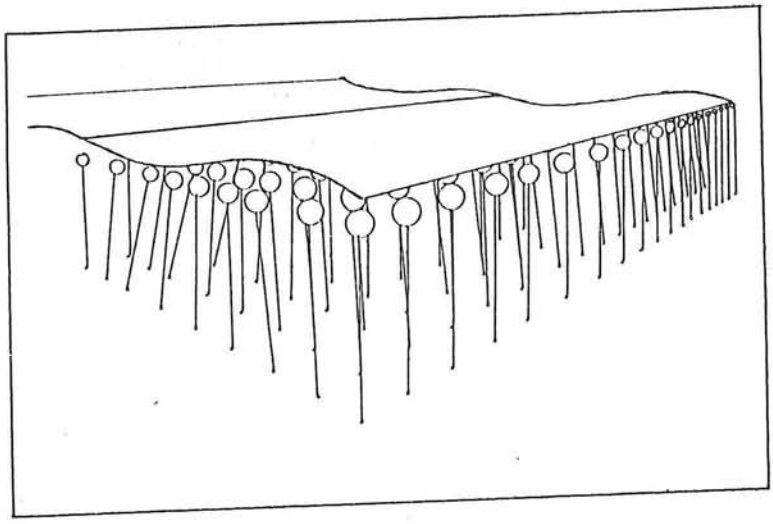
# GOLFHOOGTEVERLAGING IN HET EKOFISK VELD

# EEN ALTERNATIEF VOOR DE PLATFORM JACK UP



DEEL II

Mei 1988 J.S. Reedijk


THDelft
Technische Hogeschool Delft

**Afdeling der Civiele Techniek**
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Kustwaterbouw


88

806566

# GOLFHOOGTEVERLAGING IN HET EKOFISK VELD

# EEN ALTERNATIEF VOOR DE PLATFORM JACK UP

## DEEL II

Mei 1988 J.S. Reedijk

Deel II van het eindverslag
van de afstudeerstudie aan de
T.U. Delft

afst
OT.
88-02

begeleiders:

W.W. Massie, P.E.
Prof.Dr.Ir. E.W. Bijker

## SAMENVATTING

Deel II bevat het derde deelverslag uit maart 1988 waarin de dynamische golfbreker constructief wordt uitgewerkt. En waarin ook een kostenschatting van de dynamische golfbreker in het Ekofisk veld is gemaakt. De dynamische golfbreker is een golfdempingssysteem bestaande uit een groot aantal boeien die onder het zeeoppervlak verankerd worden, en die met een strakstaande ankerlijn aan de zeebodem zijn verbonden. Deze boeien onttrekken energie aan de golven doordat dé eigenfrequentie van het systeem boei - ankerlijn afgestemd is op de golffrequenties. De boeien maken een beweging met een grote amplitude in het horizontale vlak, waarbij golfenergie in warmte wordt omgezet via turbulente dissipatie.

Technische Universiteit Delft
Faculteit CiTG
Bibliotheek Civiele Techniek
Stevinweg 1
2628 CN Delft

3190837

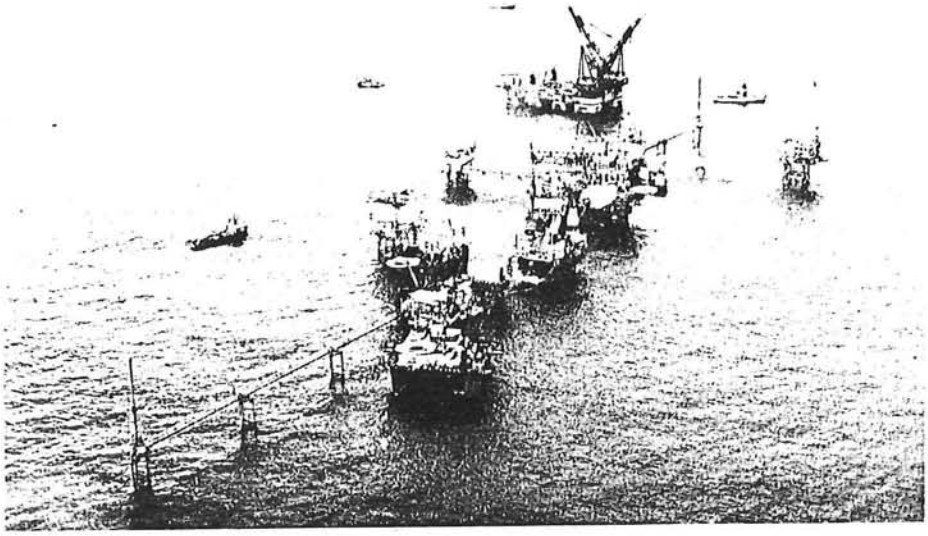
# EEN DYNAMISCH GOLFBREKERSYSTEEM IN HET EKOFISK VELD

## EEN ALTERNATIEF VOOR DE PLATFORM JACK UP

derde deelverslag maart 1988

J.S. Reedijk

T.U. Delft



*The Ekofisk Complex* (Photo: Phillips Petroleum/Husmo-foto)

INHOUDSOPGAVE


| | | pg. |
|---|---|---|
| 1. | INLEIDING | 2 |
| 2. | AFMETINGEN VAN DE BOEI EN HET GOLFBREKERSYSTEEM | 3 |
| 3. | KRACHTEN OP DE BOEI EN ZIJN VERANKERING | 7 |
| 4. | CONSTRUCTIE VAN DE BOEI | 11 |
| 4.1 | Stalen boeien | 11 |
| 4.2 | Kunststof boeien | 14 |
| 4.2.1 | Rubber boeien | 14 |
| 4.2.2 | Glasvezel versterkte kunststof boeien | 16 |
| 5. | DE ANKERLIJN | 18 |
| 5.1 | Ankerkettingen | 18 |
| 5.2 | Kunststof ankerlijnen | 20 |
| 5.3 | Aansluiting van de ankerlijn op de verankering en de boei | 21 |
| 6. | DE VERANKERING | 23 |
| 6.1 | De bodemgesteldheid in het Ekofisk veld | 23 |
| 6.2 | Verankeringsmethoden | 23 |
| 6.2.1 | Geheide paal ankers | 25 |
| 6.2.2 | Uplift resisting anchors | 27 |
| 6.2.3 | Suction piles | 31 |
| 6.2.4 | Ankercombinaties | 38 |
| 7. | INSTALLATIE METHODE VAN HET GOLFBREKERSYSTEEM | 40 |
| 7.1 | Installatie van geheide paal ankers | 40 |
| 7.2 | Installatie van grondankers | 41 |
| 7.3 | Installatie van suction piles | 41 |
| 7.4 | Installatie van glasvezelversterkte kunststof boeien | 42 |
| 8. | GLOBALE KOSTENSCHATTING | 44 |
| 8.1 | Kosten van de golfbreker bij stalen boeien en ankerkettingen | 44 |
| 8.2 | Kosten van de golfbreker met speciale suction piles | 45 |
| 8.3 | Kosten van de golfbreker bij toepassing van kunststoffen | 46 |
| 8.4 | Kosten van de golfbreker met 8 meter diameter boeien | 47 |
| 8.5 | Kosten van de golfbreker met 10 meter diameter boeien | 48 |
| 9. | CONCLUSIES | 50 |
| BIJLAGEN | | 54 |

# 1. INLEIDING

In het voorafgaande onderzoek is gezocht naar een oplossing voor de problemen die de bodemdaling in het Ekofisk veld in de Noordzee met zich meebrengt. Het probleem waarbij het hier om gaat is dat door de bodemdaling de platforms in steeds dieper wordend water komen te staan. Hierdoor wordt de afstand tussen het gemiddelde zeeniveau en de deckstructure van de platforms steeds kleiner. Daardoor wordt de kans dat in een storm een golftop het dek raakt steeds groter. In juli 1987 zijn de stalen jackets met behulp van opzetstukken verhoogd met zes meter om de gevolgen van de bodemdaling te compenseren.

Dit onderzoek gaat over de mogelijkheid om de golfhoogte in een zware storm ter plaatse van de platforms te verlagen. Dit heeft namelijk het zelfde resultaat als het verhogen van de draagconstructies van de platforms, namelijk het verlagen van de kans dat een golftop de deckstructure van één van de platforms zal raken. Dit is nodig omdat anders schade aan de platforms kan ontstaan en mensenlevens in gevaar worden gebracht. Om het zelfde resultaat te bereiken als door het verhogen van de platforms met zes meter wordt bereikt moet de maximum golfhoogte in een honderdjarige storm in het gebied rond de platforms met 12 meter worden verlaagd, van 26 meter tot 14 meter. In het tweede deelverslag was gebleken dat het golfbrekersysteem bestaande uit een groot aantal bolvormige boeien zoals weergegeven in figuur 2.3 de beste oplossing was voor het probleem van de bodemdaling in het Ekofisk veld. De bedoeling van het onderzoek is om te kijken of deze oplossing een goed alternatief is voor het opvijzelen van de platforms, en of het toepassen van een golfbreker in plaats van het opvijzelen tot een kostenbesparing had geleid.

Uit het voorgaande onderzoek bleek dat de boeien van het golfbrekersysteem een diameter van ongeveer 12 meter moeten hebben. In totaal zijn er 500 tot 850 boeien nodig. De doorvaardiepte boven de boeien wordt 9 meter. De totale lengte van het golfbrekersysteem wordt 2400 meter. De waterdiepte in het Ekofisk veld is ongeveer 73 meter. In het tweede deelverslag werden als nader te onderzoeken aspecten genoemd:

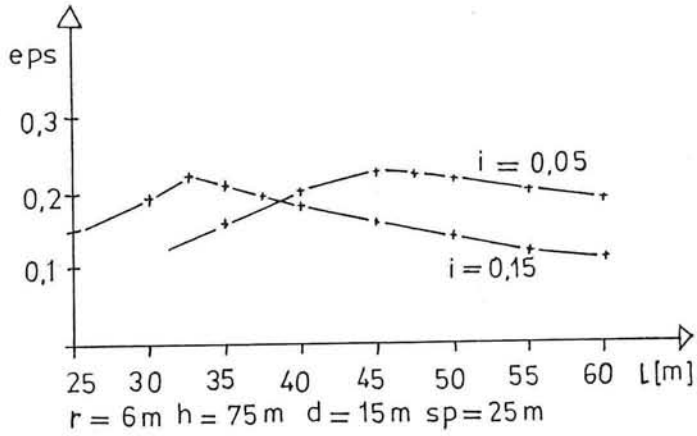
- Materiaalkeuze en levensduur van de boei.
- Constructiemethode van de boei
- Type verankering van de boei.
- Gedrag van de verankering met een wisselende belasting.
- Aansluiting van de ankerlijn op de verankering.
- Aansluiting van de ankerlijn op de boei.
- Methode van installatie van de boei.
- Optimalisering van het aantal boeien en van de afmetingen van de boeien in relatie tot de totale kosten.

Deze aspecten zullen in dit deelverslag aan de orde komen.

## 2. AFMETINGEN VAN DE BOEI EN VAN HET GOLFBREKERSYSTEEM

Uit het voorafgaande onderzoek is gebleken dat de boei een diameter van ongeveer 12 meter zal moeten hebben. Het kan echter aantrekkelijker zijn om boeien van 10 meter diameter toe te passen omdat dan de opwaartse kracht die door de boeien wordt uitgeoefend bijna wordt gehalveerd. Het aantal boeien wat dan nodig is neemt echter met ongeveer een factor 2 toe. Het rendement van de energieonttrekking neemt toe bij een kleinere massa van de boei. Er moet dus getracht worden de boei zo licht mogelijk te construeren. De relatieve massa van de boei, de massa van de boei gedeeld door de massa van het verplaatste water zal 0.1 of kleiner moeten zijn. Bij een relatieve massa van 0.1 kunnen de boeien nog uit staal worden geconstrueerd. Bij een kleinere relatieve massa zal er met kunststoffen moeten worden gewerkt. Bij een relatieve massa van 0.05 is het rendement 22 procent groter dan bij een relatieve massa van 0.1 . Het blijkt ook dat de ankerlijnlengte van 60 meter groter is dan de ankerlijnlengte waarbij het maximum rendement mogelijk is (zie figuur 2.1). Dit komt doordat de boei met zijn verankering bij een ankerlijnlengte van 60 meter niet optimaal op de piekfrequentie van het spectrum is afgestemd. Het kan dus voordelig zijn om het aangrijpingspunt van de ankerlijn op de verankering een eind boven de zeebodem te laten uitsteken zodat de ankerlijnlengte kleiner kan worden gemaakt. De ankerlijnen van de boeien kunnen ook op een bepaalde hoogte boven de zeebodem met horizontale lijnen aan elkaar worden gekoppeld waardoor het scharnierpunt omhoog wordt gebracht. Door het grote aantal boeien en de golven die uit verschillende richtingen komen is dit echter een ingewikkelde constructie. Het verankeringssysteem van de boeien is dan ook niet meer onafhankelijk per boei. Als één anker bezwijkt kan dit leiden tot het bezwijken van de overige ankers. Het middelpunt van de boeien bevindt zich 15 meter onder water. Bij een waterdiepte van 75 meter en boeien met een diameter van 12 meter resulteerd dit in een ankerlijnlengte van 54 meter tot aan de zeebodem.

De maximum golfhoogte in een honderdjarige storm kan een hoogte hebben tussen de 9.9 en 26 meter, afhankelijk van de voortplantingsrichting van de golven. Over een sector van 90 graden is deze golfhoogte groter dan 14 meter, namelijk als de golven uit de richtingen tussen Noord - Noord-Oost en West-Noord-West komen. De groep platforms in het Ekofisk veld heeft een totale lengte van 1200 meter. De as door het platformstelsel loopt in Noord - Noord-Westelijke richting. (zie ook figuur 2.2). Het golfbrekersysteem verlaagt de golfhoogte tot 14 meter of minder. Bij een maximum golfhoogte van 26 meter moet daarbij 71 procent van de golfenergie onttrokken worden. Bij boeien van 12 meter diameter met een relatieve massa van 0.1, een ankerlijnlengte van 54 meter en een onderlinge afstand van 50 meter zijn er daarvoor 16 rijen boeien nodig. Dit grote aantal rijen is alleen nodig voor de richting waaruit de golf met een golfhoogte van 26 meter kan komen.



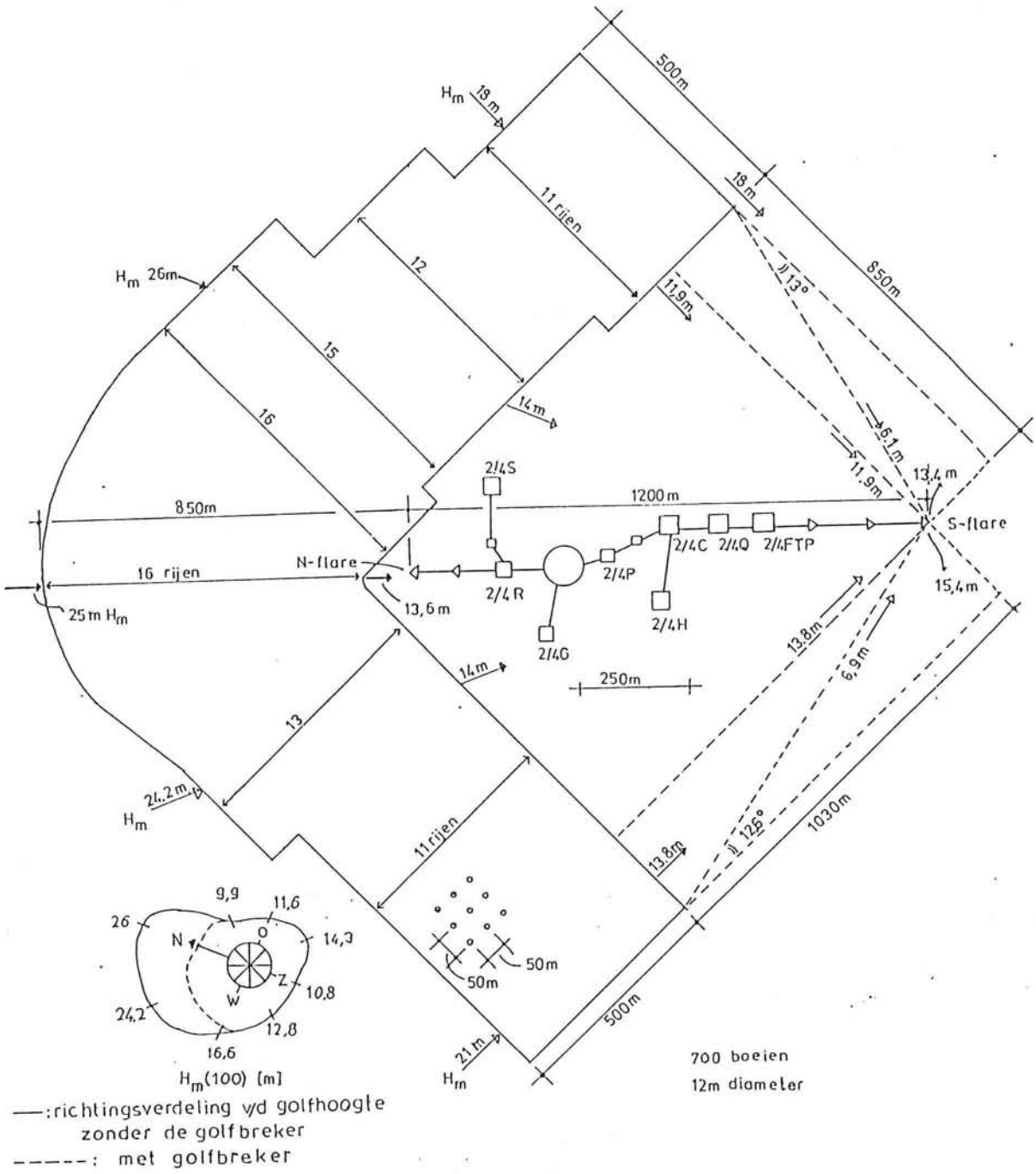

r: straal v/d boei
h: waterdiepte
d: verankeringsdiepte
sp: afstand tussen de middelpunten van de boeien
l: ankerlijnlengte, tussen het scharnierpunt en het middelpunt v/d boei
i: relatieve massa, massa boei/massa verplaatste zeewater
eps: rendement van één rij boeien; fractie v/d golfenergie die één rij boeien onttrekt

Figuur 2.1: Invloed van de ankerlijnlengte op het rendement van de energieonttrekking van de boei

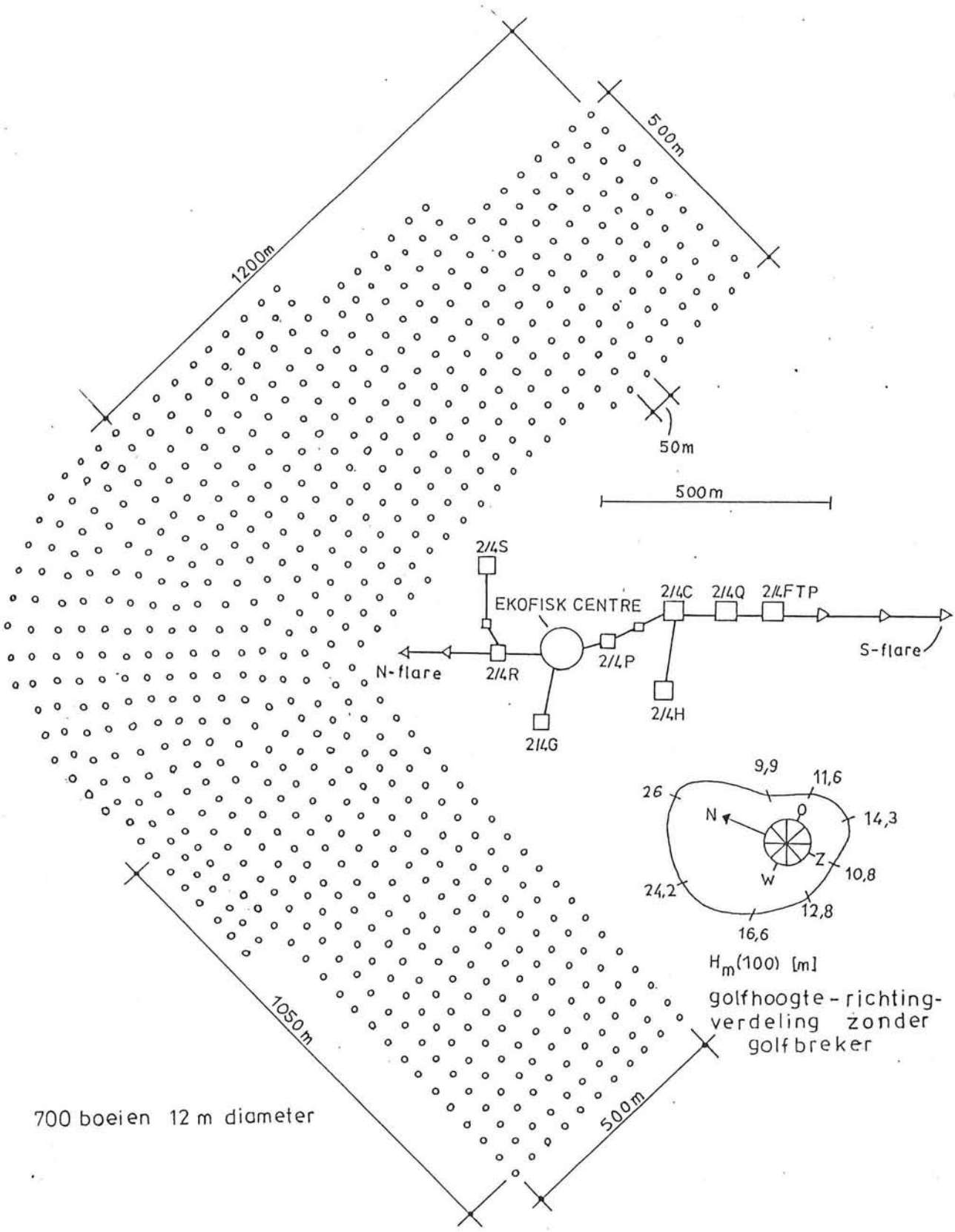
Voor de bescherming van het platformstelsel voor golven uit andere richtingen kan met een kleiner aantal rijen boeien worden volstaan. Er moet wel rekening worden gehouden met diffractie langs de einden van de golfbreker. De golfhoogte bij het uiterste flare platform veroorzaakt door diffractie en door de golfbreker doorgelaten golf moeten kleiner zijn dan 14 meter. Dit kan worden bereikt door de configuratie weergegeven in figuur 2.3. De golfbreker heeft daarbij in het midden 16 rijen boeien, en aan de uiteinden 10 tot 11 rijen boeien. In totaal zijn er dan 700 boeien nodig voor de golfbreker.

De diffractie is berekend aan de hand van een niet doorlatende golfbreker waarbij naderhand de energie van de doorgelaten golf bij de energie van de gediffracteerde golf is opgeteld. Daaruit is dan de resulterende golfhoogte bepaald. Dit is een benadering, een golfbreker bestaande uit een veld boeien is niet smal en heeft ook geen duidelijk einde. In figuur 2.2 is weergegeven wat de golfhoogte wordt bij het zuidelijkste flare platform. In de figuur is ook weergegeven is hoe het verloop is van de maximum golfhoogte over de verschillende richtingen. Het blijkt dat als de golven uit Westelijke richtingen komen de golfhoogte bij het Zuidelijke flare platform 16.6 meter is in plaats van de gewenste 14 meter. Om de golfhoogte bij het flare platform te verlagen tot 14 meter zijn echter veel meer boeien nodig. Het is economischer om het flare platform te verstevigen. De enige functie die het platform heeft is namelijk het ondersteunen van de flare mast. Aanpassingen aan het platform kunnen daarom makkelijk plaatsvinden.

Bij een definitief golfbreker ontwerp moet er wel rekening worden gehouden met pijpleidingen en kabels die over de zeebodem lopen. Dit hoeft echter geen probleem te zijn omdat de verankeringspunten 50 meter uit elkaar liggen, en er dus gemakkelijk een corridor van 40 meter breedte vrijgehouden kan worden. Bevoorradingsschepen zullen ook geen hinder ondervinden van de golfbreker omdat er een voldoende doorvaardiepte aanwezig is. Voor anker gaan in het gebied van de golfbreker is echter niet mogelijk.




Figuur 2.2: Positie van het golfbrekersysteem; golfhoogten en diffractie.

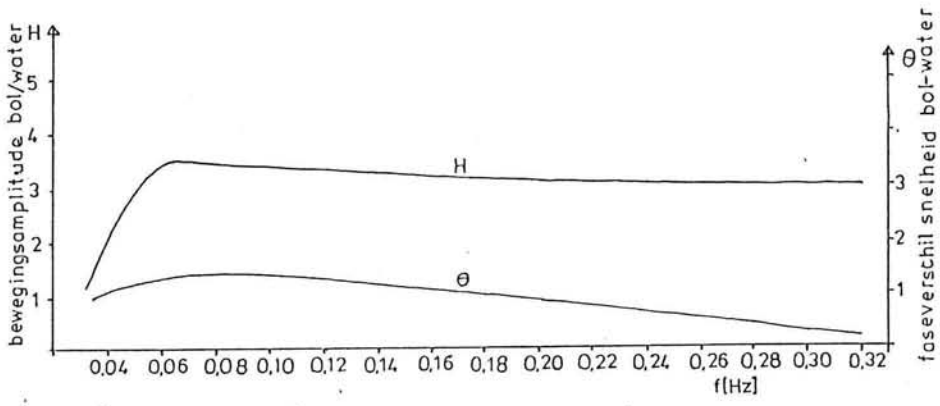



Figuur 2.3: Ontwerp voor een golfbrekersysteem.

## 3. KRACHTEN OP DE BOEI EN ZIJN VERANKERING

De krachten die op de boei worden uitgeoefend kunnen worden onderscheiden in twee groepen, namelijk de krachten die de golven op de boei uitoefenen en de krachten ten gevolge van het drijfvermogen van de boei. De golfkracht bestaat uit een snelheidscomponent ten gevolge van de weerstand van de boei en een versnellingscomponent ten gevolge van de waterverplaatsing van de boei. De kracht ten gevolge van het drijfvermogen van de boei bestaat uit een statische opwaarts gerichte kracht, en een dynamische horizontale kracht ten gevolge van de uitwijking van de boei. Deze laatste kracht kan ook gezien worden als de veerkracht die de boei weer terugbrengt in zijn evenwichtsstand, de stand waarbij de ankerlijn verticaal loopt.

