

# Bachelor Eindwerk

## Dynamische verweking

Auteur: Edwin Kester

Begeleider: Prof. Wout Broere

Delft University of Technology



## Voorwoord

Voor u ligt mijn eindwerk voor de bacheloropleiding civiele techniek, hiermee hoop ik mijn opleiding met een voldoende resultaat af te sluiten. Ik heb dit eindwerk geschreven naar indeling van een onderzoeksthesis naar het onderwerp dynamische verweking.

Deze thesis geeft een beschrijving van het verschijnsel alsmede een aantal onderzoeken en methoden om het verschijnsel te kunnen voorspellen. Het onderwerp valt onder de sectie Geo-engineering, tevens de titel van de master die ik volgend jaar zal starten. Ik ben bij dit onderwerp terecht gekomen omdat mijn interesse niet alleen ligt bij de geofysica maar ook bij offshore engineering, deze twee interesses gecombineerd hebben mij tot dit onderwerp geleid.

Mijn dank gaat uit naar mijn eindwerk begeleider en tevens coördinator Prof. W. Broere zonder wie ik dit onderwerp niet had kunnen vinden. Daarnaast heeft Prof. W. Broere mij ondersteund en begeleid in de zoektocht naar informatie over dit onderwerp.

## Samenvatting

In deze thesis komt het onderwerp dynamische verweking aan bod, er wordt onderzoek gedaan naar het verschijnsel, waarbij is vastgehouden aan de volgende hoofdvraag: “hoe zit het verschijnsel dynamische verweking precies in elkaar, welke parameters hebben invloed op het verschijnsel, wanneer treedt het fenomeen op en hoe is dit te voorspellen?” deze hoofdvraag zal in deze thesis worden ontleed om zo stap voor stap antwoord te geven en het verschijnsel te kunnen verklaren.

In hoofdstuk 3.1 vindt men een uitvoerige beschrijving van het verschijnsel dynamische verweking. In dit hoofdstuk komt men tot de ontdekking dat het verschijnsel is opgebouwd uit twee verschillende mechanismen, namelijk een transiënt mechanisme en een opbouwend, residueel mechanisme welke ontstaat ten gevolge van dit transiënte mechanisme. Vervolgens komt men in hoofdstuk 3.2 een aantal invloedsfactoren tegen, van deze parameters wordt vastgesteld hoe zij gecorreleerd zijn met het verschijnsel dynamische verweking en of desbetreffende parameters een grote of kleine invloed hebben op het verschijnsel dynamische verweking.

Na hoofdstuk 3 vindt men in hoofdstuk 4.1 verschillende randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan om het verschijnsel te kunnen zien optreden, het gaat hier om zowel grondmechanische als hydraulische randvoorwaarden. Hoofdstuk 4.2 beschrijft de modellen die tot op heden zijn toegepast in onderzoeken gedaan naar het fenomeen dynamische verweking, hierbij komen 5 modellen aan bod met elk hun eigenschappen. Vervolgens komen in hoofdstuk 4.3 een aantal onderzoeken zelf aan bod waarin hun bevindingen worden beschreven.

In hoofdstuk 5 wordt gekeken naar verschillende manieren om het verschijnsel te kunnen voorspellen aan de hand van beschikbare offshore meettechnieken. Eerst worden verschillende beschikbare methoden beschreven waarmee offshore onderzoek kan worden gedaan en waarin deze verschillen van on-shore meettechnieken.

Uiteindelijk wordt in de conclusie uiteengezet wat de beste methoden zijn om het verschijnsel te voorspellen en waar men op dient te letten bij het analyseren van het verwekingspotentieel.

## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	2
Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave .....	4
1. Inleiding .....	6
2. Doelstelling .....	8
3. Dynamische verweking.....	9
3.1 Het verschijnsel van dynamische verweking.....	9
3.2 Invloedsfactoren.....	13
3.2.1 Initiële spanningstoestand (Yasser E. Mostafa, 2006): .....	13
3.2.2 Initiële lithostatische druk (R. Noorzad, 2009):.....	13
3.2.3 Consolidatie graad(Overconsolidation Ratio) (R. Noorzad, 2009): .....	13
3.2.4 Normaalspanning( $\sigma_n$ ) (R. Noorzad, 2009): .....	13
3.2.5 Permeabiliteit( $\kappa$ ) (Yin L. Young, 2009) (Xu, 2012): .....	14
3.2.6 Stijfheid( $k$ ) (Sakai, 1992):.....	15
3.2.7 Verzagingsgraad( $S$ ) (Hanbing Bian, 2009) (Cha, 2009):.....	15
3.2.8 Golf periode( $T$ ) (Cha, 2009) (Xu, 2012): .....	16
3.2.9 Water diepte( $d$ ) (Cha, 2009) (Xu, 2012): .....	16
3.2.10 Golf hoogte( $H$ ) (Cha, 2009) (Xu, 2012): .....	17
3.2.11 Zeebodem dikte( $D$ ) (Cha, 2009) (Xu, 2012):.....	17
3.2.12 Golf patroon (Haijiang Liu, 2007) (Mutlu Sumer, 2012):.....	17
3.3 Conclusie .....	18
4. Randvoorwaarden, theorieën en onderzoek.....	19
4.1 Randvoorwaarden van optreden .....	19
4.1.1 Grondmechanische randvoorwaarden:.....	19
4.1.2 Hydraulische randvoorwaarden:.....	19
4.2 Theoretische modellen.....	20
4.2.1 Ongekoppelde model (gedraineerde model) (Nakamura, 1973):.....	20
4.2.2 Consolidatie model (Yamamoto, 1978):.....	20
4.2.3 P-Z Mark III Model (M. Zienkiewicz, 1986):.....	21
4.2.4 Dynamische model (Rahman, 2001): .....	21
4.2.5 Poro elastoplastische model (Sekiguchi, 1995):.....	21

