligt relatief gunstig ten opzichte van de huidige infrastructuur (vlakbij het Marconiplein) en heeft een goed uitzicht over de Nieuwe Maas. Omdat er nog geen stedenbouwkundig plan voor het stadshavengebied beschikbaar was, is er gebruik gemaakt van een niet uitgevoerd herstructureringsplan uit 1946.

Het hotel is gelocaliseerd in de IJsselhaven. De minimale bodemdiepte is 9,65 m onder N.A.P. Hiernaast moet rekening gehouden met de getijdenwerking die ervoor zorgt dat het waterpeil per getijde ongeveer 1 tot 1,5 m fluctueert. Gedetailleerde gegevens omtrent de getijdewerking zijn te vinden in het getijdenboekje van de Rotterdamse havens.



Afb. 10.6. Impressie herstructureringsplan Merwehavens- Vierhavens van Crimson (1946). De locatie is op de kaart aangegeven.

10.5 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het bovenstaande worden de volgende aanbevelingen voor het ontwerp gedaan:

- In het ontwerp van het logiesgedeelte moet zo veel mogelijk worden uitgegaan van één type kamer met een zo algemeen mogelijke toepasbaarheid.
- De verschillende functie-zones zo veel mogelijk stapelen. Een heldere scheiding tussen publieke zone en logiesgedeelte is belangrijk.
- Geluidsisolatie is een belangrijk aandachtspunt voor het logiesgedeelte.

11. Concept-ontwerp

In hoofdstuk 9 is onderzoek gedaan naar abstracte vormen voor een drijvend gebouw waarbij alleen gelet is op aspecten ten aanzien van drijftechnologie. In hoofdstuk 10 is het programma voor een hotel geanalyseerd. De volgende stap in het ontwerpproces is dat deze kennis wordt gecombineerd. Hierdoor kan een geschikt concept voor een drijvend hotel worden ontwikkeld.

11.1 Doelstelling

De doelstelling van deze fase is om een aantal concepten voor een drijvend hotel te ontwikkelen waarbij per concept de maximaal haalbare bouwhoogte wordt bepaald. De concepten moeten ontwikkeld en beoordeeld worden op de volgende aspecten:

- Drijftechnologie (haalbare bouwhoogte binnen technische randvoorwaarden)
- Het functionele ontwerp (maken van vlekkenplan plattegrond en doorsnede)
- Krachtswerking (globale dimensionering draagconstructie)
- Uitvoerbaarheid (bouwvolgorde)
- Kosten
- Vormgeving

11.2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

- Omdat de verschillende concepten tot een verschillende maximale bouwhoogte leiden, is er in het programma van eisen geen eis opgelegd betreffende de grootte van het hotel (aantal kamers). Uitgangspunt is daarom dat de grootte van het hotel een ondergeschikt criterium is om de kwaliteit van de verschillende varianten te bepalen.
- De maximale diepgang van het drijvende hotel wordt vastgesteld op 7,5 m. Deze randvoorwaarde heeft te maken met de functionaliteit van de ruimten in het drijflichaam, de mogelijkheid om het drijflichaam te vervoeren en de bodemdiepte op de locatie zelf.

11.3 Werkwijze

Op basis van de bevindingen van hoofdstuk 9 en 10 zijn een viertal varianten ontwikkeld, waarbij aan een groot aantal aspecten van het ontwerp aandacht is gegeven. Nadat de vier varianten waren uitgewerkt, is er een multi-criteria analyse toegepast om de kwaliteit van de verschillende varianten in beeld te brengen. Ook zijn knelpunten benoemd.

Algemeen kan over de ontwikkelde varianten het volgende gezegd worden:

- Voor elk van de varianten is een bepaald type drijflichaam gekozen (vierkant, kruisvorm enz.)
- Anders dan bij de varianten in hoofdstuk 9 hebben de varianten nu niet steeds een drijflichaam met een vergelijkbare grootte. Ook verschillen de afmetingen van de bovenbouw bij de verschillende varianten. Dit is een gevolg van het feit dat nu niet alleen naar drijftechnologie wordt gekeken, maar ook naar functionaliteit, krachtswerking, vormgeving en dergelijke aspecten. Bij het vergelijken van de varianten dient men zich te realiseren dat men uit het vergelijken van de varianten niet rechtstreeks een conclusie kan trekken over de kwaliteit van de vorm van het drijflichaam.
- Op de verschillende drijflichamen kunnen verschillende plattegrondtypologieën worden toegepast (afb. 10.2). Dit bepaalt in grote lijnen de vorm van het gebouw. Bij elk type drijflichaam is de meest geschikte plattegrondtypologie gezocht.
- Wat betreft functionele zonering vertonen de varianten veel overeenkomst. In het drijflichaam zijn steeds technische ruimten en parkeervoorzieningen aangebracht. De begane grond verdieping is grotendeels bestemd voor de publieke zone. Ook is er een deel van de dienstruimtes ondergebracht. Het logiesgedeelte is ondergebracht in de bovenliggende lagen.
- De maatsystematiek van de varianten verschilt onderling, maar de opbouw van de constructie is zoveel mogelijk gelijk gehouden (vloertype, draagconstructie).

11.4 Beschrijving varianten

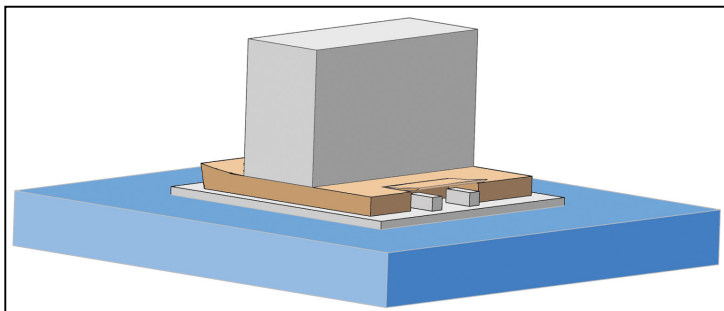
In hoofdstuk 9 is geconcludeerd dat een drijflichaam met een holle kern en het drijflichaam met een kruisvorm goed presteren. Daarom is ervoor gekozen om deze twee vormen, samen met een vierkant drijflichaam (de zogenaamde nul-optie), uit te werken tot een concreet conceptontwerp. Hierbij zijn van de kruisvorm twee subvarianten ontwikkeld. Eerst zullen hieronder de varianten beknopt beschreven worden, daarna zullen enkele algemene aspecten worden toegelicht.

A. Beschrijving varianten

Variant 1: Rechthoekig ponton

Bovenbouw

Als plattegrondtypologie is voor deze variant de gang met aan twee zijden kamers toegepast. Per laag zijn er 16 kamers aanwezig. De bovenbouw telt 9 lagen. Totaal zijn er 128 kamers in het hotel. In de bovenbouw is een grid van 5,4 x 7,2 m gehanteerd.



Afb. 11.1. Variant 1: Rechthoekig drijflichaam.

Drijflichaam

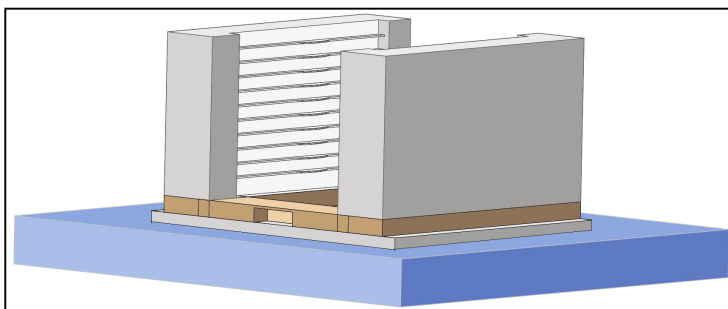
Het drijflichaam heeft een afmeting van 51,6 x 49,2 m. In het drijflichaam is een volautomatische parkeergarage toegepast met ca. 80 plaatsen. Het vrijboord bedraagt in de UGT 0,4 m en in BGT 1,6 m. De diepgang was de beperkende factor voor het aantal bouwlagen.

Zie voor verdere informatie over deze variant bijlage [6].

Variant 2: Vierkant met holle kern

Bovenbouw

Als plattegrondtypologie is voor deze variant de gang met aan één zijde kamers toegepast. Per laag zijn er 28 kamers aanwezig (2 x 14). De bovenbouw telt 11 lagen. Totaal zijn er 280 kamers in het hotel. In de bovenbouw is een grid van 7,2 x 9 m gehanteerd.



Afb. 11.2 Variant 2: Vierkant met holle kern.

Drijflichaam

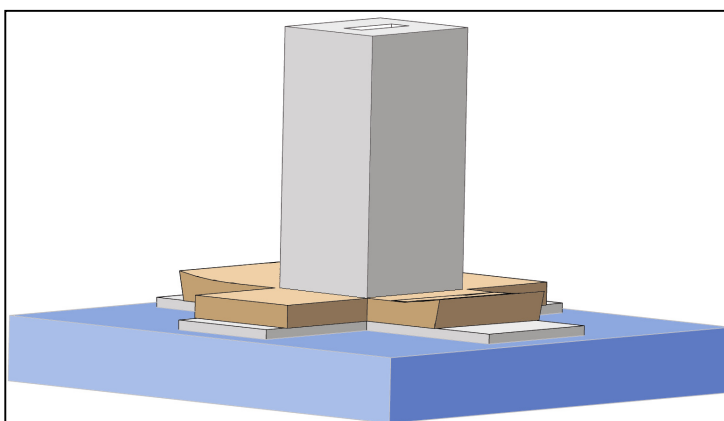
Het drijflichaam heeft een buitenafmeting van 68,4 x 61,2 m en een binnenafmeting van 36 x 37,2 m. Vanwege de vorm van het drijflichaam was er geen plaats voor een volautomatische parkeergarage. Het vrijboord bedraagt in de UGT 0,6 m en in BGT 1,8 m. De diepgang was de beperkende factor voor het aantal bouwlagen.

Zie voor verdere informatie over deze variant bijlage [7].

Variant 3: Kruisvorm

Bovenbouw

De typologie van deze variant is een centraal georganiseerde plattegrond met 8 kamers per laag. Er is een grid gebruikt van 5,4 x 5,4 m. Er zijn 13 bouwlagen en totaal 96 kamers. Er is ook een klein atrium in het logiesgedeelte aanwezig.



Afb. 11.3. Variant 3: Kruisvorm.

Drijflichaam

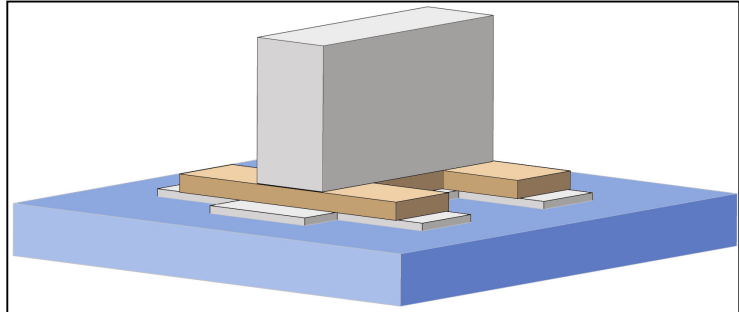
Het drijflichaam bestaat uit twee rechthoeken: één van 21,6 x 68,4 m en één van 18 x 67,2 m. In het drijflichaam is een volautomatische parkeergarage opgenomen met ca. 100 plaatsen. Het vrijboord in de UGT bedraagt 1,0 m en in de BGT 2,1 m. De scheefstandseis voor de BGT was de beperkende factor voor het aantal bouwlagen.

Zie voor verdere informatie over deze variant bijlage [8].

Variant 4: I-profiel

Bovenbouw

Als plattegrondtypologie is voor deze variant de gang met aan twee zijden kamers toegepast. Per laag zijn er 22 kamers aanwezig. De bovenbouw telt 10 lagen. Totaal zijn er 198 kamers in het hotel. In de bovenbouw is een grid van 5,4 x 7,2 m gehanteerd. Tussen de poten van de I bevinden zich haventjes waar boten kunnen worden aanleggen.



Afb. 11.4. Variant 4: I-profiel.

Drijflichaam

Het drijflichaam bestaat uit een rechthoek van 23,6 x 64,8 m waaraan vier poten zitten van 21 x 14,4 m. In het drijflichaam is een volautomatische parkeergarage toegepast met ca. 100 plaatsen. Het vrijboord bedraagt in de UGT 0,5 m en in de BGT 1,6 m. De diepgang was de beperkende factor voor het aantal bouwlagen.

Zie voor verdere informatie over deze variant bijlage [9].

B. Algemene aspecten varianten.

1. Draagconstructie

De draagconstructie voor de bovenbouw is zo licht mogelijk ontworpen. Er is gekozen voor een staalskelet met een staalplaatbetonvloer. Het eigengewicht van de constructie kwam uit op ongeveer 2 kN/m³.

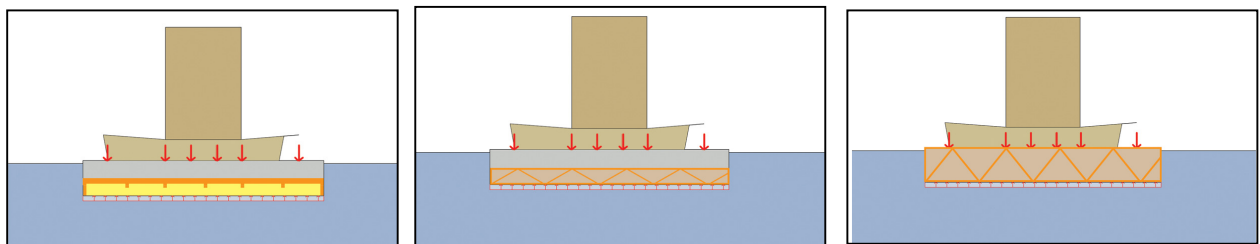
2. Drijflichaam

Het drijflichaam fungeert als fundering van het gebouw en moet daarom een bepaalde stijfheid bezitten. In afb. 11.5 een drietal conceptuele oplossingen weergegeven om aan het drijflichaam voldoende stijfheid te geven. De eerste variant is een combinatie van twee typen drijflichamen: Een gesloten caisson met aan de onderzijde een omgekeerde bak met EPS. Hierin zijn tevens balken opgenomen die aan het geheel stijfheid verlenen.

Bij de middelste oplossing is in de onderste 3 meter van het drijflichaam een draagconstructie opgenomen die kan bestaan uit schijven of vakwerken. Het betreft dus een gesloten caisson met een constructieve laag. De bovenste laag van het drijflichaam is op de kolommen na dan vrij indeelbaar.

Bij de laatste oplossing is heel de hoogte van het drijflichaam gebruikt voor de stijfheid van het geheel. In het drijflichaam bevinden zich over heel de hoogte vakwerken of schijven. Dit drijflichaam zal stijver zijn dan de andere varianten, maar tegelijkertijd zijn er minder mogelijkheden om het drijflichaam een zinvolle bestemming te geven.

De middelste variant is als uitgangspunt voor het conceptontwerp gebruikt. Een belangrijk voordeel is hierbij de grote indelingsvrijheid van de bovenste laag van het drijflichaam. Of de stijfheid van de onderste laag voldoende groot is, komt later aan de orde.



Afb. 11.5. Een drietal concepten om aan het drijflichaam voldoende stijfheid te verlenen. Links een drijflichaam met aan de onderzijde EPS met een grid van balken. Midden een drijflichaam waarbij de stijfheid komt uit de onderste laag. Rechts een variant waarbij het drijflichaam als geheel als een stijve doos fungeert.

3.Parkeergarage

In het drijflichaam is bij de meeste varianten een volautomatische parkeergarage toegepast. Hoewel er ook nadelen aan dit systeem verbonden zijn (aanschaffkosten, onderhoud technische installaties), worden de voordelen belangrijker geacht:

- De donkere ruimte in het drijflichaam krijgt een zinvolle bestemming.
- Een volautomatische parkeergarage is compacter dan zijn traditionele variant. Gezien de beperkte afmetingen van het drijflichaam is dit een voordeel.
- De garage kan functioneren als een scheefstand-corrigerend systeem. Auto's worden op die plaats geparkeerd waar op dat moment een correctie nodig is.
- Omdat de auto's volautomatisch worden geplaatst, zijn er geen of nauwelijks uitlaatgassen in de parkeergarage aanwezig. Dit is gunstig voor het vereiste ventilatievoud.

11.5 Beoordeling varianten

De bovengenoemde varianten zijn middels een multi-criteria analyse met elkaar vergeleken. Op een vijftal deelgebieden zijn de varianten beoordeeld:

- Functionaliteit (0,3)
- Technische prestaties (0,15)
- Uitvoering (0,15)
- Vormgeving (0,3)
- Kosten (0,1)

Opgemerkt moet worden dat niet de bouwhoogte het doorslaggevende criterium is geweest, maar dat er gekeken is naar de integrale kwaliteit van de varianten. Voor deze deelgebieden zijn verschillende beoordelingscriteria opgesteld die elk een eigen wegingsfactor kregen. De vergelijking van de varianten is te vinden in bijlage [10]. Het resultaat van deze vergelijking wordt hieronder kort toegelicht.

De *rechthoek* en het *I-profiel* scoren beide ongeveer even goed met een licht voordeel voor de laatste. Het *vierkant met de holle kern* en de *kruisvorm* scoren relatief slecht.

Het *vierkant met holle kern* scoort slecht op het gebied van functionaliteit en uitvoerbaarheid. Het programma van een hotel past niet goed binnen de basisvorm van deze variant, bijvoorbeeld omdat de ruimte voor publieke voorzieningen in verhouding met de grootte van het hotel behoorlijk beperkt is. Hiernaast heeft het drijflichaam een complexe en niet functionele vorm.

De *kruisvorm* scoort beter, maar de plattegrond van de bovenbouw is niet efficiënt. Ongeveer de helft van het oppervlak van een verdieping gaat verloren aan verkeersruimte.

Bij de varianten *rechthoek* en *I-profiel* past het programma goed binnen de gebouwworm. Het *I-profiel* scoort verder goed op het gebied van vormgeving. De 'haventjes' leveren een aardige ruimtelijke kwaliteit op. Een sterk punt van de *rechthoek* is tenslotte dat het drijflichaam relatief eenvoudig te maken is. Besloten is voorlopig verder te werken met de varianten *rechthoek* en *I-profiel*.

11.6 Conclusies

Het analyseren en doorrekenen van de verschillende varianten leidde tot de volgende conclusies:

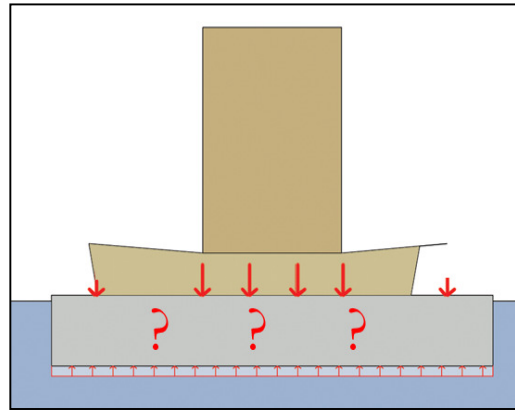
Bouwmassa

- Bij het bepalen van de maximale bouwhoogte bleek de maximale diepgang (7,5 m) doorslaggevend te zijn voor het maximale aantal lagen (en dus niet de scheefstand of de stabiliteit). De massa van bovenbouw en drijflichaam vormen dus samen de bottleneck.
- Het drijflichaam werd zwaarder dan aanvankelijk was verondersteld. Aanvankelijk was gerekend met een gewicht van ca 3,5 kN/m³. Nadat echter het drijflichaam grof was gedimensioneerd, bleek dit gewicht tussen de 4 en de 5 kN/m³ te liggen. Ongeveer 50 % van de diepgang wordt dus veroorzaakt door het eigengewicht van het drijflichaam zelf.

Krachtenwerking

Een globale berekening van de krachtenwerking in het drijflichaam leidde tot de volgende conclusies:

3. Aan de onderzijde van het drijflichaam is sprake van een hoge hydrostatische druk, terwijl aan de bovenzijde van het drijflichaam de belasting voornamelijk geconcentreerd is op de plaatsen waar de kolommen van de bovenbouw staan. Afhankelijk van de vorm van drijflichaam en bovenbouw levert dit grote tot zeer grote momenten op die de constructieve laag in het drijflichaam moet opvangen. Zie afb. 11.6.



Afb. 11.6. Buigend moment in het drijflichaam.