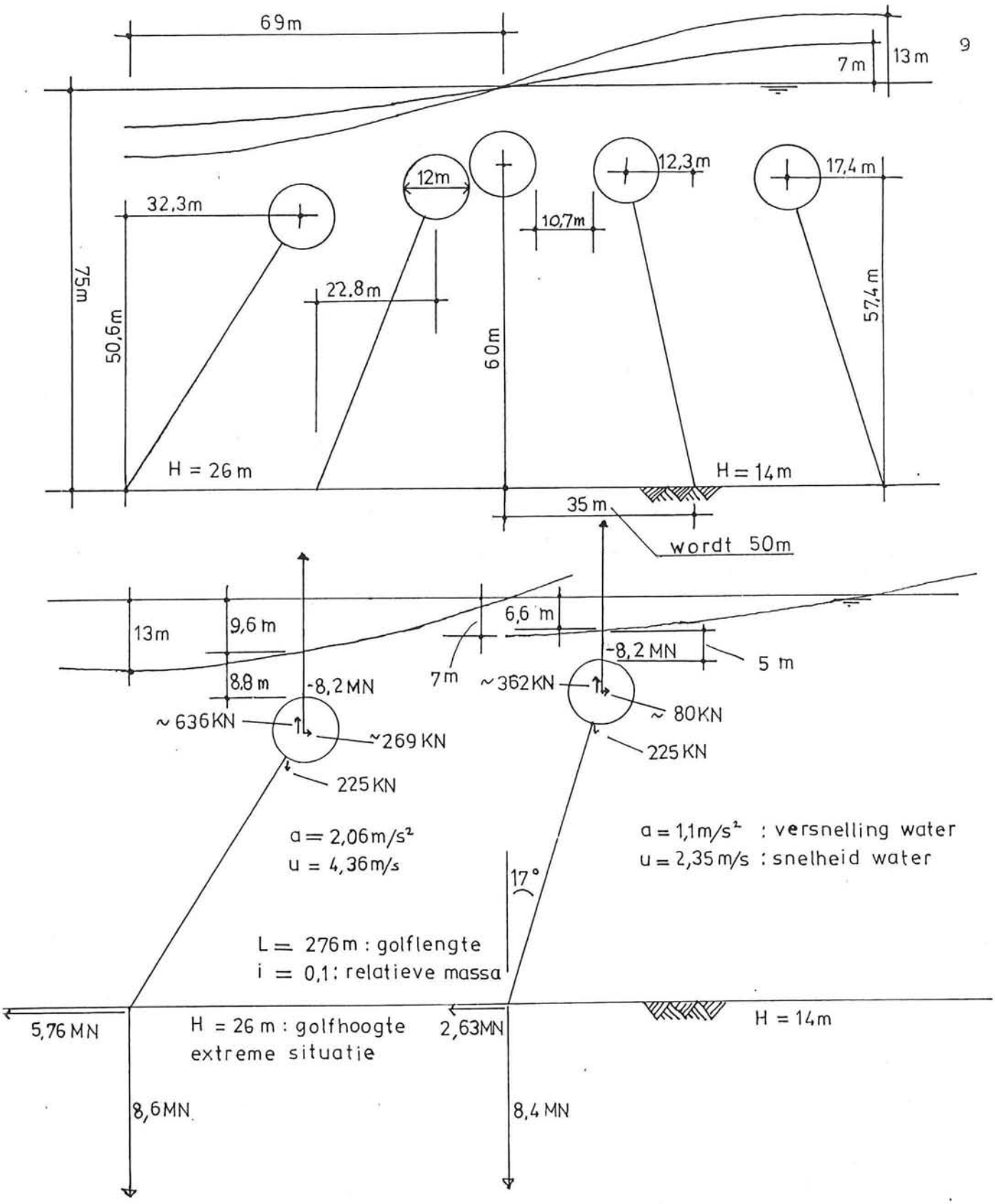
Een boei met een diameter van 12 meter heeft een waterverplaatsing van 905 kubieke meter water. Bij een relatieve massa van 0.1 resulteert dit in een opwaartse kracht van 8.2 MN. Bij gebruik van ankerkettingen zal de massa van 54 meter ketting ongeveer 25 ton worden, een verticale neerwaartse kracht van 245 kN. De maximale horizontale kracht die de verankering moet opnemen hangt af van de uitwijking van de boei uit zijn evenwichtsstand. Deze uitwijking als functie van de golffrequentie is uit te rekenen met behulp van het computerprogramma waarmee ook het rendement van de boeien wordt berekend. Met het programma wordt de overdrachtsfunctie berekend; de verhouding tussen de bewegingsamplitude van de waterdeeltjes en de bewegingsamplitude van de boei, en ook het faseverschil tussen de snelheid van de waterdeeltjes en de snelheid van de boei. Dit is ook in figuur 3.1 weergegeven voor de boei met 12 meter diameter, een relatieve massa van 0.1 en een ankerlijnlengte van 54 m.




Figuur 3.1: Overdrachtsfunctie van de uitwijking van de boei.

De krachten op de boei ten gevolge van de golven kunnen worden bepaald uit de Morison vergelijking. De boei en zijn verankering zal daarbij tenminste een golf met een golfhoogte van 26 meter moeten kunnen weerstaan. Bij een golf van 26 meter golfhoogte en een golflengte van 276 meter is de maximale snelheid van de waterdeeltjes op een diepte van 15 meter onder de waterspiegel 4.36 m/s. De maximale versnelling van de waterdeeltjes op die diepte is 2.06 $m/s^2$. De snelheidsterm van de Morison vergelijking wordt dan 277 kN, en de versnellingsterm 672 kN. Deze twee krachten zijn $\pi/2$ uit fase. De maximale kracht op de boei en zijn verankering treedt op als de boei zijn grootste horizontale uitwijking heeft. De versnellingskracht is dan verticaal opwaarts gericht, en de snelheidskracht horizontaal in de richting van de uitwijking zoals weergegeven in figuur 3.2. Dit komt omdat de beweging van de boei ongeveer $\pi/2$ uit fase is met de beweging van de waterdeeltjes.

Het blijkt dat voor de piekperiode van 13.3 seconden de bewegingsamplitude van een boei met een relatieve massa van 0.1 en een ankerlijnlengte van 60 meter 3.5 maal zo groot is als de bewegingsamplitude van de waterdeeltjes. Bij een sinusvormige golf met een golfhoogte van 26 meter en een golflengte van 276 meter is de bewegingsamplitude van de waterdeeltjes 15 meter onder de zeespiegel 9.24 meter. De maximale uitwijking van de boei wordt dus 32.3 meter. Deze bewegingsamplitude zou dus optreden als de excitatie van de boei zou bestaan uit een sinusvormige golftrein met een golfhoogte van 26 meter, en een golflengte van 276 meter. De excitatie die op zal treden is echter een combinatie van golven met verschillende golflengten en golfhoogten waarbij door interferentie golfpieken met een golfhoogte van 26 meter kunnen ontstaan. De situatie die in figuur 3.2 aan de linkerzijde is weergegeven stelt dus een extreme situatie voor. Aan de rechterzijde van figuur 3.2 is de situatie weergegeven waarbij de excitatie plaats vindt door een sinusvormige golftrein met een golflengte van 276 meter en een golfhoogte van 14 meter. Deze golfhoogte van 14 meter komt overeen met de significante golfhoogte die hoort bij de zeetoestand waarbij de maximum golfhoogte van 26 meter kan optreden. De horizontale belasting van de verankering is dan ongeveer de helft kleiner dan bij een sinusvormige golftrein met een golfhoogte van 26 meter doordat de horizontale uitwijking van de boei ongeveer de helft kleiner is.



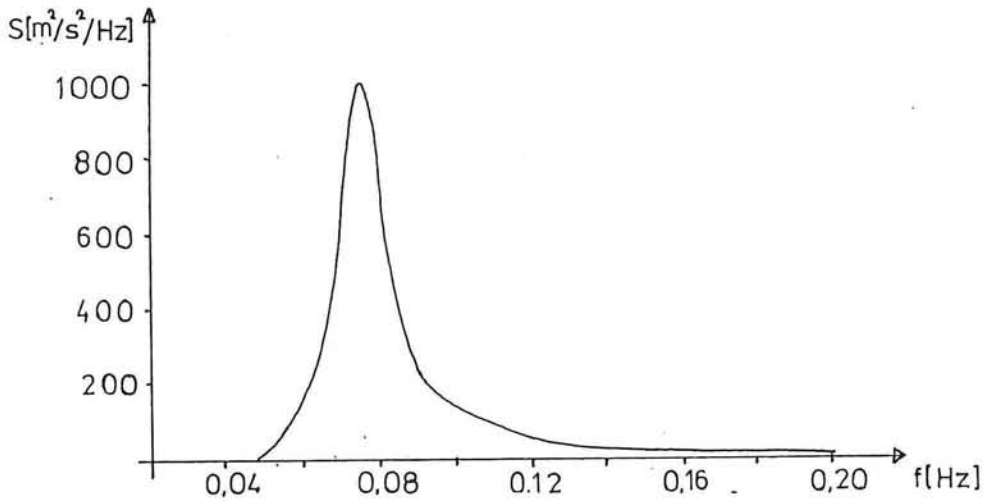

Figuur 3.2: Krachten op de boei en zijn verankering bij een golfhoogte van 14 en 26 meter

In figuur 3.2 is de afstand tussen de boeien 35 meter. In het ontwerp zoals weergegeven in figuur 2.3 is dit vergroot tot 50 meter.

Het blijkt dat de maximale verticale kracht op de verankering 8.6 MN is. De maximaal optredende horizontale kracht zal tussen de 2.63 en 5.76 MN in liggen. De verticale kracht varieert gedurende de golfperiode tussen de 7.3 en 8.6 MN. Dit is bij een golfperiode van 13.3 seconden. Deze verticale kracht kan dus als statisch worden beschouwd. De horizontale kracht op de verankering is echter volledig dynamisch. De kracht in de ankerlijn varieert tussen de 8.2 en 10.5 MN. Deze kracht kan ook als statisch worden beschouwd. (In verband met vermoeiing).

De invloed van getijstroming op het rendement van de energieonttrekking door de boei is gering. Bij een stroomsnelheid van 1 m/s is de kracht die ten gevolge van de weerstand wordt uitgeoefend op de boei 14.6 kN. De uitwijking van de boei uit zijn middenpositie die hierdoor wordt veroorzaakt is 0.1 m. De invloed hiervan op de beweging van de boei bij excitatie door de golven is te verwaarlozen.

In figuur 3.3 is het spectrum weergegeven van de relatieve snelheid in het kwadraat van een boei met een diameter van 12 meter, een relatieve massa van 0.1 en een ankerlijnlengte van 54 meter. De excitatie vindt plaats door een JONSWAP golfspectrum met een piekperiode van 13.3 seconden, en een significante golfhoogte van 14 meter.




Figuur 3.3: spectrum van het snelheidsverschil tussen boei en water in het kwadraat. (relatieve snelheid$^2$)

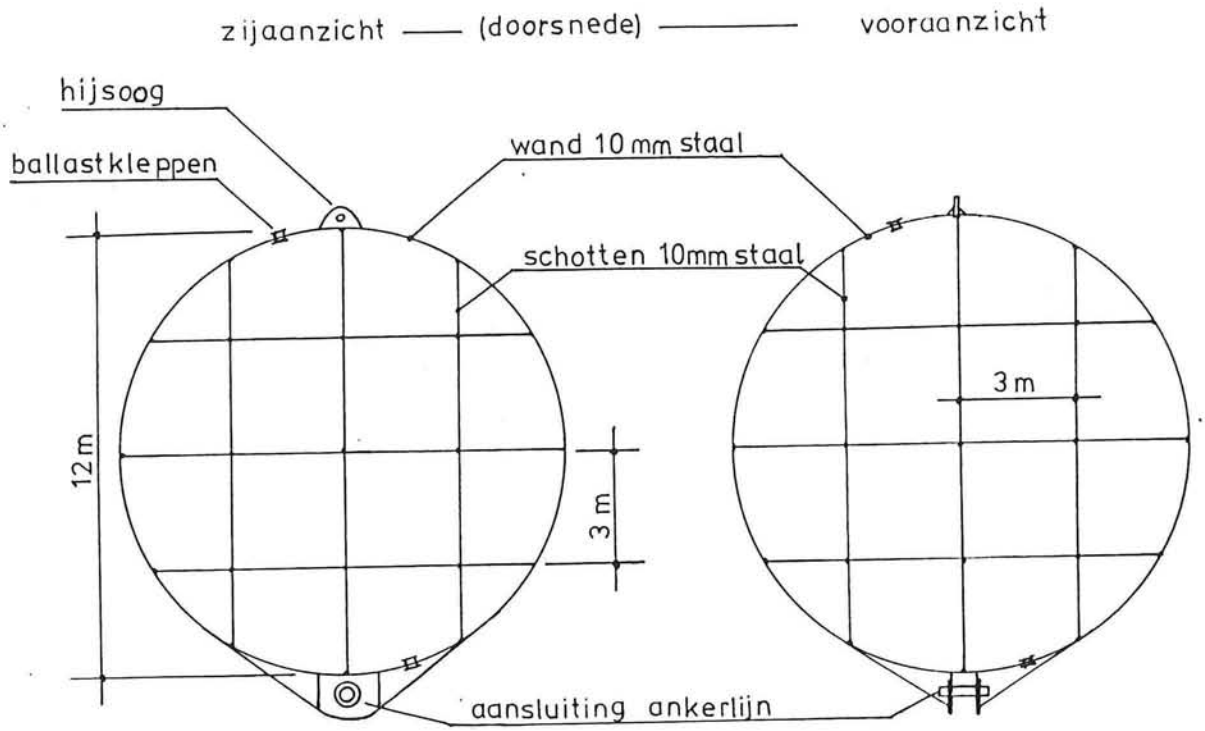
## 4. CONSTRUCTIE VAN DE BOEI

Voor de constructie van de boei komen zowel staal als kunststoffen in aanmerking. Stalen boeien van 12 meter kunnen met bestaande technieken gebouwd worden. Boeien van kunststof met een dergelijke diameter zijn nog niet eerder toegepast. Het voordeel van kunststof is dat het een lichte soortelijk massa heeft, waardoor de boei lichter geconstrueerd kan worden. Als men de boei lichter construeert neemt het rendement van de energieonttrekking per rij boeien toe en wordt het benodigde aantal boeien kleiner. Bij kunststof boeien zijn er ook geen problemen met corrosie. Bij stalen boeien zal er enige vorm van bescherming tegen corrosie moeten plaatsvinden.

### 4.1 Stalen boeien

De boei met een diameter van 12 meter heeft een waterverplaatsing van 905 kubieke water, dit is 932.2 ton zeewater. Bij een relatieve massa van 0.1 heeft de boei een een massa van 93.2 ton, bij een relatieve massa van 0.05 heeft de boei een massa van 46.6 ton. 93.2 ton staal komt overeen met 11.87 kubieke meter. Als de boei alleen als een bolvormige schil wordt gemaakt wordt de dikte van deze stalen schil 26 mm. De druk 15 meter onder de zeespiegel is 151.4 kN/m². Een stalen bol van staal Fe 360 met een diameter van 12 meter en een wanddikte van 20 mm kan een homogene uitwendige druk van 151.4 kN/m² weerstaan. Een bol met een wanddikte van 26 mm kan een druk van 246.5 kN/m² weerstaan. De druk is echter niet homogeen, en de golfkrachten leveren ook een asymmetrische druk. Deze druk ten gevolge van de golven is echter kleiner dan 10 kN/m². De kracht ten gevolge van het drijfvermogen moeten worden overgebracht naar de ankerlijn. Deze kracht grijpt aan in het middelpunt van de bol. Vanaf het bevestigingspunt van de ankerlijn zal deze kracht dus in de wand van de bol ingevoerd moeten worden. Hiervoor zullen verstevigingsschotten gebruikt moeten worden.

Men kan de boei ook uitvoeren met een wanddikte van 10 mm, ingedeeld in compartimenten met behulp van dwarsschotten. Bij toepassing van 3 circelvormige schotten met een diameter van 12 meter, en 6 circelvormige schotten met een diameter van 10 meter en een wanddikte van 10 mm is er 86.5 ton staal nodig. Er is dan nog 6.7 ton staal over om de aansluiting op de ankerlijn en de installatie voor het ballasten mee te construeren. (zie ook figuur 4.1.1). Deze ballastinstallatie zal veel uitgebreider zijn dan bij de boei zonder schotten De boei bestaat dan uit totaal 64 compartimenten. Dit vergroot de veiligheid tegen het zinken van de boei door lekraken. Van de 93.2 ton die de boei mag wegen moet nog een gedeelte gereserveerd worden bij gebruik van kathodische protectie. De zink anodes die gebruikt worden wegen 400 kilo per stuk. Om de boei met een diameter van 12 meter gedurende 25 jaar te beschermen tegen corrosie zijn tenminste 10 anodes nodig. Bij kathodische protectie vormen de anodes dus een massa van meer dan 4 ton. (zie ook bijlage 7).




Figuur 4.1.1: Stalen boei uitgevoerd met dwarsschotten.

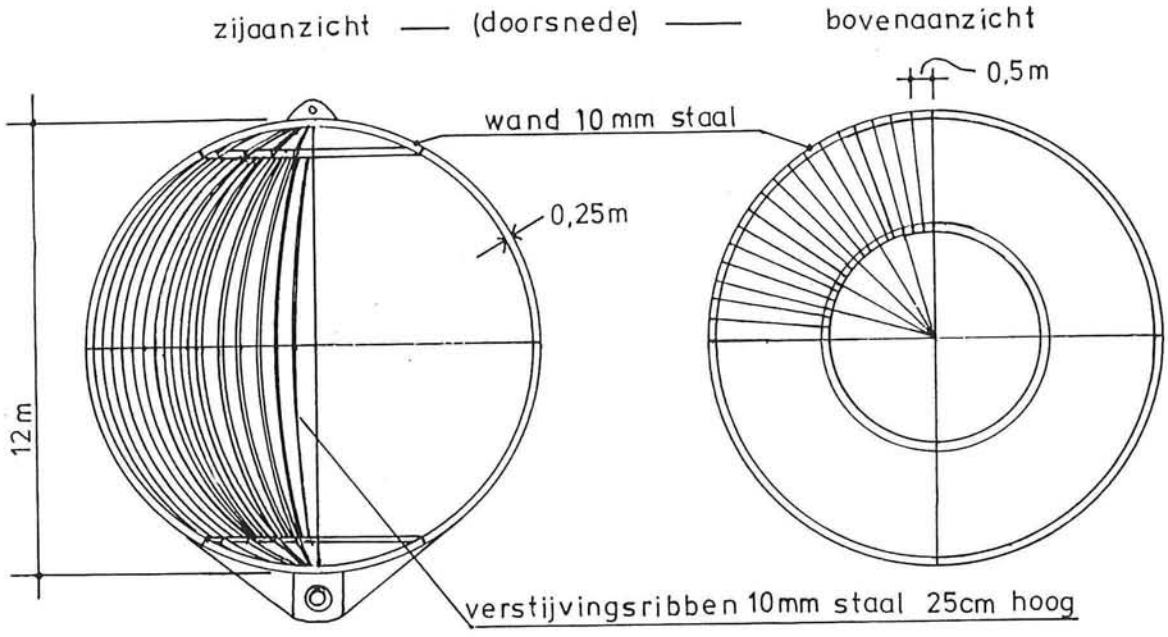
Men kan de boeien ook uit 10 mm staal maken als een bol met inwendige verstijvingsribben met een hoogte van 25 cm. Deze ribben kunnen dan om de 50 cm geplaatst worden, zoals weergegeven in figuur 4.1.2. De 75 ribben kunnen in verticale richting worden geplaatst waarbij ook horizontale verstijvingsringen worden toegepast. De 10 mm schil weegt 35.5 ton, de 75 verstijvingsribben 27.7 ton. Er is dus in totaal 44.1 ton staal beschikbaar voor de horizontale verstijvingsringen, de aansluiting op de ankerlijn en de ballastinstallatie. Een dergelijke uitvoering van de boei is echter zeer arbeidsintensief om te construeren.

De twee bovenstaande typen boeien zijn uitgevoerd als perfecte bollen. Om een dergelijke bolvorm te maken moeten de huidplaten een kromming in twee richtingen krijgen. De huidplaten moeten hiervoor speciaal geperst worden. Men kan de boeien ook op een eenvoudiger manier construeren door er een veelhoek van te maken, of uit staalplaten te construeren die slechts in één richting gewalst hoeven te worden. (Zie ook figuur 4.1.3). Dit maakt de productie van de boeien eenvoudiger en zal dus leiden tot een kostenbesparing. De Cd waarde van de boeien, en dus de weerstand, is niet echt kritisch, het rendement van de boeien blijft bij een grotere Cd waarde vrijwel gelijk. Er zal wel moeten worden gecontroleerd wat de invloed van een niet perfecte bolvorm op de Cm waarde is. Bij een toename van de toegevoegde massa neemt het rendement van de boeien duidelijk af. (Zie ook deelverslag 2).

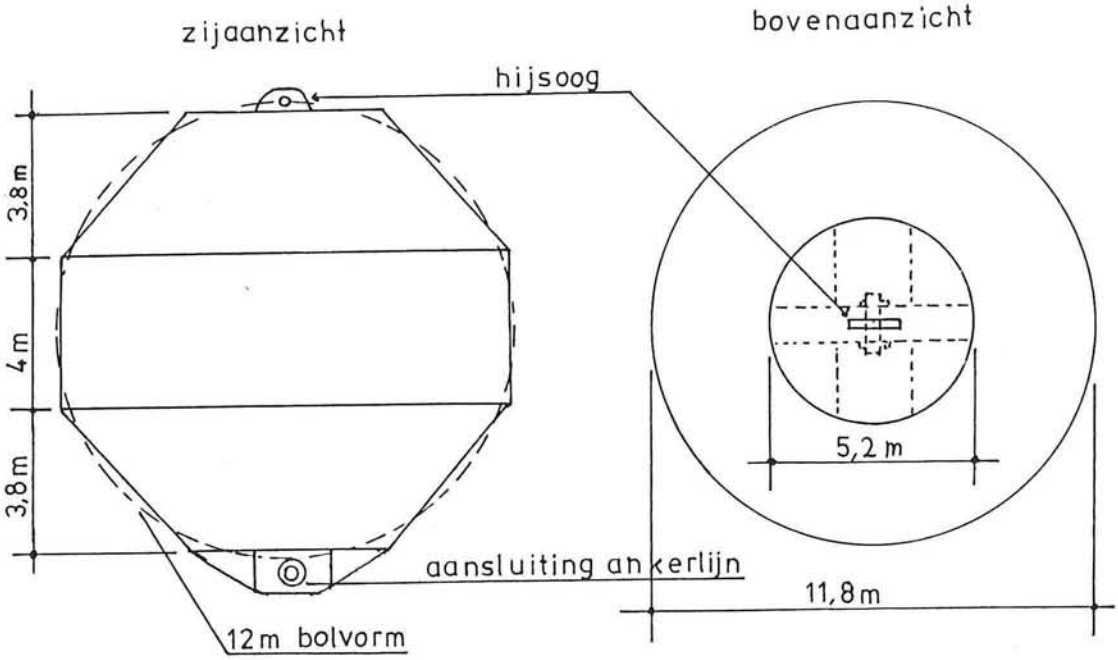
Er is bij de bovenstaande berekeningen van uit gegaan dat de lucht in de boei onder atmosferische druk staat. Het is ook mogelijk om lucht onder overdruk in de boeien aan te brengen. Bij een overdruk van twee bar in de boei wordt de uitwendige waterdruk al volledig gecompenseerd. De sterkte van de boeien kan dan volledig ten goede komen aan het opnemen van de golfkrachten. Het onder overdruk zetten van de boeien kan goed gecombineerd worden met het ballastsysteem. Als men de boeien eerst afzinkt tot de verankeringsdiepte door ze te ballasten met zeewater kan men hem dan ontballasten met perslucht. Als de boei dan volledig ontballast is de inwendige druk gelijk aan de uitwendige waterdruk. Het is ook mogelijk de boeien vol te schuimen met kunstschuim nadat ze verankerd zijn. Dan wordt de veiligheid tegen zinken en ook de stijfheid van de boeien vergroot. De boeien zijn dan echter niet meer voor onderhoudswerkzaamheden van hun verankering te verwijderen omdat ze niet meer geballast kunnen worden.

Bij stalen boeien zal bescherming tegen corrosie moeten plaatsvinden. Dit kan gebeuren door kathodische protectie met zinkanodes of door een geschikte coating van de boeien. De zinkanodes kunnen aan de buitenzijde van de boeien aangebracht worden omdat het rendement van de boeien niet erg gevoelig is voor kleine veranderingen in de cd waarde. Er zal wel gecontroleerd moeten worden of de hoge snelheidsverschillen tussen de waterdeeltjes en de boeien niet tot excessieve corrosie van de boeien of van de zinkanodes leidt.

De aangroei van zeeorganismen op de boeien zal beperkt moeten worden. De invloed op de weerstand is niet van belang, maar de invloed op de massa van de boeien wel. Bij een toenemende massa neemt het rendement van de boeien af. Een geschikte "anti fouling" kan de boeien tegen aangroei beschermen. Een aangroei van 5 ton aan zeeorganismen, 5 procent van de massa van de boeien, is nog toelaatbaar in verband met het rendement.




Figuur 4.1.2: Stalen boei uitgevoerd met verstijvingsribben.




Figuur 4.1.3: Stalen boei met afwijkende vormgeving.

## 4.2 Kunststof boeien

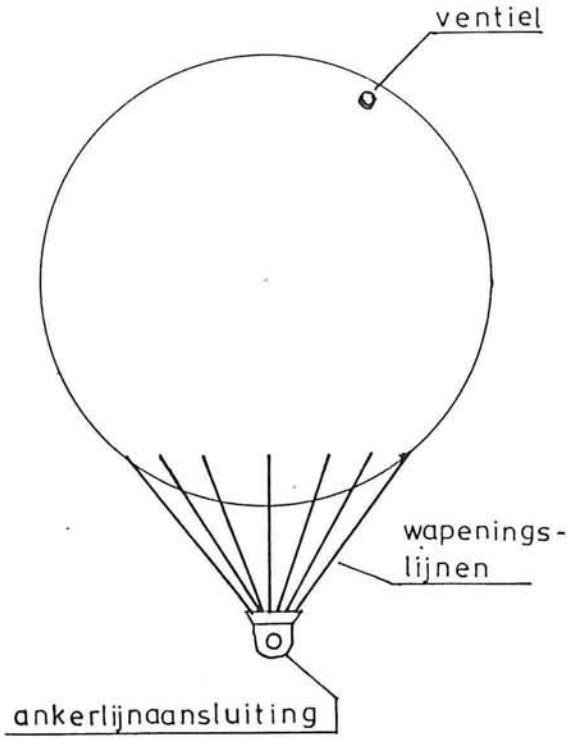
Onder kunststof boeien vallen zowel glasvezelversterkte kunststof boeien als gewapende rubber boeien. Het eerste type is vormvast, terwijl het tweede type een flexibele constructie is.

### 4.2.1 Rubber boeien

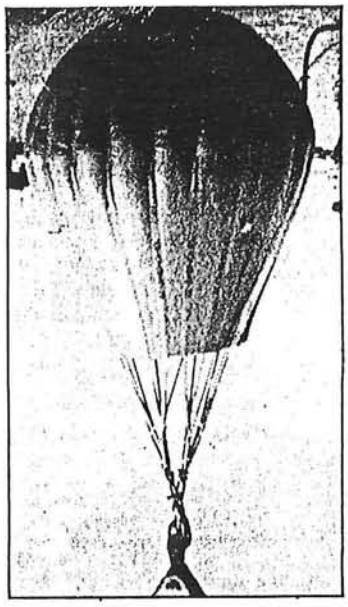
Men kan boeien van natuurrubber maken waarbij het rubber gewapend wordt met nylon of staalkabels. De boei wordt dan met een overdruk aan lucht gevuld. Een inwendige druk van 2.5 bar op 15 meter diepte is voldoende. Er zal in de loop der tijd wel enig drukverlies zijn doordat het rubber niet absoluut dicht is. Het drukverlies per tijdseenheid, dp/dt, van een boei met grote diameter is echter kleiner dan van een boei met een kleine diameter omdat het oppervlak van de boei evenredig is met de diameter in het kwadraat en het volume evenredig is met de diameter tot de derde macht. Bijvullen met lucht zou op zijn hoogst één keer in de vijf jaar nodig zijn. Natuurrubber heeft in zeewater ook een lange levensduur. Autobanden bleken na 40 jaar in het zeewater gelegen te hebben nog in goede toestand te zijn. Doordat de bovenkant van de boei 9 meter onder water is zijn er ook geen problemen met ultraviolet licht. De massa van rubber is 1200 tot 1500 kg per kubieke meter. Bij een relatieve massa van 0.05 zou de boei van 12 meter diameter 46.6 ton mogen wegen. Dit komt overeen met 31 kubieke meter rubber. De wanddikte van een boei van 12 meter diameter zou dan ongeveer 7 cm kunnen zijn.