4.2.6	Artificial Neural Networks (ANN's) (Cha, 2009) .....	21
4.3	Recent onderzoek.....	22
5.	Voorspelbaarheid en meetbaarheid.....	24
5.1	Bureau onderzoek .....	24
5.2	Geotechnisch vooronderzoek .....	25
5.2.1	Seismische reflectie .....	25
5.2.2	Seismische refractie.....	25
5.2.3	Seismische tomografie .....	26
5.2.4	Magnetische methode .....	27
5.2.5	Electische methoden .....	27
5.2.6	Gravimetrie, geodesy, seismo-electrische- en andere methoden .....	27
5.3	Geotechnisch onderzoek.....	28
5.3.1	In-situ meetsystemen.....	28
5.3.2	Laboratorium onderzoek.....	30
5.4	Conclusie .....	31
6.	Conclusie.....	32
7.	Bijlagen .....	33
	Bijlage A: Bibliography .....	33
	Bijlage B: Lijst van figuren .....	37
	Bijlage C: Biot's theorie .....	38
	Bijlage D: Geschiktheid verschillende grondtests.....	39

## 1. Inleiding

De welvaart van de mensheid is afhankelijk van de economie, om deze economie op gang te houden is er energie nodig. De meest voorkomende vorm van energie is tot op heden nog steeds te vinden in de vorm van fossiele brandstoffen. Deze fossiele brandstoffen vormen een eindige energiebron maar zijn op veel plekken te vinden, zowel te land als te water. De alsmear toenemende vraag naar energie heeft de mensheid gedwongen tot het maximaal benutten van de aanwezige energie voorraden. Dit betekent dat men sinds ongeveer een eeuw niet alleen op land zoekt naar olievelden maar ook gebruik maakt van offshore exploitatie. Door het feit dat de fossiele brandstoffen een eindige energiebron vormen, is men genooddaakt op steeds lastigere en gevaarlijkere plekken te zoeken naar energie.

Deze offshore industrie is afhankelijk van overwegend staalconstructies, zowel drijvende platforms als constructies gefundeerd op de bodem behoren tot de mogelijkheden, beiden brengen hun eigen risico's met zich mee. Bij de op de bodem gefundeerde constructies is de fundering een zeer belangrijk onderdeel ten aanzien van de stabiliteit van de constructie, er kunnen zich hier tal van problemen voordoen.

Behalve bij de winning van fossiele brandstoffen speelt de offshore industrie ook een belangrijke rol bij de winning van duurzame energie, duurzame offshore energie wordt gewonnen in de vorm van bijvoorbeeld offshore windenergie. Met een doelstelling van de Nederlandse overheid dat in het jaar 2020 14% van de energievoorziening duurzaam moet zijn, moet windenergie ongeveer 6000 MW bij kunnen dragen. Op dit moment (maart 2014) levert de windenergiesector ongeveer 2500 MW (Rijksoverheid, 2014)



**Figuur 1. Verschillende offshore funderingen (Redwave, 2014)**

Bij de constructie van offshore projecten dient men altijd rekening te houden met een groot aantal risico's. Deze risico's zijn erg uiteenlopend maar voornamelijk afhankelijk van de toegepaste constructiemethode en locatie van het project, echter in alle vormen van offshore engineering spelen dynamische belastingen een zeer belangrijke rol. Deze belastingen kunnen worden veroorzaakt door bijvoorbeeld wind, golfslag, seismische activiteiten of andere oorzaken. Wat de oorzaak van de belasting ook is, deze zal nooit mogen leiden tot instabiliteit of andere vormen van schade welke de integriteit van de constructie in gevaar kunnen brengen.

Er zijn twee verschillende mechanismen van bodeminstabiliteit te onderscheiden waaraan een fundering kan worden blootgesteld, namelijk instabiliteit ten gevolge van afschuiving en instabiliteit ten gevolge van verweking. Beide vormen van instabiliteit zijn gerelateerd aan de korrelspanningen en waterdrukken in de grond.

Instabiliteitstaat ten gevolge van afschuiving wordt bereikt wanneer de maximale afschuifweerstand van de grond wordt overschreden. Deze afschuifweerstand is voornamelijk afhankelijk van de cohesie, hoek van interne wrijving en korrelspanning.

In deze thesis wordt gekeken naar offshore projecten welke gefundeerd zijn op de bodem, hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld boorplatformen, maar ook aan kleinere constructies zoals windturbines. Zoals eerder gezegd, is een veelvoorkomend probleem bij het funderen van dit soort constructies, het verweken van de bodem waarbij de pore-pressures te hoog worden, wat uiteindelijk leidt tot instabiliteit van de fundering van de constructie. Er kunnen verschillende verschijnselen ten grondslag liggen aan deze verweking, men kan bijvoorbeeld denken aan een plotselinge verhoging van de belasting op de grond, of verweking als gevolg van initiële instabiliteit. Deze verschijnselen staan ook wel bekend als static liquefaction of statische verweking en kunnen leiden tot grote calamiteiten.

Een andere vorm van verweking is het zogenaamde dynamic liquefaction, het verschil hierbij ten opzichte van static liquefaction is dat de grond nu niet verweekt ten gevolge van een plotselinge of statische belasting maar ten gevolge van een dynamische, vaak langer aanhoudende belasting. Dit is een probleem waar men vaak tegen aanloopt maar nog geen duidelijke oplossingen voor gevonden heeft, vooral het schatten van het risico aan de hand van goedkope snelle tests is iets waar ruimte ligt voor verbetering. In deze thesis wordt daarom gekeken naar de tot op heden beschikbare methoden om deze kans op dynamic liquefaction in te schatten en te analyseren.