4. Hoe breder het drijflichaam is t.o.v. het gebouw, hoe groter de momenten in het drijflichaam, hoe zwaarder de constructie moet worden. De eerdere conclusie uit paragraaf 9.5 dat een drijflichaam beter in de breedte kan worden uitgebreid dan in de diepte moet daarom worden aangescherpt. Een breder drijflichaam is alleen gunstig als de momenten in het drijflichaam niet onacceptabel groot worden.
5. De globale berekening gaf aan dat de krachten in het drijflichaam dermate groot werden dat het de vraag was of de stijfheid van de onderste laag van het drijflichaam hiervoor voldoende groot was.

11.7 Knelpunten

In deze fase zijn er ten aanzien van het drijflichaam enkele aanzienlijke knelpunten gesignaleerd:

- Het drijflichaam is behoorlijk zwaarder dan verwacht, gewichtsbesparing is wenselijk.
- Er ontstaan in het drijflichaam grote momenten en het ontwerp van het drijflichaam moet daarop aangepast worden.
- De bouwvolgorde van het ponton is ook een probleem. Het ponton geheel op de locatie bouwen is niet aantrekkelijk. In verband met de capaciteit van de waterwegen is de breedte van een te transporteren segment zo rond de 30 m, terwijl de drijflichamen van de varianten in alle gevallen breder zijn. Dit betekent dat het drijflichaam moet worden opgebouwd uit segmenten die op de locatie gekoppeld worden. Dit gegeven moet in het vervolg van het ontwerptraject worden meegenomen.

12. Aanscherping ontwerp drijflichaam

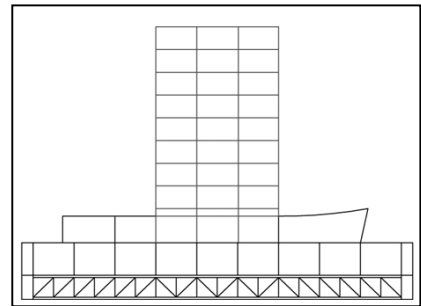
In het voorgaande is besloten verder te gaan met de varianten rechthoek en I-profiel. Aangezien er echter wat betreft het drijflichaam aanzienlijke knelpunten gesignaleerd waren, zal in deze fase het ontwerp hiervan aangescherpt worden. De krachtswerking en de bouwvolgorde van dit onderdeel zullen in dit hoofdstuk nader bestudeerd worden.

12.1 Doelstelling

- Een meer nauwkeurige berekening van de orde van grootte van de krachten in het drijflichaam van de bestudeerde varianten.
- Het bestuderen van de mogelijkheden voor de bouwvolgorde van het drijflichaam.
- Op basis hiervan een definitieve keuze maken voor een variant en het ontwerp van het drijflichaam voor deze variant optimaliseren.

12.2 Werkwijze

- Er is een voor deze fase een zo nauwkeurig mogelijke gewichtsberekening gemaakt.
- De krachtswerking in het drijflichaam is geschematiseerd. Vervolgens is er gerekend aan de optredende krachten en vervormingen in representatieve doorsneden van het gebouw.
- Er is gerekend aan de mogelijkheid om het drijflichaam op te bouwen uit verschillende pontons die aan elkaar gekoppeld worden.



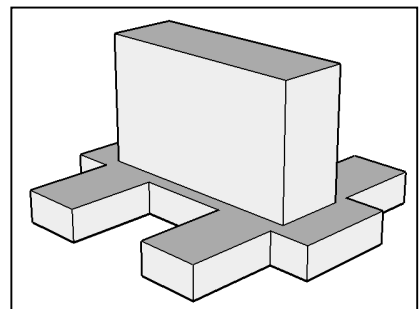
Afb. 12.1. Representatieve doorsnede voor de rechthoek.

12.3 Beschrijving varianten

De variant *rechthoek* blijft ten opzichte van het vorige hoofdstuk ongewijzigd. Voor de varianten *I-profiel* worden twee subvarianten beschouwd.

Variant *I-profiel A*

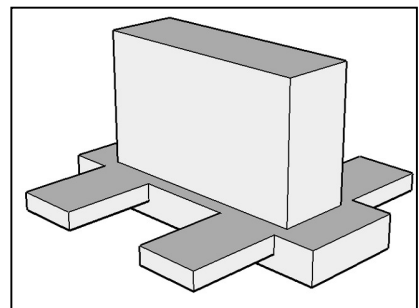
Het drijflichaam heeft overal een constante hoogte. Uit hoofdstuk 11 is duidelijk dat dit leidt tot een aanzienlijk buigend moment in het drijflichaam. Nu zal worden beschouwd hoe groot dat moment is.



Afb. 12.2 Subvariant I-profiel A.

Variant *I-profiel B*

De poten van de I hebben bij deze subvariant een geringere diepgang. Deze diepgang correspondeert met de bouwmassa die plaatstelijk aanwezig is. Dit betekent wel dat het hoofdponton een grotere diepgang krijgt (van 7,2 naar 9 m).



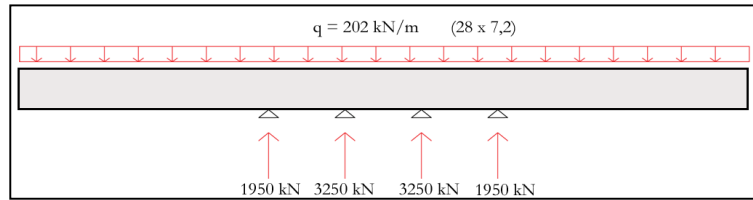
Afb. 12.3. Subvariant I-profiel B.

12.4 Resultaten berekening krachtswerking drijflichaam

Voor de verschillende varianten is de omvang van de momenten in het drijflichaam berekend. Om het moment te bepalen zijn de kolommen van de bovenbouw geschematiseerd als opleggingen met een gegeven reactiekracht (die overeenkomt met de belasting die op de kolom is aangebracht). Een representatieve moot van het drijflichaam is voorgesteld als een ligger die ten gevolge van de hydrostatische waterdruk gelijkmatig wordt belast. In afb. 12.4 is de schematisering weergegeven voor het rechthoekige ponton.

Uit de schematisering wordt duidelijk dat het drijflichaam te beschouwen is als een ligger met een behoorlijke uitstek.

De belasting van de hydrostatische waterdruk is verminderd met het plaatselijke eigengewicht van het drijflichaam.



Afb. 12.4. Schematisering van de constructieve laag van het drijflichaam van de rechthoekige variant. De punlasten stellen de kolommen voor. Om het schema duidelijker te maken is het omgekeerd.

De volledige berekening van de drijflichamen is te vinden in bijlage [11]. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in tabel 12.1. Het betreffen de momenten die optreden als het windstil is en er geen excentrische belastingen aanwezig zijn.

Uit de tabel blijkt dat de subvariant *I-profiel A* het grootste moment moet opnemen. Dit komt omdat dit drijflichaam een groot 'uitstek' heeft, dat bovendien zwaar wordt belast. De momenten zijn in dit drijflichaam zo groot dat ze niet meer in de constructieve laag van het drijflichaam (onderste 3 m) kunnen worden opgevangen.

Variant	Maximaal moment	Eigengewicht drijflichaam
	kNm	(kN/m ³)
Rechthoek	430.000	4,3
I-profiel A	860.000	4,5
I-profiel B	8.900	3,7

Tabel 12.1. Maximaal moment en eigengewicht drijflichamen.

Bij de rechthoekige variant is dit nog wel haalbaar, de constructieve laag kan met vakwerken of schijven sterk genoeg worden gemaakt om de belasting op te vangen. De variant *I-profiel B* is echter de meest gunstige variant. Omdat het drijflichaam wel breed is, maar weinig diepgang heeft op plaatsen waar de bovenbouw laag is, wordt het grote buigende moment in het drijflichaam sterk gereduceerd.

12.5 De bouwvolgorde van het drijflichaam

Verschillende mogelijkheden om het drijflichaam zijn overwogen:

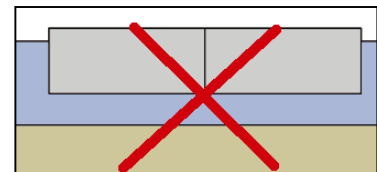
1. Het drijflichaam in zijn geheel op de locatie bouwen.
2. Het drijflichaam opbouwen uit verschillende pontons die elders gemaakt worden en op de locatie aan elkaar worden gekoppeld.
3. De onderste laag van het drijflichaam bestaat uit gekoppelde pontons die elders zijn gemaakt, de bovenste laag van het drijflichaam wordt er op de locatie opgebouwd. De bovenste laag draagt dan bij aan de stijfheid van de koppeling (afb. 12.7).

De eerste mogelijkheid is niet aantrekkelijk. Men maakt immers geen gebruik van het voordeel van het bouwen in een loods wat voor drijvende gebouwen erg aantrekkelijk is (bouwtijd en betonkwaliteit). Hiernaast heeft men op de locatie last van golven, stroming en getijdewerking.

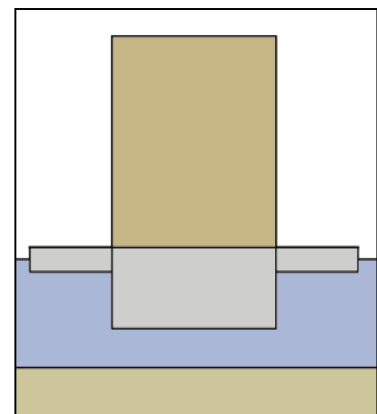
De tweede mogelijkheid is alleen aantrekkelijk als het oppervlak waar de koppeling gerealiseerd wordt niet te groot is (afb. 12.5 en afb. 12.6). Hoe groter het oppervlak, hoe groter de maatnauwkeurigheid en hoe moeilijker het is om de pontons in bewegelijk water aan elkaar te koppelen. Voordeel van deze bouwvolgorde is dat een hoge kwaliteit van de pontons mogelijk is, omdat er in een loods kan worden gebouwd.

De derde mogelijkheid wordt ook haalbaar geacht. De lage pontons kunnen relatief makkelijk worden gekoppeld waarna men een stabiele basis heeft om het drijflichaam verder af te bouwen. Vanwege het voordeel van bouwen in een loods heeft optie 2 echter een voorkeur boven optie 3.

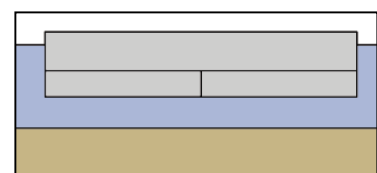
Het bovenstaande betekent dat ten aanzien van de bouwvolgorde variant *I-profiel B* de voorkeur heeft. Het hoofdpontons en de kleinere zijpontons kunnen elders gebouwd en op de locatie gekoppeld worden.



Afb. 12.5. Groot oppervlak ongunstig voor koppelen van pontons.

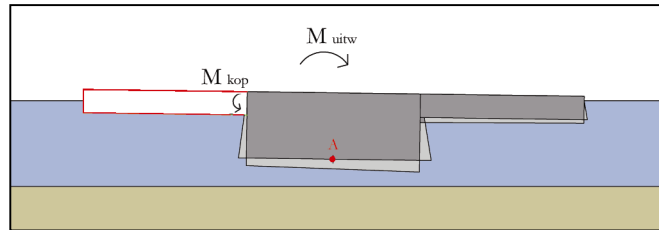


Afb. 12.6. Kleine pontons koppelen aan groter ponton.



Afb. 12.7. Lage pontons koppelen, daarna ter plaatse een bouwlaag toevoegen.

Om de haalbaarheid van het koppelen van pontons nader te kunnen beoordelen, is er gerekend aan de krachten die de koppeling dient op te kunnen nemen. Hiervoor is gekeken naar de momenten die in de UGT ontstaan als het ponton als gevolg van een windbelasting onder een maximale hoek geroteerd is (afb. 12.8). Voor deze berekening wordt verwezen naar bijlage [11].



Afb. 12.8. Het moment dat de koppeling moet opnemen.

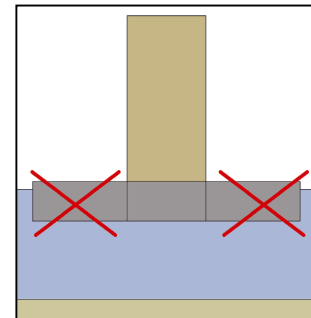
De kracht die deze koppeling moet opnemen blijkt haalbaar te zijn ($F_{koppel\ max} \approx 2600\ kN$).

12.6 Conclusies

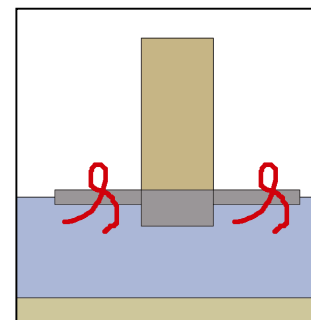
1. Zowel ten aanzien van de krachtswerking als ten aanzien van de bouwvolgorde blijkt variant *I-profiel B* de beste prestaties te leveren. Deze variant wordt in de volgende fase verder uitgewerkt.
2. Algemeen kan uit de berekening geconcludeerd worden dat het gunstig is als de diepgang van het drijflichaam zoveel mogelijk in verhouding staat met de plaatselijk aanwezige bouwmassa.
3. Het op de locatie koppelen van elders gebouwde pontons is (voor dit project) de meest wenselijke bouwvolgorde.
4. Het eigengewicht van het drijflichaam is gereduceerd van 4,3 naar 3,7 kN/m³.

Opmerking:

Bij het berekenen van de drijftechnische prestaties van variant *I-profiel B* is gebruik gemaakt van de formule van Scribanti (par. 3.4.3). De vraag kan gesteld worden of deze formule nog steeds van toepassing is als het drijflichaam geen constante hoogte meer heeft. Daarom is middels de methode van par. 3.2 geverifieerd of de formule voor deze pontonvorm nog steeds van toepassing is. Dit bleek inderdaad het geval. Het bewijs hiervan is te vinden in bijlage [12].



Afb. 12.9. Onjuiste verhouding diepgang-bouwmassa.



Afb. 12.10. Juiste verhouding diepgang-bouwmassa.

12.7 Knelpunten

- Als gevolg van het feit dat de diepgang van de zijpontons is gereduceerd, moest de diepgang van het hoofdponton bij variant *Iprofiel-B* toenemen van 7,2 naar 9,0 meter. Dit terwijl maximaal 7,5 m is toegestaan. Dit betekent dat er of meer gewicht bespaard moet worden of dat er een bouwlaag verwijderd moet worden.
- Het koppelen van pontons is wat betreft krachtswerking haalbaar gebleken, maar dient verder uitgewerkt te worden.

13. Voorlopig en Definitief Ontwerp

In hoofdstuk 12 is de definitieve keus gemaakt voor het I-profiel. Deze variant is verder ontwikkeld tot een volwaardig ontwerp. Het conceptontwerp is eerst ontwikkeld tot een voorlopig ontwerp en daarna tot een definitief ontwerp. Omdat het onderscheid tussen V.O. en D.O. minder strikt is als bij de vorige fasen in het ontwerpproces, is ervoor gekozen om beide fasen gezamenlijk te behandelen. Het definitief ontwerp verschilt in de graad van uitwerking van het voorlopig ontwerp, maar in beide gevallen wordt het ontwerp uitgewerkt in functioneel, architectonisch en bouwtechnisch opzicht. Tekeningen van het Definitief Ontwerp zijn te vinden in bijlage [13].

Er zijn in deze fase veel ontwerpbeslissingen genomen die voor het ontwerp als zodanig wel relevant zijn, maar in het kader van deze scriptie minder van belang zijn. In dit hoofdstuk worden enkele aspecten uitgelicht die specifiek voor (hoge) drijvende gebouwen van belang zijn.

13.1 Doelstelling

De doelstelling van deze fase is het gekozen concept uit te werken tot een volwaardig ontwerp:

- *In architectonisch opzicht.* Het uitwerken van de gebouwvorm, gevels, ontsluiting, materialisering etc.
- *In functioneel opzicht.* Het uitwerken van het vlekkenplan naar goed functionerende plattegronden en doorsneden.
- *In bouwtechnisch opzicht.* Het dimensioneren en berekenen van de draagconstructie voor drijflichaam en bovenbouw, het reduceren van de bouwmassa, het opstellen van een gedetailleerde gewichtsberekening, het uitwerken van de bouwvolgorde, detailering etc.

Relevante architectonische en bouwtechnische aspecten van het ontwerp worden hieronder toegelicht.

13.2 Architectonische aspecten

13.2.1 Gebouwvorm

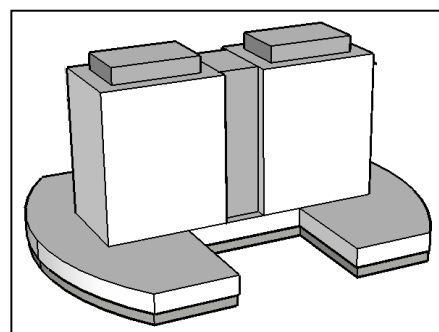
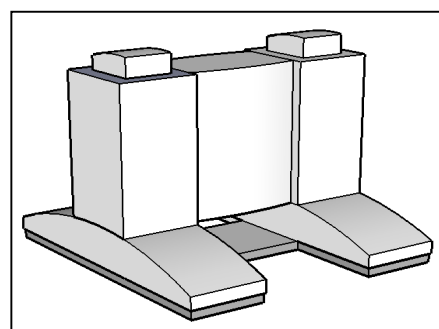
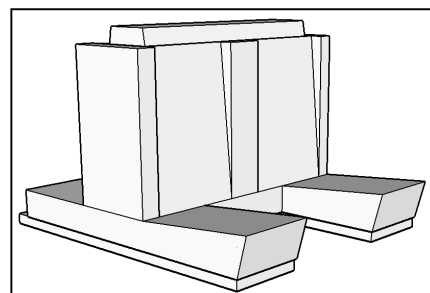
De basisvorm van het gebouw is, zoals hierboven beschreven, gebaseerd op de wens om binnen de mogelijkheden van het programma en de beperkingen van de locatie zo hoog mogelijk te bouwen. Dat resulteerde in een drijflichaam met de vorm van een I-profiel, waarop een rechthoekig gebouwvolume is geplaatst. Er zijn uiteraard talloze mogelijkheden om de vormgeving van het gebouw te verfijnen.

Er is gezocht naar mogelijkheden om de architectonische kwaliteit van de gebouwvorm te verbeteren. Als sturend element zijn daarbij de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De publieke zone en het logiesgedeelte moeten afzonderlijke volumes zijn met elk een eigen vormgeving.
- De begane grond verdieping moet als één geheel worden vormgegeven.
- In de bovenbouw moeten de verticale richting benadrukt worden om de hoogte van het gebouw te accentueren.
- De haventjes moeten een besloten ruimte vormen waarin kleinere schepen (watertaxi's e.d.) kunnen aanmeren.

Hiernaast zijn enkele van de oplossingen weergegeven die de vormstudie heeft opgeleverd. Om de verticale richting van de bovenbouw te benadrukken, is dit volume onderverdeeld in kleinere volumes met een verticale richting.

Uiteindelijk is gekozen voor de onderste variant, omdat deze het beste aansluit bij het programma van het gebouw. Functionele overwegingen gaven dus de doorslag. De begane grond verdieping vormt visueel een schijf of reddingsboei waarop de 'torens' van de bovenbouw zijn geplaatst.



Afb. 13.1 Een aantal varianten voor de gebouwvorm.

13.2.2 Gevelontwerp

Voor het gevelontwerp zijn verschillende uitgangspunten geformuleerd.

- De gevel moet een lage massa hebben ($\leq 0,4 \text{ kN/m}^2$)
- Omdat het gebouw een bijzonder gering acumulerend vermogen heeft en omdat de hotelkamers georiënteerd zijn op het ZO en ZW is een goede zonwering vereist. Bij voorkeur worden de hotelkamers natuurlijk gekoelt.
- Omdat onderhoud aan een drijvend gebouw in de meeste gevallen duurder zal zijn dan onderhoud aan gebouwen op het land is een onderhoudsarme gevel van belang.

Er zijn enkele studies gedaan naar mogelijke indeling van de gevel. Hierbij is gekeken naar de consequenties van het accentueren van de horizontale of de verticale richting

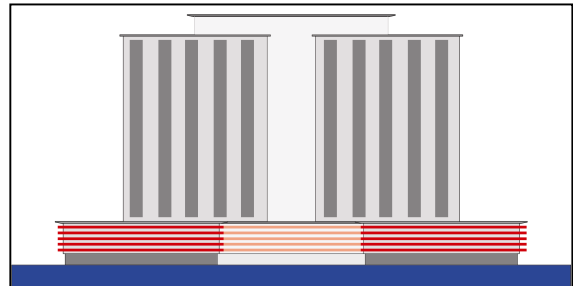
Om de hoogterichting van het gebouw te benadrukken is in het logiesgedeelte voor een verticale structuur in de gevel gekozen. Deze verticale structuur is gerealiseerd door het toepassen van een kleine balkons (afb. 13.4).