De aansluiting van de ankerlijn op de boeien geeft bij een bolvormige boei problemen. De nylon of stalen wapeningsdraden zullen aan het bevestigingspunt van de ankerlijn vastgemaakt moeten worden, zodanig dat de boei zijn bolvorm behoudt. Dit kan gebeuren zoals weergegeven in figuur 4.2.1. De wapeningsdraden zullen wel beschermd moeten worden tegen het zeewater. De rubber boei kan worden uitgerust met ventielen om hem met lucht te vullen. Omdat het een flexibele constructie is kan hij samen met anker en ankerlijn leeg worden geinstalleerd zodanig dat hij een gering drijfvermogen heeft. Na de installatie kan hij via een luchtleiding worden gevuld.

De rubber boei vertoont gelijkenis met de "underwater lifting air bag", die ook in geheel gesloten vorm verkrijgbaar zijn. Een 35 tons "underwater lifting air bag" is weergegeven in figuur 4.2.2. Deze is echter uit polyester en P.V.C. gemaakt en heeft een diameter van 4 meter. De rubber boeien in het Ekofisk veld zullen een drijfvermogen van 885 ton hebben, en een diameter van 12 meter.




Figuur 4.2.1: Rubber boei



Figuur 4.2.2: Underwater lifting airbag

4.2.2 Glasvezelversterkte kunststof boeien.

Glasvezelversterkte kunststof boeien worden gemaakt van epoxy, met een wapening van glasvezels. Ze zijn volledig zeewaterbestendig, en kunnen worden gemaakt voor een levensduur van 50 jaar, ideaal voor deze toepassing. Boeien tot een diameter van 7 meter zijn tot nu toe geconstrueerd. Voor boeien met een diameter van 12 meter zal een constructieplaats in de omgeving van een waterweg moeten worden gebruikt omdat de boeien aleen over water kunnen worden getransporteerd. De boeien kunnen op twee verschillende manieren worden geconstrueerd. Eén methode is om gebruik te maken van een negatieve of positieve mal waarop met de hand laag voor laag afwisselend epoxy en glasvezel matten worden aangebracht. Bij deze methode zal de boei in delen gemaakt moeten worden die naderhand samengevoegd worden. Bij de andere methode wordt de boei machinaal gemaakt. Eerst wordt in een mal een bol van kunststofschuim gemaakt. Op deze bol van schuim wordt vervolgens kruislings in epoxy gedrenkte glasvezels gewikkeld onder een gelijkmatige spanning. Hierdoor wordt een zeer sterke constructie verkregen. Nadeel van deze methode van construeren van de boei is dat de boei moeilijker te installeren is. De boei is dan niet meer te ballasten. Er zal dan een mechanische methode moeten worden gebruikt om de boei onder water te verankeren.

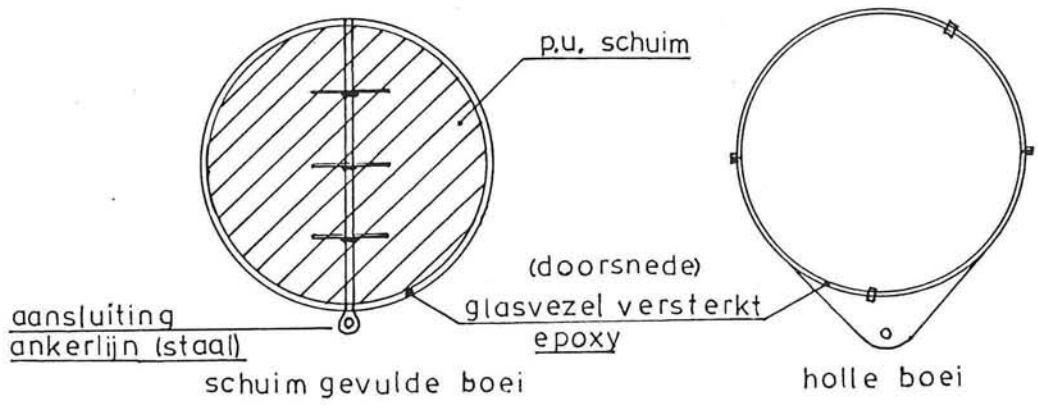
De kunststof boeien kunnen met een relatieve massa van 0.05 geconstrueerd worden. Het massa van de boeien is dan 46.6 ton. De kern van de boeien kan gemaakt worden van Polyurethaan schuim. Dit schuim heeft een massa van 29 kg per kubieke meter. De totale kern weegt dan 26.2 ton. De buitenwand van 24 mm dikte wordt gemaakt van glasvezel versterkt epoxy met een massa van 1850 kg per kubieke meter. Het P.U. schuim heeft een druksterkte van 120 $kN/m^2$. De glasvezelversterkte epoxy buitenlaag heeft een treksterkte van 400 tot 1250 $N/mm^2$ bij machinale productie, en een treksterkte van 60 tot 180 $N/mm^2$ bij productie met de hand. Omdat de boeien niet via de ballastmethode worden geinstalleerd zullen ze de volledige waterdruk moeten kunnen weerstaan, op 30 meter diepte al 300 $kN/m^2$. Deze waterdruk zal gedeeltelijk door de kern van schuim opgenomen kunnen worden en verder via de bolwerking van de buitenlaag worden verwerkt.

Bij toepassing van holle kunststof boeien kan een wanddikte van 50 mm worden gemaakt bij een massa van de boei van 46.6 ton. Als er perslucht wordt gebruikt om het ballastwater te verwijderen hoeft de boei alleen de krachten ten gevolge van de golven en zijn eigen beweging op te nemen. Daardoor kan de wanddikte van de boei beperkt blijven. Doordat het glasvezelversterkte epoxy een veel lagere E-modulus heeft dan staal, 9 $MN/m^2$ i.p.v. 210 $MN/m^2$, zal bij een uniforme uitwendige belasting eerder plooing optreden. De holle boei is dus niet geschikt om de waterdruk op 15 meter diepte te weerstaan. Het glasvezelversterkte epoxy is meer geschikt om trek op te nemen dan om druk op te nemen.

Bij de met schuim gevulde boei wordt het in epoxy gedrenkte glasfiber onder spanning om de kern van schuim heen gewonden. Daardoor zal de wand van glasfiber goed gesteund worden door de kern, en kan de wand niet door plooiing bezwijken.

De bevestiging van de ankerlijn aan de boeien kan bij de met schuim gevulde kunststof boeien via de kern plaats vinden. Door de boei heen kan men een buis van glasvezelversterkt epoxy, of van staal, plaatsen waarin de aramide kabel met epoxy wordt vastgezet. Dit moet dan al op land gebeuren, zodat op zee de aramide ankerlijn alleen aan de ankerzijde kan worden vastgemaakt. Men kan ook in de kern van schuim een stalen verankeringsconstructie ingieten die de opwaartse kracht van de boei via het schuim aan de ankerlijn kan overbrengen.

Bij de holle kunststof boeien moet een aansluiting aan de buitenwand worden gemaakt van staal of van glasvezel versterkt kunststof die de opwaartse kracht kan overbrengen naar de ankerlijn. Deze aansluiting zal zwaar moeten worden uitgevoerd omdat er een kracht van 10 MN moet worden overgebracht.




Figuur 4.2.3: Glasvezelversterkte kunststof boeien

De afweging welke type boei het meest geschikt is om toegepast te worden in het Ekofisk veld zal worden gemaakt in hoofdstuk 9; de conclusies. Daarvoor zullen in hoofdstuk 8 de kosten van de verschillende constructiematerialen en constructiemethoden vergeleken worden.

## 5. DE ANKERLIJN

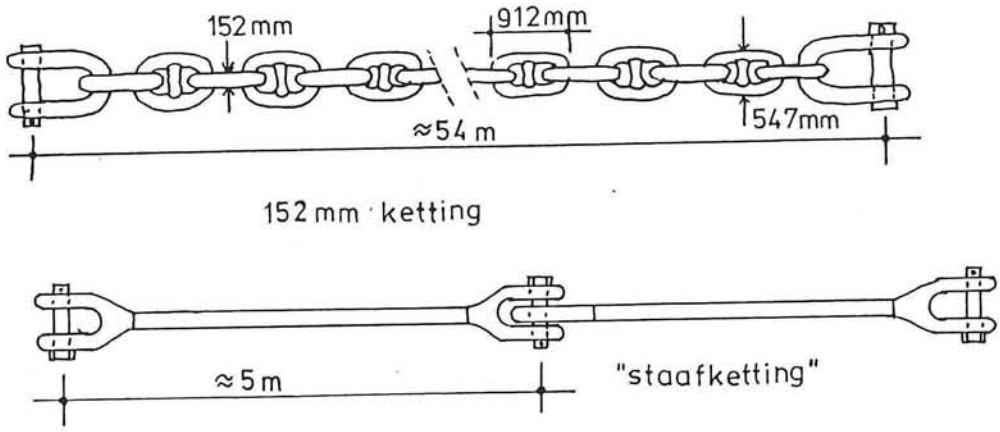
De ankerlijn moet bij boeien met een relatieve massa van 0.1 een kracht van maximaal 10 MN kunnen overbrengen. De minimale kracht in de ankerlijn is 8.2 MN. De variatie in de ankerlijnkracht is sinusvormig. De grootste variatie in de ankerlijnkracht treedt op bij golven met een grote golfhoogte en een periode van rond de 13 seconden. De kracht in de ankerlijn is als statisch te beschouwen. Theoretisch blijft de ankerlijn tijdens de beweging van de boei recht, en is er een scharnierpunt bij de zeebodem. Door de traagheid en weerstand van de ankerlijn zal dit echter niet geheel het geval zijn, en zijn er meerdere scharnierpunten nodig om momenten in de ankerlijn te vermijden. Hiervoor kunnen ankerkettingen gebruikt worden, of flexibele kunststof lijnen. De ankerkettingen kunnen uit een groot aantal gelijke schalmen bestaan, of uit meerdere rechte staven die scharnierend met elkaar zijn verbonden. De levensduur van de ankerlijnen moet zo lang mogelijk zijn, indien mogelijk 25 jaar. Anders zullen tijdens de levensduur van de golfbreker de ankerlijnen vervangen moeten worden. Bij 700 ankerlijnen is dit een kostbare zaak. De ankerlijnen zullen dus goed bestand moeten zijn tegen corrosie en slijtage.

### 5.1 Ankerkettingen

Standaard ankerkettingen zijn goed verkrijgbaar, en dus ook betaalbaar. Nadeel van deze ankerkettingen is dat er een aanzienlijke corrosie kan optreden van 1.5 mm staal per jaar. De slijtage zal wegens de kleine onderlinge beweging van de schakels beperkt blijven. De aanwezige kracht van 8.2 MN zal de ankerlijn strak houden. De volgende kettingen zijn toepasbaar:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Boeidiameter: | 12m | | 10m | | 8m | | |
| relatieve massa: | 0.1 | | 0.1 | | 0.05 | | |
| maximum kracht: | 10MN | | 6.2MN | | 3.5MN | | |
| maximum belasting: | 1020 ton | | 633 ton | | 357 ton | | |
| veiligheidsfactor: | 2 | 1.5 | 2 | 1.5 | 2 | 1.5 | |
| breakload: | 2040 | 1530 | 1266 | 950 | 714 | 536 | ton |
| kettingkwaliteit: | Super chain | Grade 3 | Grade 3 | | Grade 3 | | |
| kettingdiameter: | 152 | 157 | 142 | 120 | 100 | 87 | mm |
| kettinglengte: | 54 | 54 | 58 | 58 | 61 | 61 | m |
| kettingmassa: | 25.9 | 27.5 | 24.6 | 17.5 | 13.3 | 10.1 | ton |

In bovenstaande tabel zijn ook kettingmaten weergegeven voor boeien met een diameter van 10 en 8 meter om een kostenvergelijking in Hoofdstuk 8 mogelijk te maken. Bij standaard ankerkettingen wordt normaal voor de toelaatbare belasting een veiligheidsfactor 1.5 op de breakload toegepast. Voor een grotere veiligheid tegen bezwijken kan een hogere veiligheidfactor worden toegepast zoals 2, ook weergegeven in de tabel, of zelfs 3. Bij een veiligheidsfactor 3 is echter voor de boei met een diameter van 12 meter en een relatieve massa van 0.1 geen standaard ankerketting meer verkrijgbaar. Kettingen met een diameter van meer dan 165 mm kunnen wel in opdracht worden vervaardigd. Er is in bovenstaande tabel geen rekening gehouden met corrosie. De kettingdiameter zal zonder bescherming corrosie vertonen wat gecompenseerd kan worden door een grotere kettingdiameter te kiezen. Voor een levensduur van 25 jaar is de benodigde kettingdiameter dan groot, zodat de ankerkettingen na 10 jaar wel vervangen zullen moeten worden. Als er in plaats van ketting langere staafgedeelten in de ankerlijn worden toegepast van ongeveer 5 meter lengte dan kan er kathodische bescherming worden toegepast. (Zie ook figuur 5.1.1). Een ketting bestaande uit lange staven zal minder practisch zijn bij de installatie van de boeien dan een ketting bestaande uit schakels.



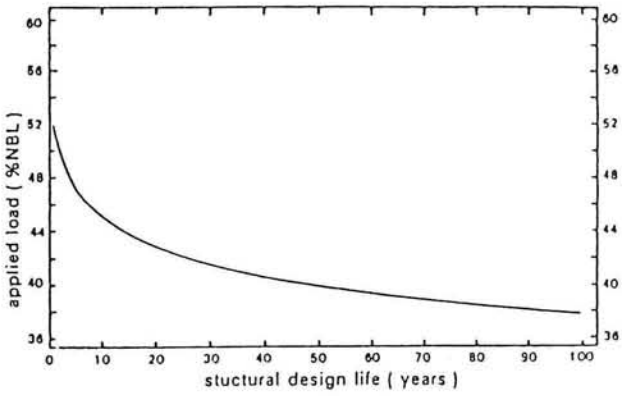

Figuur 5.1.1: Twee soorten stalen ankerlijnen

## 5.2 Kunststof ankerlijnen

Nylon en polyester ankerlijnen komen niet in aanmerking wegens hun geringe levensduur. Wel zijn er nieuwe materialen ontwikkeld zoals Twaron en Kevlar die een zeer grote treksterkte hebben. Kevlar en Twaron ankerlijnen bestaan uit aramide vezels. Deze materialen zijn ook bestand tegen inwerking van het zeewater. Een levensduur van 25 jaar is mogelijk. Lange duur toepassingen in zeewater zijn er nog niet geweest. Wel zijn er kabels van polyester vezels met 5 ton breeksterkte als stagen voor 37.5 meter lange masten in lucht getest over een periode van 20 jaar zonder dat er één bezweken is, en zonder dat de eigenschappen van de kabels achteruit zijn gegaan. Twaron en Kevlar zijn kostbare materialen, ze hebben echter een grote stijfheid en sterkte en een laag gewicht. Standaard Kevlar ankerlijnen zijn verkrijgbaar tot een diameter van 96 mm en een gegarandeerde minimum breeksterkte van 418 ton. Bij de 12 meter boei is de maximum belasting 1020 ton, er zal dan een ankerlijn van rond de 200 mm doorsnede nodig zijn. De ankerlijn van 96 mm heeft een massa van slechts 648 kg per 100 meter. De massa van een ankerlijn van 200 mm diameter en een lengte van 54 meter zal slechts 1.5 ton bedragen. De hogere kosten per kg kunnen dus worden gecompenseerd door de kleinere massa.

In 1983 zijn al aramide kabels toegepast bij de Lena Guyed Tower met een breeksterkte van meer dan 13 MN en een diameter van 127 mm. Bij een proef met een 185 mm diameter proefstuk werd een breeksterkte van 26.5 MN bereikt. De treksterkte van de aramide vezel van het type G is in de orde van 2000 $N/mm^2$, de E modulus is ongeveer 120 $kN/mm^2$. De dichtheid van aramide is 1440 kg per kubieke meter. In de kabels die voor de boeien kunnnen worden toegepast kunnen de vezels parallel lopen omdat er geen buiging zal optreden. Er kan dan optimaal worden gebruik gemaakt van de treksterkte van de aramidevezel.

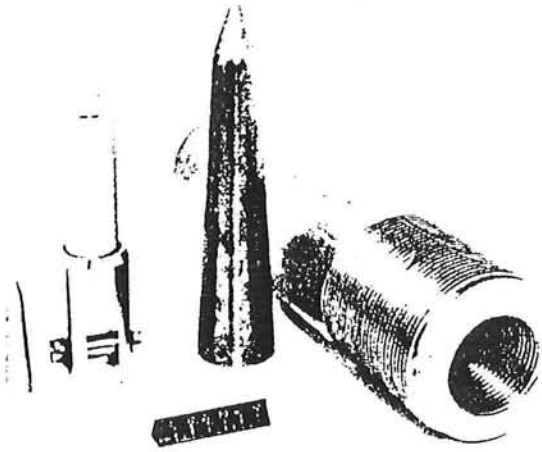
De levensduur van de aramide kabels in zeewater hangt af van de belasting die wordt aangebracht. Bezwijken van de aramide kabel kan na verloop van tijd optreden tengevolge van kruip. Bij een constante belasting en een kans op bezwijken van $1 * 10^{-6}$ kan een levensduur van 25 jaar worden gehaald bij een belasting van 42 procent van de breeksterkte. Bij een belasting van 40 procent van de breeksterkte is een levensduur van 50 jaar mogelijk. Dit is gebleken uit experimenten met Kevlar 49 vezels (type G) ingebed in epoxyhars, over een periode van 15 jaar. (Zie ook figuur 5.2.1).




Figuur 5.2.1: Levensduur van Parafil type G kabels als functie van de aangebrachtte belasting bij een kans op bezwijken van 10

N.B.L. is de bezwijkbelasting

De aansluiting van de Kevlar ankerlijn op de boei en de verankering zal op een speciale wijze moeten gebeuren omdat de aramide kabels alleen in de vezelrichting een grote kracht kunnen opnemen, en niet haaks daarop. Gedacht kan worden aan een aansluiting zoals die wordt gemaakt bij stalen voorspankabels, met een kegelvormige wig. (Zie ook figuur 5.2.2).



6 tonne and 60 tonne Parafil terminals

Figuur 5.2.2: Aansluitingen van de aramide kabels

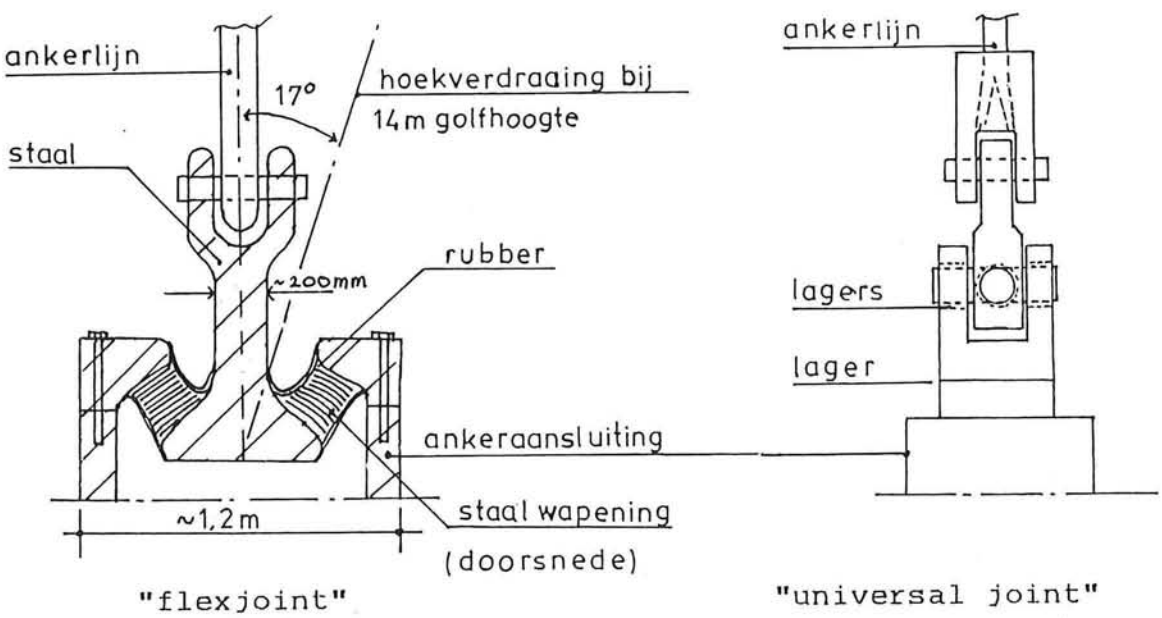
De keuze over het toe te passen type ankerlijn wordt in hoofdstuk 9 gedaan (de conclusies). In hoofdstuk 8 vindt nog een kostenvergelijking plaats.

## 5.3 Aansluiting van de ankerlijn op de verankering en de boei

De aansluiting van de ankerlijn op de verankering moet 10 MN kracht over kunnen brengen. De aansluiting moet daarbij ook een draaibeweging in het verticale vlak over een hoek van 60 graden kunnen maken, en, indien men torsie in de ankerlijn wil vermijden, een draaibeweging in het horizontale vlak over 360 graden. Torsie in de ankerlijn kan ontstaan doordat de boei tijdens zijn horizontale beweging kan gaan roteren. Men kan deze rotatie echter ook op laten nemen door de ankerlijn zelf.

De ankerlijn staat onder een grote voorspanning en zal daardoor elke verdraaing willen tegenwerken. Er zal altijd tenminste 8.2 MN kracht op de aansluiting staan.

De boeien zullen bij aanwezigheid van golven altijd in beweging zijn, daarom zal de aansluiting ook goed tegen slijtage bestand moeten zijn. De levensduur moet ook zo groot mogelijk zijn, indien mogelijk 25 jaar. Bij gebruik van standaard aansluitingen van ankerkettingen op ankers, zoals harpsluitingen zullen problemen optreden met slijtage. Er zijn dan sluitingen met grote diameters nodig. De ankerlijn zal dan voor de installatie van het anker al aan het anker bevestigd moeten worden. Er bestaan ankerlijn aansluitingen voor boeien uitgerust met kogellagers in geheel gesloten uitvoering gevuld met olie voor toepassing in zeewater. Ook zijn er scharnieren met zelfsmerende glijlagers. Dit type wordt een universal joint genoemd en wordt veel toegepast bij single anchor leg moorings (S.A.L.M.'s) en articulated loading platforms (A.L.P.'s). Men kan ook denken aan flexibele koppelingen uitgerust met rubber zoals ook toegepast bij de verankering van tension leg platforms. (Zie ook figuur 5.3). Deze hebben een lange levensduur en kunnen een grote belasting opnemen bij een grote bewegingsvrijheid. Ze zijn wel technisch gecompliceerd, en dus ook kostbaar.




Figuur 5.3: Aansluiting van de ankerlijn op de verankering

De aansluiting van de ankerlijn op de boeien zal minder problemen opleveren. Theoretisch loopt de ankerlijn in een rechte lijn naar het middelpunt van de boeien. Een ankerketting kan met een oog en een pen met een grote diameter op de stalen boeien worden aangesloten zoals ook weergegeven is in figuur 4.1.1. Deze aansluiting zal nauwlijks bewegen en dus ook geen noemenswaardige slijtage vertonen. Draaibewegingen van de boeien in het horizontale vlak kunnen worden opgenomen door de aansluiting op de verankering.

De keuze tussen de twee types wordt gedaan in hoofdstuk 9.

# 6. DE VERANKERING

De horizontale en verticale kracht uit de ankerlijn moeten worden overgebracht naar de zeebodem. Het anker moet zowel een grote vrijwel statische verticale trekkracht als een grote dynamische horizontale kracht kunnen overbrengen naar de zeebodem. Het anker moet ook makkelijk te plaatsen zijn gezien het grote aantal boeien wat moet worden geinstalleerd.

## 6.1 De bodemgesteldheid in het Ekofisk veld

De bodemgesteldheid in het gebied rond het Ekofisk veld vertoont een geringe variatie over het veld. In deze paragraaf wordt de gemiddelde bodemgesteldheid in het Ekofisk veld weergegeven.

De volgende bodemlagen zijn aanwezig.

Van 0 tot 20 meter beneden de zeebodem:

"fine and silty fine gray sands"; "dense"; $\phi$ = 35 - 38°; droog gewicht 16.3 kN/m3; watergehalte 22 - 33 procent; nat gewicht 19.5 kN/m3; gewicht onder water 9.4 kN/m3; coëfficiënt van de horizontale korrelspanningen: $K_o$ = 0.7; wandwrijvingshoek $\delta$ = 30°; conusweerstand vanaf 1 tot 20 meter onder de zeebodem ≈ 20 MN/m²; kleef ≈ 80 kN/m².

Van 20 tot 40 meter beneden de zeebodem:

"hard gray clay"; gewicht onder water 9 kN/m3; $c_u$ = 70 kN/m²

Van 40 tot 60 meter beneden de zeebodem:

"dense gray sand"; $\phi$ = 38°; gewicht onder water 10 kN/m3.

$\phi$ : de inwendige wrijvingshoek van de grond
$c_u$ : de cohesie van de klei (ongedraineerd)

## 6.2 Verankeringsmethoden

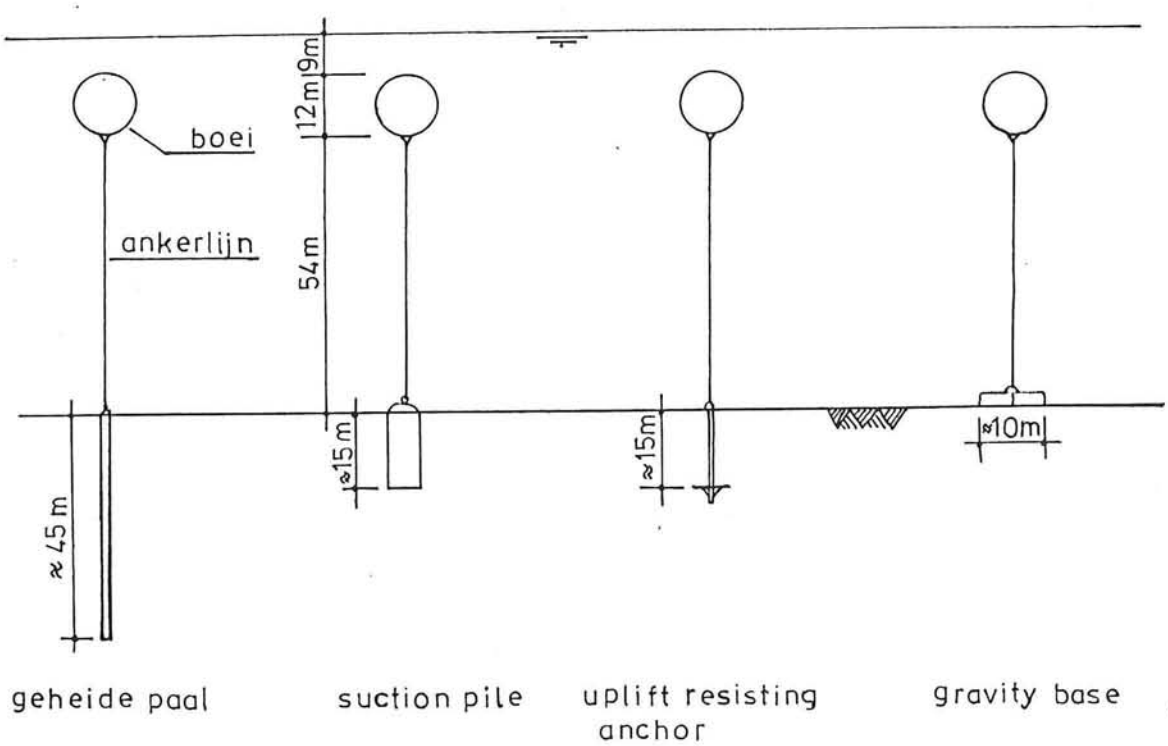
De boeien kunnen op meerdere wijzen worden verankerd. Verankering kan gebeuren door middel van geheide palen, grondankers en "suction piles" of combinaties van de drie. Nog een mogelijkheid is om een "gravity base" toe te passen, waarbij de verticale opwaartse kracht geheel door het gewicht van het anker wordt opgenomen. De horizontale belasting wordt via skirts naar de zeebodem overgebracht. Omdat de verankering een grote trekkracht moet kunnen opnemen is bij de geheide palen een aanzienlijke lengte nodig. De grootte van de op te nemen trekkracht is ook bij de "suction piles" van grote invloed op de afmetingen. De grondankers, of "uplift resisting anchors" kunnen bij kleine lengte afmetingen al grote verticale trekkrachten opnemen. De verankering moet echter ook een grote horizontale kracht kunnen opnemen.