## 2. Doelstelling

In deze thesis wordt zoals eerder besproken aandacht geschonken aan het verschijnsel wat bekend staat als dynamische verweking. Hierbij wordt gekeken naar manieren om dit verschijnsel te analyseren en modelleren. Ook wordt gekeken naar de voorspelbaarheid van dit verschijnsel, om met zo min mogelijk voorkennis een grove schatting te kunnen maken van het risico wat bestaat met betrekking tot dynamische verweking. Naast het kunnen schatten van de kans op verweking, het schatten van het verwekingspotentieel (liquefaction potential), is het van belang naar mogelijkheden te zoeken om deze verweking te voorkomen. Onze hoofdvraag in deze thesis zal zijn: “hoe zit het verschijnsel dynamische verweking precies in elkaar, welke parameters hebben invloed op het verschijnsel, wanneer treedt het fenomeen op en hoe is dit verschijnsel te voorspellen?” hierbij zullen we ook kijken naar diverse onderzoeken gedaan naar het verschijnsel dynamische verweking.

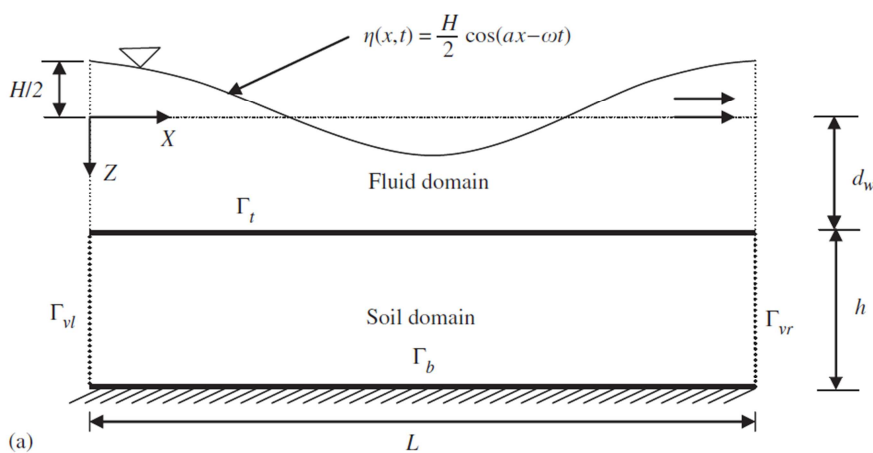


### 3. Dynamische verweking

#### 3.1 Het verschijnsel van dynamische verweking

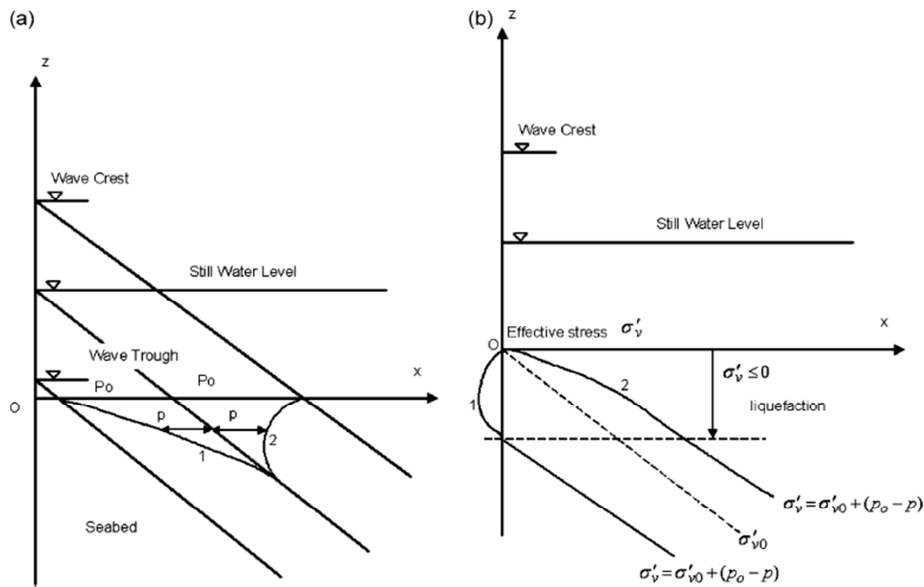
Het verschijnsel dynamische verweking komt voor in zeebodems en in mindere mate ook in rivierbodems doordat progressieve water golven zich in en over deze bodem voortplanten. Het periodieke karakter van deze golven in combinatie met het feit dat deze vaak langere periode aanhouden kan de pore-pressures doen verhogen, met verweking tot gevolg. De door de golven opgebouwde waterdruk in de poriën kan niet op hetzelfde tempo verdwijnen door een tekort aan consoliderend vermogen, dit probleem doet zich voornamelijk voor in cohesieloze gronden. De staat verweking wordt namelijk bereikt wanneer de korrelspanning negatief is en deze negatieve korrelspanning groot genoeg is om de contactspanningen van de afzonderlijke gronddeeltjes verloren te laten gaan, in deze staat gedraagt de grond zich als een vloeistof en kan deze geen schuifspanningen meer overbrengen.