Behalve dat door het toepassen van dit element een sterke verticale richting in de gevel ontstaat, levert het element ook de volgende voordelen op:

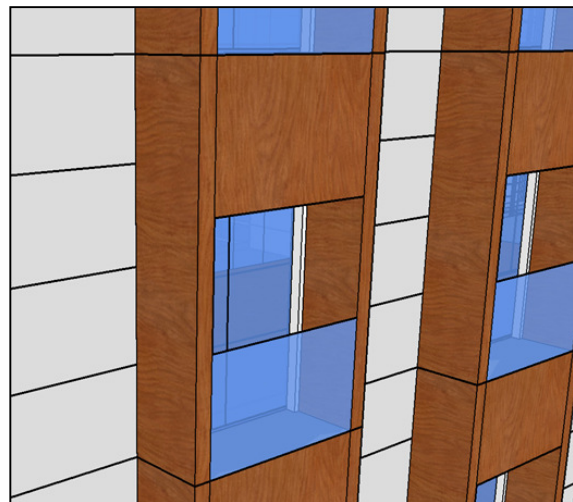
- De ramen van de hotelkamers kunnen zonder aparte gevelinstallatie gereinigd worden.
- Het balkon vormt een effectieve zonwering voor de oriëntatie van de hotelkamer. Door een combinatie van horizontale schermen en verticale schermen wordt zowel een hoogstaande als een laagstaande zon voor een groot deel geweerd.
- Vanwege het uitzicht op de Nieuwe Maas leveren de balkons ook een bijdrage aan de kwaliteit van de hotelkamer.



Afb. 13.2 Gevelconcept met nadruk op horizontale richting.



Afb. 13.3 Gevelconcept met nadruk op verticale richting.



Afb. 13.4 Balkon aan hotelkamer.

13.2.3 Ontsluiting gebouw

Bij de ontsluiting van het gebouw moet rekening gehouden worden met twee zaken:

- Vrijboordfluctuatie van het gebouw als gevolg van het veranderen van de variabele belasting.
- Peilfluctuatie haven als gevolg van de getijdewerking.

De ontsluiting van het gebouw moet de hoogteverschillen die hierdoor ontstaan, kunnen overbruggen. Om de ontsluiting te ontwerpen zijn twee gegevens van belang, het maximale en het minimale hoogteverschil tussen drijflichaam en kade.

Bij het bepalen van het maximale hoogte verschil is er vanuit gegaan dat een extreem lage waterstand niet tegelijkertijd optreedt met een extreem laag vrijboord van het hotel (als gevolg van een grote variabele belasting). Hetzelfde geldt voor de omgekeerde situatie, een extreem hoge waterstand treedt niet tegelijkertijd op met een extreem hoog vrijboord.

Op basis van gegevens over de peilfluctuatie in de haven en de vrijboordfluctuatie van het hotel zijn de volgende hoogteverschillen tussen drijflichaam en kade gehanteerd als uitgangspunt voor het ontwerp van de ontsluiting:

Maximaal hoogteverschil:	2,1 m
Minimaal hoogteverschil:	0,1 m

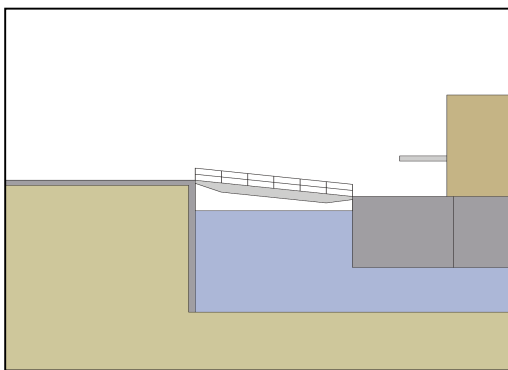
De maximale hellingshoek van de ontsluiting is vastgesteld op 10%. Er zijn drie conceptuele oplossingen bedacht voor de ontsluiting:

1. Hoogteverschil in brug

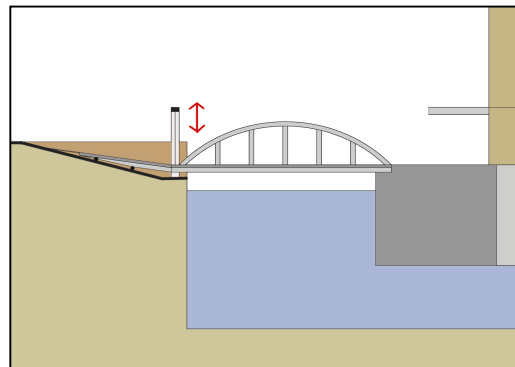
Het hoogteverschil tussen kade en drijflichaam wordt opgelost in de brug (afb. 13.5). Nadeel van deze oplossing is dat de hellingshoek van de brug geen fraai beeld oplevert.

2. Hoogteverschil in kade

De ontsluiting van het gebouw is nu zo ontworpen dat de brug steeds horizontaal blijft liggen, terwijl de hellingsbaan met een variabele hoek in de kade is opgenomen (afb. 13.6).



Afb. 13.5. Hoogteverschil in brug.

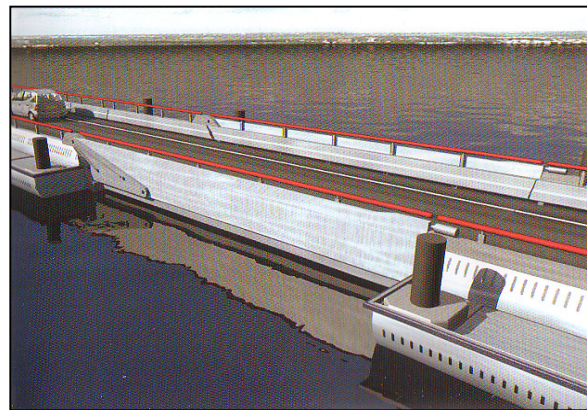


Afb. 13.6 Hoogteverschil in kade.

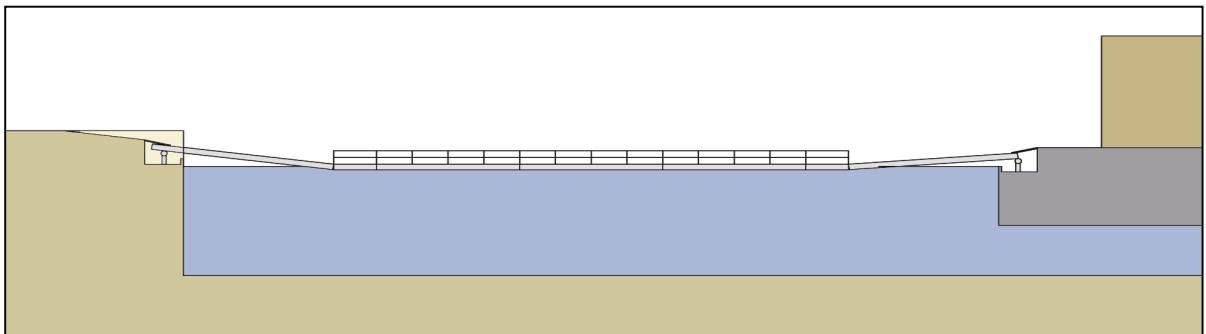
3. Ontsluiting door middel van drijvende weg

Bij deze oplossing heeft de ontsluiting twee hellingen. De helling aan walzijde kan eventueel in de kade worden opgenomen. Een nadeel van deze oplossing is dat het maximale hoogteverschil met de kade groot kan zijn. Een voordeel van deze oplossing is echter dat de constructie licht kan worden uitgevoerd en dat de belasting die op het drijflichaam wordt uitgeoefend, beperkt is. Deze oplossing is geschikt als de afstand tussen kade en drijflichaam groot is.

Ondanks het nadeel van het grote hoogteverschil met de kade is in deze opgave voor de laatst genoemde variant gekozen, omdat deze het best aansluit op het stedenbouwkundig ontwerp.



Afb. 13.7. Een drijvende weg (aluminium en EPS).



Afb. 13.8. Ontsluiting door middel van een drijvende weg.

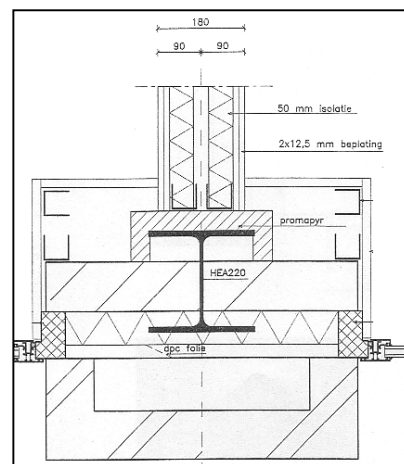
13.3 Bouwtechnische Aspecten

Er wordt ingegaan op de volgende aspecten van het ontwerp:

- Gewichtsbesparing
- Gewichtsonwerp
- Bouwvolgorde
- Het koppelen pontons

13.3.1 Gewichtsbesparing

Een van de knelpunten die bij het conceptontwerp gesignaleerd waren, betrof de te grote diepgang van het hoofdponton (9,0 i.p.v. 7,5 m in de UGT). Om dit probleem op te lossen moest het eigengewicht van de draagconstructie verder gereduceerd worden. In het conceptontwerp werd het eigengewicht van de bovenbouw voor ca. 85% bepaald door het gewicht van de vloeren. Dit is dus een belangrijke post waarop gewichtsbesparing behaald kan worden. Aanvankelijk was er gekozen voor een staalplaatbetonvloer, deze keuze is in de laatste fase van het ontwerp opnieuw overwogen. Hiertoe is een klein onderzoek gedaan naar lichtgewicht-verdiepingsvloeren die voor dit specifieke ontwerp in potentie geschikt waren. Dit onderzoek is te vinden in bijlage [14].



Afb. 13.9 Lichte kamerscheidende wand in nieuwbouw Hotel Krasnapolsky (metalstud).

Een vijftal vloeren zijn op verschillende criteria beoordeeld, te weten een appartementsvloer (referentie), een tweetal staalplaatbetonvloeren, de staalframe-vloer en een Lewis/Reppelvoer. De vloeren zijn op de volgende criteria beoordeeld:

- Eigengewicht
- Geluidsisolatie (lucht- en contactgeluid)
- Brandwerendheid
- Mogelijkheid om leidingen te integreren in de vloer
- Schijfwerking en montage

De eerste twee criteria wogen bij de beoordeling het zwaarst. De staalframe-vloer bleek het best te scoren, vooral vanwege zijn extreem laag eigengewicht (1,5 kN/m²). De vloer bestaat uit koudgewalste staalprofielen met aan de bovenzijde spaanplaat of OSB. Daarop ligt een zwevende dekvloer van anhydriet (afb. 13.10).

Volgens bron [9] moet deze vloer, mits goed uitgevoerd, voldoen aan de eisen voor een woningscheidende vloer voor lucht- en contactgeluid.³⁰

Dit vloertype is ook toegepast in het HEM-hotel in Amsterdam. Dit gebouw is geheel samengesteld uit een staalframe constructie die tegelijk zowel scheidt als draagt. Indien een gebouw hoger is dan ca. 4 bouwlagen is er wel een aparte draagconstructie van staal nodig.



Afb. 13.10 Bouw van het HEM- hotel in Amsterdam. In dit hotel is ook een staalfarme-vloer met een zwevende dekvloer toegepast.

Ook de kamerscheidende wanden in het hotel zijn licht uitgevoerd. Er is kozen voor een dubbele metalstudwand. Dit systeem is ook toegepast bij een uitbreiding van het Hotel Krasnapolsky in Amsterdam. Hierbij werden enkele verdiepingen op het bestaande gebouw toegevoegd. Om deze reden was een lichte bouwconstructie ook wenselijk.



Afb. 13.11. Een element van een staalfarme-vloer.

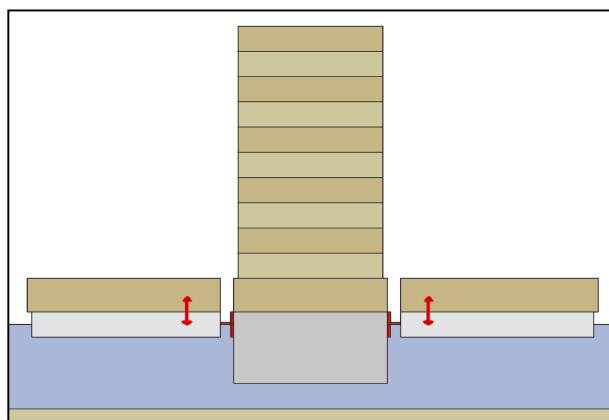
³⁰ Bron [9] par. 3.1.

13.3.2 Gewichtontwerp

In het vorige hoofdstuk kwam naar voren dat de verhouding tussen diepgang en plaatselijke bouwmassa een gegeven is dat van grote invloed is op de spanningen die in het ponton ontstaan. Om dit gegeven in het ontwerp toe te passen, is gekeken naar het zogenaamde ‘gewicht-ontwerp’ van het gebouw. Dit betekent dat niet alleen de sterkte en de stijfheid van de draagconstructie van belang is, maar ook het gewicht van het gebouw t.o.v. de plaatselijke diepgang.

De term ‘gewichtontwerp’ is nader toegelicht in afb. 13.12. Deze figuur stelt een methode voor om tot een efficiënt gewichtontwerp te komen. De verbindingen met het hoofdponton worden voorgesteld als schuifverbindingen. Indien het gewicht van de zijpontons t.o.v. het hoofdponton wijzigt, zal er een niveauverschil in de beganegrondvloer ontstaan.

De zijpontons moeten zo ontworpen worden dat het gewicht daarvan zo groot is dat er in de BGT geen hoogteverschil aanwezig is tussen het hoofdponton en de zijpontons.³¹ Deze evenwichtssituatie bepaalt dus hoe zwaar de zijpontons bij een bepaalde diepgang moeten worden uitgevoerd.



Afb. 13.12. Methode voor een optimaal gewichtontwerp: De verbindingen tussen pontons voorstellen als schuifverbindingen en vervolgens de gewichtsverdeling zo ontwerpen dat de beganegrondvloer vlak is.

Indien de zijpontons nu buigvast aan het hoofdponton worden gekoppeld, ontstaat er als gevolg hiervan in principe geen buigend moment in het ponton. Dit moment kan nog wel ontstaan door een wijziging in de variabele belasting van het gebouw of door een scheefstand als gevolg van windbelasting. De koppeling moet sterk genoeg zijn om dit op te kunnen nemen.

De bovengenoemde methode is dus geschikt om tot een optimale gewichtsverdeling voor een drijvend gebouw te komen. Deze methode is ook voor gewichtsonwerp van het drijvende hotel gebruikt.

13.3.3 Bouwvolgorde

In par. 12.4 is wat betreft de bouwvolgorde reeds geconcludeerd dat het de aanbeveling verdient om de pontons elders te bouwen en op de locatie aan elkaar te koppelen. Dit omdat het elders bouwen van de pontons grote voordelen oplevert voor de bouwsnelheid, de bouwkosten en de haalbare kwaliteit van het ponton.

Deze voordelen gelden niet alleen voor het drijflichaam. Indien een groter of kleiner deel van de bovenbouw reeds in de loods op de pontons kan worden gebouwd, levert dit grote voordelen voor het bouwproces op. Zo kon het gebouw *De Bolder* (Schiedam) aanzienlijk sneller gebouwd worden, omdat het in een scheepsbouwloods is gebouwd en daarna over water naar de uiteindelijke locatie is gebracht. De bouwperiode was slechts 6 maanden.

Het drijvende hotel heeft te een te grote afmeting om in zijn geheel te worden verplaatst (68 x 60 m). Het is echter wellicht wel mogelijk om delen van het gebouw op een dergelijke wijze als *De Bolder* te bouwen.



Afb. 13.13. Het transport van ‘De Bolder’ van Zwijndrecht naar Schiedam.

Om de haalbaarheid hiervan te onderzoeken is de volgende werkwijze gehanteerd:

- Er is een mogelijke bouwvolgorde ontwikkeld.
- Vervolgens zijn de randvoorwaarden bepaald die deze bouwvolgorde veronderstelde.
- Tenslotte is getoetst of het ontwerp aan deze randvoorwaarden kon voldoen.

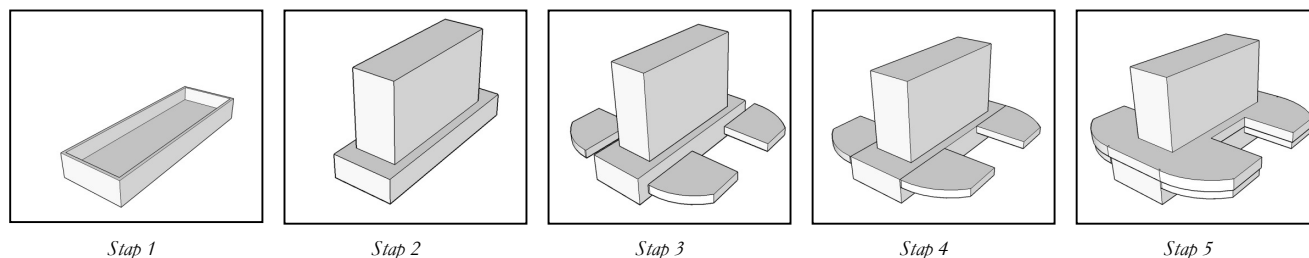
³¹ De BGT, omdat deze belastingssituatie min of meer zorgt voor een gemiddelde diepgang.

A. Voorgestelde bouwvolgorde

De volgende bouwvolgorde wordt voorgesteld:

1. Het hoofd- en de zijpontons worden in een scheepsbouwloods gebouwd.
2. Op het hoofdponton wordt het casco van de hoogbouw neergezet en tevens voor zover mogelijk afgebouwd (uitgezonderd de beganegrond verdieping).
3. Het hoofdponton met opbouw en de zijpontons worden afzonderlijk naar de locatie gebracht.
4. Op de locatie worden de pontons gekoppeld.
5. Vervolgens wordt het gebouw verder afgebouwd.

Stap 4 wordt in paragraaf 13.3.4 nader uitgewerkt.



Afb. 13.14. Voorgestelde bouwvolgorde.

B. Randvoorwaarden voorgestelde bouwvolgorde

Wil de bovenstaande bouwvolgorde haalbaar zijn dan moet aan de volgende randvoorwaarden voldaan worden:

1. Er moet in de nabijheid van de locatie een scheepsbouwloods aanwezig zijn die groot genoeg is voor de bouw van het drijvende hotel.
2. Het traject van de scheepsbouwloods naar de locatie dient voldoende diep te zijn. Hiernaast dient de doorvaartbreedte en -hoogte van bruggen en sluisen voldoende groot te zijn voor de verschillende onderdelen van het hotel die over water vervoerd zullen worden.
3. De verschillende onderdelen die over water vervoert zullen worden, dienen te voldoen aan de randvoorwaarde voor stabiliteit ($h_m \geq 0,5$ m).
4. Het koppelen van de pontons op de locatie dient technisch haalbaar te zijn.

C. Toetsing randvoorwaarden

1. Scheepsbouwloods

Er zijn langs de Nieuwe Maas zowel stroomafwaarts als stroomopwaarts meerdere grote scheepswerven te vinden. Verschillende daarvan beschikken over een scheepsbouwloods. Stroomafwaarts is er bijvoorbeeld de scheepswerf *United Yard* in de Wiltonhaven. Stroomopwaarts is de scheepsbouwloods *Giessen- De Noord* in Krimpen aan de IJssel een geschikte locatie. Deze loods is 265 m lang, 97 m breed en 52 m hoog. De maximale afmetingen van een schip dat nog in de loods past bedragen 245 m lang en 38 m breed.