De grondankers en geheide palen zijn hier minder voor geschikt door hun geringe buigstijfheid in het horizontale vlak. De "suction piles" zijn door hun grote afmetingen in het horizontale vlak zeer stijf en kunnen daardoor een grote horizontale kracht opnemen, groter dan de verticale opneembare trekkracht.

Geheide palen en grondankers moeten beiden ingeheid worden, in tegenstelling tot de "suction piles" die door de waterdruk de bodem in gedreven worden. De installatietijd zal door de dichte zandlaag bij de paal en grondankers ook duidelijk hoger zijn dan bij de "suction piles", dit zal kostenverhogend werken.

Bij de "gravity base" verankering wordt een stalen doosconstructie gebruikt die na plaatsing op de zeebodem wordt geballast, met ijzererts of bariet. Per verankering is meer dan 1000 ton ijzererts nodig wat per ertstanker aangevoerd moet worden. De installatiekosten zullen bij dit type anker dan ook groot zijn.

Dit laatste type verankering komt in dit verslag verder niet meer aan de orde. Nadere informatie staat in het boek Single Point Moorings van R. Maari. (Zie ook referenties, bijlage 2).




Figuur 6.2: Verschillende verankeringsmethoden

6.2.1 Geheide paal ankers

De maximale verticale kracht die moet worden opgenomen is 8.6 MN, de maximale horizontale kracht die moet worden opgenomen is ongeveer 4 MN. Met de "A.P.I. rules" kan men nu de benodigde paalafmetingen bepalen: (Voor de volledige berekening zie bijlage 3)

Voor een 60" paal, diameter 1.52 meter, 50 meter lang volgt:

Bij een wanddikte van 50 mm is het massa van de paal: 93.7 ton; de massa onder water is 81.4 ton of 797.7 kN. Het gewicht van de grondplug in de paal wordt verwaarloosd. De gewenste "ultimate pull out capacity" wordt nu bij toepassing van een veiligheidsfactor 1.5 ("design environmental loads"): (8.6-0.798) * 1.5 = 11.7 MN

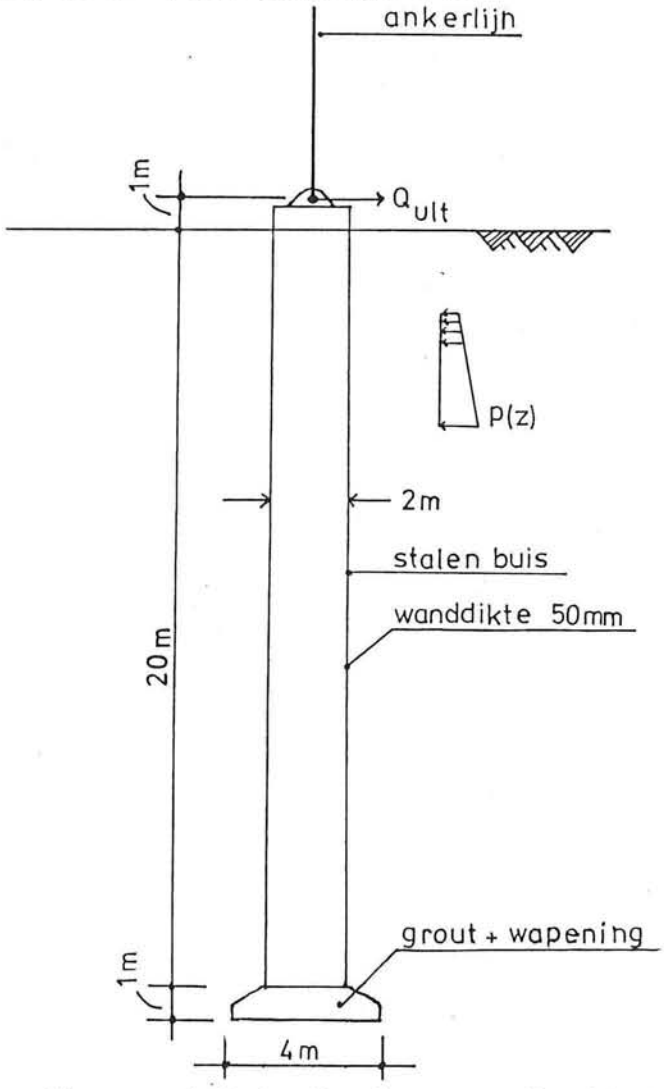
De "ultimate pull out capacity" van deze paal in de bodem van het Ekofisk veld is volgens berekeningen aan de hand van de A.P.I regels 11.74 MN.

Een 60" paal van 50 meter lengte voldoet dus om de verticale kracht op te nemen. Voor het opnemen van de horizontale belasting is de stijfheid van de paal van belang. Bij een diameter van 1.52 meter, een wanddikte van 50 mm en een horizontale belasting van 4 MN wordt de horizontale verplaatsing bij de paalkop 0.4 meter. Dit is veel, de uitwijking kan worden verminderd door een grotere paaldiameter toe te passen, of een grotere wanddikte over de bovenste 22 meter. Een grotere diameter paal toepassen is daarbij het effectiefste.

Een paal van 2 meter diameter met een wanddikte van 50 mm geeft bij een horizontale belasting van 4 MN een horizontale uitwijking van de paalkop van 0.12 m. Om de verticale belasting met een veiligheidsfactor 1.5 op te kunnen nemen is een lengte van 45 meter vereist. De massa van een dergelijke paal is 111 ton. Om een paal van 2m diameter 45 meter de bodem in te heien zijn grote heihamers nodig. De paal zal dan met onderwaterhamers geheid moeten worden.

Men kan ook gebruik maken van een "underreamed pile", een paal waarvan aan de voet door grouting een voetplaat wordt gemaakt. De paal wordt eerst de bodem ingeheid, waarna hij wordt uitgeboord en met een speciale boor de ruimte bij de voet wordt geboord. In deze ruimte moet wapening worden geplaatst waarna hij kan worden volgegrout. (Zie ook figuur 6.2.1). De verticale belasting kan dan op dezelfde wijze als bij een gróndanker worden overgebracht naar de zeebodem. Bij een paallengte van 20 meter, een paaldiameter van 2 meter en een diameter van de voet van 4 meter kan maximaal een verticale belasting van 37 MN worden opgenomen. Er is dan een grote veiligheid op de verticale belasting. Men kan de toelaatbare belasting via twee methoden benaderen; bij de eerste methode beschouwd men de paal onderaan als ingeklemd, en bij de tweede methode beschouwd men de paal als oneindig stijf.

De werkelijkheid zal hier tussen inliggen. De paal heeft een eindige lengte en dwarsdoorsnede. Hij zal onderaan niet geheel ingeklemd zijn, en zal onder horizontale belasting ook enige buiging vertonen. Via de eerste methode komt men op een horizontale verplaatsing van de paalkop van 0.116 meter bij een belasting van 4 MN. Bij de tweede methode werken er krachten op de paal zoals weergegeven in figuur 6.2.1. De paal zal dan een punt hebben bij de voet waarom hij heen draait. Uit het momentenevenwicht van de krachten bij volledig gemobiliseerde passieve gronddruk kan men dan de toelaatbare horizontale belasting bepalen: (Zie bijlage 3).




Figuur 6.2.1: "underreamed pile"

Uit de berekeningen volgt dan voor de maximaal toelaatbare horizontale belasting op de paalkop:

$$Q_{ult} = 4544.6 \text{ kN}$$

Het uit de benaderingen blijkt dat de maximaal toelaatbare horizontale paalbelasting ongeveer 4 MN is.

De "underreamed pile" met een totale lengte van 21 meter, een diameter van 2 meter en een wanddikte van 0.05 meter heeft een massa van 51.8 ton.

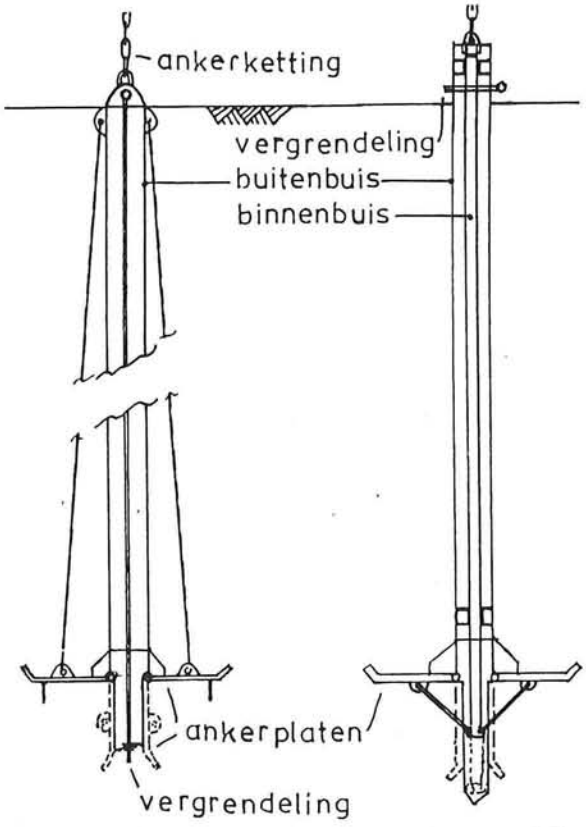
Het nadeel van een dergelijke type verankering is dat de installatie nogal veel werk kost. Het heien van een paal van 20 meter is makkelijker dan van een paal van 45 meter, het uitboren, wapening plaatsen, en grouten is echter een ingewikkelde procedure. Ook moet dan het aansluitpunt van de ankerlijn op de ankerpaal nog worden gerealiseerd.

### 6.2.2 Uplift resisting anchors (Grondankers)

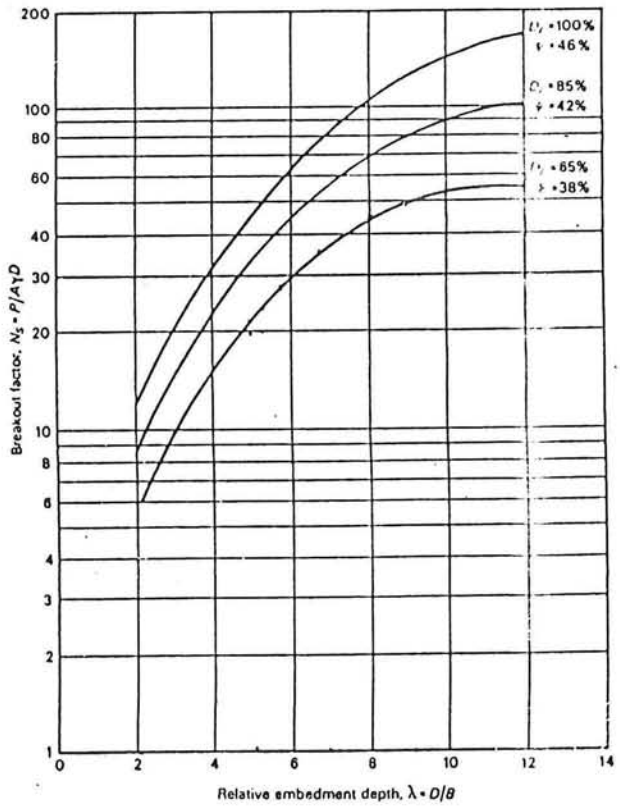
De "uplift resisting anchors" kunnen bij kleine afmetingen grote verticale krachten opnemen. Zij zijn uitgerust met een mechanisch systeem om de verankeringsplaten tijdens het inheien te ontgrendelen en uit te klappen. De verticale ankerkracht kan dan zowel met een trekstaaf als met kettingen worden overgebracht naar de ankerplaten zoals is weergegeven in figuur 6.2.2.1 De kracht die kan worden opgenomen hangt af van een aantal factoren. Dit zijn: de relatieve inbeddingsdiepte $\lambda = D'/B$, waarbij D' de inbeddingsdiepte is en B de dwarsafmeting is van de ankerplaat, de afmetingen van het anker en de bodemplaat, De hoek van inwendige wrijving van de grond en het gewicht van de grond. De uiterste statische houdtkracht van een grondanker in cohesieloze grond kan met de volgende vergelijking berekend worden:

$$P = A\gamma' D' N_s \qquad (6.2.2.1)$$

A is het oppervlak van de ankerplaat, $\gamma'$ is het gewicht van de grond onder water, D' is de diepte van de ankerplaat en $N_s$ is de "break out factor". Deze "break out factor" kan uit grafiek 6.2.3 bepaald worden.




Figuur 6.2.2.1: 2 soorten grondankers

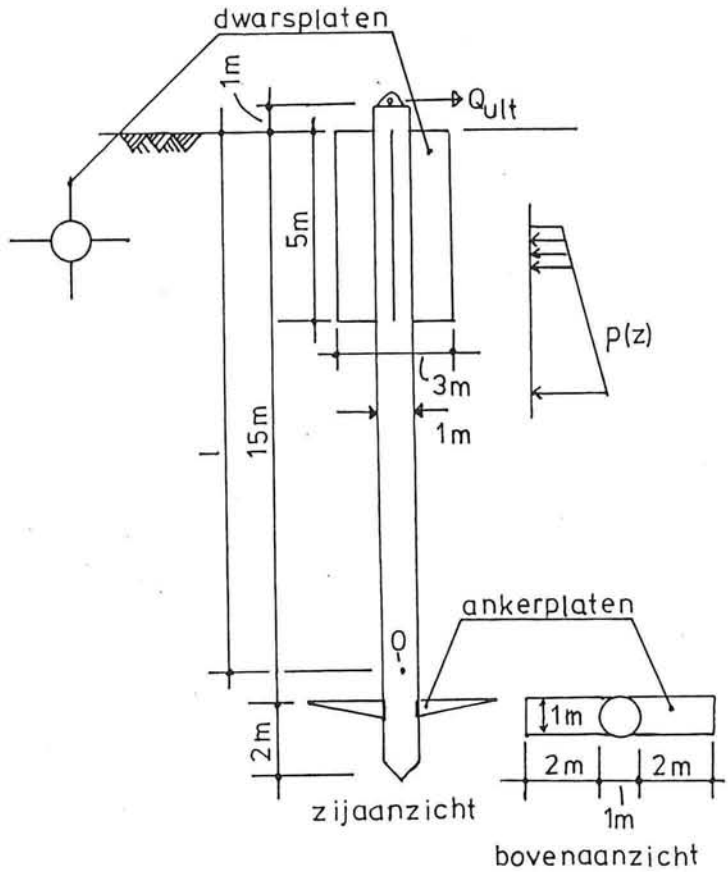



Figuur 6.2.2.2: "break out factor" als functie van de inbeddingsdiepte

Als men een anker neemt met de ankerplaat 15 meter beneden de zeebodem, bestaande uit twee uitklapbare platen van 2 meter lengte en 1 meter breedte met een totaal oppervlak van 4 m² volgt:

$\lambda$ = D/B = 15/1 = 15; $\phi$ = 35°; uit figuur 6.2.3: $N_s$ = 45;
$\gamma'$ = 9.4 kN/m3; A = 4 m²; P = 25.38 MN.

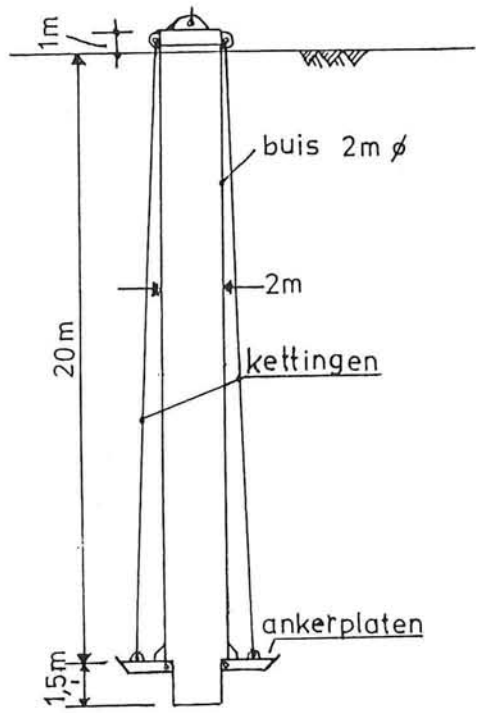
Er is dus een veiligheidsfactor aanwezig van: 25.38/8.6 = 2.95 voor de belasting die het anker kan opnemen. Dit anker is voldoende veilig om de verticale belasting op te kunnen nemen. (Een uitgebreide berekening staat in bijlage 4). De horizontale belasting moet ook nog opgenomen kunnen worden. Dit geeft bij smalle dwarsafmetingen van het anker problemen. Bij gebruik van een buis van 1 meter diameter kan men het anker eerst beschouwen als onderaan ingeklemd. Bij een wanddikte van 50 mm volgt uit de vergelijkingen B.1.6 en B.1.7 (bijlagen) dat bij een horizontale belasting op de ankerkop van 4 MN een verplaatsing van de ankerkop van 2.63 m optreedt !. Een horizontale belasting van 2 MN geeft een verplaatsing van 0.47 m. Als men het anker als een stijf geheel beschouwd, en kijkt naar het momenten evenwicht om de kop van het anker dan volgt als maximum toelaatbare horizontale belasting 1393 kN, dit is te weinig. Als men nu over de bovenste 5 meter van het grondanker platen bevestigt van 1 meter breedte zodat de totale breedte van de ankerschacht 3 meter wordt, (zie ook figuur 6.2.2.3), dan neemt de maximum toelaatbare horizontale belasting toe tot 1921 kN, dit is nog steeds te weinig. (Berekening in bijlage 4).



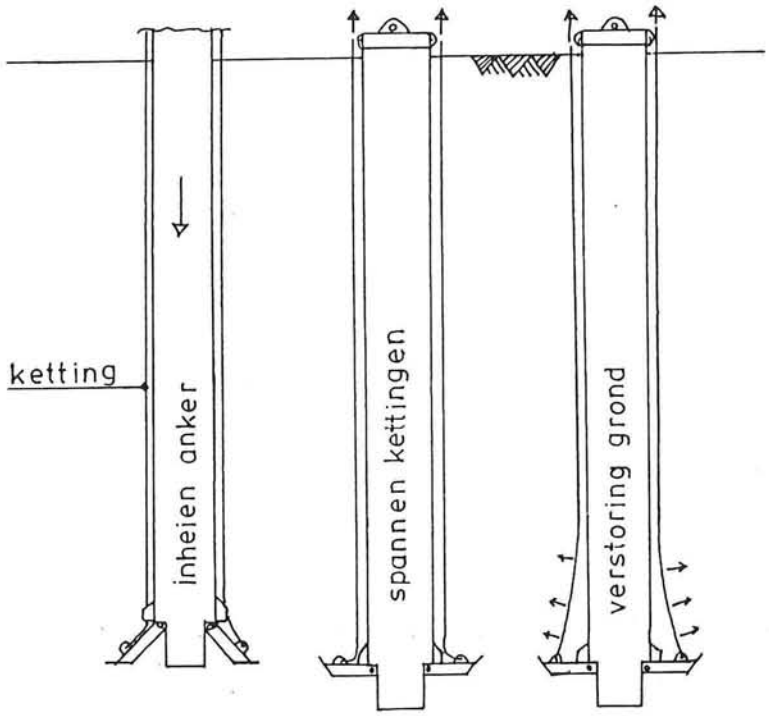

Figuur 6.2.2.3: grondanker met dwarsplaten

Door het aanbrengen van de dwarsplaten bovenaan komt het punt waar het anker om heen gaat draaien bij een horizontale belasting omhoog, richting de zeebodem. Hierdoor wordt het positieve effect van deze platen weer enigszins te niet gedaan. Het probleem dat het grondanker niet voldoende horizontale kracht kan overbrengen wordt veroorzaakt doordat vlak bij de zeebodem waar de horizontale kracht aangrijpt de toelaatbare horizontale korrelspanningen vrij laag zijn. Men moet dus of dicht bij de zeebodem een groot oppervlak realiseren wat de horizontale kracht kan overbrengen naar de zeebodem, of men moet de ankerschacht stijf en breed genoeg maken zodat de horizontale kracht overgebracht kan worden naar de diepere lagen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door de schacht van het grondanker de dimensies te geven zoals genoemd bij de "underreamed pile". Namelijk een lengte van 20m beneden de zeebodem en een diameter van 2 meter en een wanddikte van 0.05 meter. De horizontale kracht van 4 MN kan dan overgebracht worden. De ankerplaten bevinden zich dan op 20 meter beneden de zeebodem zodat ook met een kleiner oppervlak kan worden volstaan. D/B wordt 20 bij B gelijk aan 1 meter, $N_s$ blijft 45, bij gelijke A zou P 1.33 maal zo groot worden. A kan dus 1.33 maal zo klein worden, namelijk 3 vierkante meter. De afmetingen van de ankerplaten worden dan 1 bij 1.5 meter. (Zie ook figuur 6.2.2.4). De massa van een dergelijk anker is ongeveer 60 ton.

Het uitklapsysteem voor de ankerplaten met kettingen zal in de dichte zandlaag problemen geven, omdat de kettingen zich tijdens het inheien langs de ankerschacht bevinden, ook als de ankerplaten door het inheien zich in uitgeklapte toestand bevinden. Om kracht op te kunnen nemen moeten de kettingen gespannen worden, waarna ze aan de bovenzijde van de ankerschacht vastgemaakt kunnen worden. Voor dit spannen zal een grote kracht vereist zijn, waarbij de kettingen door het zand heen worden getrokken. Hierdoor zal ook een verstoring van de grond boven de ankerplaten ontstaan. Het systeem met de trekstaaf is in deze dichte zandgrond beter geschikt. (Zie ook figuur 6.2.2.5).



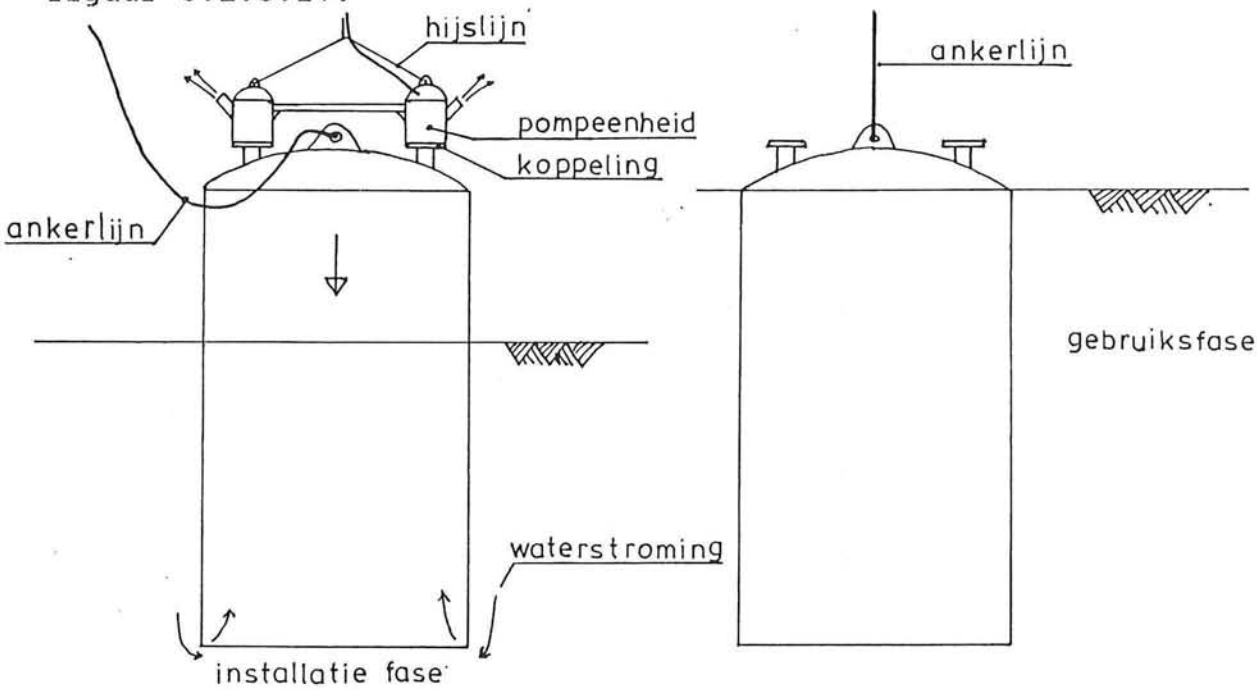

Figuur 6.2.2.4: grondanker met grote afmetingen




Figuur 6.2.2.5: Installatieproblemen bij het grondanker

### 6.2.3 Suction piles

Suction piles zijn buizen met een grote diameter met een open onderzijde, en een gesloten bovenzijde. De suction pile wordt voor zijn installatie met een kraan op de zeebodem geplaatst. Door zijn eigengewicht zakt hij een klein stuk de zeebodem in. Bovenop de suction pile bevindt zich een pomp waarmee het water uit de suction pile weggepompt kan worden. Daardoor ontstaat er een overdruk aan de buitenzijde van de suction pile. Door deze overdruk wordt de suction pile de zeebodem ingedrukt. (Zie ook figuur 6.2.3.1).




Figuur 6.2.3.1: de suction pile

De maximale druk die geleverd kan worden om de suction pile te installeren hangt af van de waterdiepte via de vergelijking:

$$\Delta P_{max} = \{z + 10m - (L - H)\} * \gamma_w * g \qquad (6.2.3.1)$$

z is de waterdiepte, L is de lengte van de suction pile, H is de penetratiediepte, $\gamma_w$ is het soortelijk gewicht van zeewater en g is de versnelling van de zwaartekracht. Voor een waterdiepte van 70 meter en een suction pile die 1 meter boven de zeebodem uitsteekt volgt:

$$\Delta P_{max} = 797.4 \text{ kN/m}^2$$

Uit de maximale penetratieweerstand van de suction pile kan het benodigde opervlak van de bovenzijde van de suction pile, en dus zijn diameter berekend worden. De verticale houdtkracht kan worden berekend met de A.P.I. regels. De wandwrijving aan de binnenzijde van het anker wordt daarbij verwaarloosd omdat het zand aan de binnenzijde van het anker verstoord is door de installatie. Bij installatie in zandlagen zal er een waterstroom ontstaan onder de rand van de suction pile door, waardoor aan de binnenzijde van de suction pile de korrelspanning verlaagd wordt.