Zoals algemeen bekend is binnen de geofysica, leiden verhoogde pore-pressures tot een verlaging van de sterkte van de grond. Deze pore-pressure verhoging kan er zelfs toe leiden dat de grond (bijna) zijn totale draagkracht verliest, of te weinig draagkracht overhoudt om de op de grond rustende fundering nog te kunnen ondersteunen. In dit geval spreken we van verweking ten gevolge van een dynamische last, of dynamische verweking. Het probleem dynamische verweking speelt niet alleen een rol bij funderingen van offshore constructies, maar kan zich manifesteren bij alle vormen van offshore engineering, denk hierbij bijvoorbeeld aan het aanleggen van pijpleidingen. Maar zelfs vormen van on-shore engineering kunnen worden blootgesteld aan dit fenomeen, denk hierbij bijvoorbeeld aan dijklichamen.



**Figuur 2. Interactie golf-zeebodem (Wang, 2007)**

In de standaard grondmechanica wordt over het algemeen een hydrostatische waterdruk aangenomen over zowel de diepte van de bodem als de diepte van het water. Bij golfslag echter is dit een aanname die niet meer valt te behouden, dit omdat de golfbeweging een variatie in waterhoogte teweeg brengt welke resulteert in een variatie van de waterdruk in de poriën van de grond. Deze variatie in waterdruk dempt uit met de diepte, dit betekent dus dat op genoeg diepte de waterdruk weer hydrostatisch te beschouwen is. Wanneer we deze twee gegevens combineren komen we uit op de volgende grafische weergave, zie figuur 2.



**Figuur 3. Concept van poriendruk verhoging en verweking (Zhang, 2005)**

Er zijn verschillende mechanismen waarop het verschijnsel verweking kan optreden, echter alvorens dit te kunnen doen moet men duidelijk hebben wat het verschijnsel precies inhoudt. Er kunnen meerdere oorzaken aan de verweking ten grondslag liggen, deze zijn te onderscheiden in de volgende 3 gevallen (Wang, 2007):

1. Wanneer de verticale korrelspanning kleiner wordt dan 0, dit betekent dat de effectieve korrelspanning t.g.v. de golf (wave induced effective stress),  $\sigma'_{zz}$  groter is dan het droge gewicht van de bovenliggende grondlaag (Yamamoto, 1978).

$$\sigma'_{zz} \geq \gamma'z$$

$$\sigma'_{zz} = \text{wave induced vertical effective stress}$$

$$\gamma' = \text{effective volumetric weight}$$

$$z = \text{depth}$$

2. Wanneer de volumieke effectieve spanning ten gevolge van de golf (wave-induced effective volumetric stress)  $\sigma'_{vol}$ , groter wordt dan de initiële volumieke spanning (initial effective volumetric stress),  $\sigma'_{vol_0}$  in de bodem. (Wang, 2007)

$$\sigma'_{vol} \geq \sigma'_{vol_0}$$

$$\sigma'_{vol} = \frac{1}{3}(1 + \nu)(\sigma'_{zz} + \sigma'_{xx}) \quad \sigma'_{vol_0} = \frac{1}{3} \frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \gamma'z$$

$$\sigma'_{xx} = \text{wave induced horizontal effective stress}$$

$$\nu = \text{Poisson ratio}$$

3. Wanneer de opwaartse kwelkracht groter is dan het effectieve gewicht van de bovenliggende grondlaag. In dit geval is de kracht ten gevolge van kwel groter dan het gewicht van de grond en komen de grond deeltjes los van elkaar. (Wang, 2007)

$$(P_z - P_0) \geq \gamma'z$$

Dit zijn drie verschillende grondslagen met allen hetzelfde resultaat, namelijk verweking. Dit kan omgezet worden in de volgende drie dimensionale uitdrukking welke moet gelden zolang de bodem niet verweekt en dus stabiel is (Zhang, 2005):

$$-\frac{1}{3}(\gamma_s - \gamma_w)(1 + 2K_0)z + (P_b - p) \leq 0$$

$P_b$  = Golf druk op bodemoppervlak

$P$  = Pore-pressure ten gevolge van de golf

$K_0$  = horizontale grond coefficient

$\gamma_s$  = Volumieke gewicht van de grond

$\gamma_w$  = Volumieke gewicht van het water

Deze drie verschillende grondslagen kunnen weer onderverdeeld worden in de volgende twee verschillende mechanismen van wave induced liquefaction, welke samen zorgen voor het totale effect (A. Sawicki, 2005):

1. Opbouwend mechanisme (residual liquefaction):  $\bar{p}$

Dit is een mechanisme welke, het beste uitgelegd kan worden aan de hand van verweking ten gevolge van een aardbeving, dit wil echter niet zeggen dat dit mechanisme per definitie veroorzaakt wordt door een aardbeving. In dit mechanisme is cyclische afschuiving de hoofdoorzaak van de verweking, deze afschuiving heeft in grondlagen met bepaalde grondeigenschappen een geleidelijke opbouw van de porie-druk tot gevolg. Omdat het water niet direct kan ontsnappen uit de ingesloten ruimten welke verkleind worden door de afschuiving, neemt de porie-druk toe. Deze cyclische afschuivingen worden veroorzaakt door de cyclische belasting welke volgt uit het transiënte karakter van een golfbeweging. Dit mechanisme is hetzelfde mechanisme wat zich voordoet bij aardbevingen. Omdat afschuiving in dit mechanisme van groot belang is, heeft deze vorm van wave-induced liquefaction zeer grote vervormingen tot gevolg.