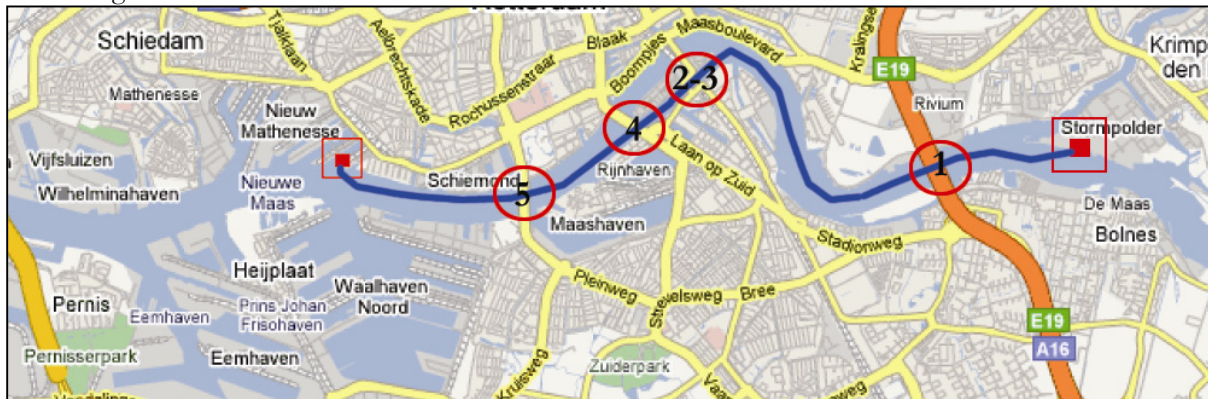
Hoewel in de uiteindelijke keuze van een loods ook aspecten als kosten en beschikbaarheid meespelen, wordt er voor deze opgave alleen naar de capaciteit van de loods gekeken. Omdat de loods *Giessen – de Noord* wat dit betreft voldoet, wordt de bouw van het hotel hier gesitueerd.



Afb. 13.15. Extérieur en intérieur van scheepsbouwloods Giessen - De Noord.

2. Vaarwegen

Een tweede voorwaarde betreft de capaciteit van de vaarwegen. De diepte van de Nieuwe Maas voldoet (ca. 10 m). Het traject tussen de loods in Krimpen en de IJsselhaven in Rotterdam is weergegeven in afbeelding 13.16.



Afb. 13.16. Traject van de scheepsbouwoods (rechts) naar de locatie (links).

Tijdens het transport moet het hotel de volgende bruggen passeren:

1. Van Brienoordbrug. Deze brug heeft een basculebrug van 50 m breed.
2. Koningsbrug (oude spoorbrug met bijnaam 'De Hef'). Deze heeft een doorvaarthoogte van ca. 50 m hoog. De doorvaartbreedte bedraagt 50 m.
3. Koninginnebrug, doorvaartbreedte 50 m.
4. Erasmusbrug, deze heeft ook een basculebrug van 50 m breed.
5. Maastunnel, geen belemmering.

Aangezien de maximale breedte van de te vervoeren pontons 25 m bedraagt, is ook aan deze voorwaarde voldaan.

3. Stabiliteitsvoorwaarde

Voorwaarde voor het vervoer is dat de pontons voldoen aan de stabiliteitsvoorwaarde dat de metacentrumhoogte minimaal 0,5 m bedraagt. Deze voorwaarde is vooral relevant voor het hoofdponton met de hoogbouw van het hotel erop (afb. 3.14 –stap 2). Bij de berekening van de stabiliteit van het hoofdponton is ervan uitgegaan dat tijdens het transport geen variabele belasting in de bovenbouw aanwezig is. Dit maakt de situatie iets gunstiger.

Aanvankelijk voldeed het hoofdponton niet aan de genoemde voorwaarde. Het zwaartepunt van dit ponton bleek in ontkoppelde situatie boven het metacentrum te liggen. Om dit probleem op te lossen zijn de volgende maatregelen genomen:

- Het zwaartepunt is verlaagd door het drijflichaam zwaarder uit te voeren. Hierdoor voldeed het ponton in ontkoppelde situatie aan de stabiliteitsvoorwaarde ($h_m = 1,3$ m).
- Door de ballastanks van het hoofdponton tijdens het transport te vullen, daalde het zwaartepunt en kwam het ponton dieper te liggen. Hierdoor wordt de rotatiegevoeligheid van het ponton verminderd. Voorwaarde voor deze maatregel is wel dat de ballastanks op een juiste wijze gecompartmenteerd zijn. De metacentrumhoogte van het ponton kwam met deze maatregel op 1,7 m terecht. Indien men het vullen van de ballastanks met water niet veilig genoeg acht, kan men ook zand als tijdelijke ballast gebruiken.

In het volgende hoofdstuk zal het bovengenoemde rekenkundig worden aangetoond. Een overzicht van de stabiliteit van het gebouw in de bouw- fase is ook te vinden in bijlage [20].

4. Mogelijkheid voor het koppelen van de pontons op de locatie

In par. 12.5 is reeds vastgesteld dat het eenvoudiger wordt pontons te koppelen naarmate het oppervlakte waarop deze koppeling moet worden gerealiseerd kleiner is. Wat voor manieren er zijn om pontons te koppelen en hoe deze koppeling wordt gerealiseerd, is echter nog niet aan de orde geweest. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan. Hier volgt alsvast de conclusie dat het koppelen van het zijponton aan het hoofdponton haalbaar wordt geacht.

Aan de vier gestelde randvoorwaarden voor de voorgestelde bouwvolgorde wordt dus voldaan. Hieruit volgt de conclusie dat het haalbaar wordt geacht om het hoofdponton met bovenbouw elders te bouwen en op de locatie aan de zijpontons te koppelen.

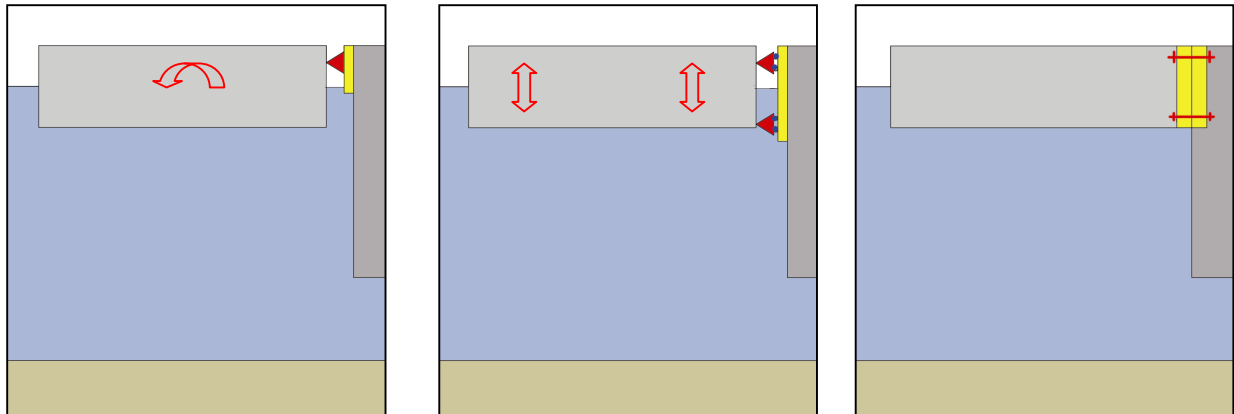
13.3.4 Het koppelen van pontons

In deze paragraaf worden de volgende aspecten betreffende het koppelen van pontons toegelicht:

- De aard van de verbinding (scharnier, rol of inklemming)
- De bouwvolgorde bij het koppelen van het ponton.

A. De aard van de verbinding

De verbinding tussen de pontons kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. Hieronder worden verschillende mogelijkheden aan de orde gesteld.



Afb. 13.17. De aard van de verbinding: Links scharnier, midden dubbele rol, rechts natte inklemming.

1. Scharnier

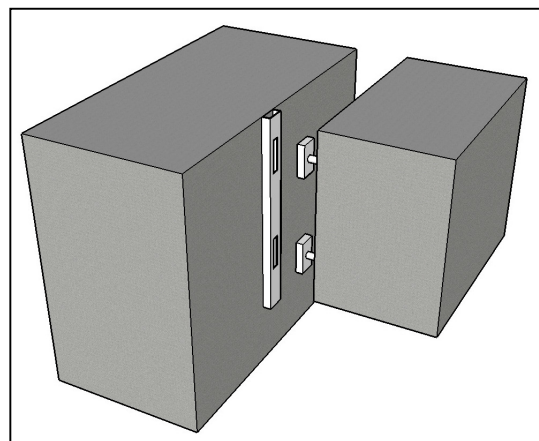
De verbinding kan geen momenten opnemen alleen dwarskrachten en normaalkrachten. De dwarskracht zorgt ervoor dat de verbinding een bijdrage levert aan de stabiliteit van het gehele drijflichaam. Deze bijdrage is echter wel klein ten opzichte van de andere mogelijke oplossingen.

Voordeel van deze verbinding is dat de krachten die de verbinding moet opnemen relatief klein zijn. De hoekverdraaiing tussen de pontons, die bijvoorbeeld door windbelasting kan ontstaan, is een aanzienlijk nadeel. Indien het ponton fungeert als een terras is een hoekverdraaiing ten opzichte van het hoofdponton wellicht nog acceptabel. Indien de verbinding zich echter in het gebouw bevindt, zal deze hoekverdraaiing niet acceptabel zijn. Een ander nadeel is de beperkte bijdrage aan de stabiliteit van het gebouw.

2. Dubbele rol

Indien de koppeling tussen de pontons wordt uitgevoerd als een dubbele rol zal de koppeling wel een moment op kunnen nemen. Binnen een bepaalde marge kan het ponton evenwijdig langs het hoofdponton bewegen (afb. 13.17 en 13.18). De arm tussen de twee verbindingen zorgt ervoor dat er een koppel ontstaat.

Het voordeel van deze oplossing is dat de krachten in het ponton en de koppeling relatief klein zijn, terwijl de verbinding toch een moment kan opnemen. Door de bewegingsvrijheid in één richting wordt het totale buigende moment in het drijflichaam beperkt. Nadeel van deze oplossing is dat er een hoogteverschil tussen de pontons ontstaat. Hiernaast is het maximale moment wat de verbinding kan opnemen, beperkt.

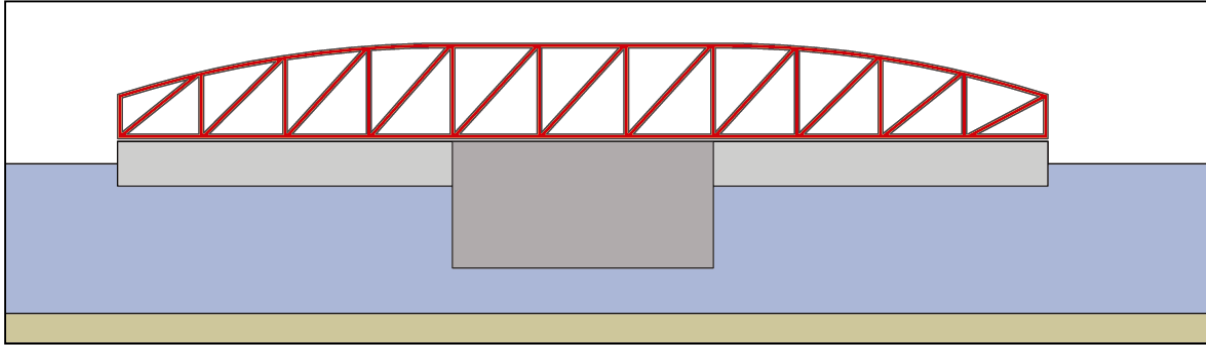


Afb. 13.18. Principe van een schuifverbinding. De verbinding is buigvast maar heeft wel een vrijheidsgraad.

3. Natte buigvaste verbinding

De koppeling is nu volledig buigvast en heeft geen enkele vrijheidsgraad meer. De verbinding tussen de pontons wordt in het drijflichaam gerealiseerd wat tot gevolg heeft dat een van de verbindingen zich onder de waterspiegel bevindt. Daarom wordt de verbinding nat genoemd.

Het drijflichaam is nu geheel vormvast wat een belangrijk functioneel en esthetisch voordeel is. Nadeel is dat de krachten die het drijflichaam en de koppeling moeten opnemen groter zijn als bij de eerder genoemde mogelijkheden. Hierbij is een natte verbinding lastiger om uit te voeren dan een droge variant.



Afb. 13.19. Voorbeeld van een droge buigvaste verbinding tussen de pontons.

4. Droge buigvaste verbinding

De stijfheid van het drijflichaam hoeft niet per definitie te komen uit de verbinding tussen de pontons. Er kan ook op het drijflichaam een constructie worden toegevoegd. Deze constructie maakt het drijflichaam dan tot een stijf geheel (afb. 3.19). Deze constructie kan uiteraard op tal van manieren worden vormgegeven. Men kan de desbetreffende constructie expressief in de vormgeving van het gebouw naar voren laten komen zodat men aan de vorm van het gebouw de krachtswerking kan lezen (*form follows force*).

Voordeel van deze variant is dat men al naar gelang de vorm en de hoogte van de koppelconstructie het drijflichaam zo stijf kan maken als wenselijk is. Hierbij is het een voordeel dat er onder de waterspiegel geen koppelingen gerealiseerd hoeven te worden. De constructie kan wel functioneel nadelige consequenties hebben voor de plattegrond van het gebouw.

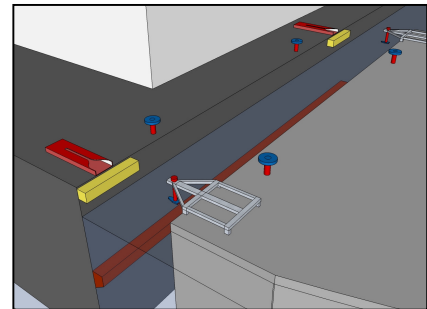
Voor het drijvende hotel is gekozen voor een natte buigvaste verbinding. Gezien de functionele bestemming van de zijpontons was een scharnierende verbinding of een dubbele rol geen optie. De droge buigvaste verbinding is op zichzelf gezien een aantrekkelijke mogelijkheid, maar de oplossing paste niet goed binnen de plattegrond en de vormgeving van het gebouw.

B. Het koppelen van pontons

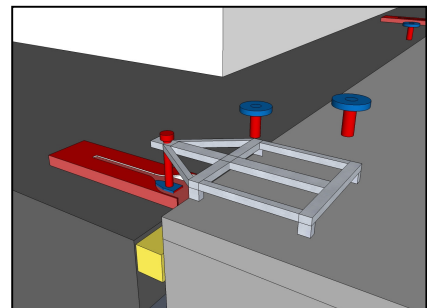
De wijze waarop pontons aan elkaar worden gekoppeld, is gevisualiseerd in bijlage [15]. Hieronder wordt in hoofdlijnen het stappenplan beschreven.

1. Het hoofdponton wordt met gevulde ballasttanks naar de locatie vervoerd.
2. Het hoofdponton wordt aan de meerpalen gekoppeld.
3. De koppelvoorzieningen worden aangebracht (afb. 13.20)
4. Het zijponton wordt tegen het stootblok geduwd. De schoen staat nu in de geleider (afb. 13.21).
5. Het stootblok wordt verwijderd en het zijponton wordt tegen het hoofdponton aangetrokken.
6. Omdat de ballasttanks van het zijponton nog leeg zijn, ligt het zijponton hoger dan het hoofdponton.
7. De ballasttanks van het zijponton worden nu gevuld, zodat het zijponton op de nok van het hoofdponton zakt.
8. De koppelvoorziening wordt nu gefixeerd in drie vrijheidsgraden.
9. Dywidag-staven worden aangebracht in de middelste ballasttank (afb. 13.22).
10. De andere ballasttanks in de koppelzone worden leeggepompt.
11. Ook daar worden de dywidag-staven aangebracht.
12. De momentvaste verbinding is nu tot stand gekomen. De resterende ballasttanks worden geleegd.

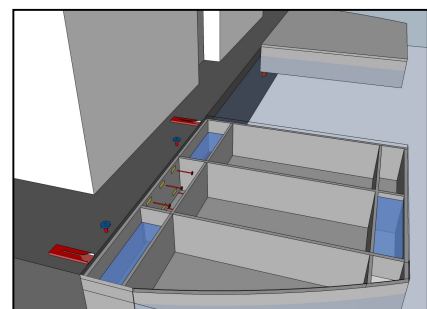
De diepgangfluctuatie die ontstaat door het vullen van de ballasttanks is weergegeven in bijlage [20]. Hier is tevens informatie te vinden over de stabiliteit van de bouwdelen in de bouwfase.



Afb. 13.20. Koppelvoorzieningen.



Afb. 13.21. Schoen in geleider.



Afb. 13.22. Aanbrengen dywidag-staven.

13.4 Kostenanalyse

Omdat de bouw van het drijvende hotel sterk verschilt van de wijze waarop een traditioneel hotel wordt gebouwd, is het een relevante vraag of de investeringskosten van het ontworpen hotel hoger of lager zullen uitvallen dan zijn traditionele variant op het land. Om een antwoord te vinden op deze vraag is een kostenanalyse opgesteld.

De volgende vier varianten zijn in deze kostenanalyse bestudeerd:

1. Een traditioneel hotel met een vergelijkbare grootte als het definitief ontwerp, maar dan op het land gesitueerd. (nulvariant).
2. Een drijvend hotel dat voor zover mogelijk in een scheepsbouwloods wordt gebouwd.
3. Een drijvend hotel dat, uitgezonderd het drijflichaam, op de locatie wordt gebouwd.
4. Een hotel op het land waarbij het grootste gedeelte van het gebouw in een loods wordt gebouwd. Vervolgens wordt het gebouw over het water naar de uiteindelijke locatie gebracht, om daar geplaatst te worden op een traditionele fundering.

Deze kostenanalyse is te vinden in bijlage [16]. In deze paragraaf wordt van dit rapport een samenvatting gegeven. De volgende zaken komen aan de orde:

- A. De gehanteerde methode.
- B. De meer- en minderkosten van bouwen in een loods t.o.v. bouwen op locatie.
- C. De meer- en minderkosten van een drijvend gebouw t.o.v. een gebouw op het land.
- D. Vergelijking varianten en conclusies.

A. Methode

Om de vier varianten op een zinnige wijze met elkaar te kunnen vergelijken is de volgende methode gehanteerd:

- Met behulp van kengetallen zijn de bouw- en investeringskosten van de nulvariant bepaald.
- De investeringskosten van de nulvariant zijn vergeleken met verschillende referentieprojecten.
- Voor de relevante elementenclusters zijn voor de verschillende varianten de meer- en minderkosten bepaald. Ook de algemene bouwplaatskosten en de bijkomende kosten zijn bestudeerd.
- De varianten zijn met elkaar vergeleken en er zijn conclusies getrokken.

De bouw- en investeringskosten van de nulvariant zijn bepaald om de meer- en minderkosten van de verschillende varianten als een percentage hiervan te kunnen uitdrukken. Het viel niet binnen het bestek van de analyse om een complete elementenraming te maken voor de verschillende varianten. Daarom zijn de meer- en minderkosten alleen bepaald voor die elementenclusters waarin naar verwachting de grootste meer- en minderkosten ontstaan, te weten de elementenclusters fundering, skelet, gevel en dak.

B. Meer- en minderkosten van bouwen in een loods

Ten opzichte van een bouwwijze waarbij grotendeel op de locatie zelf wordt gebouwd, heeft het bouwen in een loods de volgende meer- en minderkosten:

Minderkosten

- **Minderkosten arbeid** vanwege een hogere efficiëntie. Per werkzaamheid zijn er gemiddeld gezien minder manuren vereist, omdat de arbeidsomstandigheden gunstiger zijn en omdat er geen hinder wordt ondervonden van wind- regen en vorstverlet.
- **Minderkosten door bouwtijdverkorting.** De bouwtijdverkorting ontstaat door drie oorzaken: De algemene arbeidsomstandigheden zijn beter, er is geen sprake van weershinder en er kan in ploegdienst worden gewerkt. De bouwtijdverkorting zorgt voor de volgende minderkosten:
 1. Een besparing op de variabele algemene bouwplaatskosten.
 2. Een besparing op de rentekosten in de bouwfase.
 3. Een langere exploitatietermijn van het hotel. Dit kostenvoordeel behoort echter niet tot de investeringskosten, maar tot de exploitatiefase en is daarom niet meegenomen in de vergelijking.
- Mogelijke **minderkosten** door **subsidie**.

Meerkosten

- **Meerkosten transport.** Het gebouw moet over waterwegen naar de uiteindelijke locatie worden gebracht, hieraan zijn transportkosten verbonden.
- **Meerkosten lichtgewicht constructie.** Om het gebouw te kunnen vervoeren is een lage bouwmassa wenselijk. Dit kan meerkosten veroorzaken, bijvoorbeeld de kosten van een zwevende dekvloer of extra kosten voor de klimaatinstallatie.
- **Hogere bijkomende kosten.** Het transporteren van een gebouw is niet gebruikelijk en kan daarom hogere bijkomende kosten veroorzaken (ontwikkelingskosten, risicotoeslag).
- **Meerkosten huur loods.** De loods moet gehuurd worden, en eventueel moeten extra voorzieningen voor de bouw van het hotel in de loods worden aangebracht (betonwerk).