Hierdoor wordt de wandwrijving aan de binnenzijde tijdens de installatie vrijwel tot 0 gereduceerd. Voorkomen moet echter worden dat de korrelspanningen 0 worden omdat de pomp dan ook zand gaat verpompen waardoor verstopping kan optreden.

De verticale houdtkracht kan als volgt worden berekend:

$$P = \pi D H f = \pi D K_o \int_0^H p'(z)\,dz \tan\delta; \quad p' = \gamma' z \qquad (6.2.3.2)$$

D is de diameter van de suction pile, H is de penetratiediepte, $K_o$ is de coëfficiënt van de horizontale korreldruk, in dit geval 0.5, p' is de verticale korreldruk, $\delta$ is de wrijvingshoek langs de wand van de suction pile gelijk aan 30°. Bij een suction pile van 8 meter diameter en 18 meter lengte wordt P: 11.05 MN. Het blijkt dat er bij berekening volgens de A.P.I. rules grote afmetingen nodig zijn om voldoende verticale kracht te kunnen opnemen. Bij een suction pile van 8 meter diameter en 18 meter lengte en een wanddikte van 0.035 meter is de massa van het anker boven water 185 ton, onder water 160 Ton, of 1.57 MN. De grond moet kunnen opnemen: 8.6 - 1.57 = 7.03 MN, met een veiligheidsfactor 1.5 dus 10.55 MN. Het anker kan 11.05 MN op de zeebodem overbrengen, en voldoet dus.

Voor de penetratie weerstand kan worden gerekend met de regels van Det Norske Veritas voor penetratie van stalen skirts van gravity platforms. De penetratieweerstand kan als volgt geschreven worden:

$$R = k_p(d) A_p q_c + A_s \int_0^d k_f(z) q_c(z)\,dz \qquad (6.2.3.3)$$

d : penetratiediepte van het anker, m
$q_c(z)$ : conusweerstand in MN/m²
$A_p$ : puntoppervlak van het anker, m²
$A_s$ : buitenoppervlak van het anker per eenheid van penetratie, m²/m
$k_p(z)$ : empirische coëfficiënt die $q_c$ relateert aan de puntweerstand
$K_f(z)$ : empirische coëfficiënt die $q_c$ relateert aan de wandwrijving

Voor dicht zand in de Noordzee volgt voor de coëfficiënten:

| Meest waarschijnlijke | | Hoogst verwachtte | |
|---|---|---|---|
| $k_p$ | $k_f$ | $k_p$ | $k_f$ |
| 0.3 | 0.001 | 0.6 | 0.003 |

Voor de bovenste 1.5 meter van de zeebodem kunnen 50 procent lagere waarden worden genomen. De bodem in het Ekofisk veld kan geschematiseerd worden met een conusweerstand van 5 MN/m² voor de bovenste 1.5 meter, en een conusweerstand van 20 MN/m² 1.5 tot 20 meter beneden de zeebodem.

Voor de berekening van puntweerstand en wandwrijving bij de installatie worden in dit verslag de maximum waarden van de coëfficiënten gebruikt. De waarden voor de coëfficiënten die zijn gemeten in praktijksituaties blijken onder deze maximum waarden te zitten.

Voor een anker met een doorsnede van 8 meter, een lengte van 18 meter en een wanddikte van 0.035 meter wordt de hoogst verwachtte weerstand bij volledige penetratie dan 36 MN. De kracht die geleverd kan worden door de waterdruk bij een diameter van 8 meter is 40 MN, dit is dus voldoende om de volledige penetratie te bereiken.

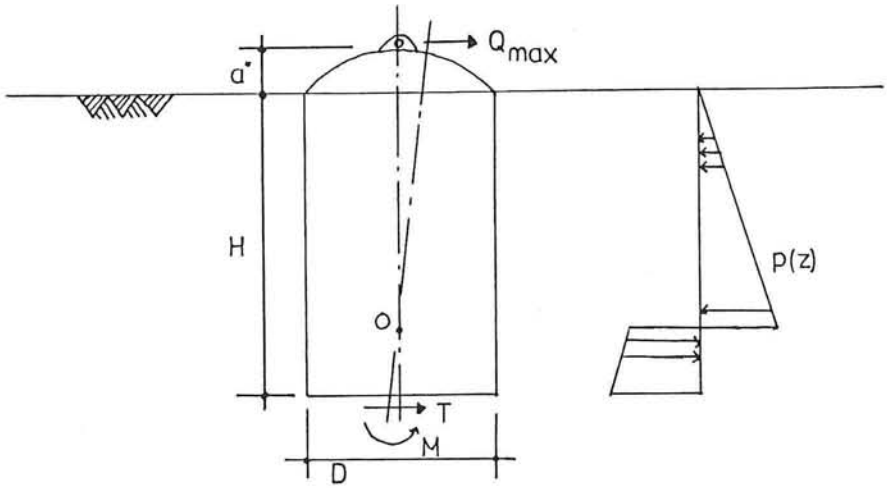
Men kan een "toe jetting" systeem toepassen om de puntweerstand van het anker te reduceren. de "jets" worden dan aan de binnenkant van het anker aangebracht zodat de grond aan de buitenzijde van het anker niet verstoord wordt. (Wat van groot belang voor de houdtkracht is). De maximale voetweerstand die optreedt bij de suction pile van 8 meter diameter is 10.6 MN. Als die tot 0 kan worden teruggebracht kan een kleinere diameter paal met een grotere penetratiediepte worden toegepast wat een besparing op de massa van het anker oplevert. Een suction pile met een diameter van 6.5 meter, en een lengte van 20 meter heeft zonder voetweerstand een maximale penetratieweerstand van 23.1 MN. De maximale indrijvende kracht die geleverd kan worden is 26.5 MN, dat is dus voldoende. De verticale houdtkracht is dan 11.1 MN. De massa van het anker boven water is 160 ton, en onder water 139 ton, het gewicht dus 1.36 MN. De grond moet dus opnemen: 8.6 - 1.36 = 7.24 MN, met een veiligheidsfactor 1.5: 10.86 MN. Dit anker voldoet dus ook.

De maximale horizontale kracht die het anker kan opnemen kan met de volgende vergelijking goed worden berekend:

$$Q_{max} = \frac{\gamma' D H'^3 K_p}{2(a + H')} \quad ; \quad K_p = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \qquad (6.2.3.4)$$

$\gamma'$ : gewicht van de grond onder water
D : diameter van het anker
H : penetratiediepte van het anker
a' : hoogte van het aangrijpingspunt van de horizontale kracht boven de zeebodem
$K_p$ : coëfficiënt van de passieve horizontale korrelspanningen
$\phi$ : hoek van inwendige wrijving van de grond

Deze vergelijking is gebaseerd op het momentenevenwicht om het aangrijpingspunt van de horizontale kracht. (Zie ook figuur 6.2.3.2). Daarbij is aangenomen dat de paal oneindig stijf is, wat bij de grote diameters van de suction piles ook een goede aanname is. Vergelijking 6.2.3.4 blijkt ook in de praktijk goed te voldoen. Voor het anker met een diameter van 8 meter en een lengte van 18 meter is de maximale horizontale kracht die het anker kan opnemen als het aangrijpingspunt zich 3 meter boven de zeebodem bevindt: 38.6 MN. Voor het anker van 6.5 bij 20 meter volgt voor de maximale horizontale kracht: 39.3 MN.



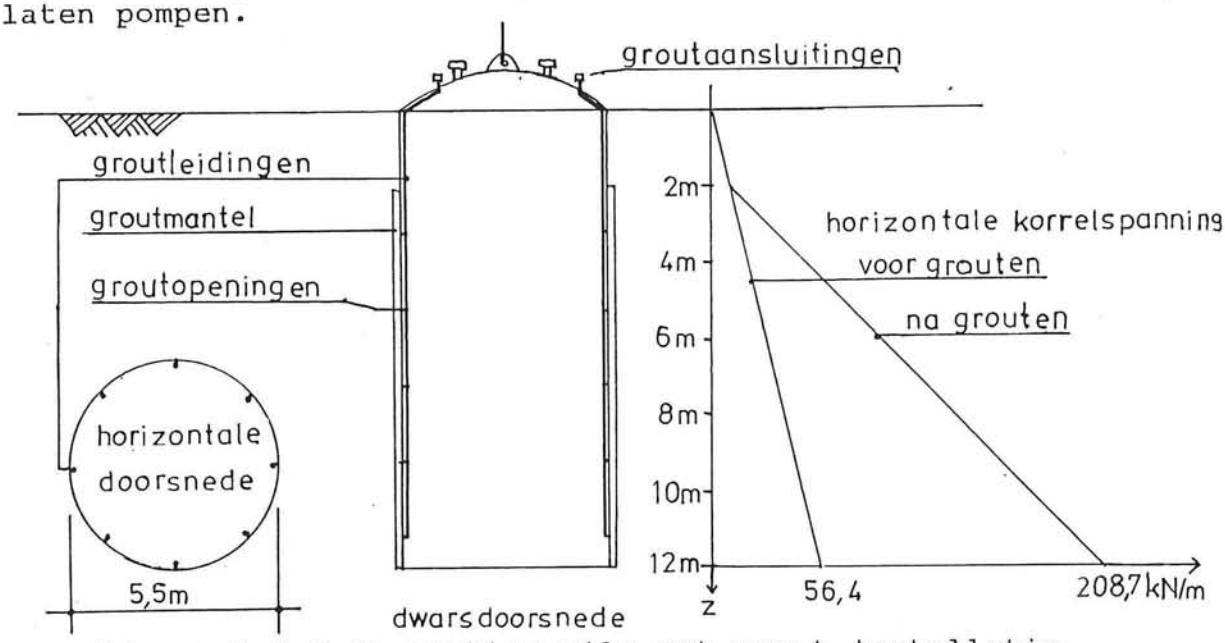

Figuur 6.2.3.2: krachtswerking op de suction pile

Het blijkt dat de suction piles een duidelijk grotere horizontale als verticale kracht kunnen opnemen. Bij een horizontale belasting van 4 MN zullen geen merkbare verplaatsingen optreden, de horizontale belasting zal geen invloed hebben op de toelaatbare verticale belasting.

Een manier om bij kleinere afmetingen van de suction piles toch een hoge toelaatbare verticale kracht op te kunnen nemen kan het door grouting verhogen van de horizontale korrelspanningen zijn. Men kan deze neutrale horizontale korrelspanningen na de installatie van het anker door het onder druk injecteren van grout verhogen tot maximaal de passieve horizontale korrelspanningen. De horizontale belasting moet echter ook nog kunnen worden opgenomen, er moet dus enige toename van de horizontale korrelspanningen mogelijk zijn zonder dat bezwijken van de grond optreedt. Men kan een suction pile nemen van 12 meter lengte, 5.5 meter diameter en een wanddikte van 30 mm. Als men dan over de onderste 10 meter van de suction pile de horizontale korrelspanning verhoogt tot 1/2 X de passieve korrelspanningen kan het anker over die 10 meter 12.15 MN overbrengen. Het zelfde anker zou zonder grouting 3.38 MN aan verticale belasting kunnen overbrengen. De maximale horizontale korrelspanning bij de voet van het anker wordt na het grouten 208.7 kN/m², 0.21 N/mm². Als de groutinstallatie 0,5 N/mm² kan leveren is dat ruim voldoende. (Zie ook figuur 6.2.3.3). De massa van een dergelijke suction pile boven water is 70 ton, onder water 60.8 ton, het gewicht 596 kN. Het anker moet kunnen overbrengen: 8.6 - 0.596 = 8.0 MN. Met een veiligheidsfactor 1.5: 12 MN. Het anker voldoet dus. De maximale voetweerstand bij installatie is 6.22 MN, de maximale wandwrijving 11.08 MN. Samen 17.3 MN. De maximale indrijvende kracht die kan worden geleverd is 18.9 MN, dus voldoende.

De horizontale kracht die opgenomen kan worden kan weer worden berekend met vergelijking 6.2.3.4, alleen moet $K_p$ vervangen worden door 1/2 $K_p$ .De suction pile van 5.5 bij 12 meter kan dan 5.7 MN opnemen.

Door het groutsysteem kan de massa van de suction pile meer dan 2 maal zo klein worden. Dit levert een grote kostenbesparing op. Het grouten is wel een gecompliceerde procedure die goed uitgevoerd moet worden, zodat de korrelspanning overal gelijkmatig vergroot wordt. Hiervoor moet aan de binnenzijde van de suction pile leidingen worden aangebracht, met openingen naar de buitenzijde van de suction pile. Per diepte niveau zal er gegrout moeten worden, bijvoorbeeld met verticale afstanden van 2 meter. bij horizontale afstanden tussen de groutpunten van 2.16 meter zijn er 5 niveaus met elk 8 groutpunten zoals weergegeven in figuur 6.2.2.3. Deze niveaus moeten elk afzonderlijk gegrout worden, dit moet vanaf de oppervlakte geregeld kunnen worden. Het grouten zal dus ook extra installatie tijd kosten. Nadeel van de gegroute suction piles is dat ze niet meer eenvoudig te verwijderen zijn. Dit kan wel bij de normale suction piles door de pomp waarmee het water uit de suction pile werd weggepomt dan water in de suction pile te laten pompen.




Figuur 6.2.3.3: suction pile met grout installatie

Bij de grotere suction piles zoals met een diameter van 6.5 meter, en een lengte van 20 meter is het zinvol om aan de binnenzijde na de installatie de korrelspanningen te verhogen. Door de installatie is de grond aan de binnenzijde van de suction pile verstoord waardoor de korrelspanningen laag zijn geworden, en de wandwrijving gering is. Na installatie bevindt zich een grondvolume van 660 kubieke meter in de suction pile. Deze grond heeft een totaal gewicht onder water van 6.2 MN. Als men na de installatie de gemiddelde wrijving langs de binnenwand kan vergroten tot 15.2 kN/m² dan wordt al 6.2 MN van de 8.6 MN verticale belasting opgenomen door grond aan de binnenzijde van de suction pile. Er hoeft dan nog slechts 2.4 MN worden opgenomen door de grond aan de buitenzijde van de suction pile. Er kan echter 11.1 MN opgenomen worden. De afmetingen van de suction pile kunnen dus dan een stuk kleiner worden. Bijvoorbeeld een suction pile met een diameter van 6 meter, een lengte van 15 meter en een wanddikte van 0.035 meter. Het volume grond binnen in de suction pile levert dan al een verticale neerwaartse kracht van 3.99 MN.

De suction pile heeft dan een massa van 110 ton boven water en 95.6 ton onder water, een gewicht onder water van 937 kN. De grond aan de buitenzijde van de suction pile moet dan nog 3.76 MN opnemen. De grond kan 5.75 MN opnemen, 1.5 maal zo veel. De korrelspanningen aan de binnenzijde van de suction pile door grouting verhogen is eenvoudiger dan aan de buitenzijde, omdat de grond niet weg kan. Het is ook minder kritisch, langs de binnenzijde van de suction pile kan grout door buizen worden gepompt tot voldoende druk wordt bereikt waarna het buizenstelsel via een klep wordt afgesloten. Door het grouten aan de binnenzijde wordt de maximale horizontale kracht die kan worden opgenomen ook niet beinvloed.

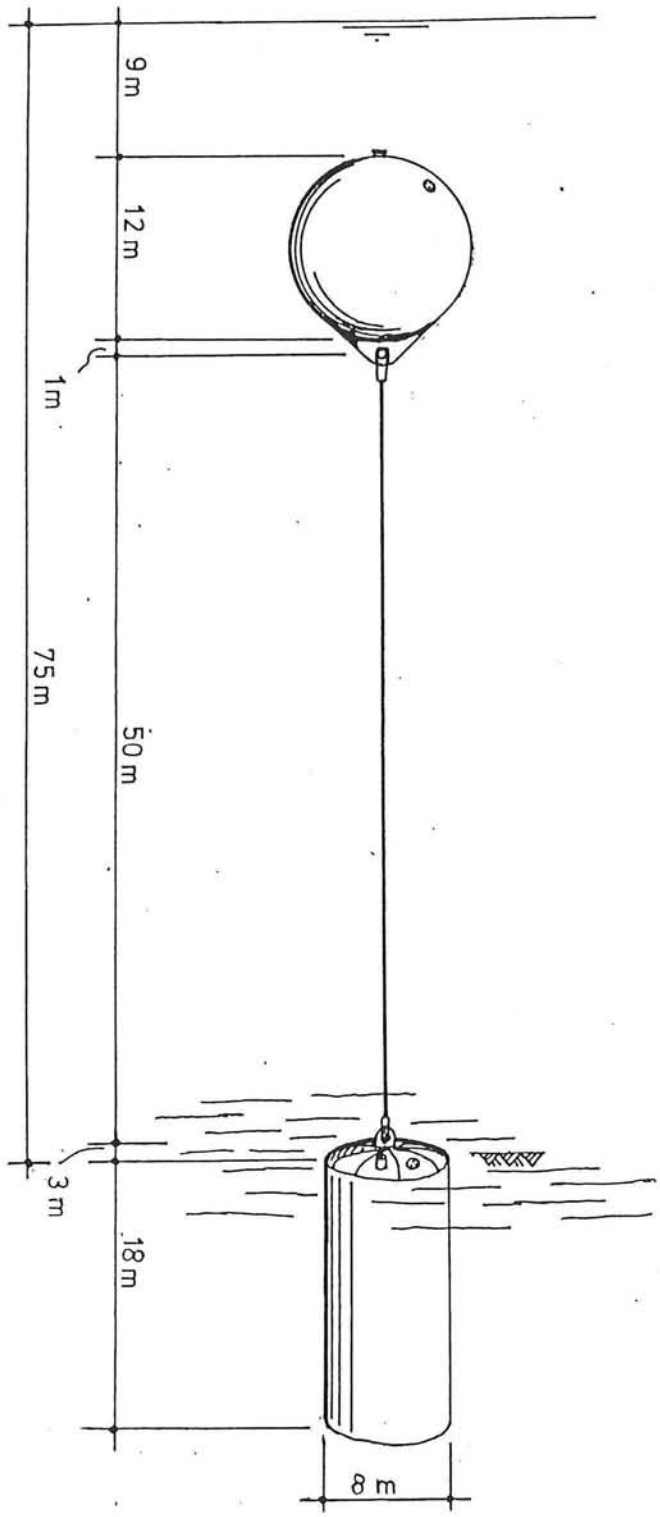
De wanddikte van de suction pile is afhankelijk van de belasting die ontstaat tijdens het installeren. De maximale druk die op de suction pile uitgeoefend kan worden is bijna 800 $kN/m^2$. Deze druk treedt echter pas op als het anker vrijwel volledig in de grond gepenetreerd is. De vrijstaande lengte van de wand is dan vrijwel 0, en de wand is door de grond aan de onderzijde ingeklemd. (Berekeningen voor het bepalen van de benodigde wanddikte staan in bijlage 5). De bovenzijde van de suction pile moet de druk van 800 $kN/m^2$ ook kunnen weerstaan. Bij grote diameters van de suction piles kunnen hiervoor het beste sferische of halve bolvormige bovenkanten voor worden gebruikt. Voor de suction pile met een diameter van 8 meter kan een halve bol als bovenkant gebruikt worden, met een straal van 4 meter en een wanddikte van 35 mm. (Zie bijlage 5 voor de sterkteberekening). Er kunnen nog verstijvingsribben worden aangebracht indien dat nodig is om de verankeringskracht op te kunnen nemen.

Het voordeel van de halve bol als bovenkant is dat het aangrijpingspunt van de ankerlijn 4 tot 4.5 meter boven de zeebodem komt te liggen. Dit heeft een gunstige invloed op het rendement van de boeien, waardoor er minder boeien nodig zijn. Bij boeien met een relatieve massa van 0.1 en een onderlinge afstand per rij van 50 meter zijn er dan 15 in plaats van 16 rijen boeien nodig. In totaal zijn er dan 675 in plaats van 720 boeien nodig, 45 boeien minder.

De halve bol, of sferische bovenzijde van de suction pile is moeilijker te construerendan een vlakke bovenzijde. Bij een vlakke bovenzijde moeten er echter zware verstijvingsbalken worden aangebracht om de waterdruk te weerstaan. Bij grote diameter suction pile is het daarom ook economisch aantrekkelijk om een sferische of bolvormige bovenzijde van de suction pile toe te passen.

De wanddikte van de suction pile men een diameter van 8 meter en een lengte van 18 meter kan worden berekend door de suction pile te beschouwen als een drukvat met een twee maal zo grote lengte. Met lengte wordt dan bedoeld de afstand tussen de zeebodem en de aansluiting van de cylinder op de halve bolvormige bovenkant. Het blijkt dan dat het voor een suction pile met een grote diameter in de dichte zandbodem voordelig is om een "toe jetting" systeem aan te brengen.

De gemeten conusweerstands waarden in de zandbodem zijn bij geringe diepte al hoog, daardoor heeft de suction pile bij geringe penetratie al een hoge voetweerstand. Om verder te penetreren is al een hoge uitwendige druk vereist. Doordat de suction pile nog ver boven de zeebodem uitsteekt is de uitwendige druk die hij kan opnemen nog gering. Door de voetweerstand te verminderen kan dan met een kleinere wanddikte worden volstaan. De eerder genoemde wanddikte van 35 mm is dan voldoende.

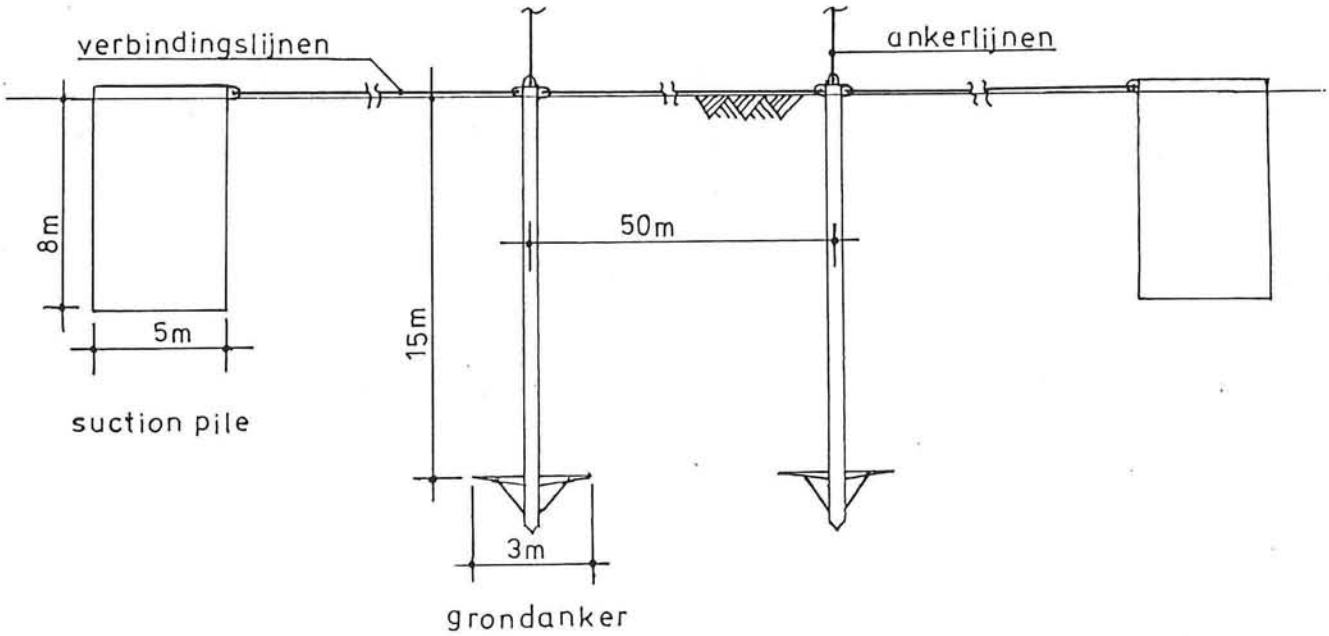



Figuur 6.2.3.4: 12 meter boei verankerd met een suction pile van 8 meter diameter en 18 meter lengte

### 6.2.4 Ankercombinaties

Men kan verschillende soorten ankers combineren om de gewenste toelaatbare verticale en horizontale belasting op te kunnen nemen. Een mogelijkheid is om de boeien met grondankers te verankeren die onderling met kettingen aan elkaar verbonden zijn. De horizontale belasting kan dan opgenomen worden door enkele suction piles. Nadeel hiervan is echter dat er op de zeebodem een groot aantal ankerkettingen moet worden geinstalleerd in een soort rasterpatroon, de horizontale kracht moet in alle richtingen kunnen worden opgenomen. (Zie ook figuur 6.2.4.1). De over de zeebodem lopende kettingen moeten ook de juiste lengte hebben, zodat de horizontale verplaatsingen die optreden bij de grondankers niet te groot worden. Ook een nadeel is dat de boeien met hun verankering niet meer onafhankelijk zijn. Voorkomen moet worden dat door het bezwijken van één verankering de verankeringen van de andere boeien ook bezwijken.

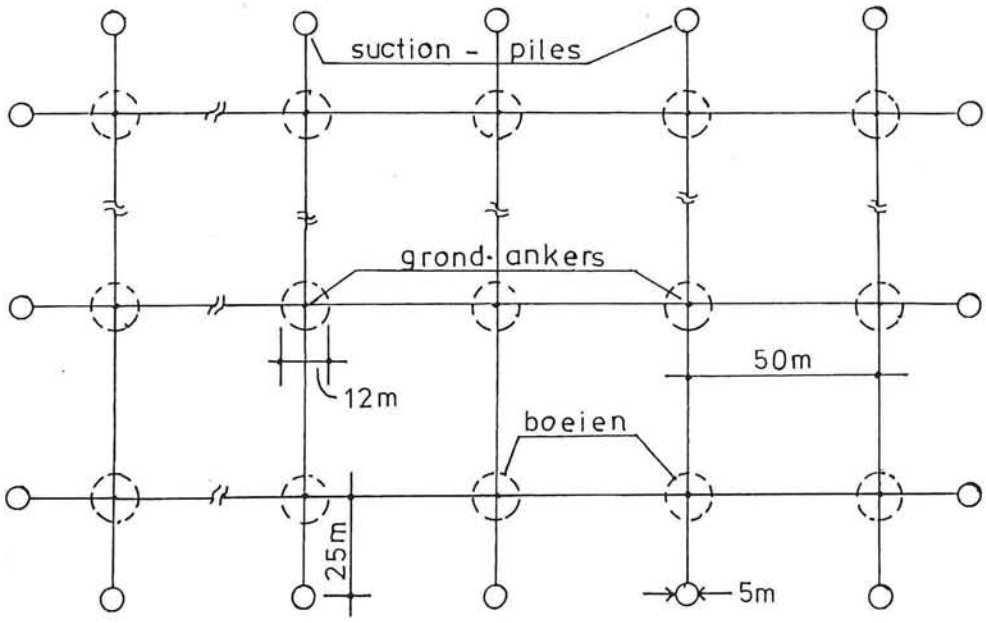
Het is ook mogelijk verschillende ankertypes per boei te combineren. Men kan een grondanker met een inbeddingsdiepte van 15 meter gebruiken om de verticale belasting op te nemen, en daarbij een suction pile van 5 meter diameter en 8 meter lengte gebruiken om de horizontale belasting op te nemen. De suction pile heeft een toelaatbare horizontale belasting van 5 MN. De installatie zal wel veel tijd kosten. Men moet eerst de suction pile plaatsen, met aan de bovenzijde een door een deksel afgesloten doorvoerruimte voor de schacht van het grondanker. Na de installatie van de suction pile kan men het deksel verwijderen waarna het grondanker wordt ingeheid. De verbinding tussen de schacht van het grondanker en de suction pile hoeft alleen een horizontale kracht over te brengen.