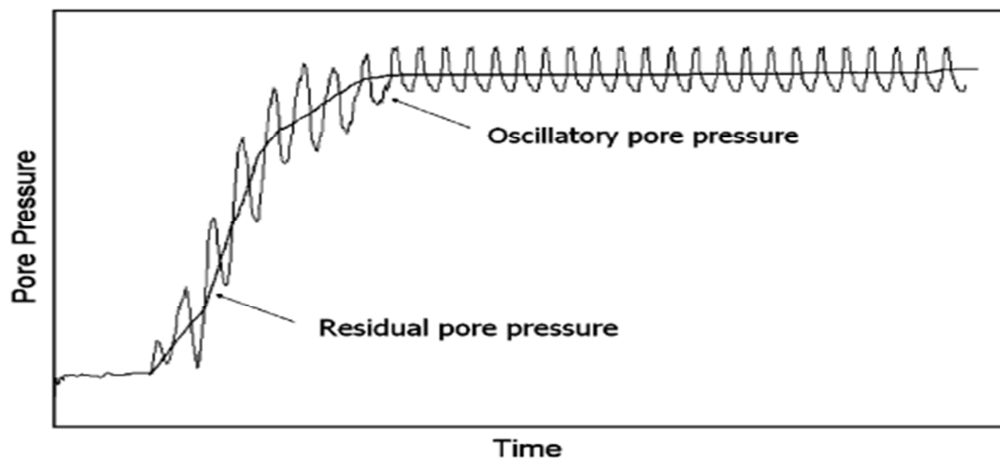
2. Oscillaire / transiënte mechanisme (momentary liquefaction):  $\tilde{p}$

Wave induced liquefaction volgens het oscillaire mechanisme wordt voornamelijk veroorzaakt door verticale golfbeweging in het water. Dit mechanisme heeft minder grote vervormingen tot gevolg dan het eerste mechanisme. Toch vormt ook dit mechanisme een groot risico voor de integriteit van bijvoorbeeld een offshore fundering omdat dit mechanisme aan het begin van de cyclische belasting dominant is met betrekking tot de drukopbouw. Dit mechanisme ontstaat vrij snel en regelmatig in bijvoorbeeld een storm, omdat er in een dergelijk geval sprake is van een groot waterhoogteverschil ten gevolge van golfbeweging welke weer resulteert in grote drukverschillen.

Deze twee verschillende mechanismen leiden gecombineerd dus tot het resultaat, namelijk het verlies van draagkracht.

Het transiënte mechanisme is het mechanisme welke ten grondslag ligt aan het gehele probleem van wave induced liquefaction. Dit komt doordat het opbouwende mechanisme veroorzaakt wordt door het transiënte mechanisme, afschuivingen veroorzaakt door het drukverschil ten gevolge van de golfslag, sluiten het water in de poriën in. Deze insluiting heeft een waterdrukverhoging tot gevolg welke in sommige gronden minder snel kunnen worden geconsolideerd dan zij worden opgebouwd, dit resulteert in een geleidelijke opbouw van de porie-druk.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad \bar{p} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p dt \quad \tilde{p} = ?$$



**Figuur 4. Opbouw van poriedruk in zeebodem ten gevolge van golfslag (D.-S. Jeng J. L., 2008)**

De moeilijkheid van het probleem verschuilt zich in het definiëren of bepalen van de waterdrukken in de poriën, deze zijn moeilijk te voorspellen. Voornamelijk de residuele porie-druk is moeilijk te bepalen, dit omdat deze afhangt van consoliderend vermogen van de grond alsmede andere grondeigenschappen en eigenschappen van de golf.

## 3.2 Invloedsfactoren

Niet elke zeebodem is gevoelig voor dynamische verweking, er zit veel verschil in deze mate van gevoeligheid voor verweking van de bodem. Deze mate van gevoeligheid voor verweking wordt ook wel het verwekingspotentieel genoemd (liquefaction potential), een groter verwekingspotentieel duidt op een grotere kans op verweking en een grotere verwekingsdiepte. In deze paragraaf wordt gekeken naar de invloed van verschillende parameters van de grond en de golfslag op dit verwekingspotentieel.

Hiervoor geldt wel dat verschillende onderzoeken uitkomen op verschillende resultaten, niet in elk onderzoek worden dezelfde parameters vergeleken. In algemene zin kan men stellen dat de volgende parameters invloed hebben op het verwekingspotentieel:

### 3.2.1 Initiële spanningstoestand (Yasser E. Mostafa, 2006):

De initiële spanningstoestand en spanningsgeschiedenis van de grond is bij de meeste geofysische processen van groot belang, zo ook bij dynamische verweking is gebleken uit onderzoek van (Yasser E. Mostafa, 2006). Het is gebleken dat voornamelijk de initiële statische schuifspanning van belang is met betrekking tot dit verschijnsel, de oorzaak hiervoor is te vinden in het feit dat het aardbevingsanaloge verwekingsmechanisme ontstaat door overschrijding van de maximaal houdbare schuifspanning van de grond, wanneer er dus al residuele spanningen aanwezig zijn in de grond vergroten deze het verwekingspotentieel.

### 3.2.2 Initiële lithostatische druk (R. Noorzad, 2009):

Uit het onderzoek van (R. Noorzad, 2009) is gebleken dat de lithostatische druk ook van invloed is op het verwekingspotentieel van een zeebodem. Hoe groter deze lithostatische druk is, hoe hoger de korrelspanning is. Verweking is het proces waarin alle korrelspanning verloren gaat, het moge duidelijk zijn dat een hogere korrelspanning leidt tot een lager verwekingspotentieel.

$$p(z) = p_0 + g \int_0^z p(z) dz \sim \sigma'_0$$

### 3.2.3 Consolidatie graad(Overconsolidation Ratio) (R. Noorzad, 2009):

Het verwekingspotentieel van een bodem is gecorreleerd met de graad van consolidatie, een hogere consolidatiegraad is dus van invloed op de stabiliteit van een zeebodem. Of deze invloed positief of negatief is voor de veiligheid met betrekking tot verweking van de bodem hangt af van het type grond.

$$OCR = \frac{p_{max}}{p}$$

### 3.2.4 Normaalspanning( $\sigma_n$ ) (R. Noorzad, 2009):

De staat van verweking wordt zoals eerder vermeld bereikt wanneer alle effectieve normaalspanningen volledig worden overgedragen op porie-druk en de normaalspanning gereduceerd is tot het nulpunt. Wanneer de normaalspanning dus een hogere waarde bedraagt, betekent dit dat de grond minder snel zal verweken. Er is naast dit gegeven nog een effect te onderscheiden met betrekking tot de normaalspanning, dit is de afschuifweerstand van de grond. De afschuifweerstand van de grond is positief gecorreleerd met de korrelspanning volgens de theorie

van Mohr, een hogere normaalspanning zorgt dus voor een hogere sterkte van de grond en een lager verwekingspotentieel.