De bovenstaande kosten zijn voor zover mogelijk in de kostenanalyse gekwantificeerd. Onder andere is hiertoe een reductiefactor voor het benodigde aantal manuur opgesteld en is met een formule de bouwtijdverkortening ingeschat. Deze gegevens zijn te vinden in par. 4.2 en 4.6 van bijlage [16].

C. Meer- en minderkosten van een drijvend gebouw.

Ten opzichte van een gebouw op het land heeft een drijvend gebouw meer- en minderkosten.

Minderkosten

- Mogelijkheid subsidie vanwege onconventioneel ontwerp.
- Mogelijk voordeel in de grondkosten (waterkavel).

Meerkosten

- Meerkosten van het drijflichaam. Een drijflichaam is gemiddeld gezien (behoorlijk) duurder dan een traditionele fundering, bijvoorbeeld als gevolg van het voorspannen van beton.
- Meerkosten van het koppelen van potons.
- Meerkosten van de aanmeerconstructie (meerpalen).
- Meerkosten van een relatief dure ontsluiting.
- Meerkosten van een lichtgewichtconstructie.
- Hogere bijkomende kosten (projectontwikkelingskosten, verzekeringskosten en risicotoeslag).

De bovengenoemde kosten zijn voor zover mogelijk voor de verschillende varianten berekend en ingeschat.

D. Vergelijking en conclusie

De bouwkosten van de nulvariant zijn geraamd op 13,0 mln euro en de investeringskosten op 15,9 mln euro. De meer- en minderkosten van de verschillende varianten weergegeven in tabel 13.1.

variant			meer- en minderkosten t.o.v. nulvariant		bouwijdverkortening
bouwkosten 13,0 mln euro investeringskosten 15,9 mln euro			percentage van bouwkosten	percentage van investeringskosten	factor
	<i>situering</i>	<i>bouw</i>			
nulvariant	land	locatie	-	-	1,0
variant 1 (D.O.)	water	loods	- 1,0 %	- 0,8 %	0,7
variant 2	water	locatie	+ 3,5 %	+ 2,9 %	1,0
variant 3	land	loods	- 4,5 %	- 3,7 %	0,7

Tabel 13.1. Resultaat kostenanalyse drijvend hotel.

Conclusie

Variant 3 blijkt financieel het meest gunstig, omdat er een aanzienlijke bouwtijdverkortung wordt gerealiseerd zonder dat er een relatief duur drijflichaam gebouwd hoeft te worden. De minderkosten van het bouwen in een loods overstijgen dus de meerkosten van het transport. De gerealiseerde bouwijdverkortung is ook zeer aantrekkelijk.

Variant 1 (het definitieve ontwerp) blijkt wat betreft de totale investeringskosten niet veel van de nulvariant te verschillen. De meerkosten van het elementencluster fundering (drijflichaam, koppelen pontons en meerpalen) blijken in grote lijn gecompenseerd te worden door de minderkosten van het bouwen in het loods. De kosten van het drijflichaam zijn ongeveer twee maal zo groot als de nulvariant met een traditionele fundering, waarin ook een parkeerkelder is opgenomen. De aanzienlijke bouwijdverkortung met een factor 0,7 is het belangrijkste voordeel van variant 1.

Variant 2 blijkt ongunstig, omdat er geen bouwijdverkortung wordt gerealiseerd (eerder een vertraging) en tevens een relatief duur drijflichaam gebouwd moet worden, waardoor er veel meerkosten en weinig minderkosten zijn. Als het hotel dus niet in een loods wordt gebouwd zullen de kosten hoger uitvallen als een traditioneel hotel met een vergelijkbare grootte. Als we variant 2 met variant 1 vergelijken, kan hieruit het absolute kostenvoordeel van het bouwen in een loods worden uitgedrukt. Als de bouw van het drijvende hotel in een loods wordt gesitueerd, levert dit een kostenvoordeel van ca. 6 ton op (4,5 % van de bouwsom).

Kanttekeningen

Bij deze kosten analyse worden twee kanttekeningen geplaatst:

- Benadrukt moet worden dat de kostenanalyse een zeer globaal karakter heeft. Er is kosteninformatie uit actuele databases gebruikt en de meer- en minderkosten zijn zo veel mogelijk op een inzichtelijke manier bepaald. Toch moesten veel posten moeten worden geschat, omdat concrete informatie over de specifieke kosten van een bepaald onderdeel niet voorhanden was.
- De kostenanalyse is specifiek ontwikkeld voor het drijvende hotel en daarom niet generaliseerbaar. Er zijn veel gegevens ingecalculeerd die specifiek voor deze opgave van toepassing zijn. De uitgangspunten en gehanteerde formules zijn wel generaliseerbaar en kunnen ook gebruikt worden voor kostenanalyses van andere projecten.

14. Validatie ontwerp

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp rekenkundig gevalideerd. Het gaat hierbij om de drijftechnologische prestaties van het gebouw. Bezien wordt of het gebouw in bouw- en gebruiksfase stabiel is. Hiernaast komt de rotatiegevoeligheid aan de orde door te bestuderen hoe het gebouw zich gedraagt onder windbelasting en niet-centrische belasting. Ook wordt er gekeken naar de scheefstandcorigerende mechanismen van het hotel. Tenslotte komt de diepgangfluctuatie van het gebouw aan de orde.

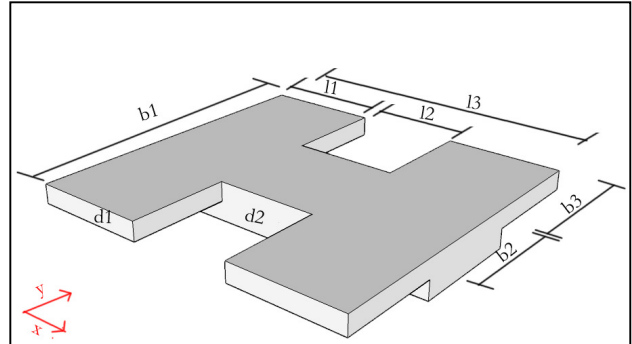
14.1 Statische stabiliteit

Eerst wordt gekeken naar de gebruiksfase van het hotel, daarna naar de bouwfase.

1. Gebruiksfase

De positie van het metacentrum van het drijvende hotel kan bepaald worden met de formule van Scribanti (3.25). De afmetingen van het drijflichaam zijn gedefinieerd als aangegeven in afb. 14.1.

Het substitueren van deze gegevens levert de volgende positie van het metacentrum op:



Afb. 14.1. Afmetingen van het drijflichaam.

a. Metacentrum in x-richting (voor moment M_y)

$$BM_x = \frac{l_2^3 \cdot b_2 + 2l_1^3 \cdot b_1 + 24a_1^2 \cdot l_1 \cdot b_1}{12(4d_1 \cdot b_3 \cdot l_1 + d_2 \cdot b_2 \cdot l_3)} \quad (14.1)$$

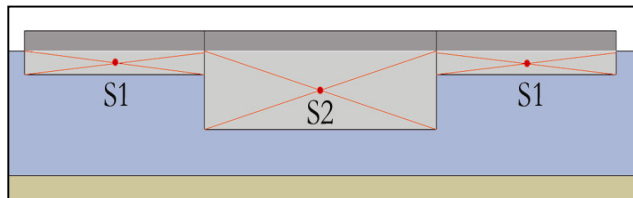
met

a_1 = afstand zwaartepunt rechthoek $b_1 \cdot l_1$ t.o.v. zwaartepunt rechthoek $b_1 \cdot l_3$ (m).

b. Metacentrum in y-richting (voor moment M_x)

$$BM_y = \frac{2b_1^3 \cdot l_1 + b_2^3 \cdot l_2}{12(4d_1 \cdot b_3 \cdot l_1 + d_2 \cdot b_2 \cdot l_3)} \quad (14.2)$$

De positie van het drukingspunt van het drijflichaam kan worden bepaald met behulp van het statisch oppervlaktemoment van de verschillende onderdelen van het drijflichaam. Omdat de zijpontons niet over de gehele breedte van het hoofdponton aanwezig zijn, vermenigvuldigen we deze onderdelen met de wegingsfactor $2l_1/l_3$. Afgeleid kan worden dat voor de positie van het drukingspunt dan de volgende formule geldt:



Afb. 14.2. Het gezamenlijk drukingspunt van het drijflichaam kan bepaald worden met het statisch moment van hoofd- en zijpontons. Het gegeven dat de zijpontons niet over heel de breedte van het ponton aanwezig zijn, wordt verdisconteerd met een wegingsfactor.

$$B = \frac{2S_1 + S_2}{2A_1 + A_2} = \frac{2d_1^2 \cdot b_3 \cdot \frac{l_1}{l_3} + \frac{1}{2}d_2^2 \cdot b_2}{4d_1 \cdot b_3 \cdot \frac{l_1}{l_3} + d_2 \cdot b_2} \quad (14.3)$$

De positie van het drukingspunt wordt gemeten vanaf de waterlijn. De afstand van het drukingspunt tot de kiel wordt dus gevonden met:

$$h_B = d_2 - B \quad (14.4)$$

met:

h_b = Afstand drukingspunt- kiel (m)

Men vindt $h_{k \text{ x-richting}}$ door het superponeren van (14.1) en (14.4). $h_{k \text{ x-richting}}$ wordt gevonden door het superponeren van (14.2) en (14.4). De metacentrumhoogte in de BGT wordt nu hieronder berekend.

Het drijflichaam heeft de volgende afmetingen:

$$\begin{array}{lll} b_1 = 60,2 \text{ m} & l_1 = 21,7 \text{ m} & d_{1 \text{ BGT}} = 1,9 \text{ m} \\ b_2 = 23,6 \text{ m} & l_2 = 21,4 \text{ m} & d_{2 \text{ BGT}} = 6,3 \text{ m} \\ b_3 = 18,3 \text{ m} & l_3 = 64,8 \text{ m} & a_1 = 21,6 \text{ m} \end{array}$$

Als deze gegevens worden ingevuld in de formules (14.1), (14.2) en (14.4), kunnen $h_{k \text{ x-richting}}$ en $h_{k \text{ y-richting}}$ worden uitgerekend:

$$\begin{array}{ll} h_{k \text{ x-richting}} &= 109,2 \text{ m} \\ h_{k \text{ y-richting}} &= 67,9 \text{ m} \end{array}$$

Het zwaartepunt van het gebouw als geheel ligt in de BGT 10,0 m boven de kiel. Met $h_m = h_k - h_z$ kan nu h_m worden bepaald:³²

$$\begin{array}{ll} h_{m \text{ x-richting}} &= 99,2 \text{ m} \\ \mathbf{h_{m \text{ y-richting}}} &= \mathbf{57,9 \text{ m}} \end{array}$$

De randvoorwaarde voor stabiliteit was dat h_m minstens 0,5 m moest bedragen. Aan deze voorwaarde wordt dus voldaan.

2. Bouwfase

Voor de bouwfase is met name de stabiliteit van het hoofdponton met bovenbouw van belang. De vorm van het drijflichaam is dan eenvoudiger dan in de gebruiksfase. Het betreft een rechthoekig ponton, dus formule (3.27) kan gebruikt worden voor het bepalen van de positie van het metacentrum. Eerst wordt gekeken naar de situatie waarin de ballasttanks leeg zijn. In de transportfase is er geen variabele belasting in het gebouw aanwezig. De bouwfase kan worden aangeduid als een bijzondere belastingsituatie, dus de belastingfactoren bedragen 1,0. De y-richting is de kritische richting.

$$\boxed{h_{m \text{ y-richting}} = \frac{b_2^2}{12d_2} + \frac{1}{2}d_2 - h_z} \quad (14.4)$$

Voor het hoofdponton in de bouwfase met lege ballasttanks gelden de volgende parameters:

$$\begin{array}{ll} b_2 &= 23,6 \text{ m} \\ d_2 &= 5,4 \text{ m} \\ h_z &= 10,0 \text{ m} \end{array}$$

Indien deze gegevens worden ingevuld in formule (14.4) levert dit de metacentrumhoogte op:

$$\mathbf{h_{m \text{ y-richting}}} = \mathbf{1,3 \text{ m}}$$

Er wordt dus voldaan aan de stabiliteitsvoorwaarde ($h_m > 0,5 \text{ m}$). Om de rotatiegevoeligheid tijdens het transport te verminderen worden de ballasttanks onder in het hoofdponton gevuld met 1100 m³ water. Het zwaartepunt komt hierdoor 1 meter lager te liggen. De metacentrumhoogte wordt berekend in de nieuwe situatie:

$$\begin{array}{ll} b_2 &= 23,6 \text{ m} \\ d_2 &= 6,1 \text{ m} \\ h_z &= 9,0 \text{ m} \\ \mathbf{h_{m \text{ y-richting}}} &= \mathbf{1,7 \text{ m}} \end{array}$$

Het hoofdponton is dus in de transportfase voldoende stabiel te krijgen. In bijlage [20] is een meer gedetailleerd overzicht gegeven van de stabiliteit van het gebouw in bouw- en gebruiksfase. Daar is ook de diepgangfluctuatie aangegeven die door het vullen van de ballasttanks ontstaat.

³² Er is sprake van een klein afrondingsverschil t.o.v. de waarden die in bijlage [17] zijn af te lezen.

14.2 Rotatiegevoeligheid

Er wordt gekeken naar de rotatiegevoeligheid bij windbelasting en bij excentrische variabele belasting.

1. Windbelasting - gebruiksfase

De invloed van de wind in de y-richting wordt bepaald. Dit is de kritische richting, omdat de positie van het metacentrum voor deze richting het laagst is. Als volgens de in par. 6.5 beschreven rekenregels de grootte van de windbelasting wordt bepaald, blijkt dat het drijflichaam in de BGT een moment van 46.400 kNm krijgt opgelegd ($p_w = 1,3 \text{ kN/m}^2$). Een gedeelte van dit moment wordt geleverd door de meerpalen; een gedeelte door de waterdruk tegen het drijflichaam. Met formule (3.24) kan de optredende rotatie worden bepaald:

$$M_{opr} = F_z \cdot \sin \alpha \cdot h_m$$

M_{wind}	= +	46.400	kNm	
$M_{meerpaal}$	= -	2.700	kNm	(3.000 kN x 0,9 m)
M_{opr}	= -	43.700	kNm	
F_z	=	125.650	kN	(permanente en variabele belasting)
$h_{m \text{ y-richting}}$	=	57,9	m	
α_y	=	0,3	deg	

Deze rotatie is kleiner dan de maximaal toegestane rotatie in de BGT, dus ook aan deze randvoorwaarde wordt voldaan. Op soortgelijke wijze kan de rotatie in de UGT worden berekend. De rotatie bedraagt dan 0,5°.

2. Excentrische variabele belasting-gebruiksfase

In de congreszaal wordt een dikke-mensen-feestje georganiseerd. Aangezien de congreszaal zich in de zijvleugels bevindt, veroorzaakt dit een excentrische belasting. Stel dat er 250 mensen aanwezig zijn met een gemiddelde massa van 140 kg. De totale puntlast bedraagt dan 350 kN. Als de spreiding van de mensen over de zaal min of meer gelijk is, veroorzaakt dit een M_x van 6.615 kNm en een M_y van 7.560 kNm. We bestuderen de rotatie die als gevolg van deze belasting ontstaat:

Rotatie in y-richting				Rotatie in x-richting			
M_x	= +	6.615	kNm	M_y	= +	7.560	kNm
M_{opr-x}	= -	6.615	kNm	M_{opr-y}	= -	7.560	kNm
F_z	=	126.000	kN	F_z	=	126.000	kN
$h_{m \text{ y-richting}}$	=	57,9	m	$h_{m \text{ x-richting}}$	=	99,2	m
α_y	=	0,05	deg	α_x	=	0,03	deg

De rotatie die de belasting veroorzaakt is dus blijkens de bovenstaande berekening erg klein. De maximale rotatie in de BGT mocht 1,0° bedragen, hier wordt gemakkelijk aan voldaan.

3. Windbelasting - bouwfase

Voor het transport van het hoofdponton zal men een dag met weinig wind uitkiezen. Stel dat er tijdens het transport een windbelasting op het gebouw aanwezig is van $p_w = 0,3 \text{ kN/m}^2$. We bestuderen de windbelasting op de langsegevel, en bezien zowel de situatie met lege als met gevulde ballasttanks.

Lege ballasttanks				Gevulde ballasttanks			
M_{wind}	= +	10.000	kNm	M_{wind}	= +	10.000	kNm
M_{opr}	= -	10.000	kNm	M_{opr}	= -	10.000	kNm
F_z	=	82.300	kN	F_z	=	94.300	kN
$h_{m \text{ y-richting}}$	=	1,3	m	$h_{m \text{ y-richting}}$	=	1,7	m
α_y	=	5,4	deg	α_y	=	3,6	deg

Door de ballasttanks van het hoofdponton te vullen vermindert dus de rotatiegevoeligheid. Voor de transportfase wordt een rotatie van 3,6° acceptabel geacht. Indien men de ballasttanks geheel vult, kan de rotatie bij de gegeven belasting verder gereduceerd worden tot 3,2°.

14.3 Scheefstandcorrectie

Er zijn in het drijvende hotel twee scheefstandcorrigerende systemen aanwezig: De volautomatische parkeergarage en de ballasttanks. De parkeergarage fungeert als middel om op korte termijn een correctie aan te brengen. Bij langdurige excentrische belastingen kunnen de ballasttanks worden ingeschakeld. In deze paragraaf wordt de maximale scheefstandcorrectie berekend die met deze systemen bereikt kan worden.

1. Parkeergarage

We beschouwen de scheefstandcorrectie die in de y-richting kan worden aangebracht, in die richting is het gebouw het meest rotatiegevoelig. De parkeergarage heeft 81 plaatsen. De scheefstandcorrigerende functie wordt optimaal benut als er 41 auto's in de garage aanwezig zijn, en deze allemaal aan de zelfde zijde van de lengteas van het gebouw worden geplaatst. In deze optimale situatie ontstaat de volgende scheefstandcorrectie:

Scheefstandcorrectie garage

$$\begin{aligned}
 F_{\text{excentr.}} &= 410 \quad \text{kN} && (41 \text{ auto van } 1.000 \text{ kg}) \\
 a_{\text{excentr.}} &= 5,4 \quad \text{m} && (\text{afstand rotatiecentrum}) \\
 M_{\text{excentr.}} &= + 2.215 \quad \text{kNm} \\
 M_{\text{opr}} &= - 2.215 \quad \text{kNm} \\
 F_z &= 126.060 \quad \text{kN} \\
 h_{\text{m y-richting}} &= 57,9 \quad \text{m} \\
 \alpha_y &= 0,02 \quad \text{deg}
 \end{aligned}$$

De scheefstandcorrigerende capaciteit van de garage is dus erg klein. Kleine excentrische belastingen (bijvoorbeeld topdrukke in het restaurant) kunnen er wel mee worden gecompenseerd.

2. Ballasttanks

Scheefstandcorrectie in de y-richting gebeurt door de ballasttanks in de zijpontons. Scheefstandcorrectie in de x-richting wordt bereikt door de ballasttanks in het hoofdponton in te schakelen.

Correctie in y-richting

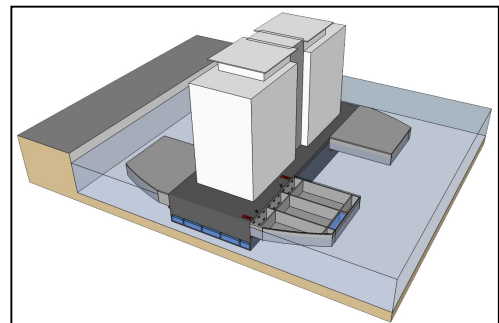
In elk zijponton zijn in de buitenste zone twee ballasttanks aanwezig die samen een maximale capaciteit hebben van 97.000 liter. Als de ballasttanks van de twee zijpontons aan de langszijde van het gebouw maximaal worden gevuld, ontstaat de maximale scheefstandcorrectie.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{excentr.}} &= 1.940 \quad \text{kN} && (2 \times 97.000 \text{ liter water}) \\
 a_{\text{excentr.}} &= 28,3 \quad \text{m} \\
 M_{\text{excentr.}} &= + 54.900 \quad \text{kNm} \\
 M_{\text{opr}} &= - 54.900 \quad \text{kNm} \\
 F_z &= 127.590 \quad \text{kN} \\
 h_{\text{m y-richting}} &= 57,9 \quad \text{m} \\
 \alpha_y &= 0,4 \quad \text{deg}
 \end{aligned}$$

Correctie in x-richting

In de constructieve laag van het drijflichaam bevinden zich 45 compartimenten. Het is niet nodig om al deze compartimenten als ballasttank in te zetten. De 20 compartimenten in de zone 1 tot 4 worden gebruikt voor scheefstand correctie.