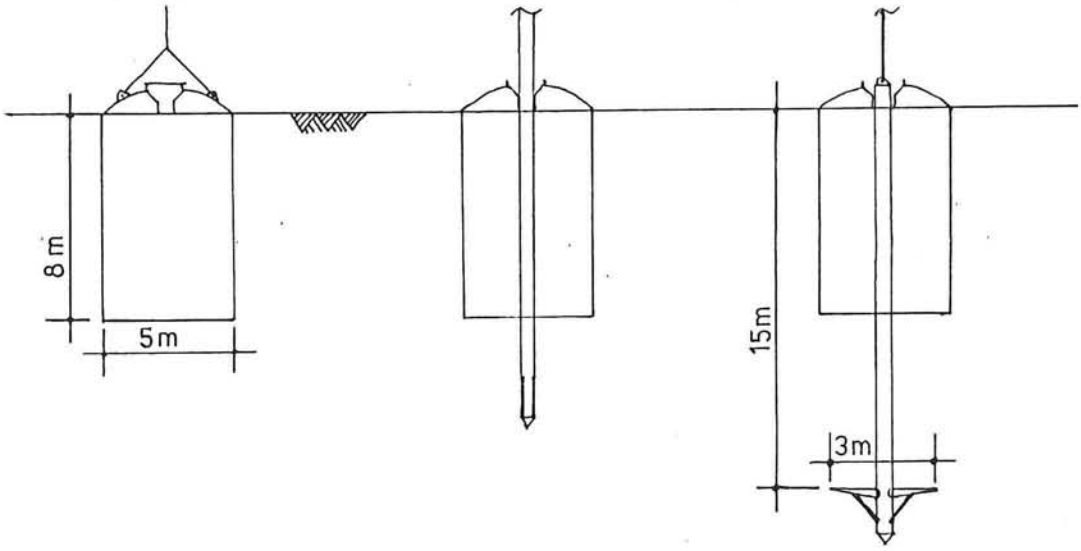

Figuur 6.2.4.1: Gecombineerd verankeringssysteem

De schacht van het grondanker kan gedimensioneerd worden op de belasting tijdens het heien en op de verticale belasting door de boei. De constructie van het grondanker en het uitklapmechanisme van de ankerplaten moet zodanig zijn dat de installatie door de opening van de suction pile kan plaats vinden. (Zie ook figuur 6.2.4.2).

Een andere methode van installatie is om de suction pile aan de bovenzijde van het grondanker te bevestigen, en tegelijkertijd te installeren. Men begint dan eerst met heien totdat de onderzijde van de suction pile de zeebodem heeft bereikt. Daarna kan men het enker verder laten penetreren door het water uit de suction pile weg te pompen. De schacht van het grondanker moet dan wel de extra belasting van de suction pile tijdens het heien kunnen opnemen, ongeveer 35 ton. Vergeleken met het gewicht van de heihamers die toegepast worden is dit geen grote massa.




Figuur 6.2.4.1: Gecombineerd verankeringssysteem, bovenaanzicht




Figuur 6.2.4.2: Combinatie van ankers

# 7. INSTALLATIEMETHODE VAN HET GOLFBREKERSYSTEEM

Het golfbrekersysteem bestaat uit een groot aantal eenheden, ongeveer 700 die allen apart moeten worden geinstalleerd. Elke eenheid bestaat uit een verankeringsconstructie, een ankerlijn van ongeveer 50 meter lengte, en een boei van 12 meter diameter. Het golfbrekersysteem moet in één zomerseizoen kunnen worden geinstalleerd, in 100 dagen. Als de eenheden in hun geheel kunnen worden geinstalleerd dan kan dat een grote tijdsbesparing opleveren. De ankerlijn kan dan boven water al aan de boei en de verankeringsconstructie gekoppeld worden. Dit zal niet bij alle verankeringsconstructies mogelijk zijn. Met name bij de constructies die ingeheid moeten worden is het moeilijk om de ankerlijn dan centrisch op de verankering te laten aangrijpen.

## 7.1 Installatie van ingeheide paalankers

Bij gebruik van paalankers kan de paal met onderwaterheihamers worden ingeheid. De paal van 45 meter lengte en 2 m diameter komt onder water op de zeebodem te staan zonder enige geleiding. Het kan nodig zijn eerst een constructie op de zeebodem te plaatsen om de paal te positioneren. Een paal van dergelijke afmetingen kan wel meteen met zware heihamers de bodem in worden geheid, de paal wordt verticaal geheid, en de vrijstaande lengte is relatief kort. Een constructie met een oog waaraan de ankerlijn bevestigd kan worden kan aan de bovenzijde van de paal worden gemaakt zodanig dat de paal met een aangepaste heihamer kan worden geheid. De eerste boeien kunnen worden geinstalleerd terwijl de volgende palen worden ingeheid.

De ankerlijn van de boeien moet onder water aan de paalkop worden bevestigd. Bij een ankerlijn met grote afmetingen en een groot gewicht is dat geen eenvoudige taak. De ankerlijn kan wel al aan de boeien zijn bevestigd. Sommige types boeien kunnen door ballasten worden afgezonken zodanig dat het uiteinde van de ankerlijn met een kraan boven de ankerpaalkop kan worden gebracht. De bevestiging zal dan door duikers moeten gebeuren. Het ballastwater in de boeien kan met perslucht eruit worden geblazen, zodat de ankerlijn en de verankering geleidelijk onder spanning worden gebracht.

De palen moeten met een onderlinge afstand van 50 meter worden geplaatst. Bij 700 palen moeten er 7 palen per dag worden geplaatst. Eén per 3.5 uur. Hiervoor zullen twee kraanschepen ingezet moeten worden. Elk kraanschip heeft dan 7 uur om van positie te veranderen, de paal te plaatsen, de heihamer te plaatsen, en de paal in te heien. Om palen met 2 meter diameter door de dichte zandlaag heen te heien zijn zware heihamers nodig. Kraanschepen met een kraancapaciteit van 1000 ton zijn nodig. Om de 7 boeien per dag te installeren zijn nog twee schepen nodig met een kraancapaciteit van 500 ton. Ook zijn schepen nodig om de ankerpalen en de boeien te vervoeren.

Bij de "underreamed pile" is het makkelijker de palen in te heien omdat hun lengte slechts 20 meter bedraagt, Deze palen zouden ook ingetrild kunnen worden. Het uitboren en het aanbrengen van de wapening en beton zal de installatietijd echter vergroten.

## 7.2 Installatie van grondankers

De grondankers met een totale lengte van 22.5 meter en een diameter van 2 meter kunnen ook ingeheid of ingetrild worden. Voorkomen moet worden dat de ankerplaten, het vergrendelingsmechanisme, en het openingsmechanisme van de ankerplaten beschadigd raakt tijdens het inheien in de dichte zandlaag. Het ontgrendelen en weer vergrendelen van de ankerplaten zal door duikers moeten gebeuren. Er zal een systeem moeten worden bedacht om de kettingen, waarmee de ankerplaten in de geopende toestand worden gehouden, worden gespannen. Men kan het bovenste gedeelte van de ankerschacht, waaraan de kettingen naar de ankerplaten worden gekoppeld zodanig verbinden aan het overige gedeelte van de ankerschacht dat het in verticale richting kan schuiven, zodat de boeien door hun opwaartse kracht de kettingen kunnen spannen. De horizontale belasting moet wel door de kop van de ankerschacht overgebracht kunnen worden.

Het inheien van de grondankers, het ontgrendelen van de ankerplaten en het aankoppelen van de ankerlijn zal veel tijd kosten. Om de horizontale belasting te kunnen opnemen is ook een grondanker met een ankerschacht van 2 meter diameter vereist. Er zal een grote heihamer vereist zijn om deze ankers in de zandbodem te heien. Er zijn ook twee kraanschepen nodig om alle ankers in drie maanden te kunnen installeren.

## 7.3 Installatie van suction piles

De installatie van suction piles kan snel gebeuren omdat er vrijwel geen externe apparatuur nodig is. Er is alleen een pomp nodig om het drukverschil te creëren waarmee de suction pile de zeebodem ingedreven wordt, een meeteenheid om de druk in de suction pile te registreren, en een pomp om het jettingsysteem van water te voorzien. Deze drie onderdelen kunnen tot één eenheid worden gecombineerd die met een van afstand te bedienen snelkoppeling op de suction pile wordt bevestigd. Aan boord van het kraanschip wordt de eenheid dan op de suction pile geplaatst. De suction pile wordt daarna met de ankerlijn er reeds aan bevestigd op de zeebodem geplaatst waar hij door zijn eigen gewicht een eind in weg zakt. Dan kan de pomp worden gestart en precies de benodigde druk om de voetweerstand en de wandwrijving te overwinnen worden gecreëerd. Na plaatsing van de suction pile kan de koppeling met de pompeenheid worden losgemaakt en de pompeenheid met een vooraf aangebrachtte lijn door het kraanschip worden verwijderd waarna het voor de volgende suction pile kan worden gebruikt.

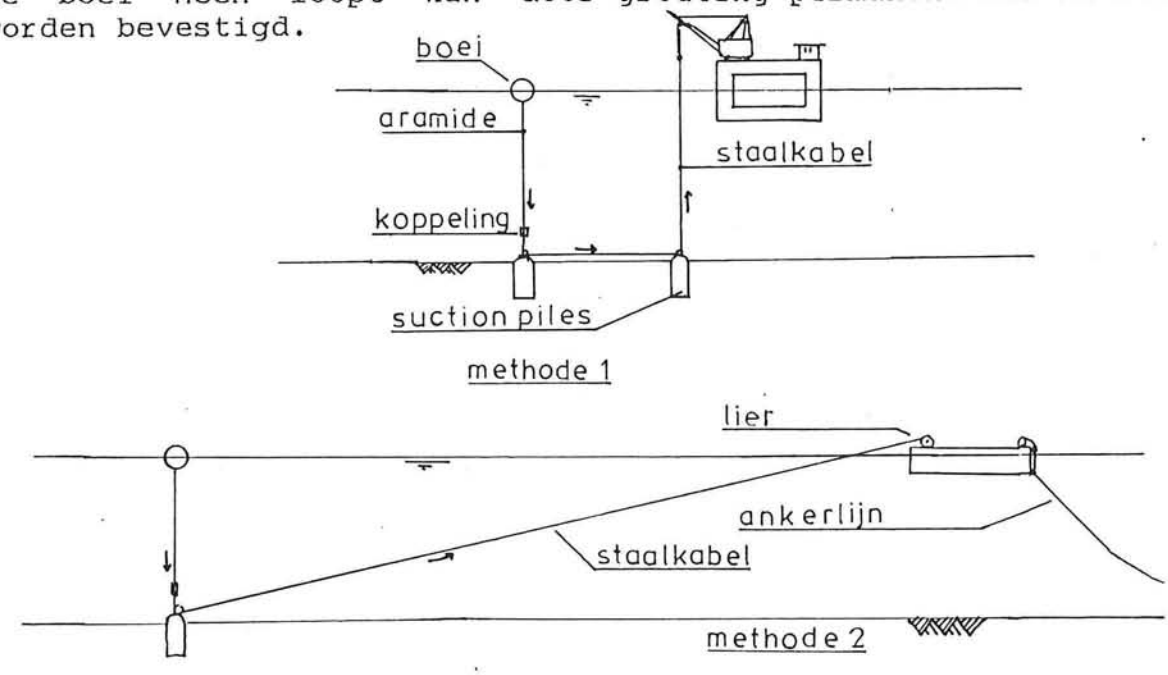
Een suction pile van grote afmetingen is in 3 uur tijd te plaatsen. Men kan bij boeien die kunnen worden geballast ook de boeien reeds aan de ankerlijn koppelen zodat de suction pile, ankerlijn en boei als één eenheid kunnen worden geplaatst. Bij een 1000 tons kraanschip kan bijvoorbeeld het hoofdblok de suction pile plaatsen terwijl de boei door het hulpblok onder water op de juiste positie wordt gehouden. Bij gebruik van twee kraanschepen kan men dan per kraanschip elke 6 uur een boei met suction pile plaatsen. Het ballastwater kan met perslucht via een slang van het kraanschip uit de boeien verwijderd worden. Alleen daarvoor is waarschijnlijk een duiker nodig die de slang loskoppelt, en de ballastafsluiters sluit. De boei bevindt zich 9 meter onder water en is dus goed bereikbaar voor duikers.

## 7.4 Installatie van glasvezelversterkte kunststof boeien

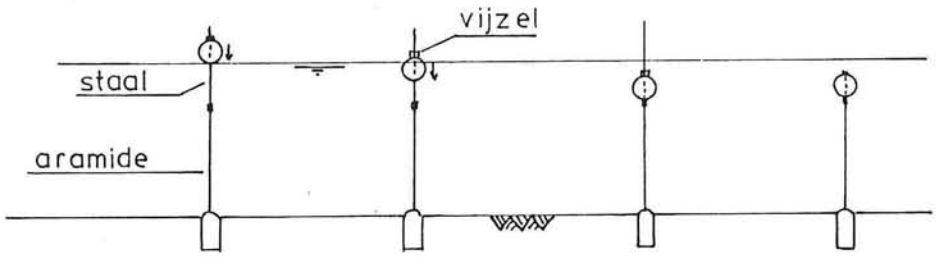
De glasvezelversterkte kunststof boeien die gevuld zijn met schuim kunnen niet door ballasten worden geinstalleerd. Deze boeien zullen met een mechanische methode onder water moeten worden geplaatst. Er kan worden gebruik gemaakt van een koppeling bij de zeebodem die eenvoudig onder water kan worden vergrendeld. De boei kan dan bijvoorbeeld met een tijdelijke stalen ankerkabel via twee katrollen aan twee suction piles onder water worden getrokken door het kraanschip. Daarna kan de aramide ankerlijn aan de suction pile worden gekoppeld, en langzaam op spanning worden gebracht door de tijdelijke stalen ankerlijn te laten vieren. Er zijn twee suction piles en twee katrollen nodig omdat bij één katrol de belasting op de suction pile te groot zou worden. Bij gebruik van 2 suction piles wordt elke suction pile belast met een verticale én een horizontale kracht van 8.7 MN. Deze krachten kunnen de suction piles van 6 diameter bij 15 meter lengte opnemen. Bij deze methode moet het kraanschip dus een massa van 1000 ton kunnen hijsen. Aan de suction piles moeten katrollen worden aangebracht waarover de staalkabel loopt, deze kunnen later weer verwijderd worden. Voor elke boei moeten de staalkabel en de katrollen weer verplaatst worden, een arbeidsintensieve operatie waarbij duikers vereist zijn.

Men kan ook een verankerd ponton gebruiken met lieren. Dan kan men de staalkabel vrijwel horizontaal naar de katrol op de suction pile toe laten lopen. Er hoeft dan slechts één suction pile per boei installatie gebruikt te worden. (Zie ook figuur 7.4.1).

Een andere methode van installeren is om aan de bovenzijde van de ankerlijn een metalen verlengstuk van 22 meter lengte te bevestigen, waarop een grote diameter schroefdraad is aan gebracht. Dit verlengstuk wordt voor de installatie door een buis door de kern van de boei heengevoerd. Na de plaatsing van de boei op het zeeoppervlak en de bevestiging van de ankerlijn aan de verankering kan men dan met een groot formaat hydraulische moeraanzetter en een grote moer op het stalen verlengstuk de ankerlijn onder spanning brengen, en de boei geleidelijk onder de zeespiegel plaatsen. Als de boei op de gewenste diepte is gekomen kan de bovenste 10 meter schroefdraad worden verwijderd. Het stalen verlengstuk wat door de boei heen loopt kan door grouting permanent aan de boei worden bevestigd.




Figuur 7.4.1: Installatie van glasvezelversterkte kunststof boeien




methode 3

## 8. GLOBALE KOSTENSCHATTING

De kosten van een dynamisch golfbrekersysteem in het Ekofisk veld hangen sterk af van de toegepaste constructiematerialen en installatiemethodes. Daarom zal in dit hoofdstuk een vergelijking worden gemaakt van de kosten. Als levensduur van de dynamische golfbreker wordt tenminste 25 jaar genomen. Voor de verankering worden suction piles genomen, omdat deze het best toepasbaar zijn voor de 12 meter diameter boeien in het EKOFISK veld, en ook omdat daarvan de kosten vrij goed te schatten zijn.

### 8.1 Kosten bij stalen boeien en ankerlijnen

Bij toepassing van 12 meter diameter boeien, relatieve massa 0.1, met een standaard suction pile met een diameter van 8 meter, en een lengte van 18 meter met een wanddikte van 35 mm:

| | | |
|---|---|---|
| massa boei: | 93.2 ton staal | |
| prijs per kilo: f 5.- | kosten: | f 466.000.- |
| massa ankerkettingen: | 30 ton staal | |
| prijs per kilo: f 3.- | kosten: | f 90.000.- |
| massa suction pile: | 185 ton staal | |
| prijs per kilo: f 4.5.- | kosten: | f 832.500.- |
| aansluitingen van de ankerlijn: | kosten: | f 50.000.- + |
| totale kosten per eenheid: | | f 1438.500.- |

totale kosten van 700 eenheden: 1007 miljoen gulden

kosten van een 1000 tons kraanschip per dag, exclusief brandstof: 100 tot 200.000 gulden.

kosten voor 100 dagen gebruik: ≈ 25 miljoen gulden.
kosten voor 2 kraanschepen : ≈ 50 miljoen gulden.

totale kosten van installatie met het transport inbegrepen:

≈ 100 miljoen gulden.

directe kosten bij installatie van de golfbreker:

≈ 1.1 miljard gulden.

kosten onderhoud aan boeien en ankerlijnen gedurende 25 jaar:

≈ 200 miljoen gulden.

Totale kosten over een periode van 25 jaar:

≈ 1.3 miljard gulden.

## 8.2 Kosten van de golfbreker bij toepassing van speciale suction piles

De kosten van een suction pile met groutinstallatie kunnen kleiner zijn. Bijvoorbeeld bij een suction pile met grouting aan de buitenzijde:

| | | |
|---|---|---|
| massa suction pile: | 70 ton staal | |
| kosten per kilo: f 4.5.- | kosten: | f 315.000.- |
| kosten groutinstallatie: | | f 100.000.- |
| extra installatiekosten: | | f 100.000.- |
| kosten boei + ankerlijn + aansluitingen: | | f 606.000.- + |
| kosten per eenheid: | | f 1121.000.- |

| | |
|---|---|
| kosten 700 eenheden: | 784.7 miljoen gulden |
| installatiekosten: | 100 miljoen gulden |
| onderhoudskosten: | 200 miljoen gulden + |
| totale kosten voor 25 jaar: | 1.1 miljard gulden |

Bij grouting aan de binnenzijde van de suction pile worden de kosten:

| | | |
|---|---|---|
| massa suction pile: | 110 ton staal | |
| kosten per kilo: f 4.5.- | kosten: | f 495.000.- |
| kosten groutinstallatie: | | f 50.000.- |
| extra installatiekosten: | | f 50.000.- |
| kosten boei + ankerlijn + aansluitingen: | | f 606.000.- + |
| kosten per eenheid: | | f 1201.000.- |

| | |
|---|---|
| kosten 700 eenheden: | 840.7 miljoen gulden |
| kosten installatie: | 100 miljoen gulden |
| kosten onderhoud 25 jaar: | 200 miljoen gulden + |
| totale kosten 25 jaar: | ≈ 1.14 miljard gulden |

## 8.3 Kosten van de golfbreker bij toepassing van kunststoffen

Bij toepassing van aramide voor de ankerlijnen kan voorkomen worden dat de ankerlijnen tussentijds vervangen moeten worden. Dit kan een grote kostenbesparing geven.

| | | | |
|---|---|---|---|
| massa ankerlijn: | ≈ 1.5 ton | | |
| prijs per kilo: | ≈ f 50.- | kosten: | f 75.000.- |

Bij stalen boeien met een diameter van 12 meter, en een suction pile van 185 ton worden de totale kosten per eenheid dan:

kosten boei + ankerlijn + aansluitingen + anker: f 1423.500.-

| | |
|---|---|
| kosten 700 eenheden: | 996.5 miljoen gulden |
| kosten installatie: | 100 miljoen gulden |
| kosten onderhoud: | 50 miljoen gulden + |
| totale kosten gedurende 25 jaar: | 1.15 miljard gulden |

De kosten van de kunststof boeien worden bepaald door de kosten van het glasvezelversterkte epoxy, en de kosten van de kern van schuim. Het glasvezelversterkte epoxy kost inclusief verwerkingskosten 4 tot 10 gulden per kg bij machinale verwerking. Bij handverwerking liggen de kosten tussen 5 en 14 gulden per kg. P.U. schuim kost ongeveer 3 gulden per kg. In deze kosten zijn de kosten voor de mallen en machines niet inbegrepen, de kosten hiervoor kunnen echter verdeeld worden over de 525 boeien. (Door de lagere relatieve massa zijn er minder boeien nodig).

De kosten van een 12 meter boei met een massa van 46.6 ton, gevuld met schuim worden dan ≈ 300.000 gulden. Bij 100.000 gulden aanvullende productiekosten per boei worden de totale kosten 400.000 gulden.

| | |
|---|---|
| kosten suction pile 110 ton met grouting aan de binnenzijde: | f 595.000.- |
| kosten aansluitingen ankerlijn: | f 50.000.- |
| kosten aramide ankerlijn: | f 75.000.- |
| kosten kunststof boei: | f 400.000.- + |
| kosten per eenheid: | f 1120.000.- |
| kosten 525 eenheden: | 588 miljoen gulden |
| kosten installatie: | 200 miljoen gulden |
| kosten onderhoud 25 jaar: | 50 miljoen gulden + |
| totale kosten gedurende 25 jaar: | 838 miljoen gulden |

## 8.4 Kosten van de golfbreker met 8 meter diameter boeien

Bij toepassing van boeien met een kleinere diameter dan 12 meter is een groter aantal boeien nodig. Er kunnen dan echter lichtere ankers, boeien en ankerlijnen worden toegepast. Bijvoorbeeld bij stalen boeien met 8 meter diameter en een relatieve massa van 0.05, een aramide ankerlijn en een suction pile van 6 bij 12 meter en een wanddikte van 30 mm:

| | | | |
|---|---|---|---|
| massa boei: | 15 ton staal | | |
| prijs per kilo: | f 5.- | kosten: | f 75.000.- |
| massa ankerlijn | 500 kilo aramide | | |
| prijs per kilo: | f 50.- | kosten | f 25.000.- |
| massa anker: | 75 ton staal | | |
| prijs per kilo: | f 4.5.- | kosten: | f 337.500.- |
| aansluitingen van de ankerlijn: | | kosten: | f 25.000.- |
| | | | + |
| totale kosten per eenheid: | | | f 462.500.- |

| | |
|---|---|
| kosten 2000 eenheden: | 925 miljoen gulden |
| kosten installatie: | 100 miljoen gulden |
| kosten onderhoud: | 50 miljoen gulden |
| | + |
| totale kosten gedurende 25 jaar | ≈ 1.1 mijard gulden |

Het blijkt dat de totale kosten van de boeien men een diameter van 12 en van 10 meter elkaar niet veel ontlopen. Het kan technisch eenvoudiger zijn om een kleinere diameter boeien toe te passen. Er moet hierbij wel opgemerkt worden dat de 8 meter boeien een relatieve massa van 0.05 hebben, ze zijn dus veel lichter dan de 12 meter boeien. De waterdiepte boven de 8 meter boeien is in dit geval 6 meter, minder dan de 9 meter bij de 12 meter boeien. Een probleem bij de 8 meter boeien is dat er veel ruimte nodig is om ze te plaatsen. Men kan de onderlinge afstand verkleinen tot 35 meter, maar dan zal de golfbreker nog breder zijn dan bij de 12 meter boeien. De berekening van de 8 meter boei en zijn verankering staat in bijlage 6.

## 8.5 Kosten van de golfbreker met 10 meter diameter boeien

Men kan ook boeien met een diameter van 10 meter toepassen. Bij een relatieve massa van deze boeien van 0.1, en een vaardiepte van 7 meter zijn er ongeveer 1200 boeien nodig.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| massa boei: | 54 ton staal | | | |
| prijs per kilo: | f 5.- | kosten: | f | 270.000.- |
| massa ankerlijn: | 1000 kilo aramide | | | |
| prijs per kilo: | f 50.- | kosten: | f | 50.000.- |
| massa anker: | 120 ton staal | | | |
| prijs per kilo: | f 4.5.- | kosten: | f | 540.000.- |
| aansluitingen van de ankerlijn | | kosten: | f | 40.000.- + |
| totale kosten per eenheid: | | | f | 900.000.- |

| | |
|---|---|
| kosten 1200 eenheden: | 1080 miljoen |
| kosten installatie: | 100 miljoen |
| kosten onderhoud: | 50 miljoen + |
| totale kosten gedurende 25 jaar: | 1230 miljoen |

De totale kosten van een golfbreker met 10 meter diameter boeien zijn hoger dan bij toepassing van de 8 meter boeien doordat de 8 meter boeien een lagere relatieve massa hebben, 0.05 in plaats van 0.1. Dit geeft een besparing op de materiaalkosten. Of een relatieve massa van 0.05 bij de 8 meter boeien haalbaar is, is niet duidelijk.