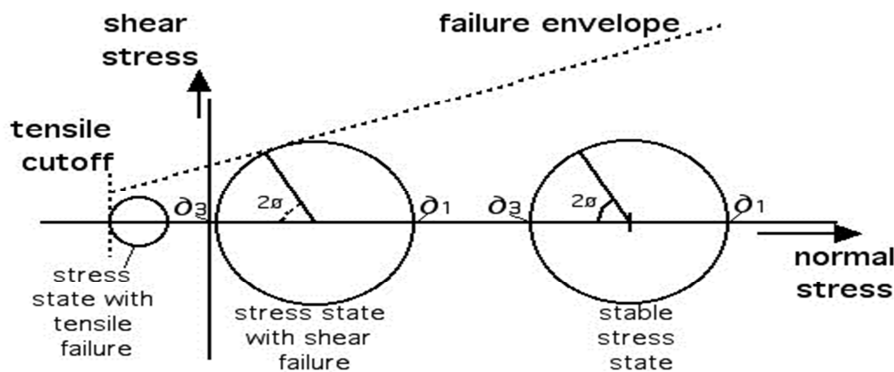
$$\tau = S_0 + \sigma_n \tan(\theta)$$

Waarbij:

$S_0$  = cohesie

$\sigma_n$  = Normaalspanning

$\theta$  = hoek van inwendige wrijving



Figuur 5. Relatie tussen  $\tau$  en  $\sigma$  (Dr. Harmon, 2013)

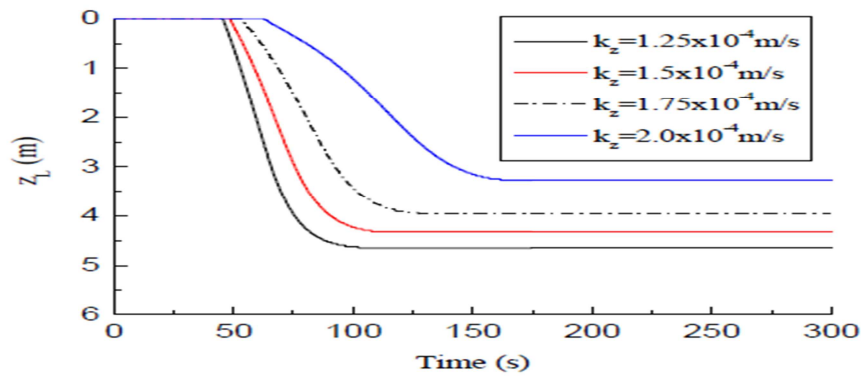
### 3.2.5 Permeabiliteit( $\kappa$ ) (Yin L. Young, 2009) (Xu, 2012):

De mate waarin een grondlaag waterdoorlatend is kan van groot belang worden genoemd bij diverse grondmechanische processen. Er is veel onderzoek gedaan naar dynamische verweking waarin de permeabiliteit als constant wordt verondersteld. De reden hiervoor is dat de doorlatendheid of permeabiliteit van een verwekende grondlaag moeilijk te definiëren valt, dit omdat deze permeabiliteit erg varieert wanneer de grondlaag verweekt. De permeabiliteit is namelijk onder andere afhankelijk van de hoeveelheid fijne deeltjes aanwezig in het materiaal, wanneer dit materiaal verweekt spoelen de deeltjes weg en varieert dit aantal dus enorm.

Wel kan men nagaan dat de permeabiliteit van invloed is op het proces van dynamische verweking. Dit omdat er een porie-druk wordt opgebouwd welke tegelijkertijd consolideert. Omdat bij elk consolidatie proces de permeabiliteit een rol speelt zal dit ook het geval zijn bij dynamische verweking, dit verband hangt overigens weer samen met andere parameters zoals de verzadigingsgraad. Men kan stellen dat het verwekingspotentieel niet lineair gecorreleerd is met de doorlatendheid van de grond, maar eerder een randvoorwaarde schept voor het verschijnsel. Er is een minimale waarde van ondoorlatendheid vereist om überhaupt een drukopbouw van het poriewater te faciliteren echter, wanneer de ondoorlatendheid te groot is zal het drukverschil veroorzaakt door het variërende wateroppervlak geen invloed hebben op de zeebodem omdat de energieverliezen dan te groot worden.

Haixa Xu is er echter wel in geslaagd voor een aantal verschillende waarden van de permeabiliteit van de grond de verwekingsdiepte te bepalen, zie figuur 6. Hieruit valt op te maken dat een hogere permeabiliteit leidt tot een lagere verwekingsdiepte.

De vraag is nu wat de waarden van doorlatendheid zijn waarin dynamische verweking kan optreden, we zullen hier in hoofdstuk 4 op terug komen.