Als de ballasttanks in de zones 1 en 2 maximaal worden gevuld, kan hierin 430.000 liter water worden opgeslagen. Met deze capaciteit kan de volgende scheefstandcorrectie gerealiseerd worden:



Afb. 14.3. Zowel in de zijpontons als in het hoofdponton zijn ballasttanks aanwezig.

P									
P	1	2					3	4	
P									

Afb. 14.4. compartimentering in constructieve laag hoofdponton. De zones 1-4 worden gebruikt voor scheefstandcorrectie in de y-richting.

$$\begin{aligned}
F_{\text{excentr.}} &= 4.300 \text{ kN} && (430.000 \text{ liter water}) \\
a_{\text{excentr.}} &= 18,0 \text{ m} \\
M_{\text{excentr.}} &= + 77.400 \text{ kNm} \\
M_{\text{opr}} &= - 77.400 \text{ kNm} \\
F_z &= 129.950 \text{ kN} \\
h_{\text{m x-richting}} &= 99,2 \text{ m} \\
\alpha_x &= 0,3 \text{ deg}
\end{aligned}$$

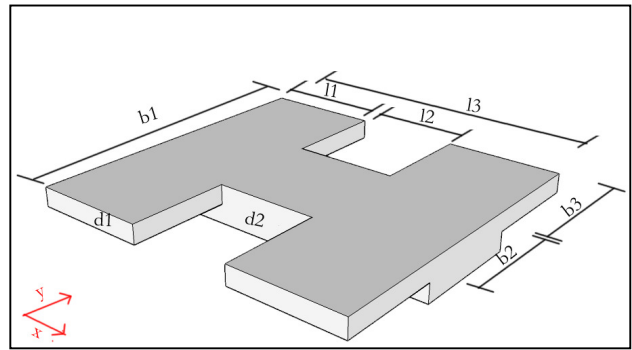
De scheefstandcorrigerende capaciteit van de ballasttanks is ruim voldoende voor de te verwachten scheefstand.

14.4 Diepgangfluctuatie.

Als gevolg van een verandering in de variabele belasting van het gebouw kan de diepgang wijzigen. In deze paragraaf wordt gezien hoe groot deze diepgangfluctuatie is. Als $d_1 > 0$ kan de diepgang van het drijflichaam met de volgende formules worden bepaald:

$$d_1 = \frac{F/10 - \Delta d \cdot b_2 \cdot l_3}{b_2 \cdot l_3 + 4b_3 \cdot l_1} \quad (14.6)$$

$$d_2 = d_1 + \Delta d \quad (14.7)$$



Afb. 14.5. Afmetingen van het drijflichaam.

In de BGT heeft het een drijflichaam een diepgang van 1,9 en 6,3 m. De diepgangfluctuatie wordt bestudeerd als gevolg van:

- Een veranderende bezetting in het hotel.
- Een veranderende bezetting in de parkeergarage.
- Het vullen van de ballasttanks.

1. Veranderende bezetting in het hotel

Het hotel heeft 193 kamers, een restaurant voor ca. 200 personen en hiernaast zijn er vergaderfaciliteiten in het hotel voor groepen tot ca. 300 man. Er wordt verondersteld dat het hotel in de BGT een gemiddelde bezettingsgraad heeft, waarbij er 250 man in hotel aanwezig zijn.

Stel dat er ter gelegenheid van de opening van het hotel een open dag wordt gehouden waarbij er in plaats van 250 man 1200 personen in het hotel aanwezig zijn. Bij een gemiddelde massa van 85 kg per persoon, betekent dit dat een extra belasting van 81 kN. Als met formule (14.6) de diepgangfluctuatie wordt bepaald, blijkt dat het gebouw ongeveer 3 mm dieper komt te liggen. Op een vrijboord van 1,6 m is deze wijziging niet van enige betekenis.

2. Parkeergarage

Stel dat de parkeergarage met een capaciteit van 81 plaatsen aanvankelijk voor een kwart gevuld was, maar als gevolg van een evenement in het hotel tot de laatste plaats bezet wordt. Bij een gemiddelde massa van 1000 kg per auto levert dit een extra belasting op van $61 \times 10 = 610$ kN. Dit veroorzaakt een diepgangfluctuatie van 2 cm. Ook dit is niet van enige betekenis.

3. De ballasttanks

De ballasttanks van het hoofdponton worden gevuld met 350.000 liter water om een excentrisch geplaatste belasting op te compenseren. Dit veroorzaakt een extra belasting van 3.500 kN en volgens formule (14.6) een diepgangfluctuatie van 11 cm.

De diepgangfluctuatie als gevolg van wijzigende variabele belasting zal volgens de bovengenoemde voorbeelden beperkt zijn. De maximale fluctuatie wordt geschat op 0,2 m.

14.5 Overige berekeningen

Tijdens het ontwerpproces zijn de bovenstaande drijftechnologische berekeningen steeds met een hiervoor ontwikkelde spreadsheet uitgevoerd. Deze sheet berekende na het invoeren van de gegevens van het ontwerp de volgende gegevens uit:

- Het zwaartepunt van het ontwerp voor de verschillende belastingcombinaties (maximaal 4).
- De metacentrumhoogte in twee richtingen voor de verschillende belastingcombinaties.
- Rotatie als gevolg van niet-symmetrisch geplaatste bouwmasa.
- Rotatie als gevolg van niet symmetrisch geplaatste puntlasten (o.a. ballasttanks).
- Rotatie als gevolg van windbelasting.
- Diepgang en vrijboord voor de verschillende belastingcombinaties.
- Een toetsting van de drijftechnologische prestaties van het ingevoerde ontwerp aan de randvoorwaarden betreffende resterende diepgang, vrijboord, metacentrumhoogte en rotatie voor de verschillende belastingcombinaties.

De in- en uitvoer van het definitief ontwerp. in deze software is weergegeven in bijlage [17]. Om de berekening hiervan echter inzichtelijk te maken, zijn de belangrijkste gegevens in dit hoofdstuk handmatig uitgerekend.

Behalve naar de drijftechnologische prestaties is er voor het definitieve ontwerp ook gekeken naar de krachtswerking in bovenbouw en drijflichaam. Hierbij zijn ook de krachten in de koppeling tussen de pontons bepaald. Deze berekening is te vinden in bijlage [21]. Hiernaast zijn de relevante eigenperiodes van het drijflichaam ingeschat, en is er een gedetailleerde gewichtsberekening gemaakt, bijlage [18] en [19].

2 belastingcombinatie: BGT

a. metacentrum	
omvang	
waterverplaatsing	12564,34 m³
gezaamelijk drukingspunt vanaf kiel	3,7 m

	rechthoek		driehoek		halve cilinder	
voor	M _x	M _y	M _x	M _y	M _x	M _y
	m	m	m	m	m	m
zwaartepunt incl. veranderlijke bel.	10,0	10,0				
positie metacentrum vanaf kiel	68,3	109,9				
metacentrumhoogte incl. alle belasting	58,3	99,9	n.v.t.		n.v.t.	

b. vergrotingsfactor		
voor		
	M _x	M _y
	m	m
n	6,8	11,0
n/n-1	1,0	1,0

c. belastingen	
belasting	
	grote
	m
F _{tot}	125643 kN
M _{x,tot}	43724 kNm
M _{y,tot}	0 kNm

d. rotatiehoek		
richting		
	hoek	hoek
	rad	deg
x-richting α _x	0,000	0,000
y-richting α _y	0,006	0,342

e. diepgang	
gemiddeld	
positie	
	(0,0,0)
gemiddelde diepgang 1	1,872 m
gemiddelde diepgang 2	6,272 m

hoekpunten

x	y	$-1/L_x$	0	$1/L_x$
$-1/L_y$	6,09	6,27	6,45	
0	6,09	6,27	6,45	
$1/L_y$	6,09	6,27	6,45	

f. randvoorwaarden

onderdeel	grens	waarde	
vrijboord	0,4	1,83 m	voldoet
resterend drijfvermogen	0,2	1,81 m	voldoet
hoekpunt 1		1,81 m	
hoekpunt 2		1,45 m	
hoekpunt 3		1,45 m	
hoekpunt 4		1,45 m	
scheefstand UGT	5	°	n.v.t.
	x-richting	-	
	y-richting	-	
scheefstand BGT	x-richting	1	0,00 °
	x-richting	0	0,34 °
	y-richting	0	58,3 m
metacentrumhoogte (rotatie om x-as)	0	58,3 m	voldoet
metacentrumhoogte (rotatie om y-as)	0	99,9 m	voldoet
resterende diepgang	0,6	9,1 m	voldoet

Afb. 14.6. Voorbeeld van een uitvoer uit de spreadsheet.

15. Evaluatie

In dit hoofdstuk wordt teruggeblikt de opgave. Eerst wordt er ingegaan op de specifieke ontwerpopgave, vervolgens wordt er meer algemeen ingegaan op de bevindingen van ontwerp en onderzoek ten aanzien van de geformuleerde hoofdvraag.

15.1 Productevaluatie

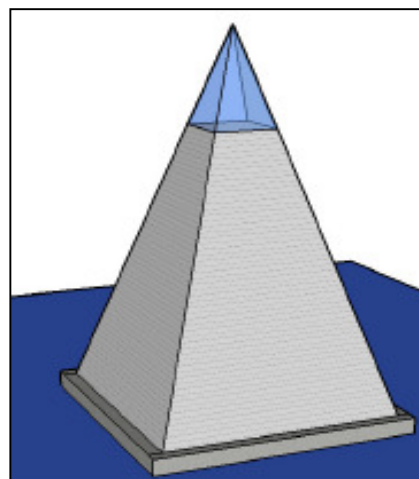
Verschillende aspecten van het definitieve ontwerp worden geëvalueerd.

1. Bouwhoogte

De doelstelling van deze opgave was het ontwikkelen van een hoog drijvend gebouw. Het definitieve ontwerp telt, afgezien van het drijflichaam, 11 bouwlagen met een totale bouwhoogte van ca. 37 meter (gemeten vanaf de waterlijn). Ten opzichte van de referentieprojecten in Nederland is een aanzienlijke bouwhoogte bereikt. Een hoog drijvend gebouw blijkt zowel wat betreft drijftechnologie als wat betreft bouwtechniek haalbaar te zijn.

Toch is bij het ontwikkelen van het ontwerp er niet voor gekozen om enkel en alleen een zo hoog mogelijk gebouw te willen ontwerpen. Dan zou bijvoorbeeld de conceptvariant *keruisvorm* gekozen moeten zijn in plaats van de conceptvariant *I-profiel*. Bij het maken van ontwerpbeslissingen is steeds gekeken naar de integrale kwaliteit van het ontwerp. Een kwalitatief goed ontwerp op alle deelgebieden (functionaliteit architectonisch ontwerp, bouwtechnisch ontwerp en bouwkosten) was belangrijker dan het verlangen om hoog te bouwen.

Indien men voor een bepaalde ontwerpopgave zou streven naar een drijvend gebouw waarbij de bouwhoogte wel het doorslaggevend criterium is, zou men niet alleen moeten werken aan het optimaliseren van de vorm van het drijflichaam, maar zou ook de vorm van de bovenbouw geoptimaliseerd moeten worden. De bovenbouw zou bijvoorbeeld de vorm van een piramide kunnen hebben. Uit het oogpunt van drijftechnologie is dit een heel aantrekkelijke vorm. Het zwaartepunt ligt laag en als men de gevel gebruikt voor het afdragen van de zwaartekracht dan zorgt men ervoor dat de bouwmassa min of meer gelijkmatig over het drijflichaam wordt verspreidt. Dit is gunstig voor de krachtwerving in het drijflichaam.



Afb. 15.1. Optimale vorm bovenbouw.

Aangezien de gebouwvorm van een piramide niet aantrekkelijk is voor een hotel, is er niet voor deze basisvorm gekozen. Indien men echter nog hoger wil bouwen dan valt deze mogelijkheid te overwegen.

2. Capaciteit drijflichaam

Een aardig evaluatiepunt voor het ontwerp is de vraag hoeveel waterverplaatsing er uit het programma van de opgave volgt, en hoeveel extra waterverplaatsing er nodig is vanwege het eigengewicht van het drijflichaam. Deze gegevens zijn weergegeven in tabel 15.1.

Uit deze tabel is af te leiden dat meer dan de helft van de waterverplaatsing wordt veroorzaakt door het drijflichaam zelf. Hiernaast is er ruim 10% extra waterverplaatsing nodig voor de UGT.

Op het eerste gezicht lijken we uit deze tabel te moeten concluderen dat het drijflichaam erg inefficiënt is. Zou men niet kunnen volstaan met een minder groot en minder zwaar drijflichaam?

onderdeel: geheel gebouw	waterverplaatsing	
	BGT	percentage
	m ³	%
eigengewicht drijflichaam	7471	59
eigengewicht bovenbouw	3555	28
variabele belasting	1539	12
extra voor UGT	1370	11
totaal	13934	111

Afb. 15.1. Benodigde waterverplaatsing voor bouwmassa.

Men dient zich echter bij het interpreteren van de tabel wel de volgende zaken te beseffen:

- Het relatief hoge gewicht van het drijflichaam zorgt voor een laag zwaartepunt (ca. 2,5 m boven drijflichaam). Een lichter drijflichaam zou betekenen dat het gebouw bij eenzelfde windbelasting meer roteert.
- Het hoge gewicht van het drijflichaam is met name gunstig voor de fase waarin het hoofdponton met opbouw getransporteerd moet worden. Zonder het grote eigengewicht van het drijflichaam zou het hoofdponton in de transportfase niet stabiel zijn met het gevolg dat men niet meer in een loods kan bouwen.
- Het drijflichaam heeft ook een functionele bestemming (parkeren, ballasttanks en technische ruimte).
- Men dient zich ook te realiseren dat ten opzichte van andere gebouwen de bovenbouw eerder extreem licht is dan dat het drijflichaam extreem zwaar is. Voor een parkeerkelder heeft het drijflichaam geen buitengewoon hoge massa. Bovendien is de betonnen vloer van de begane grond gunstig vanuit overwegingen m.b.t. functionaliteit (trillingen).

Het hoge eigengewicht van het drijflichaam wordt om de bovenstaande redenen niet negatief geëvalueerd. In de fase van het voorlopig ontwerp was het drijflichaam lichter (ca. 8%). De vakwerken in de constructieve laag onder in het drijflichaam zijn naderhand vervangen door schijven van beton om de stabiliteit van het hoofdponton in de bouwfase te kunnen garanderen.

3. *More concrete, less concrete*

Een lage bouwmassa van de bovenbouw is een belangrijke doelstelling geweest tijdens het ontwerpen. Naarmate het ontwerpproces vorderde en het ontwerp concreter werd, verdween er steeds meer beton uit de bovenbouw. Het vervangen van staalplaatbetonvloeren door staalframevloeren leverde een grote gewichtsbesparing op. De vloeren hebben een groot aandeel in het totale gewicht van het gebouw en als er gewichtsbesparing gewenst is dan is dit een post waarop veel winst gehaald kan worden.

In het definitieve ontwerp is een staalconstructie toegepast waarin de functies scheiden en dragen nog strikter gescheiden zijn dan bij andere gebouwen met een draagconstructie van staal. Immers, normaliter vervullen de vloeren een constructieve functie in het afdragen van de windbelasting naar de stabiliteitsvoorzieningen. In het drijvende hotel zijn echter ook de vloervelden met kruisverbanden geschoord, omdat de staalframevloer niet als een stijve plaat kan fungeren.

Bij het bepalen van de maximale bouwhoogte bleek de bouwmassa meestal de beperkende factor. Een lichtgewicht constructie is daarom essentieel als men hoog wil drijven. In dit ontwerp is gebruik gemaakt van vrij conventionele materialen. Indien een verdere reductie van het eigengewicht van de draagconstructie gewenst is, kan men de volgende maatregelen overwegen:

- Het vervangen van staal door aluminium of zelfs door composiet-materialen.
- Het gebruik maken van alternatieve lichtgewicht bouwmaterialen, zoals muren van EPS (afb. 15.2).



Afb. 15.2. Drijvend huis in Volendam, gebouwd met alternatieve materialen. De muren zijn gemaakt van EPS blokken.

Men dient wel het nuttig effect van de bovengenoemde maatregelen te bepalen. De staalconstructie heeft een vrij beperkt aandeel in de totale bouwmassa.

4. *Pontonvorm*

In het theoretische kader en in de beginfase van het ontwerp is uitgebreid ingegaan op de vraag wat een effectieve basisvorm van het ponton is als men hoog wil bouwen. Verschillende vormen zijn de revu gepasseerd zoals een vierkant drijflichaam, een catamaran, een drijflichaam met een holle kern, een drijflichaam met een kruisvorm, een driehoekvormig drijflichaam en een cilindervormig drijflichaam.

De volgende pontonvormen bleken in potentie geschikt te zijn voor een hoog drijvend gebouw: De rechthoek, de kruisvorm en het vierkant met de holle kern. In het uiteindelijke ontwerp is gekozen voor een drijflichaam met de vorm van een I-profiel. Dit drijflichaam zorgt voor een hoge metacentrumhoogte en sluit tevens goed aan bij de typologie van het gebouwtype hotel.

Om de meerwaarde van de gekozen pontonvorm aan het licht te brengen, is de vraag gesteld hoeveel bouwlagen het gebouw zou kunnen tellen indien de zijpontons niet zouden worden toegevoegd en het gebouw dus een rechthoekige pontonvorm zou hebben.

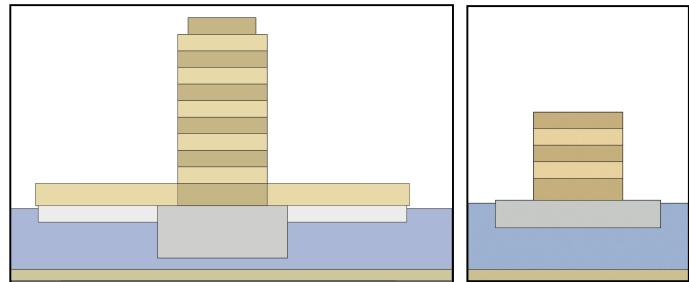
Hiertoe is een variant doorerekend waarbij de zijpontons zijn weg gelaten, maar waarbij de opbouw verder zo veel mogelijk gelijk is gebleven (hoogte en oppervlakte bouwlagen, eigengewicht constructie). Het resultaat van deze berekening is te zien in tabel 15.2.

Uit de tabel blijkt duidelijk dat het toevoegen van de zijpontons een zeer gunstige invloed heeft zowel ten aanzien van de maximale bouwhoogte als ten aanzien van de optredende rotaties. Het aantal bouwlagen kan ruim verdubbelen als de zijpontons worden toegevoegd.

	variant met zijpontons	variant zonder zijpontons
aantal bouwlagen	11	5
hoogte drijflichaam (m)	7,9	4,9
hoogte in BGT vanaf waterlijn (m)	37,0	17,3
metacentrumhoogte UGT	46,3	7,2
metacentrumhoogte BGT	58,3	9,3
rotatie UGT (deg)	0,5	1,4
rotatie BGT (deg)	0,3	0,9

Tabel 15.2. Vergelijking van Definitief Ontwerp met een variant met een vergelijkbare opbouw, maar dan zonder zijpontons. Massa-opbouw van ponton en bovenbouw zijn constant gehouden.

Hieraan bleek dat bij de variant zonder zijpontons de rotatie in de BGT (max 1,0 °) de begrenzende factor was, terwijl voor de variant met zijpontons de stabiliteit in de bouwfase beperkend was voor de bouwhoogte. De rotaties in de UGT en de BGT liggen voor deze variant ver onder de gestelde randvoorwaarde. De rotatiegevoeligheid van de pontons uit zich in de metacentrumhoogte h_m . Deze is ruim zes maal groter indien er zijpontons aanwezig zijn.



Afb. 15.2. Links variant met zijpontons, rechts variant zonder zijpontons.