## 9. CONCLUSIES

In de hoofdstukken 4,5,6 en 7 zijn verschillende aspecten van de boei en zijn verankering aan de orde gekomen. In hoofdstuk 8 is daarbij voor enkele varianten een kostenschatting gemaakt. In dit hoofdstuk zal een afweging worden gemaakt tussen de mogelijke varianten. Daarbij zullen eerst de voor en nadelen van de verschillende varianten worden bekeken.

| type boei: | voordelen: | nadelen: |
|---|---|---|
| staal, compartimenten | onzinkbaar | moeilijk te ballasten |
| staal, verstijvingsribben | goed te ballasten | zinkt bij lekraken dure constructie |
| staal, afwijkende vorm | makkelijker te construeren, goedkopere constructie | kan negatieve invloed hebben op de Cm waarde |
| kunststof, rubber | makkelijk te transporteren en te installeren, bestand tegen aanvaringen, laag gewicht, kleiner aantal boeien nodig | levensduur en productiemethode zijn onzeker, productiekosten zijn dus ook onzeker |
| glasvezelversterkt kunststof, gevuld met P.U. schuim | onzinkbaar, lange levensduur, sterke constructie, laag gewicht, kleiner aantal boeien nodig, corrosievrij | moeilijk te installeren, duurder om te installeren |
| glasvezelversterkte kunststof, hol | lange levensduur, corrosievrij, laag gewicht, kleiner aantal boeien nodig makkelijk te installeren | zinkt bij lekraken, moeilijker en duurder om te construeren, aansluiting ankerlijn moeilijk |
| **type ankerlijn:** | **voordelen:** | **nadelen:** |
| stalen ankerketting standaard schalmen | bij veiligheidsfactor 2 standaard verkrijgbaar | geringe levensduur groot gewicht, grote afmetingen, voor veiligheidsfactor >2 geen standaard maat verkrijgbaar |
| stalen ankerlijn bestaande uit staafelementen | toepassingsgericht, lager gewicht, bescherming tegen corrosie eenvoudiger | bescherming tegen corrosie nodig, niet standaard, moeilijker te installeren |

| type ankerlijn: | voordelen: | nadelen: |
|---|---|---|
| aramide ankerlijn | laag gewicht, lange levensduur,goede bescherming tegen invloed zeewater mogelijk | complexe aansluiting-en, hoge kosten per kg, mag bij installatie niet op buiging belast worden |
| type aansluiting ankerlijn op de verankering: | voordelen: | nadelen: |
| flexjoint | geen mechanische bewegende delen, geen slijtage, goed tegen corrosie te beschermen | complexe constructie, technisch geavanceerd, nog alleen bij T.L.P.'s toegepast |
| unijoint: (mechanische scharnier) | veel en gedurende lange tijd toegepast bij S.A.L.M.'s en A.L.P.'s, constructief eenvoudiger en goedkoper | slijtage bij lagers, bescherming lagers tegen corrosie nodig |
| (A.L.P.: articulated loading platform, S.A.L.M.: single anchor leg mooring, T.L.P.: tension leg platform) | | |
| type verankering: | voordelen: | nadelen: |
| geheide paalankers | eenvoudige constructie, makkelijk transporteerbaar | lange installatie-tijd, groot kraanschip vereist, grote diameter palen nodig om horizontale kracht op te nemen, zware heihamers nodig, aansluiting ankerlijn moeilijk |
| underreamed pile | beperkte afmetingen beperkt gewicht, hoge verticale houdtkracht | complexe installatie door heien, uitboren, plaatsen van wapening en vullen met beton, dure installatie, aansluiting ankerlijn moeilijk |
| uplift resisting anchors | beperkte afmetingen beperkt gewicht, hoge verticale houdtkracht | complexe installatie, inheien moeilijk, openen ankerplaten moeilijk, aansluiting ankerlijn moeilijk, opnemen hor. kracht problematisch |

| type verankering: | voordelen: | nadelen: |
|---|---|---|
| suction piles | eenvoudige en snelle installatie, grote horizontale houdtkracht, bevestiging ankerlijn eenvoudig, | grote afmetingen nodig om voldoende verticale houdtkracht te verkrijgen , groot gewicht |
| grouted suction pile | kleinere afmetingen lager gewicht, grote verticale en horizontale houdtkracht, bevestiging ankerlijn eenvoudig | complexere installatie, niet meer verwijderbaar nog niet eerder toegepast |
| ankercombinaties | kleine afmetingen van de ankers | complexe en langdurige installatie; verankering is niet meer per boei onafhankelijk |

Bij de boeien is de keuze tussen stalen of kunststof boeien nog niet geheel duidelijk, getracht moet worden om zo goedkoop en zo licht mogelijke boeien te construeren met een lange levensduur. Indien de constructie en installatie van de schuimgevulde kunststof boeien goed mogelijk blijkt zijn deze de beste oplossing.

De aramide ankerlijn blijkt de goedkoopste oplossing te zijn met de langste levensduur en het laagste gewicht. Dit lage gewicht is handig bij de installatie. De aramide ankerlijn heeft wel speciale aansluitingen nodig, en kan niet te sterk gebogen worden.

Bij de aansluiting van de ankerlijn verdient de unijoint (universal joint) de voorkeur omdat deze in serie geproduceerd een goedkopere oplossing is, en er ook al veel ervaring mee is opgedaan.

De verankering kan het best met suction piles worden uitgevoerd omdat deze snel te installeren zijn, de horizontale belasting goed kunnen opnemen, en ook voldoende mogelijkheid bieden om een unijoint met ankerlijn te bevestigen voor de installatie van de suction pile. De suction pile met grouting aan de binnenzijde lijkt het aantrekkelijkste, de afmetingen en de massa zijn een stuk kleiner dan bij de standaard suction pile. De techniek is echter nog niet eerder toegepast op zee. Op land is de "grouting" methode wel al eerder toegepast. De grouting aan de binnenzijde van de suction piles wordt ook door S.B.M. (Single Buoy Moorings) als uitvoerbaar geacht, en een goede methode gevonden om de verticale houdtkracht van de suction pile te vergroten.

Voor het Ekofisk veld is de golfbreker met de volgende afmetingen en specificaties de beste oplossing:

| | |
|---|---|
| - boeien: kunststof of staal: | diameter 12 meter<br>massa 50 - 100 ton |
| - vaardiepte boven de boeien: | 9 meter |
| - ankerlijn: aramide kabel: | lengte ≈ 50 meter<br>diameter ≈ 200 mm<br>massa ≈ 1.5 ton |
| - anker: suction pile, staal: | lengte 15 meter<br>diameter 6 meter<br>wanddikte 35 mm<br>massa 110 ton<br>sferische bovenzijde<br>grouting aan binnenzijde<br>kathodische bescherming |
| - aansluiting ankerlijn op het anker: | universal joint<br>(mechanische koppeling) |
| - totaal aantal boeien: | 700 stalen boeien, of 525 kunststof boeien |
| - installatie: | in één zomerseizoen met 2 kraanschepen |
| - levensduur: | 25 - 50 jaar |
| - totale kosten inclusief onderhoud: | 850 miljoen à 1 miljard gulden |

De kosten van de jack up operatie zijn geweest:

| | |
|---|---|
| Opvijzelen platforms, totaal: | ≈ 1 miljard gulden |
| Bouw en installatie van de muur rond de Ekofisk tank, totaal: | ≈ 1 miljard gulden |
| | + |
| Totale kosten: | ≈ 2 miljard gulden |

In deze totale kosten zijn nog niet inbegrepen de kosten die veroorzaakt zijn doordat de productie en het transport van olie en gas gedurende het opvijzelen een maand hebben stilgelegen.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat een dynamische golfbreker een goed alternatief was geweest voor de platform jack up in het Ekofisk veld. De dynamische golfbreker bestaande uit een veld boeien is goed in staat om precies de vereiste golfhoogteverlaging in een willekeurige richting tot stand te brengen.

Het blijkt dat de kosten van een dynamische golfbreker duidelijk lager zijn dan de kosten die nu zijn en worden gemaakt om het Ekofisk complex tegen de golven te beschermen. De dynamische golfbreker is dus ook economisch een goed alternatief voor de platform jack up. Het blijkt mogelijk te zijn om in dit geval tegen aanvaardbare kosten een dynamische golfbreker te bouwen die de golfhoogte van de hoogste golven tot het gewenste niveau kan terugbrengen.

De dynamische golfbreker kan met bestaande materialen en technieken worden gebouwd en geinstalleerd. Doordat van alle onderdelen grote aantallen nodig zijn kan er serieproductie plaatsvinden wat de kosten van de onderdelen kan verminderen.

Als bij het Ekofisk veld de bodemdaling zich blijft voortzetten kan alsnog een dynamische golfbreker worden toegepast. Ook bij andere platforms waar zeebodemdaling een probleem is, of waar de maximum golfhoogte onderschat is, kan de dynamische golfbreker een oplossing vormen. Men kan de dynamische golfbreker ook gefaseerd toepassen, bij voortschrijdende bodemdaling kan men elk jaar een rij bijplaatsen.

Voor de specifieke toepassing in het Ekofisk veld met een maximum golfhoogte in een honderjarige storm van 26 meter zijn er boeien en een verankering nodig van grote afmetingen. Voor andere toepassingen kan worden volstaan met kleinere boeien, van ongeveer 2 tot 8 meter diameter. De ankers die dan toegepast kunnen worden kunnen grondankers zijn met een inbeddingsdiepte tot 15 meter en met een schachtdoorsnede van 1 meter of kleiner.

aanbevelingen voor nader onderzoek:

- modelonderzoek om het precieze aantal benodigde boeien te bepalen, en de precieze Cm en Cd waardes te bepalen
- constructieve uitwerking van de kunststof en stalen boeien
- nader onderzoek naar de productiemethode van kunststof boeien
- dimensionering van het scharnier bij de zeebodem
- onderzoek naar de installatiemogelijkheden van de kunststof boeien
- onderzoek naar het grouten van suction piles in de zeebodem
- nauwkeuriger kostenonderzoek

BIJLAGE 1: SYMBOLENLIJST

a : versnelling van de waterdeeltjes.
$c_u$ : schuifsterkte van klei.
d : diepte v/h middelpunt v/d boeien onder het zeeoppervlak.
eps: rendement van de energieonttrekking door één rij boeien, de fractie energie die door één rij boeien wordt onttrokken; de totale golfenergie is gelijk aan 1.
f : golffrequentie, gelijk aan 1/T.
f' : wandwrijving.
g : versnelling van de zwaartekracht.
h : waterdiepte.
h' : diepte beneden de zeebodem.
i : relatieve massa van de boeien, de massa van de boei gedeeld door de massa van het verplaatste zeewater.
k : stijfheid van de grond.
$k_f$ : empirische coëfficiënt.
$k_p$ : empirische coëfficiënt.
l : lengte maat.
p : effectieve bovenbelasting van de grond.
p' : korrelspanning.
$q_c$ : conusweerstand.
r : straal van de boeien, 2r is de diameter.
s : veiligheidsparameter.
sp : afstand tussen de boeien in één rij.
t : wanddikte.
u : snelheid van de waterdeeltjes.
x : horizontale verplaatsing.
z : diepte beneden een bepaald oppervlak.
A : oppervlakte maat.
B : breedte maat.
D : diameter.
D' : inbeddingsdiepte.
E : elasticiteismodulus.
$H_m$ : meest waarschijnlijke maximum golfhoogte in een storm met een "return period"
$H_s$ : significante golfhoogte, de golfhoogte van het hoogste 1/3 deel van de golven.
H' : lengte maat.
I : traagheidsmoment.
$K_o$ : coëfficiënt van de neutrale horizontale korrelspanningen.
$K_a$ : coëfficiënt van de actieve horizontale korrelspanningen.
$K_p$ : coëfficiënt van de passieve horizontale korrelspanningen.
L : lengte maat.
L : golflengte van de golven.
M : moment.
$N_s$ : "break out factor", empirische coëfficiënt.
P : verticale bezwijkbelasting.
Q : toelaatbare horizontale belasting
T : horizontale schuifkracht.
T : golfperiode.
$\alpha$ : veiligheidscoëfficiënt.
$\beta$ : coëfficiënt.
$\delta$ : wrijvingshoek langs een stalen wand.
$\gamma'$ : dichtheid van de grond onder water.
$\lambda$ : relatieve inbeddingsdiepte, gelijk aan D/B.
$\phi$ : hoek van inwendige wrijving van de grond.
$\sigma$ : standaardafwijking.

BIJLAGE 2: REFERENTIES


- Tethered Float Breakwaters: R.J. Seymour, J.D. Isaacs. Proceedings of Floating Breakwaters Conference, Newport 1974.
- Proceedings of the Second Conference on Floating Breakwaters, 1981. Ocean Engineering, B.H. Adee, E.P. Richey.
- Buoy Engineering: Berteaux 1976.
- Ocean wave climate: symposium 1977: Marshall D. Earle; Alexander Malakoff. 1979 Plenum Press.
- Hydrodynamics in Ship Design: H.E. Saunders 1957. Volume 2, pp 290,291,420,421. Added mass and drag coëfficiënts.
- The suction pile finds its place: Offshore Engineer april 1981.
- Anchoring: Offshore Engineer maart 1982.
- Offshore Engineer sept. 1986 - dec. 1987.
- The Ekofisk jack up: Noroil augustus 1987.
- A design procedure for embedded anchors: A. Andreadis, R.C Harvey. Applied Ocean Research, 1981, vol. 3 no. 4. pp 177.
- Field trials with large diameter suction piles: J.R. Hogervorst, Shell Offshore Research. O.T.C. conference Houston mei 1980.
- Suction Anchor Piles - A Proven Alternative to Driving or Drilling. D. Senpere, G.A. Auvergne, S.B.M.. O.T.C. conference Houston, mei 1982.
- Anchor manual: Vrijhof ankers. 1982.
- Offshore moorings: Conference proceedings. maart 1982.
- Shore protection manual volume I - II. 1984.
- Pressure vessel design handbook: Henry H. Bednar. New York 1981.
- Rubber in offshore engineering: Stevenson. Conference proceedings 1983
- Offshore engineering with elastomers: Plastics and rubber institute 1985
- Offshore soil mechanics: A. Verruijt. oktober 1986.
- Symposium on Engineering applications of Parafil ropes. 6 januari 1988. C.J. Burguoyne, Imperial College of Science and Technology.
- The latest developments in the use of aramid fibre light corrosion free ropes. N O'Hear, Du Pont.
- Construction of offshore structures: Ben C. Gerwick. John Wiley and sons 1986.
- Design in offshore structures: conference proceedings. Thomas Telford 1983.
- Single point moorings: R. Maari. S.B.M. inc. 1985.
- Corrosion and marine growth on offshore structures: conference proceedings. Lewis and Mercher 1984.
- Offshore cathodic protection: a symposium on corrosion control in marine enviroments. NACE 1975.
- Corrosie en bescherming tegen corrosie: W.A. Schultze metaalkunde. blokcollege offshore techniek 1980.
- Glass Reinforced Plastics in construction: Engineering aspects. Leonard Hollaway 1978.
- Composite construction materials handbook: Robert Nichols, 1976.

## BIJLAGE 3: BEREKENINGEN VAN GEHEIDE PAALANKERS

De maximale verticale kracht die moet worden opgenomen is 8.6 MN, de horizontale kracht die moet worden opgenomen is ongeveer 4 MN. Bij toepassing van een veiligheidsfactor 1.5 op de maximum verticale belasting ("design environmental loads") is de gewenste "pull out capacity" 12.9 MN. Uit de "A.P.I. rules" volgt voor de wandwrijving bij trekpalen in zandlagen:

$$f_{si} = K\tan\delta p_0' \text{ ; met } p_0' = \gamma' z \text{ en } K_o = 0.5 \qquad (B.3.1)$$

Voor de bovenste zandlaag volgt met $\gamma'$ = 9.4 kN/m3 en $\delta$ = 30° :

$$f_{si} = 2.71 * z \text{ [kN/m}^2\text{]} \qquad (B.3.2)$$

Voor de onderste zandlaag volgt met $\gamma'$ = 10 kN/m3 en $\delta$ = 30° :

$$f_{si} = 0.289 * (368 + 10 * z) = 106.35 + 2.89 * z \text{ [kN/m}^2\text{]} \qquad (B.3.3)$$

Voor de kleilaag van z = 20 tot z = 40 meter volgt:

$$f_{si} = \alpha * c_u \text{ ; met } c_u = 70 \text{ kN/m}^2 \text{ en } \alpha = 0.5 \qquad (B.3.4)$$

Voor een 60" paal, diameter 1.52 meter, 50 meter lang volgt nu:

bij een wanddikte van 50 mm is de massa van de paal: 93.7 ton; massa onder water is 81.4 ton, of 797.7 kN. De massa van de grondplug in de paal wordt verwaarloosd. De gewenste "ultimate pull out capacity" wordt nu: (8.6 - 0.798) * 1.5 = 11.7 MN

$$z = 0 - 20\text{m} : \pi D\int_0^{20} 2.71 z dz = \pi D[\ 1.36z^2\ ]_0^{20} = 2.60 \text{ MN} \qquad (B.3.5)$$

$$z = 20 - 40\text{m} : \pi D(40 - 20) * 0.5 * 70 = 3.35 \text{ MN}$$

$$z = 40 - 50\text{m} : \pi D\int_0^{10} (106.35 + 2.89z)dz =$$

$$\pi D[106.35z + 1.45z^2]_0^{10} = \frac{5.79 \text{ MN}}{11.74 \text{ MN}} +$$

Een 60" paal van 50 meter lengte voldoet dus om de verticale kracht op te nemen. Voor het opnemen van de horizontale belasting is de stijfheid van de paal van belang. Daarvoor volgt:

$$I = 0.125\pi D^3 t = 0.0690 \text{ m}^4; E = 2.1*10^{11} \text{ N/m}^2; EI = 1.45*10^{10} \text{ N/m}^2$$

De paal van 50 meter kan als ingeklemd worden beschouwd. Voor de homogene bovenlaag van 20 meter zand kan de volgende benadering worden gebruikt om de horizontale verplaatsingen bij de paaltop uit te rekenen:

De horizontale belasting $Q = 4*10^3 kN = (K_p - K_a)\gamma' Dh^2/6$ (B.3.6)

Voor zand met $\phi = 35°$ volgt: $K_p = 3.7$ en $K_a = 0.27; \gamma' = 9.4$ kN/m3
Voor z = h is de horizontale kracht volledig naar de grond overgebracht. Uit B.3.6 volgt: h = 22.1 m. De laterale verplaatsing aan de top kan nu met vergelijking B.3.7 worden berekend:

$$x = \frac{(K_p - K_a)\gamma' Dh^5}{45EI} \qquad (B.3.7)$$

Daaruit volgt dat x 0.397 meter is. Dit is veel, de uitwijking kan worden verminderd door een grotere paaldiameter toe te passen, of een grotere wanddikte over de bovenste 22 meter. Een grotere diameter paal toepassen is daarbij het effectiefste. Een paal van 2 meter diameter met een wanddikte van 50 mm geeft bij een horizontale belasting van 4 MN een horizontale uitwijking van de paaltop van 0.116m. Om de verticale belasting met een veiligheidsfactor 1.5 op te kunnen nemen is een lengte van 45 meter vereist. De massa van een dergelijke paal is 111 ton.

Men kan ook gebruik maken van een "underreamed pile", een paal waarvan aan de voet door grouting een voetplaat wordt gemaakt. De paal wordt eerst de bodem ingeheid, waarna hij wordt uitgeboord en met een speciale boor de ruimte bij de voet wordt geboord. In deze ruimte moet wapening worden geplaatst waarna hij kan worden volgegrout. (Zie ook figuur B.3.1). De verticale belasting kan dan als bij een grondanker worden overgebracht. Bij een paallengte van 20 meter, een paaldiameter van 2 meter en een diameter van de voet van 4 meter kan maximaal een verticale belasting van 37 MN worden opgenomen. Er is dan een grote veiligheid op de verticale belasting. Men kan de toelaatbare belasting via twee methoden benaderen; bij de eerste methode beschouwd men de paal onderaan als ingeklemd, en bij de tweede methode beschouwd men de paal als oneindig stijf. De werkelijkheid zal hier tussen inliggen. De paal heeft een eindige lengte en dwarsdoorsnede. Hij zal onderaan niet geheel ingeklemd zijn, en zal onder horizontale belasting ook enige buiging vertonen. Via de eerste methode komt men op een horizontale verplaatsing van de top van 0.116 meter bij een belasting van 4 MN. Bij de tweede methode werken er krachten op de paal zoals weergegeven in figuur B.3.1 De paal zal dan een punt hebben bij de voet waarom hij heen draait. Uit het momentenevenwicht van de krachten bij volledig gemobiliseerde passieve gronddruk kan men dan de toelaatbare horizontale belasting bepalen:

$$T_1 = \tfrac{1}{4}\pi(D_2^2 - D_1^2)p_0'\tan\delta = 1023 \text{ kN} \quad ; \quad p_0' = \gamma' * z \qquad (B.3.8)$$

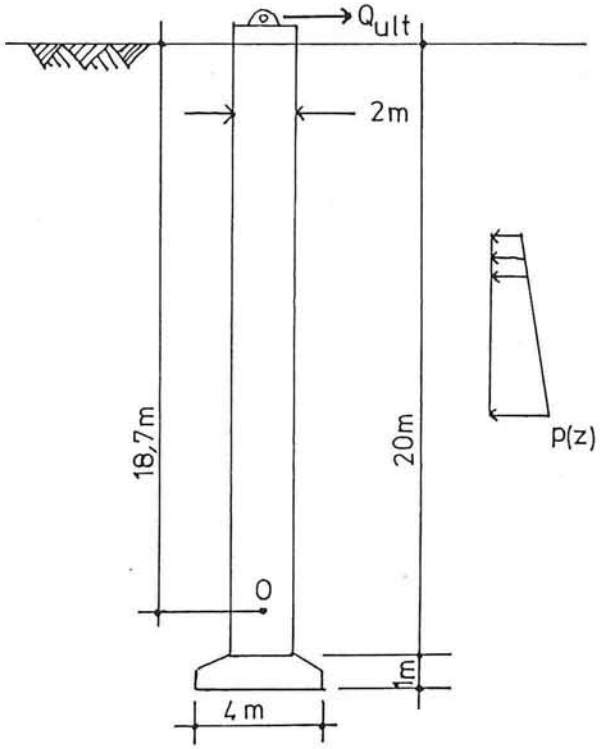
$$T_2 = \tfrac{1}{4}\pi D_2^2 p_0'\tan\delta = 1432 \text{ kN}$$

$$M_1 = \tfrac{1}{4}\pi(D_2^2 - D_1^2) * \tfrac{1}{2} * (K_p - K_a)p_0' * l = 3039 \text{ kN}$$

$$M_2 = \tfrac{1}{4}\pi D_2^2 * \tfrac{1}{2} * (K_p - K_a)p_0' * l = 4245 \text{ kN}$$

$$T_1 * 2l + T_2 * 2l + M_1 + M_2 + D_1\int_0^{20} p(z) * (z + l)dz + D_2\int_0^{20} p(z) * (z + l)dz - D_1\int_0^{l} p(z) * (z + l)dz = 0; \quad p(z) = (K_p - K_a)\gamma' z \quad (B.3.9)$$

Uit vergelijking B.3.9 volgt: $l^3 + 1.5l^2 - 7032 = 0$ en dus $l = 18.7$m. Het draaipunt bevindt zich dus 18.7 meter beneden de zeebodem, vlak bij de paalvoet.




$\gamma' = 9.4$ kN/m3
$\phi = 35°$
$\delta = 30°$
$K_p = 3.7$
$K_a = 0.27$
$D_1 = 2$m
$D_2 = 4$m
$t = 0.05$m

$EI = 3.3 * 10^{10}$ Nm²

Figuur B.3.1: "underreamed pile"

Voor de maximaal toelaatbare horizontale kracht op de paalkop volgt:

$$Q_{ult} = D_1\int_0^{18.7} p(z)dz - D_1\int_{18.7}^{20} p(z)dz - D_2\int_{20}^{21} p(z)dz - T_1 - T_2 \quad (B.3.10)$$

$$Q_{ult} = 4544.6 \text{ kN}$$

Men kan de ankerpaal als oneindig stijf beschouwen als geldt:

$\beta H < 0.6$ met H als lengte van de paal en $\beta = [k/4EI]^{1/4}$

k is de stijfheid van de grond, EI de buigstijfheid van de paal. Voor zand geldt: $k \approx 600000$ N/m². Er volgt met $EI = 3.3 * 10^{10}$ Nm²: $\beta = 0.046$ en $\beta H = 0.92 > 0.6$. De aanname van de oneindig stijve paal klopt dus niet volledig. Toch is duidelijk uit de bovenstaande benaderingen dat de maximaal toelaatbare horizontale paalbelasting ongeveer 4 MN is.

## BIJLAGE 4: BEREKENINGEN VAN UPLIFT RESISTING ANCHORS

Men kan kijken naar de invloed van variaties in de grondeigenschappen op de houdtkracht van het anker. Met bijvoorbeeld de standaardafwijkingen $\sigma_\gamma$ = 1 kN/m3 en $\sigma_{Ns}$ = 4 volgt, omdat de variabelen ongecorreleerd zijn:

$$\sigma_p = \sqrt{[(4*15*40)^2*1^2 + (4*9.4*15)^2*4.5^2]} = 3.49 \text{ MN} \qquad (B.4.1)$$

De verankering kan als veilig worden beschouwd als:

$$P_o - Q_o > s\sqrt{(\sigma_p^2 + \sigma_g^2)}; \text{ s is een veiligheidsparameter.} \qquad (B.4.2)$$

Q is de ontwerpbelasting. Bij een kans op bezwijken van $1 * 10^{-6}$ is s 4.75. Met $\sigma = 0.05Q_o$ volgt:

$$25380 - Q_o > 4.75\sqrt{[3490^2 + (0.05Q_o)^2]} \text{ en } Q = 8660 \text{ kN} = 8.66 \text{ MN}$$

Dit anker is voldoende veilig om de verticale belasting op te kunnen nemen. De horizontale belasting moet ook nog opgenomen kunnen worden. Dit geeft bij smalle dwarsafmetingen van het anker problemen. Bij gebruik van een buis van 1 meter diameter kan men het anker eerst beschouwen als onderaan ingeklemd. Bij een wanddikte van 50 mm volgt uit de vergelijkingen B.3.6 en B.3.7 dat bij een horizontale belasting op de ankerkop van 4 MN een verplaatsing van de ankerkop van 2.63 m optreedt !. Een horizontale belasting van 2 MN geeft een verplaatsing van 0.47 m. Als men het anker als een stijf geheel beschouwd, en kijkt naar het momenten evenwicht om de kop van het anker dan volgt als maximum toelaatbare horizontale belasting 1393 kN, dit is te weinig. Als men nu over de bovenste 5 meter van het grondanker platen bevestigt van 1 meter breedte zodat de totale breedte van de ankerschacht 3 meter wordt, (zie ook figuur B.4.1), dan neemt de maximum toelaatbare horizontale belasting toe tot 1921 kN, dit is nog steeds te weinig.