Figuur 6. Invloed van permeabiliteit op verwekingdiepte (Xu, 2012)

### 3.2.6 Stijfheid(k) (Sakai, 1992):

Ook stijfheid speelt een rol bij dynamische verweking, zo kwam (Sakai, 1992) met behulp van de grenslaag theorie van Mei en Foda (Mei, 1981) tot de ontdekking, dat het verwekingspotentieel toeneemt met een toenemende stijfheid van de grond.

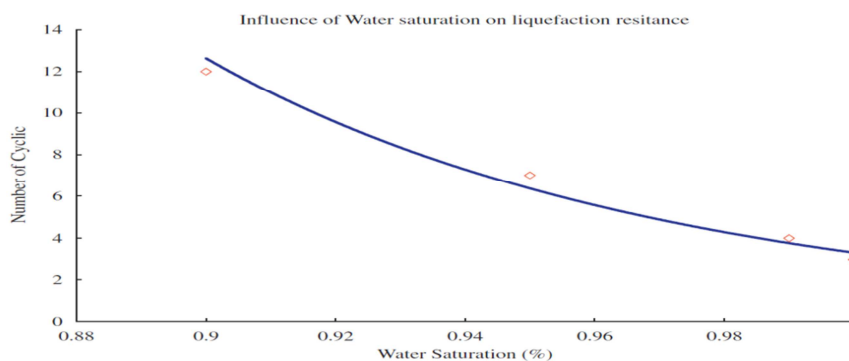
### 3.2.7 Verzadigingsgraad(S) (Hanbing Bian, 2009) (Cha, 2009):

De verzadigingsgraad is misschien wel een van de meest belangrijke parameters in het proces van dynamische verweking, er zijn een aantal onderzoeken gedaan naar de relatie tussen het verwekingspotentieel en de verzadigingsgraad waaronder die van H. Bian.

“Triaxial cyclic tests on unsaturated Hostun sand indicated the possibility of liquefaction of partially saturated soils [2] and showed an increase in the resistance to liquefaction of soils with the decrease in the saturation degree.” (Hanbing Bian, 2009). Hanbing Bian en Isam Shahrour concludeerden in hun onderzoek dat er een relatie bestaat tussen het verwekingspotentieel en de verzadigingsgraad.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100\%$$

Een vraag die gesteld kan worden is, of de verzadigingsgraad wel relevant is met betrekking tot het fenomeen van dynamische verweking, het probleem speelt zich immers altijd af onder de waterspiegel dit omdat er golfslag vereist is om het fenomeen te genereren. Op deze vraag kan gereageerd worden met een bevestigend antwoord, het is namelijk zelfs onder de waterspiegel mogelijk te maken te krijgen met een onverzadigde bodem. Diverse in de poriën opgesloten gassen kunnen zich manifesteren in lagen nabij het bodemoppervlak, deze gassen kunnen de verzadigingsgraad van de bodem beïnvloeden. In onderstaande grafiek het verband tussen verzadigingsgraad en verwekingspotentieel.

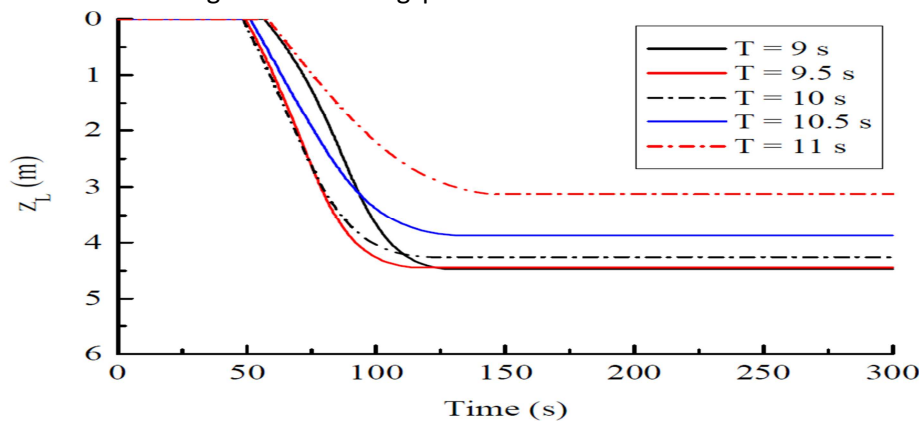


Figuur 7. Belasting cycli tot verweking uitgezet tegen verzadigingsgraad (Hanbing Bian, 2009)

Naast parameters van de grond, zijn ook diverse parameters van de golf en andere hydraulische aspecten van belang, deze gelden in sommige gevallen eerder als randvoorwaarden dan directe invloed factor:

### 3.2.8 Golf periode(T) (Cha, 2009) (Xu, 2012):

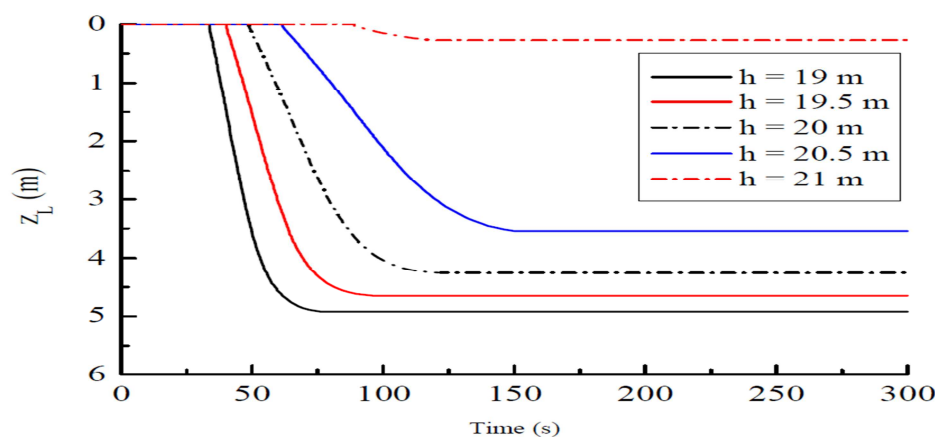
Een van deze parameters die het verwekingsproces beïnvloedt is bijvoorbeeld de golf periode. Bij gelijk blijvende omstandigheden waarin de golf periode variëert ziet men ook een variatie terug in het verwekingsproces, deze variatie is echter niet consistent. Deze variatie wordt veroorzaakt door het feit dat de golf periode weer samen hangt met de mate van energie dissipatie van de porie-druk. De variatie van de van de verwekingsdiepte met betrekking to de golfhoogte is positief gecorreleerd te noemen, dit terwijl de variatie met betrekking tot het verwekingspotentieel en de verwekingsnelheid minder goed te beoordelen is. Over het algemeen kan men zeggen dat de golf periode met name van invloed is op de verwekingsdiepte. Wanneer de golfperiode al invloed heeft op het verwekingspotentieel is deze invloed van beperkte mate te noemen, een kleinere golfperiode leidt dan tot een groter verwekingspotentieel.