Het is verder opmerkelijk dat de metacentrumhoogte voor de BGT behoorlijk groter is dan in de UGT. Dit betekent dat het gebouw minder rotatiegevoelig is als het minder diep ligt. Dit laat zich verklaren als we de formule van Scribanti in herinnering roepen:

$$BM = \frac{J_u}{\nabla} \left(1 + \frac{1}{2} (\tan \alpha)^2 \right)$$

In een situatie dat het gebouw een lagere variabele belasting heeft, is uit de wet van Archimedes af te leiden dat de waterverplaatsing kleiner zal zijn. Aangezien het kwadratisch oppervlaktemoment van de waterdoorsnede gelijk blijft en de waterverplaatsing afneemt, zal de uitkomst van de breuk toenemen, wat een hoger metacentrum impliceert. Aangezien de positie van het zwaartepunt min of meer gelijk zal blijven, zal de metacentrumhoogte toenemen. Een geringere diepgang is dus gunstig voor de rotatiegevoeligheid van het gebouw.

Uit de bovenstaande vergelijking blijkt dat het toevoegen van de zijpontons een zeer gunstige invloed heeft op de drijftechnologische prestaties van het gebouw. Het drijflichaam met de vorm van een I kan dus positief worden geëvalueerd.

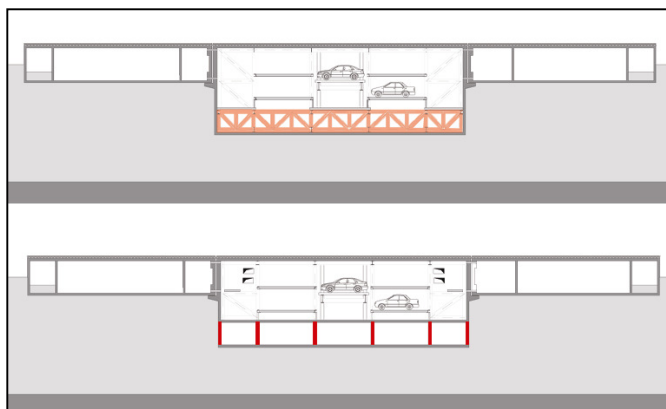
5. Bouwvolgorde

In het ontwerpproces is ook veel aandacht gegeven aan de vraag hoe het drijvend hotel gebouwd moet worden. Er is gepoogd om de bouw voor een zo groot mogelijk deel in een loods te situeren, omdat dit leidt tot gunstigere arbeidsomstandigheden, een hogere kwaliteit en een kortere bouwtijd. De voorgestelde bouwvolgorde voor het gebouw is dat het hoofdponton inclusief de hoogbouw in een loods wordt gebouwd, waarna het naar de locatie wordt vervoerd om daar vervolgens de koppeling met de zijpontons te realiseren.

De fase waarin de pontons worden vervoerd, bleek het kritieke punt te zijn voor de bouw van het hotel. Bij punt 4 is reeds genoemd dat de transportfase de beperkende factor was voor het maximaal aantal bouwlagen, omdat het hoofdponton met opbouw (exclusief variabele belasting) moest voldoen aan de randvoorwaarde voor stabiliteit ($h_m \geq 0,5$ m). Dit bleek haalbaar, maar het ponton moest wel worden verzwakt om dit te bereiken. De vakwerken in de constructieve laag van het drijflichaam zijn vervangen door betonnen schijven (afb. 15.3).

De voorgestelde bouwvolgorde heeft veel voordelen ten opzichte van het bouwen in de haven en zelfs ook voordelen ten opzichte van een meer traditioneel bouwproces. In de kostenanalyse van het gebouw is geschat dat het bouwen in een loods een bouwtijdverkortingsfactor met een factor 0,7 zal opleveren ten opzichte van een traditioneel, op het land gebouwd hotel. Ook aan het koppelen van de pontons is veel aandacht besteed. Dit bleek haalbaar te zijn.

De voorgestelde bouwvolgorde wordt positief geëvalueerd hoewel gerealiseerd moet worden dat het transporteren en het koppelen van de pontons werkzaamheden zijn die een hogere risicofactor hebben dan gemiddeld.



Afb. 15.3. De constructieve laag van het drijflichaam: Om de stabiliteit in de transportfase te kunnen garanderen werden de vakwerken vervangen door de zwaardere betonnen schijven.

6. Vormstabiliteit versus gewichtstabiliteit.

In het theoretisch kader werd geconcludeerd dat men zich bij een hoog drijvend gebouw met name moet richten op een goede vormstabiliteit, omdat voor deze gebouwvorm een hoge aanvangstabiliteit wenselijk is. Een hoge vormstabiliteit is gerealiseerd door het bepalen van een optimale vorm voor het drijflichaam. Dit zoeken naar een geschikte pontonvorm heeft blijkens tabel 15.2 haar vruchten afgeworpen. Het gebouw heeft een zeer hoge aanvangstabiliteit wat zich uit in kleine rotaties in de BGT.

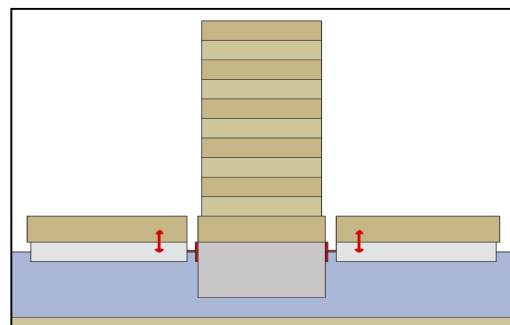
Als we het ontwerp echter achteraf evalueren, blijkt dat het gebouw uiteindelijk ook een hoge gewichtstabiliteit heeft gekregen. Het zwaartepunt van het gebouw ligt in de UGT 2,3 m boven het ponton. Dit is 23,6% van de totale gebouwhoogte (de hoogte van het drijflichaam meegerekend).

Deze gewichtstabiliteit is met name een gevolg van de voorgestelde bouwvolgorde. Het hoofdponton heeft in de bouwfase een lage vormstabiliteit (breedte 23,6 m, hoogte 37,2 m). Om de stabiliteit in deze fase te kunnen garanderen, diende het ponton zijn stabiliteit te halen uit een lage positie van het zwaartepunt (gewichtstabiliteit). Dit wordt deels gerealiseerd door de ballastanks tijdens het transport te vullen met water of zand en deels door het verhogen van de massa van het drijflichaam (afb. 15.3).

Uiteindelijk bleek voor het definitieve ontwerp dus zowel een hoge vormstabiliteit als een hoge gewichtstabiliteit van belang. De maximale breedte van het drijflichaam is ca. 1,6 maal groter als de gebouwhoogte. Hiernaast bepaalt het drijflichaam voor zo'n 65% van het eigengewicht van het gebouw. In punt 1 is dit hoge eigengewicht van het drijflichaam reeds geëvalueerd

7. Gewicht-ontwerp

In het ontwerp is niet alleen aandacht gegeven aan gewichtsbesparing en aan gewichtstabiliteit, maar ook aan gewichtsverdeling. Voor een gunstige krachtswerking in het ponton bleek de gewichtsverdeling van groot belang. Hiertoe is de term gewichtontwerp geïntroduceerd. De diepgang van een onderdeel van het gebouw dient te corresponderen met het eigengewicht ervan (inclusief de variabele belasting). Als dit uitgangspunt wordt gehanteerd, worden de momenten in het drijflichaam zo beperkt mogelijk gehouden.



Afb. 15.4. Gewichtontwerp: streven naar een efficiënte gewichtsverdeling.

In het definitieve ontwerp is er sprake van een optimale gewichtsverdeling. In de BGT hebben hoofdponton en zijponton een diepgang die correspondeert met het eigengewicht en de aanwezige (momentane) variabele belasting. Dit is zichtbaar in bijlage [19]. In de BGT bedraagt het vrijboord in de gekoppelde en ontkoppelde fase voor alle onderdelen 1,6 m. Dit is gunstig voor het realiseren van een koppeling tussen de onderdelen.

8. Type drijflichaam

Eerder in deze scriptie is beargumenteerd waarom er voor een gesloten caisson is gekozen voor het type drijflichaam (paragraaf 2.5 en 11.4). Achteraf is deze keuze nog eens geëvalueerd.

Hoofdponton

De keuze voor een gesloten caisson voor het hoofdponton wordt zowel vanuit het oogpunt van krachtswerking als uit het oogpunt van functionaliteit positief geëvalueerd. Wat betreft krachtswerking heeft het caisson uit zichzelf een hoge stijfheid wat wenselijk is, omdat het caisson fungeert als fundering en daarom een ongelijkmatige spreiding van de krachten van de bovenbouw moet kunnen opvangen. De ondervloer, de tussenvloer en de bovenzijde van het drijflichaam vormen als het ware de flenzen die vanwege de grote onderlinge afstand een hoge stijfheid veroorzaken.

Hiernaast is het gesloten caisson ook uit overwegingen ten aanzien van drijftechnologie gunstig. Het hoge eigengewicht veroorzaakt een laag zwaartepunt wat met name voor de bouwfase grote voordelen oplevert (zie punt 6).

Tenslotte is het gesloten caisson ook uit functionele overwegingen een goede keus. Vrijwel het gehele hoofdponton heeft een zinnige bestemming. Onderin het ponton bevinden zich de ballasttanks (lage positie is gunstig). In de bovenste laag zijn parkeervoorzieningen en installatieruimten ondergebracht. Tevens is er ruimte voor het aanbrengen van leidingen. Kortom, de ruimte in het hoofdponton is geen verloren ruimte.

Zijponton

Voor de zijpontons is ook gekozen voor een gesloten caisson. Er is echter wel wat meer aarzeling om ook deze keuze positief te evalueren. Eerst zullen de voor- en nadelen worden benoemd en vervolgens zullen alternatieven worden overwogen.

Verschillende voordelen van het hoofdponton gelden ook voor het zijponton. Het caisson heeft van zichzelf een grote stijfheid en er is ruimte voor ballasttanks en leidingen. Hiernaast is het aanbrengen van een koppeling met het hoofdponton relatief eenvoudig. De aangebrachte koppelingen kunnen ook steeds worden geïnspecteerd (makkelijk bereikbaar).

Er zijn echter ook nadelen te noemen: Het grootste gedeelte van het zijponton heeft geen functionele bestemming en is daarom als verloren ruimte aan te merken. Wellicht zou men er een berging in aan kunnen brengen, maar de bereikbaarheid hiervan laat te wensen over (geen lift).

Een ander nadeel is dat de verhouding tussen het eigengewicht van het ponton en het eigengewicht van de bovenbouw nog schever ligt als bij het gebouw als geheel. We herhalen de analyse van de opbouw van de waterverplaatsing nu voor het zijponton (tabel 15.3). Het blijkt dat nog een groter deel van de waterverplaatsing wordt veroorzaakt door het eigengewicht van het drijflichaam zelf (59% voor het hele gebouw, 76 % voor het zijponton op zichzelf beschouwd).

Een hoge gewichtstabiliteit is echter voor het zijponton geen vereiste, een lager eigengewicht zou ook kunnen voldoen.

onderdeel: zijponton	waterverplaatsing	percentage
	BGT m ³	totaal %
eigengewicht zijponton	568	76
eigengewicht bovenbouw	131	18
variabele belasting (momentaan)	45	6
totaal	745	100

Tabel 15.3. De opbouw van de waterverplaatsing van het zijponton.

Met het oog op het bovenstaande kan de vraag gesteld worden of een ander type drijflichaam voor het zijponton niet geschikter was geweest. Met name de omgekeerde bak met EPS of EPS met een frame van beton zijn mogelijkheden die mijns inziens in aanmerking komen. Met een geringere diepgang kan het ponton wellicht dezelfde functie vervullen. Helaas strekken de consequenties van de keuze van het type drijflichaam te ver om het definitieve ontwerp in de laatste fase nog aan te passen.

Wel worden enkele richtlijnen gegeven waaraan het zijponton moet voldoen indien het van EPS en beton wordt gemaakt:

- Het ponton moet voldoende diepgang hebben om de diepgangfluctuatie van het gebouw als geheel op te kunnen vangen. Bij een geringe diepgang mag het zijponton niet boven het water komen te hangen.
- De stijfheid van het drijflichaam als geheel (in gekoppelde toestand) moet gewaarborgd zijn en voldoen aan de te verwachten belastingen.
- De koppeling moet maakbaar en controleerbaar zijn.
- Het gewicht-ontwerp moet corresponderen met het hoofdponton (punt 7).
- Indien mogelijk moet er ruimte zijn voor leidingen in het drijflichaam.

Of een ander type drijflichaam voor het zijponton beter zou zijn, kan niet met zekerheid gesteld worden. Daarvoor moet nader onderzoek verricht worden. Dat zal uitwijzen of de voordelen van een zijponton met EPS die van een gesloten caisson overstijgen.

9. Bouwkosten

De analyse van de bouw- en investeringskosten van het drijvende hotel is beschreven in par. 13.4 en bijlage [16]. Indien het drijvende hotel op de locatie wordt gebouwd, zullen de bouw- en investeringskosten hoger zijn dan bij een vergelijkbaar hotel op het land. Als de bouw van het hotel in de loods wordt gesitueerd, blijken de meerkosten van het drijflichaam in grote lijn gecompenseerd te worden door de minderkosten van het bouwen in een loods. Het belangrijkste voordeel dat het bouwen in een loods oplevert, is een aanzienlijke bouwtijdverkortung met een factor van 0,7.

De bouwkosten van het drijvende hotel kunnen voorzichtig positief geëvalueerd worden. De bouwkosten van het hotel zijn, indien het bouwproces op de juiste wijze wordt georganiseerd, vergelijkbaar met de kosten van een vergelijkbaar hotel op het land. Daarnaast kan het drijvende hotel eerder in gebruik genomen worden.

15.2 Procesevaluatie

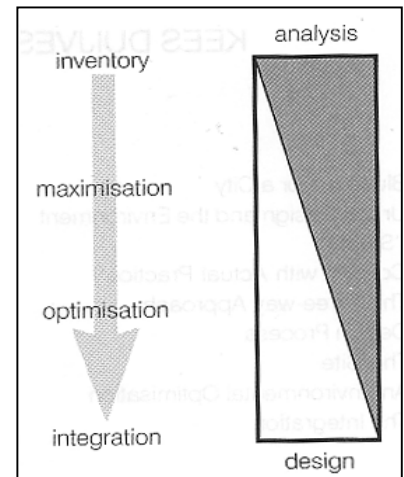
Het ontwerpproces is in de hoofdstukken 9 t/m 13 uitgebreid beschreven. In deze paragraaf wordt het ontwerpproces kort geëvalueerd.

1. Verhouding ontwerp-onderzoek

Het ontwerpproces is gestart met een literatuuronderzoek naar drijvende gebouwen en dan met name naar de drijftechnologie. Achteraf bleek dat vooral de analyse over het oprichtende moment, het metacentrum, de vorm- en gewichtstabiliteit nuttige input leverde voor het ontwerp. Andere kennis bleek minder van belang.

Met de verkregen kennis kon nuttig onderzoek worden gedaan naar een efficiënte pontonvorm wat mijns inziens zijn vruchten heeft afgeworpen in de uiteindelijke bouwhoogte van 37 m die gerealiseerd kon worden.

Globaal gezien is de hienaast gevisualiseerde overgang van onderzoek naar een concreet ontwerp in het verloop van het proces te onderscheiden. Echter, als elke schematisering, is ook dit schema een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Aan het begin lag het accent op onderzoek, aan het eind op ontwerp. Veel ontwerpbeslissingen in latere fasen zijn echter ook met onderzoek onderbouwd (te denken valt aan de analyse van de krachtswerking in het drijflichaam en het onderzoek naar vloersystemen).

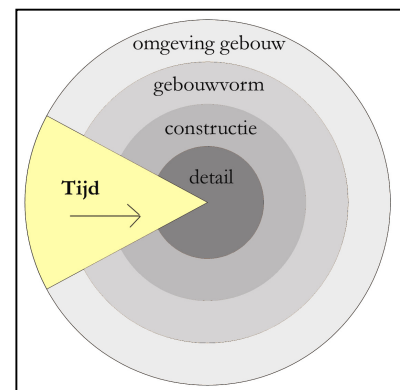


Afb. 15.5. Accenten in ontwerpproces: van onderzoek naar ontwerp.

Mijns inziens was er tijdens het ontwerpproces een gezonde wisselwerking tussen onderzoek en ontwerp. Het onderzoek vaak was leidend in het nemen van ontwerpbeslissingen en maakte duidelijk waar zowel de problemen als de kansen zich bevonden die in het concrete ontwerp respectievelijk opgelost en benut konden worden.

2. Schaalniveau: van grof naar fijn.

Elk ontwerpproces heeft een overgang van een grove schaal naar een fijnere schaal. Men pleegt het ontwerpproces van een gebouw niet te beginnen met het bepalen van de positie van stopcontacten. Ook in het ontwerpproces van het drijvende hotel is een overgang van een grovere schaal naar een fijnere schaal te onderkennen. Dit is gevisualiseerd in afb. 15.6.



Afb. 15.6. De verschuiving van het schaalniveau gedurende het ontwerpproces.

Aan de schaal *omgeving gebouw* is weinig aandacht gegeven. Het gaat dan om de situering van het ontwerp in het stedenbouwkundige masterplan voor het gebied. Er is uitgegaan van een bestaand maar zeer gedateerd plan om de reden dat er geen tijd was om een nieuw plan voor het gebied te ontwikkelen. De schalen *gebouwworm*, *constructie* en *detail* zijn achtereenvolgens aan de orde geweest. In de fase *basisvormen* en *conceptvarianten* stond vooral de schaal *gebouwworm* centraal. In de fase *aanscherping ontwerp drijflichaam* tot en met *definitief ontwerp* is ook veel aandacht gegeven aan de draagconstructie. In de laatste fase is tevens het schaalniveau detail aan de orde gekomen.

Hoewel het overschakelen van een grovere naar een steeds fijnere schaal vrijwel natuurlijk verliep, ging het niet steeds vlekkeloos. In de fase waarin de contouren van de het gebouw werden bepaald (de fasen *basisvormen* en *conceptvarianten*) moest de massa van het gebouw geschat worden. Dit gegeven hoort echter bij een meer fijnere schaal in het ontwerpproces. Dan is immers meer bekend over de afmetingen en materialisering van de constructie.

Achteraf bleek dat de aanvankelijke schatting van het eigengewicht van drijflichaam en bovenbouw te wensen overliet. De toename van de gemiddelde massa van de bovenbouw bij het toenemen van de bouwhoogte (zie par. 9.3) bleek achteraf gezien een misvatting te zijn. Het gewicht van de bovenbouw was voor 11 bouwlagen bijvoorbeeld ingeschat op 3,0 kN/m³, terwijl in het D.O. het gewicht bleek te zijn uitgekomen op 0,9 kN/m³. Dit is toe te schrijven aan een schaalniveau probleem. Men heeft in een eerdere fase van het proces eigenlijk al kennis nodig die in een latere fase pas beschikbaar komt. Als de fase basisvarianten zou worden herhaald, zou worden uitgegaan van een andere gewichtverdeling.

Een sterk punt van het gehanteerde schaalniveau is mijns inziens dat er is begonnen met abstracte gebouwvormen die niet gekoppeld waren aan het programma van het hotel (hoofdstuk 9). De mate van abstractie kwam de vergelijkbaarheid van de varianten ten goede en leverde nuttige generieke kennis op. Pas in een latere fase werd deze kennis gekoppeld aan de specifieke opgave van het ontwerpen van een hotel.

3. Wisselwerking vakgebieden

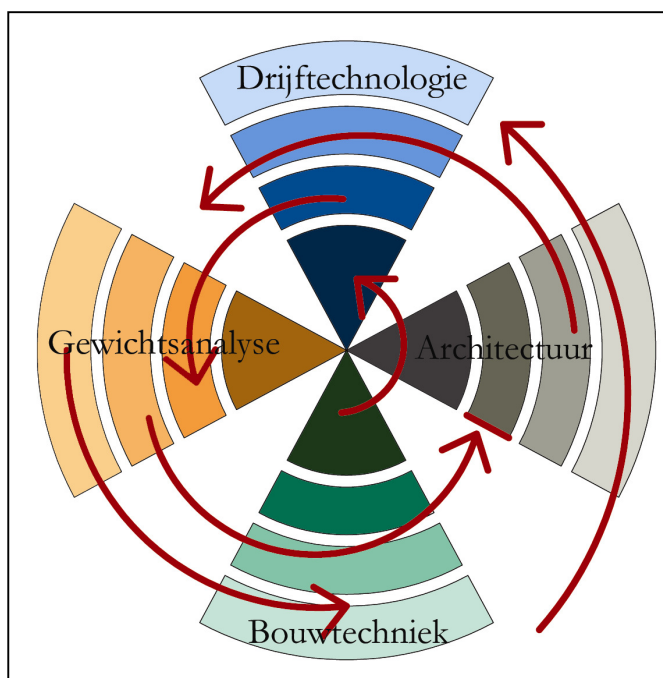
Gedurende het ontwerpproces is steeds vanuit verschillende disciplines het ontwerp benaderd. Het komt de kwaliteit van het ontwerpproces van drijvende gebouwen ten goede als deze verschillende disciplines worden onderkend zodat op het juiste moment aan het juiste vakgebied aandacht wordt gegeven. Pas als er een goede wisselwerking ontstaat tussen de verschillende disciplines, zal het uiteindelijke resultaat van het ontwerpproces bevredigend zijn.