$\phi = 35°$
$\delta = 30°$
$\gamma' = 9.4$ kN/m3

T = 72.5 kN
T = 651.3 KN
M = 2901.8 kNm
M = 53.8 kNm

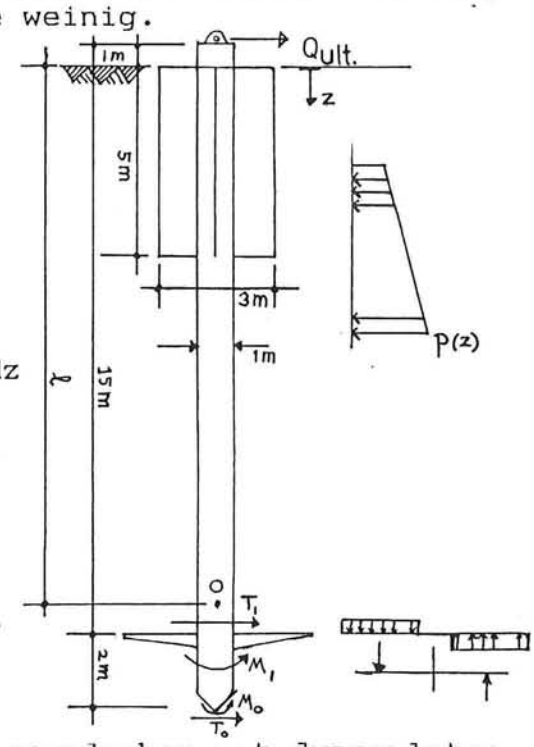
$$T_0 * 18 + T_1 * 16 + M_0 + M + \int_{14.2}^{17} p(z)(z+1)dz$$

$$- 3 * \int_0^5 p(z)(z+1)dz - \int_5^{14.2} p(z)(z+1)dz = 0$$

$$l^3 + 2.26 l^2 - 3288 = 0 \; ; \; l = 14.2 \text{ m}$$

$$Q_{ult} = 3*\int_0^5 p(z)dz + \int_5^{14.2} p(z)dz - \int_{14.2}^{17} p(z)dz -$$

$$T_0 - T_1; \; Q_{ult} = 1921 \text{ kN}$$




Figuur B.4.1: grondanker met dwarsplaten

## BIJLAGE 5 BEREKENING VAN DE WANDDIKTE VAN SUCTION PILES

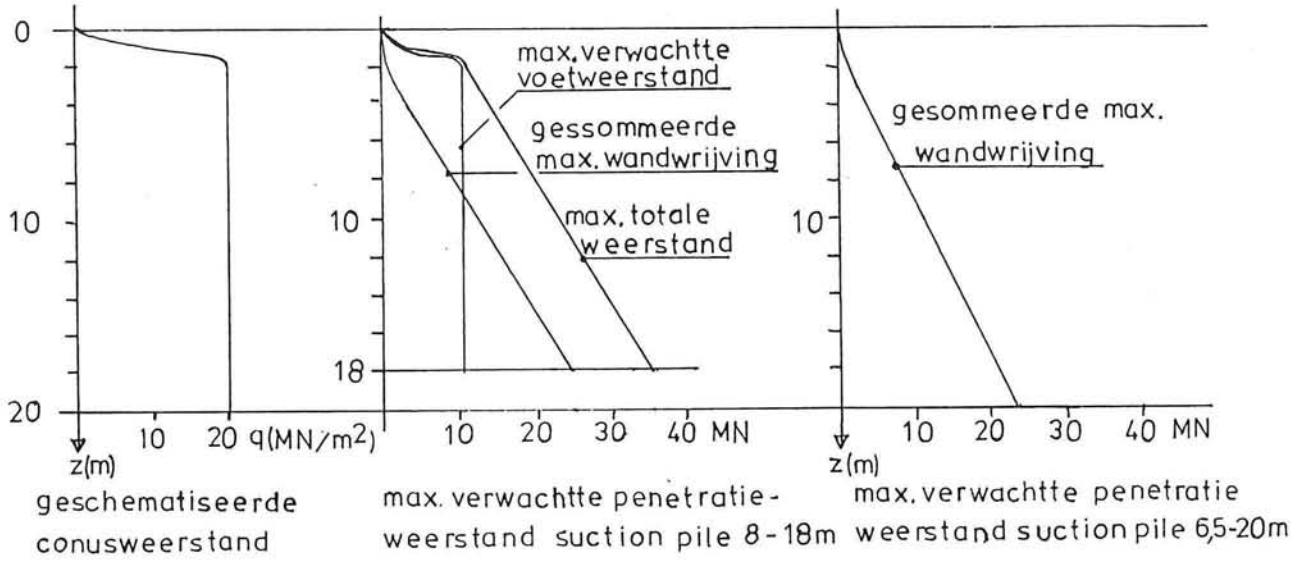
De wanddikte van suction piles kan worden berekend door de suction pile te beschouwen als een vat dat onder uitwendige druk staat. De suction pile is echter aan de onderzijde open, en wordt daar gedeeltelijk ondersteund door de grond. Bij de installatie van de suction pile zal hij eerst door zijn eigengewicht een klein eind in de bodem penetreren. De ondersteuning van de grond is dan nog gering. De druk die nodig is om verdere penetratie te bereiken is dan echter nog klein, maar de lengte van de suction pile boven de zeebodem is nog groot. Bij een te kleine wanddikte zal de suction pile door de uitwendige waterdruk gaan plooien en dus bezwijken. Een berekeningsmethode voor de wanddikte van de suction pile waarmee veilige uitkomsten worden verkregen is die waarbij de suction pile wordt berekend als een drukvat met een lengte 2 maal zo groot als de lengte van de suction pile. Bij deze berekeningsmethode hoeft men ook geen rekening te houden met imperfecties in de doorsnede van de suction pile (Niet perfect rond). De maximum uitwendige druk kan worden berekend uit de voetweerstand en de wandwrijving samen, gedeeld door het bovenoppervlak van de suction pile. De bezwijkdruk van de suction pile, de druk waarbij de suction pile gaat plooien kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$P = 2.80E(t/D)^{2.5}/(1/D) \qquad (B.5.1)$$

Dit is een empirische vergelijking uit het Pressure vessel design handbook die voldoet voor cylinders waarvoor geldt:

$$L < L_c;\ L_c = 1.11D\sqrt{(D/t)} \qquad (B.5.2)$$

In deze vergelijkingen is P de uniforme uitwendige bezwijkdruk, E de elasticiteitsmodulus van staal, t de wanddikte, D de diameter van de suction pile en L twee maal de niet ondersteunde lengte van de suction pile. L is voor een cylinder met een diameter van 8 meter, en een wanddikte van 35 mm 134.3 meter. Voor een cylinder met een diameter van 6.5 meter en een wanddikte van 35 mm is L 98.3 meter. Vergelijking B.5.1 kan voor de suction piles dus toegepast worden.




Figuur B.5.1: Penetratieweerstand van de suction piles

In figuur B.5.1 is weergegeven wat het verloop van de penetratieweerstand, en dus van de benodigde uitwendige druk is voor een suction pile met een diameter van 8 meter, en een lengte van 18 meter en een wanddikte van 35 mm, en ook voor een suction pile met een diameter van 6.5 meter, een lengte van 20 meter, een wanddikte van 35 mm en uitgerust met een "toe jetting" systeem.

Voor de suction pile met een diameter van 8 meter volgt uit figuur B.5.1 en vergelijking B.5.1:

| penetratie: | max. druk: | lengte vat: | bezwijk druk: |
|---|---|---|---|
| 1 m | 99.4 kN/m² | 34 m | 175.2 kN/m² |
| 2 m | 258.6 kN/m² | 32 m | 186.1 kN/m² |
| 5 m | 348.2 kN/m² | 26 m | 229.1 kN/m² |
| 10 m | 497.4 kN/m² | 16 m | 372.2 kN/m² |
| 15 m | 636.6 kN/m² | 6 m | 992.6 kN/m² |
| 18 m | 716.2 kN/m² | 0 m | >> |

Het blijkt dat de wanddikte van 35 mm voor de penetratiediepte tussen 2 en 15 meter niet voldoende is. Dit komt omdat de voetweerstand hoog is, meer dan 10 MN. Men zal hier dus of een wanddikte van 40 mm moeten toepassen waardoor het anker ook nog zwaarder wordt, of ook een "toe jetting" systeem moeten toepassen. Voor de suction pile met een diameter van 6.5 meter volgt:

| penetratie: | max. druk: | lengte vat: | bezwijkdruk: |
|---|---|---|---|
| 2 m | 36.2 kN/m² | 36 m | 225.9 kN/m² |
| 5 m | 146.8 kN/m² | 30 m | 271.1 kN/m² |
| 10 m | 331.5 kN/m² | 20 m | 406.6 kN/m² |
| 18 m | 626.9 kN/m² | 6 m | 1355.2 kN/m² |
| 20 m | 702.2 kN/m² | 0 m | >> |

De sterkte van deze suction pile tijdens de installatie voldoet dus.

De sterkte van de bovenzijde van de suction pile kan bij toepassing van een halve bol worden berekend met vergelijking B.5.3. Met deze vergelijking wordt de toelaatbare uniforme externe druk berekend voor dunwandige schalen waarbij enige afwijking van de ideale bolvorm toegestaan is.

$$P'_a = (E/16)(t/r)^2 \qquad \text{(B.5.3)}$$

P' is de toelaatbare uitwendige druk, E is de elasticiteitsmodulus van staal, t is de wanddikte van de halve bol en r is de straal van de halve bol. Voor een halve bol met een straal van 4 meter en een wanddikte van 35 mm volgt: P' = 1004.9 kN/m². Voor een halve bol met een diameter van 3.25 meter en een wanddikte van 35 mm volgt: P' = 1522.2 kN/m². Deze twee halve bollen voldoen als afsluiting van de suction piles tijdens de installatie. Voor het opnemen van de verankeringskracht moeten aanvullende berekeningen worden gemaakt. En waarnodig verstijvingsribben worden aangebracht.

## BIJLAGE 6: TOEPASSING VAN 8 EN 10 METER DIAMETER BOEIEN

De boeien met een diameter van 8 meter hebben een waterverplaatsing van 268.1 kubieke meter. Bij een relatieve massa van 0.05 is de opwaartse kracht die op de ankerlijn wordt uitgeoefend 2.57 MN. Ten gevolge van de golfbelasting zal de maximale verticale kracht op de verankering ongeveer 3 MN zijn. De maximale horizontale kracht zal ongeveer 1.5 MN zijn. De maximale kracht in de ankerlijn zal dus 3.5 MN zijn.

Een suction pile van 5.5 meter diameter en 12 meter lengte heeft een maximale verticale houdtkracht van:

$$P_{ult} = \pi DHf = \tfrac{1}{2}\pi D(2.71H^2) = 3.37 \text{ MN}$$

Bij een wanddikte van 30 mm wordt het totaal massa aan staal 75 ton, het gewicht 639 kN onder water. Door de zeebodem moet dan worden opgenomen: 3 - 0.639 = 2.361 MN. De veiligheid op de houdtkracht is dan 3.37/2.361 = 1.43. (Iets te weinig, de suction pile zal iets groter moeten worden gekozen).

De maximale horizontale kracht die opgenomen kan worden is volgens vergelijking 6.2.3.4 12.7 MN. Dit is dus ruim voldoende om de horizontale kracht te kunnen opnemen.

De kracht die geleverd kan worden door de waterdruk is:

$$P = \tfrac{1}{4}\pi D^2 * 0.797 = 18.94 \text{ MN}$$

De maximale voetweerstand wordt $\pi Dt * 0.6 * q_c = 6.22$ MN. De maximale wandwrijving wordt $\pi DH * 0.003 * q_o = 12.44$ MN. De totale maximale penetratieweerstand wordt 6.22 + 12.44 = 18.66 MN, minder dan de 18.94 MN die geleverd kan worden.

Een boei van 8 meter diameter met een relatieve massa van 0.05 heeft een massa van 15 ton boven water. Dat komt overeen met 1.91 kubieke meter staal. De boei zou dan slechts uit een stalen schil van 9.5 mm kunnen bestaan. Het is dus noodzakelijk om kunststof toe te passen.

De ankerlijn moet een belasting van 3.5 MN kunnen opnemen. Daar kan een 87 mm ketting van 10.1 ton massa voor worden gebruikt, of een aramide kabel van 110 mm doorsnede met een massa van 500 kilo.

Om het rendement van de 8 en 10 meter meter boeien te berekenen kan het computerprogramma uit deelverslag 2 worden gebruikt. er volgt dan:

| r | h | d | sp | i | cd | cm | sr | u0 | eps | n |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [m] | [m] | [m] | [m] | | | | m/s | m/s | | |
| 4 | 75 | 10 | 50 | 0.05 | 0.25 | 0.35 | 4.69 | 7.06 | 0.0296 | 41 |
| 5 | 75 | 12 | 50 | 0.1 | 0.25 | 0.35 | 4.66 | 7.01 | 0.0475 | 26 |

r is de straal van de boeien, h is de waterdiepte, d de diepte van het middelpunt van de boeien, sp de afstand tussen de boeien in één rij, i de relatieve massa, cd de weerstandscoëfficiënt, cm de coëfficiënt van de toegevoegde massa, sr de standaardafwijking van het snelheidsspectrum, u0 de vaste snelheid in de gelineariseerde Morison vergelijking, eps het rendement van één rij boeien, en n het aantal benodigde rijen om 71 procent van de golfenergie te onttrekken.

Er zijn dus 41 rijen boeien van 8 meter diameter nodig met een onderlinge afstand van 50 meter. Er zijn 2.56 maal zo veel rijen boeien nodig als bij de toepassing van 12 meter diameter boeien. Totaal zijn er dan ongeveer 2000 boeien nodig.

In de berekening hierboven is uitgegaan van suction piles als verankering. Omdat de horizontale belasting op de verankering bij de 8 meter boeien maximaal 1.5 MN is, is de toepassing van grondankers goed mogelijk. Bijvoorbeeld het anker wat genoemd is in paragraaf 6.2.2, met een massa van ongeveer 30 ton staal, of een kleiner anker.

De 10 meter boeien met een relatieve massa van 0.1 hebben een waterverplaatsing van 523.6 kubieke meter. De massa van de boei bedraagt 54 ton. De opwaartse kracht die op de ankerlijn wordt uitgeoefend is 4.8 MN. De maximale verticale kracht op de verankering wordt tengevolge van de golfbelasting 5.4 MN. De maximale horizontale kracht wordt 3 MN. De maximale kracht in de ankerlijn wordt 6.2 MN.

Een suction pile van 7 meter doorsnede en 15 meter lengte kan een kracht van 6.7 MN op de zeebodem overbrengen. De massa van het anker met een wanddikte van 35 mm is boven water 120 ton, en onder water 104 ton. De maximale verticale kracht die het anker moet overbrengen is 5.4 - 1.02 = 4.38 MN. De aanwezige veiligheid is dus 6.7/4.38 = 1.53.

De maximaal toelaatbare horizontale kracht die de suction pile kan overbrengen is volgens vergelijking 6.2.3.4 25.7 MN, ruim voldoende om de horizontale kracht te kunnen overbrengen.

De maximale kracht die door de waterdruk geleverd kan worden is 30.7 MN. De maximale voetweerstand is 9.2 MN en de maximale wandwrijving 19.8 MN, samen 29 MN. De kracht die door de waterdruk geleverd kan worden is dus voldoende om volledige penetratie te verkrijgen.

De ankerlijn moet 6.2 MN kunnen opnemen. Er kan daarvoor een 120 mm ketting met een totaal massa van 17.5 ton worden gebruikt, of een aramide kabel met een diameter van 160 mm en een massa van 1000 kilo.

Er zijn bij toepassing van 10 meter diameter boeien 26 rijen boeien nodig. Dat zijn er 26/16 = 1.625 maal zoveel als bij de 12 meter boeien, totaal ongeveer 1400. Doordat de golfbreker niet recht loopt zijn er bij een groter aantal rijen boeien een meer dan evenredig aantal extra boeien nodig.

## BIJLAGE 7: KATHODISCHE BESCHERMING VAN STALEN BOEIEN EN SUCTION PILES

Een goedkope manier van bescherming tegen corrosie van staal in zeewater is de toepassing van kathodische protectie. Er worden dan anodes van een minder edel metaal dan staal aan de stalen constructie bevestigd die in de loop der jaren wegcorroderen. Bij een voldoende aantal anodes blijft het staal onaangetast. Als anode metalen kunnen bijvoorbeeld aluminium of zink worden gebruikt. In de Noordzee is om voldoende bescherming te krijgen een stroom van 100 mA per vierkante meter oppervlakte van de constructie nodig. De capaciteit van aluminium anodes is 2750 Ah per kg. Om dus een stalen boei van 12 meter diameter, en een uitwendig oppervlak van 452 $m^2$, te beschermen gedurende 25 jaar is 3600 kilo aan anodes nodig. Bij een massa van 400 kilo per anode zijn er dus 9 anodes nodig. De boeien bevinden zich geheel onder water, ook bij golven en laag tij. Daardoor is de levensduur van de anodes groter. De hoge snelheid van de boei bij excitatie door de golven kan echter de levensduur van de aluminium anodes verkorten. De kosten van de anodes bedragen ongeveer 5 gulden per kilo. De kosten van de kathodische bescherming zijn dus ongeveer 20000 gulden. In de begroting in hoofdstuk 8 is er van uitgegaan dat de anodes onderdeel van het totale massa van de boeien vormen, en per kg ook evenveel kosten als het geconstrueerde staal. (beide 5 gulden per kg.).

De totale oppervlakte van de suction pile met een lengte van 15 meter en een diameter van 6 meter is 622 vierkante meter. Voor een bescherming gedurende 25 jaar is 4950 kilo aan aluminium anodes nodig. Totaal 13 anodes van 400 kg per stuk. In de totale massa van de suction piles is dit ook meegenomen. De kosten van de kathodische bescherming zijn per suction pile 26000 gulden.

## BIJLAGE 8: PROGRAMMA VOOR RENDEMENTSBEREKENINGEN AAN DE BOEIEN

Voor dit programma is de theorie zoals genoem in deelverslag 2 gebruikt. Deze theorie gaat echter uit van een discreet frequentiespectrum met een bepaalde energiedichtheid per frequentie. In het programma wordt echter gebruikt gemaakt van een continu spectrum, het JONSWAP frequentiespectrum. Hiervoor moet de theorie iets aangepast worden. Dat gaat als volgt:

gegeven is het spectrum van $\eta$ : $E_{\eta\eta}(f)$.

Daaruit wordt het spectrum van de relatieve snelheid $u_r$ van de boei berekend met de volgende vergelijking (B.8.1):

$$E_{uu}(f) = \omega^2 * E_{\eta\eta} * \left(\frac{\cosh(k(h-d))}{\sinh(kh)}\right)^2 * (1 + |H|^2 - 2 * \cos\theta)$$

is Gaussisch verdeeld. u is dan ook Gaussisch verdeeld met de volgende kansdichtheidsfunctie:

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi m0)}} * \exp\left(-\frac{u^2}{2m0}\right) \qquad (B.8.2)$$

Om het vermogen te kunnen berekenen wat de boei aan de golven onttrekt is nodig de tijdsgemiddelde waarde van de absolute waarde van $u_r$ tot de derde macht:

$\overline{|u_r|^3}$, gelijk aan de verwachtingswaarde.

De verwachtingswaarde van $|u_r|^3$ , $E\{|u_r|^3\} = |M3|$ is gelijk aan:

$$2\int_0^\infty u_r^3\, p(u_r)du_r = 2\int_0^\infty u_r^3 \frac{1}{\sqrt{(2\pi m0)}} * \exp\left(-\frac{u^2}{2m0}\right)du_r \qquad (B.8.3)$$

$$= 2 * \left[\frac{-u^2 m0}{\sqrt{(2\pi m0)}} * \exp(-u^2/2m0) - \frac{2m0^2}{\sqrt{(2\pi m0)}} * \exp(-u^2/2m0)\right]_0$$

$$= 2 * \left[(0-0) - \left(0 - \frac{2m0^2}{\sqrt{(2\pi m0)}}\right)\right] = \frac{4m0^2}{\sqrt{(2\pi m0)}} = \frac{4}{\sqrt{(2\pi)}}\, m0 =$$

$$= 1.60 * m0^{3/2}$$

In deze vergelijkingen is:

| | |
|---|---|
| $u_r$ | relatieve snelheid, het snelheidsverschil water - boei |
| m0 | oppervlakte van het spectrum van de relatieve snelheid |
| M3 | derde moment van de kansdichtheidsfunctie van $u_r$ |
| $E_{\eta\eta}(f)$ | spectrum van de oppervlakteuitwijking (energiedichtheidsspectrum) |
| $E_{uu}(f)$ | spectrum van de relatieve snelheid |
| $p(u_r)$ | kansdichtheidsfunctie van de relatieve snelheid |
| H | de overdrachtsfunctie tussen de waterbeweging en de beweging van de boei |
| $\theta$ | het faseverschil tussen de waterbewehing en de beweging van de boei |
| $\omega$ | de hoekfrequentie van de golven |
| $\eta$ | de uitwijking van het zeeoppervlak |
| h | de waterdiepte |
| d | de diepte van het middelpunt van de boei onder water |
| k | het golfgetal, $2\pi/L$ |
| L | de golflengte |

BIJLAGE 9: STRUCTUURSCHEMA VAN HET PROGRAMMA BOEI.C

```
g = 9.81;m0 = 0;eps = 0;s1 = 0;k = 0;
for (;;)
    read a,h,d,l,sp,i,cd,cm,sir,t1,t2,dt,hs,t3,hsn;
    m1 = sir²;m2 = sir;
    while (m1-m0) > (0.01 * m1) or (m1 - m0) < (-0.01 * m1)
        y: m1 = sir²        k =1        n: m1 = m0
        m0 = 0;teller = 0;noemer = 0;t = t1;
        while t < t2
            w = 2π/t;t0 = t;t = t + dt;f = 1/t;
            c = eng(w,t);
            m0 = m0 + c * ((1/t0) - (1/t));
            s1 = √m0
            teller = teller + c * ((1/t0) - (1/t));
            noemer = se(f)*((1/t0) - (1/t)) * (1.56 * t/2);
        print: tussentijdse stand.afwijking rel. snelh.: s1;
        m2 = √m0;
        k = k + 1;
    m0 = 0;
    eps = (πa²*cd/(g*sp))*((1.60*teller*√teller)/noemer);
    n = log(hsn²/hs²)/log(1 - eps);
    print: standaardafwijking van de relatieve snelheid: s1;
    print: rendement per rij boeien: eps;
    print: benodigde aantal boeien: n;
```

```
eng(w,t):
u0 = 1.5045 * m2;ro = 1030;g = 9.81;mw = (4/3)*ro*π*a²*a;
ms = i * mw;cl = ro*π*a²*cd/2;e = mw*(1+cm)/(mw*cm + ms);
z = cl*u0/(mw*cm + ms); b = (g/l)*(mw - ms)/(mw*cm + ms);
hh = w²*((e² * w²) + (z² * w²))/((b² * w²)² + (z² * w²));
te = arctan(z * w/b² * w²) - arctan(e * w/z);
k = 2 * π/1.56 * t²;
sr = se(f) * cosh(k * (h - d))² * w² *
(1 + hh -2 * cos(te))/(sinh(k * h))²;
return(sr);
```

```
se(f):
fm = 1/t3; m3 = hs²/3.8²;gam = 3.3;
alf = 5*m3/(pow(2*π,-4)*g²*pow(fm,-4)*(0.78+(0.22*gam)));
if (x < fm) s = 0.07 else s = 0.09;
u = (-0.5*((x - fm)/(s*fm)²); r = exp(u); p = pow(gam,r);
v = -1.25 * pow(x/fm,-4);
q = p * alf * g² * pow(2 * π,-4) * pow(x,-5) * exp(v);
return(q);
```

## BIJLAGE 10: HET PROGRAMMA BOEI.C (geschreven in c)

```
/*
    boei.c

*/

#include (math.h)
#define PI     3.141593

double a,h,d,l,sp,i,hsn,cm,cd,sir,f,g,alf,gam,hs,m0,m1,m2,m3,t3;


main()
{
    double  w,t,t0,t1,t2,dt,s1,k,c,eng(),se(),teller,noemer,eps,n;

    printf("            Programma boei.c versie 1.0, april 1988\n");
    printf("                    J.S. Reedijk T.U. Delft\n");
    printf("\n     Dit programma gaat uit van diep water omstandigheden\n");
    printf("         Er wordt gerekend met een JONSWAP spectrum\n");

    g = 9.81;
    m0 = 0;
    eps = 0;
    s1 = 0;
    k = 0;
    for (;;) {
        printf("\n\n a   : de straal van de boei        [m]: ");
        scanf("%lf",&a);
        printf(" h   : de waterdiepte               [m]: ");
        scanf("%lf",&h);
        printf(" d   : de verankeringsdiepte        [m]: ");
        scanf("%lf",&d);
        printf(" l   : de ankerlijnlengte           [m]: ");
        scanf("%lf",&l);
        printf(" sp  : de afstand tussen de boeien  [m]: ");
        scanf("%lf",&sp);
        printf(" i   : de relatieve massa              : ");
        scanf("%lf",&i);
        printf(" cd  : de cd waarde                    : ");
        scanf("%lf",&cd);
        printf(" cm  : de cm waarde                    : ");
        scanf("%lf",&cm);
        printf("\n sir : de beginschatting van de standaardafwijking\n");
        printf("       van de relatieve snelheid            [m/s]: ");
        scanf("%lf",&sir);
        printf("\n t1 : de kleinste golfperiode waarmee gerekend wordt (> 3s) [s]: ");
        scanf("%lf",&t1);
        printf(" t2 : de grootste golfperiode waarmee gerekend wordt        [s]: ");
        scanf("%lf",&t2);
        printf(" dt : de stapgrootte waarmee gerekend wordt                 [s]: ");
        scanf("%lf",&dt);
        printf("\n hs : de significante golfhoogte [m]: ");
        scanf("%lf",&hs);
        printf(" t3 : de piekperiode             [s]: ");
        scanf("%lf",&t3);
        printf("\n hsn : de gewenste significante golfhoogte na de golfbreker [m]: ");
        scanf("%lf",&hsn);
```

```
/*
iteratieve berekening van u0
*/

        m1 = sir * sir;
        m2 = sir;
        while ((m1 - m0) > (0.01 * m1) || (m1 - m0) < (-0.01 * m1)) {
            if (k < 1)
                m1 = sir * sir;
            else
                m1 = m0;
            m0 = 0;
            teller = 0;
            noemer = 0;
            t = t1;
            while (t < t2) {
                w = 2 * PI / t;
                t0 = t;
                t += dt;
                f = 1 / t;
                c = eng(w,t);
                m0 += c * ((1 / t0) - (1 / t));
                s1 = sqrt(m0);
                teller += c * ((1 / t0) - (1 / t));
                noemer += se(f) * ((1 / t0) - (1 / t)) * (1.56 * t / 2);

            }
            m2 = sqrt(m0);
            printf("\n tussentijdse standaardafwijking van de relatieve snelheid [m/s]: s1 = %lf",s1);
            k += 1;
        }
        m0 = 0;
        eps = (PI * a * a * cd /(q * sp)) * ((1.60 * teller * sqrt(teller)) / noemer);
        n = log((hsn * hsn) / (hs * hs)) / log(1 - eps);
        printf("\n\n standaardafwijking van de relatieve snelheid      [m/s]: sr  = %lf",s1);
        printf("\n rendement per rij boeien (fractie van het golfvermogen]: eps = %lf",eps);
        printf("\n benodigde aantal rijen boeien:                          n   = %lf",n);
    }
}

/*
berekening van de overdrachtsfactoren van de responsie van de boei
*/

double    eng(w,t)
double    w,t;
{
    double u0,q,ro,mw,ms,c1,e,z,b,hh,te,tr,k,se(),sr;

    u0 = 1.5045 * m2;
    ro = 1030;
    g = 9.81;
    mw = (4 / 3) * ro * PI * a * a * a;
    ms = i * mw;
    c1 = ro * PI * a * a * cd / 2;
    e = mw * (1 + cm) / (mw * cm + ms);
    z = c1 * u0 / (mw * cm + ms);
    b = (g / l) * (mw - ms) / (mw * cm + ms);
```

```
    hh = w * w * ((e * e * w * w) + (z * z * w * w)) / ((b * b - w * w) * (b * b - w * w) + (z * z * w * w));
    te = atan(z * w / b * b * w * w) - atan(e * w / z);
/*
    tr = sqrt(hh);
    printf(" f = %lf tr = %lf te = %lf\n",f,tr,te);
*/
    k = 2 * PI / (1.56 * t * t);
    sr = se(f) * cosh(k * (h - d)) * cosh(k * (h - d)) * w * w * (1 + hh - 2 * cos(te)) / (sinh(k * h) * sinh(k * h));
/*
    printf("t = %lf f = %lf sr = %lf\n",t,f,sr);
*/
    return(sr);
}

/*
berekening van het JONSWAP spectrum
*/

double    se(x)
double    x;

{

    double s;
    double p;
    double fm;
    double q;
    double r;
    double u;
    double v;

    fm = 1 / t3;
    m3 = pow(hs, 2)/pow(3.8, 2);
    gam = 3.3;
    alf = 5 * m3 / (pow(2 * PI, -4) * pow(g, 2) * pow(fm, -4) * (0.78 + (0.22 * gam)));

    if (x < fm)
        s = 0.07;
    else
        s = 0.09;

    u = (-0.5 * ((x - fm)/(s * fm)) * ((x - fm)/(s * fm)));
    r = exp(u);
    p = pow(gam, r);
    v = (-1.25 * pow(x / fm, -4));
    q = p * alf * pow(g,2) * (pow(2 * PI, -4) * pow(x, -5) * exp(v));

    return(q);

}
```