Reflecterend op het ontwerpproces, onderscheid ik de volgende min of meer zelfstandige disciplines die specifiek voor een drijvend gebouwen van belang zijn:

- Drijftechnologie
- Gewichtsanalyse (gewichtsberekening, gewichtsverdeling, gewichtsbesparing)
- Bouwtechniek
- Architectuur

Onder **drijftechnologie** valt de stabiliteitsanalyse van het gebouw, het berekenen van het metacentrum, het berekenen van de optredende rotaties, diepgang en diepgangfluctuaties.

Gewichtsanalyse beschouw ik als een min of meer zelfstandige discipline die de nodige input levert voor de disciplines drijftechnologie en bouwtechniek. Onderdelen van de gewichtsanalyse zijn een nauwkeurige *gewichtsberekening*, een werken aan *gewichtsbesparing* en het streven naar efficiënte *gewichtsverdeling*. Met enige nadruk wil ik stellen dat een goede gewichtsanalyse voor een drijvend gebouw van groot belang is. Het ontbreken van een grondige gewichtsanalyse maakt de berekeningen van de drijftechnologische prestaties onbetrouwbaar en kan er tevens toe leiden dat in het drijflichaam als gevolg van een verkeerde gewichtsverdeling onnodig grote momenten ontstaan. Indien deze discipline in het ontwerpproces onderbelicht blijft, kan men in een late fase van het ontwerp tegen onplezierige verrassingen aanlopen (bijvoorbeeld ten aanzien van de capaciteit van het drijflichaam).



Afb. 15.7. Het ontwerpproces voor drijvende gebouwen geschematiseerd. Het ontwerpproces is een concentrische cirkel waarin steeds weer aan de verschillende vakgebieden aandacht moet worden gegeven. Wisselwerking is van groot belang.

Onder **bouwtechniek** valt het ontwerpen en doorrekenen van de draagconstructie van het gebouw. Met name het rekenen aan het drijflichaam is specifiek voor drijvende gebouwen van belang. Te denken valt aan het berekenen van de krachten die door het koppelen van pontons ontstaan.

Onder **architectuur** valt het architectonische ontwerp van het drijvende gebouw, de functionaliteit, de vormgeving, de gebouwstructuur en de materialisering.

In afbeelding 15.17 is het ontwerpproces geschematiseerd. Het ontwerpproces is voor te stellen als een concentrische cirkel die in elke fase elke discipline in mindere of meerdere mate raakt. De verschillende disciplines dienen in elke fase aan de orde te komen zodat de verschillende aspecten van het ontwerp gelijkmatig worden ontwikkeld. Als men deze structuur in het ontwerpproces hanteert, zal er voldoende wisselwerking tussen de vakgebieden plaatsvinden. Tevens zullen knelpunten tijdig worden geconstateerd en opgelost kunnen worden.

15.3 Conclusie

De reflectie in de voorgaande paragrafen was gericht op het specifieke ontwerp van een drijvend hotel. Aan het einde van deze scriptie zal geformuleerd worden welke generieke kennis tijdens het gehele proces is opgedaan. De meer algemeen toepasbare conclusies dus van ontwerp en onderzoek.

De hoofdvraag van deze scriptie luidde:

Hoe kan men een hoog, lichtgewicht en stabiel gebouw realiseren op een drijvende fundering, waarbij de voordelen van bouwen op water (zowel in de bouw- als gebruiksfase) kunnen worden benut en waarbij voldaan wordt aan constructieve en gebruikstechnische eisen?

Op basis van ontwerp en onderzoek worden de volgende conclusies geformuleerd:

1. Pontonvorm

Het kiezen van de juiste pontonvorm vormt de basis voor het ontwerp van een hoog drijvend gebouw.

- Het ponton dient binnen de mogelijkheden van het programma zo breed mogelijk te zijn
- Het materiaal van het drijflichaam dient zoveel mogelijk naar de buitenkant gebracht te worden.
- Vormen die beter presteren dan een vierkant of rechthoek zijn een kruisvorm of een vorm met een holle kern.
- Het kan wenselijk zijn om de hoogte van het drijflichaam op een bepaalde plaats te laten toenemen of juist te laten afnemen.

Een efficiënt gekozen pontonvorm kan de maximale bouwhoogte aanzienlijk doen toenemen en de rotatiegevoeligheid van het gebouw verminderen.

2. Beperkende factor

Bij een beperkte breedte van het ponton kan de maximaal toelaatbare rotatie de beperkende factor zijn voor de maximale bouwhoogte. Bij een breder ponton zal de maximale diepgang of de bouwfase eerder beperkend zijn.

3. Vormstabiliteit en gewichtstabiliteit

Voor een drijvend gebouw in de gebruiksfase is vooral een hoge vormstabiliteit van belang. Dit beperkt de optredende rotatie en verhoogt hiermee het gebruiksgemak.

Indien men een breder ponton uit onderdelen opbouwt, kan het nuttig zijn om bepaalde onderdelen ook een hoge gewichtstabiliteit te geven. Dit vergroot de mogelijkheden om elders te bouwen en daarmee de voordelen van drijvende gebouwen te benutten.

4. Gewichtontwerp

Een juiste verdeling van de bouwmassa over het drijflichaam is van groot belang voor een drijvend gebouw, omdat het de krachtswerking in het drijflichaam optimaliseert. De diepgang van een bepaald onderdeel in de BGT moet corresponderen met de permanente en variabele belasting die op dit onderdeel werken.

5. Gewichtsbesparing

Gewichtsbesparing in de bovenbouw van een drijvend gebouw is zonder meer aan te bevelen, omdat dit het zwaartepunt verlaagt (wat gunstig is voor de stabiliteit en de rotatiegevoeligheid) en omdat het de benodigde hoogte van het drijflichaam reduceert. Men dient wel acht te geven om de nadelige consequenties hiervan voor geluidsisolatie en klimaat (koellast) en dit op een afdoende wijze te compenseren.

Gewichtsbesparing in het drijflichaam is aan te bevelen indien het gebouw zijn stabiliteit ontleent aan de vorm (een relatief breed drijflichaam). Indien echter ook gewichtstabiliteit vereist is, bijvoorbeeld voor het transporteren van onderdelen in de bouwfase, dient men op de juiste plaats -dat is zo laag mogelijk in het drijflichaam- voor voldoende massa te zorgen.

6. Gewichtsberekening

Een complete en zo nauwkeurig mogelijke gewichtsberekening is van groot belang voor een drijvend gebouw, omdat de krachtswerking en de drijftechnologische prestaties hier in grote mate door beïnvloed worden.

7. Type drijflichaam

Bij het beoordelen van de geschiktheid van een type drijflichaam voor een bepaalde opgave dient men onder andere te overwegen:

- In hoeverre een functionele bestemming van het drijflichaam mogelijk is.
- Of voor het drijflichaam gewicht- of vormstabiliteit vereist is.
- Wat de mogelijkheid is om koppelingen te realiseren tussen pontons (indien van toepassing).
- Of aan het drijflichaam in zijn geheel voldoende stijfheid kan worden gegeven.

8. Bouwvolgorde

Indien de locatie hiervoor de mogelijkheid biedt (en een goede aansluiting heeft op de vaarwegen), verdient het de aanbeveling om een zo groot mogelijk deel van het bouwproces in de loods te situeren. Dit verbetert de arbeidsomstandigheden, verhoogt de kwaliteit, verkort de bouwtijd en werkt bovendien kosten- besparend.

9. Bouwkosten

Een globale analyse van de investeringskosten wijst uit dat de extra kosten van het relatief dure drijflichaam van een drijvend gebouw in grote lijn gecompenseerd kunnen worden door het kostenvoordeel wat het bouwen in een loods oplevert. Hiernaast kan de genoemde bouwwijze ook een aanzienlijke verkorting van de bouwtijd opleveren (arbeidsomstandigheden, weersinvloeden, ploegendienst).

Indien men een hoog drijvend gebouw op de locatie zelf bouwt, is de verwachting dat de bouwtijd langer en de bouwkosten hoger worden dan een traditioneel gebouw met vergelijkbare grootte.

10. Ontwerpproces

Tijdens het ontwerpproces van een drijvend gebouw is een wisselwerking tussen de disciplines drijftechnologie, gewichtsanalyse, bouwtechniek en architectuur van groot belang voor het bereiken van een bevredigend resultaat.

Literatuur

- [1] Andrianov, Alexey; *Hydroelastic analysis of very large floating structures* (2005)
- [2] Angremond, d' ; Bezuyen; Van der Meulen e.a.; *Inleiding Waterbouwkunde* (2003)
- [3] Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21e eeuw, civieltechnische oplossingen voor drijvende wijken* (2004)
- [4] Baars, dr. Ir. S. van; ir. H.K.T. Kuipers e.a.; *Handboek constructieve waterbouw, belasting, materiaal en constructie* (2002) Delft
- [5] Boo, Marion de; *Waterwonen - een drijvende woonwijk op een onzinkbare fundering*, in: Delft-integraal (4-2004).
- [6] Brink, ir. B. - J. van den ; ir. C. Douma; *Stabiliteit van een betonnen kelder met opbouw*, in: Cement (7-2005).
- [7] Commissie waterbeheer 21e eeuw; *Waterbeleid voor de 21e eeuw, geef water de ruimte en aandacht die het verdient* (2000)
- [8] Cool, prof J.C.; *Werkbouwkundige systemen* (2003)
- [9] Deelen, ir. Paul van; prof. Ir. Eddy Gerritsen e.a.; *Kansen voor lichte verdiepingsbouw*, in: Bouwen met Staal (10-2004).
- [10] Franssen, Jan (red); *Bouwen met water, Wonen werken en recreëren* (2003)
- [11] Hartman, Dap; *Een kwestie van Stabiliteit*, in: Delft-integraal, (4-2005).
- [12] Hartsuijker, C. *Toegepaste Mechanica Deel 2* (2003) Schoonhoven
- [13] Huurmink, Voila; *Bouw van IJburg daadwerkelijk in zicht*, in: Bouwwereld (8-2001).
- [14] Jong, T. De; J.J. Braak en H.M. van Mulken; *Hotels; planning en ontwerp* (1996) Delft.
- [15] Kamerling, ir. M.W.; *Ontwerp van betonnen pontons* (2001) Delft.
- [16] Kamerling, ir M.W.; *Ontwerpen van Pontons onder gebouwen*, in: Cement (1-2002).
- [17] Kamerling, ir M.W.; ir. J. van der Voort; *Drijvende gebouwen -verkenning van de mogelijkheden om gebouwen te funderen op betonnen pontons*, in: Cement (8-2001).
- [18] Keuning, dr. Ir. J.A.; ing C.J.Bom; *Geometrie en stabiliteit* (2001) Delft.
- [19] Kranendonk, ir. P.F. (red); *Bouwkosten Management – Berenschot Osborne (1999) Doetinchem*
- [20] Kuijper, M; *De drijvende fundering, een stabiele basis voor waterwonen in de 21e eeuw* (2006) Delft.
- [21] Lichtenberg, J.J.N.; *Ontwikkeling van Projectgebonden Bouwproducten* (2002).
- [22] Linq, ir. Dennis, *De drijvende stad*, afstudeerscriptie Civiele Techniek TU Delft (2001)
- [23] Lormans, ing. R.A.A.M.; *Drijfsysteem voor drijvende woonwijk*, in: Cement (7-2005).
- [24] Maassen, Clemens (red); *Wonen op het water* (2001).
- [25] Meijer, drs. J.P.R.; *Wonen op het water is leuk, maar deugt de regelgeving wel?*, In: Cement (7-2005).
- [26] Peters, ir. D.J. ; ir. J. Bauwens e.a.; *Onvrijwillig drijven op beton*, in: Cement (7-2005).
- [27] Rijcken, ir. T. e.a. *Tussen woonark en regenton*, in: Cement (7-2005).
- [28] Rijcken, ir. T.; ir. J.A. den Uijl, *De Drijvende Bouwsteen*, in: Cement (7-2005).
- [29] Rutes, W.A.; R.H. Penner en L. Adams; *Hotel Design –Planning and Development* (2001) Malta
- [30] Snel, ing. P.L.M.; ing. S. Eversdij e.a.; *Ervaringen met de eerste drijvende kas ter wereld*, in: Cement (7-2005).
- [31] Spliet, Arne; *Technical background study to floating greenhouses* (2002).

Internetbronnen

- [32] ABC Arkenbouw, www.arkenbouw.nl
- [33] Adviesbureau INTRON, www.intron.nl
- [34] Bouwmaatschappij Ooms, www.oomswaterwoningen.nl
- [35] Bouwkosten, www.bouwkosten.nl
- [36] Bouwkosten-online, www.bouwkosten-online.nl
- [37] Dura Vermeer, www.duravermeer.nl
- [38] Dura Vermeer, www.dedrijvendestad.nl
- [39] H₂Olland, architectuur with wet feet, www.h2olland.nl
- [40] IMFS LTD, www.floatingstructures.com & www.floatinghomes.com
- [41] Ontwerpbureau Waterstudio, www.waterstudio.nl
- [42] Overheid, www.h2overheid.nl

Illustratieverantwoording

- Afb. 2.1. Bron: *Waterwonen, een drijvende woonwijk op een onzinkbare fundering*; In: Delft integraal 2004-4 (foto Ties Rijcken)
- Afb. 2.2. Bron: Ooms waterwoningen (www.oomswaterwoningen.nl)
- Afb. 2.3. Bron: commissie waterbeheer 21^e eeuw; *Waterbeleid voor de 21^e eeuw* (2000)
- Afb. 2.3. Bron: Franssen, Jan (red); *Bouwen met water, Wonen werken en recreëren* (2003)
- Afb. 2.5. Bron: Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21^e eeuw, civieltechnische oplossingen voor drijvende wijken* (2004)
- Afb. 2.5. Bron: ABC arkenbouw
- Afb. 2.7. Bron: Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21^e eeuw, civieltechnische oplossingen voor drijvende wijken* (2004)
- Afb. 2.8. Bron: Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21^e eeuw, civieltechnische oplossingen voor drijvende wijken* (2004)
- Afb. 2.9. Bron: Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21^e eeuw, civieltechnische oplossingen voor drijvende wijken* (2004)
- Afb. 2.10. Bron: Huurmink, Voila; *Bouw van IJburg daadwerkelijk in zicht*; in: *Bouwwereld* (8-2001)
- Afb. 2.11. Bron: Snel, ing. P.L.M.; ing. S. Eversdij e.a.; *Ervaringen met de eerste drijvende kas ter wereld*; in: *Cement* (7-2005)
- Afb. 2.12. Bron: Rijcken, Ties
- Afb. 2.13. Bron: Franssen, Jan (red); *Bouwen met water, Wonen werken en recreëren* (2003)
- Afb. 2.14. Bron: www.floatinc.com; Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21^e eeuw, civieltechnische oplossingen v. drijvende wijken* (2004)
- Afb. 2.15. Bron: Aqua Struenda; *Waterwonen in de 21^e eeuw, civieltechnische oplossingen voor drijvende wijken* (2004)
- Afb. 3.19. Bron: Kuijper, Maarten (bewerkt)
- Afb. 4.1. Bron: Weij, ing R. van der; *De markermeerstranden onderzocht* (2005)
- Afb. 4.2. Bron: Angremont, d' ; Bezuyen; Van der Meulen e.a.; *Inleiding Waterbouwkunde* (2003)
- Afb. 4.3. Bron: Angremont, d' ; Bezuyen; Van der Meulen e.a.; *Inleiding Waterbouwkunde* (2003)
- Afb. 6.4. Bron: J Baars, dr. Ir. S. van e.a.; *Handboek constructieve waterbouw, belasting, materiaal en constructie* (2002)
- Afb. 6.5. Bron: J Baars, dr. Ir. S. van e.a.; *Handboek constructieve waterbouw, belasting, materiaal en constructie* (2002)
- Afb. 10.1. Bron: Jong, T. De; J.J. Braak en H.M. van Mulken; *Hotels; planning en ontwerp* (1996) Delft.
- Afb. 10.2. Bron: Rutes, W.A.; R.H. Penner en L. Adams; *Hotel Design –Planning and Development* (2001) Malta
- Afb. 10.3. Bron: Jong, T. De; J.J. Braak en H.M. van Mulken; *Hotels; planning en ontwerp* (1996) Delft.
- Afb. 10.5. Bron: Brouwer, Jan; *De Houthavens een nieuwe hollandse waterstad* (2000)
- Afb. 13.7. Bron: Franssen, Jan (red); *Bouwen met water, Wonen werken en recreëren* (2003)
- Afb. 13.9. Bron: Bronsvoort, ir A.; *Hotel Krasnapolsky, Amsterdam* (1995) in *Bouwen met Staal*
- Afb. 13.10. Bron: internet - www.staalframebouw.nl - HEM hotel
- Afb. 13.11. Bron: *Bouwen op Toplocaties; optoppen met Staalframebouw.*
- Afb. 13.13. Bron: Franssen, Jan (red); *Bouwen met water, Wonen werken en recreëren* (2003)
- Afb. 15.2. Bron: Tuip, Niels; *Voel zelf maar; hartstikke stevig* (2006) in: *CB nieuws*.
- Afb. 15.5. Bron: Jong, D.M; D.J.M. van der Voordt ; *Ways to study and research* (2002)

Bij geen vermelding zijn de afbeeldingen van de auteur.

Symbolen

a	amplitude golf (m)
a	arm moment (m)
A	oppervlakte (m^2)
b	breedte ponton (m)
B	drukkingspunt (gemeten van waterlijn, m)
b'	breedte ponton t.p.v. waterlijn (m)
BM	afstand metacentrum-drukkingspunt (m)
C	veerconstante (kNm/rad)
C	windvormfactor
c	voortplantingsnelheid golf (m/s)
d	diepgang/waterdiepte (m)
F	strijk lengte
F_{krit}	kritische kracht (kN)
F_{opw}	resulterende opwaartse kracht (kN)
F_z	resulterende zwaartekracht (kN)
g	valversnelling (m/s^2)
H	golfhoogte (m)
h_k	afstand metacentrum-kiel (m)
h_m	metacentrumhoogte (m)
H_m	significante golfhoogte (m)
h_z	afstand zwaartepunt-kiel (m)
J_u	kwadratisch oppervlaktemoment van de waterlijndoorsnede om de langsas (m^4)
k	beddingsconstante (kN/m^3)
k	golfgetal (m^{-1})
k	Constructiestijfheid (MN/m)
l	lengte drijflichaam (m)
l	hoogte zwaartepunt (m)
L	golflengte (m)
l_{krit}	kritische hoogte zwaartepunt
M	Metacentrum (m)
M	Moment (kNm)
m	massa schip (ton)
M_{opr}	oprichtend moment (kNm)
M_{opr}	eerste orde moment (kNm)
M_{tot}	totaal (opgelegd) moment, incl. 2e orde (kNm)
M_{uitw}	uitwendig moment (kNm)
p	waterdruk (kN/m^2)
p	waarde belasting (kN/m^2)
r	straal cilinder (m)
S_y	Statisch moment in het xy-vlak (m^3)
t	tijd (s)
T	golfperiode (s)
u	zetting (m)
U	windsnelheid (m/s)
v	aanvaarsnelheid (m/s)
w	horizontale verplaatsing (m)
z	positie zwaartepunt (m)
α	rotatiehoek ponton
β	halve hoek top driehoek
γ	soortelijke massa (kN/m^3)
γ	belastingfactor
η	momentane afwijking waterstand t.o.v. waterlijn (m)
φ	middelpuntshoek (cilinder)
ρ	dichtheid (kg/m^3)
σ	spanning
ω	hoekfrequentie (s^{-1})
ψ	factor momentane waaarde
∇	waterverplaatsing (m^3)