Figuur 8. Invloed golfhoogte op verwekingsproces (Xu, 2012)

### 3.2.9 Water diepte(d) (Cha, 2009) (Xu, 2012):

De waterdiepte is een andere parameter die los staat van de grondeigenschappen welke invloed heeft op het proces van dynamische verweking. Uit onderzoek van Haixia Xu blijkt dat de waterdiepte negatief gecorreleerd is met zowel het verwekingspotentieel als de verwekingsdiepte, deze correlatie is niet lineair. Afhankelijk van de diepte zet het verwekingsproces zich op een bepaald moment in, waarna de verweking snel dieper in de grond voortbeweegt totdat de kritische verwekingsdiepte bereikt is.



Figuur 9. Invloed waterdiepte op verwekingspotentieel (Xu, 2012)



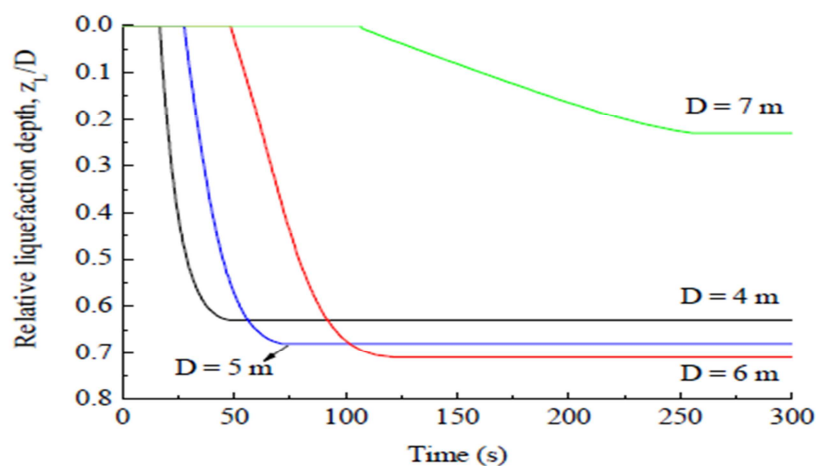
### 3.2.10 Golf hoogte(H) (Cha, 2009) (Xu, 2012):

De golfhoogte is een parameter die met alle golfproblemen een belangrijke rol speelt, het gaat hier dan met name om de golfhoogte ten opzichte van de water diepte, de relatieve golfhoogte. Dit geldt ook bij het probleem dynamische verweking, op deze manier is de invloed van de golfhoogte te vergelijken met die van de waterdiepte, een grotere water diepte heeft hetzelfde effect als een kleinere golfhoogte.

### 3.2.11 Zeebodem dikte(D) (Cha, 2009) (Xu, 2012):

Op het eerste gezicht zou men misschien verwachten dat de zeebodem dikte niet van extreem groot belang is, het tegenovergestelde is waar. Zoals te zien is in onderstaande figuur kruipt de verwekingsdiepte in de testopstelling van Haixia Xu omhoog met oplopende zeebodem dikte tot aan een dikte van 6 meter. Bij een zeebodem dikte tussen de 6 meter en 7 meter daalt de verwekingsdiepte drastisch, er bestaat dus een zekere kritische zeebodem dikte. Let op, het gaat hier om de dikte van de verweerbare laag in de zeebodem.

Dit verschijnsel valt uit te leggen aan de hand van het feit dat de wateroverspanning in de poriën hoofdzakelijk afhankelijk is van volume veranderingen ten gevolge van cyclische afschuiving en de afwateringsvoorwaarden in de verweerbare laag. Wanneer de bodem dikte kleiner is dan de kritische bodem dikte betekent een vergroting van de bodemdikte een vergroting van de drainage voorwaarden van de laag. Deze vergroting van de drainage lengte resulteert in een grotere drukopbouw in de poriën. Echter wanneer de zeebodem dikte groter wordt, wordt het effect van de schuifkracht opgewekt door het variërend wateroppervlak ten gevolge van de golf kleiner. Na een bepaalde bodemdikte is het effect van de vergrote drainage lengte kleiner dan de reductie van schuifkracht, deze bodemdikte is de kritische bodemdikte.



Figuur 10. Invloed van bodemdikte op verwekingsproces (Xu, 2012)

### 3.2.12 Golf patroon (Haijiang Liu, 2007) (Mutlu Sumer, 2012):

In een natuurlijke omgeving zijn parameters als de golfhoogte en golfperiode niet zomaar vast te stellen, deze golfparameters variëren niet volgens een vast patroon. Omdat deze parameters willekeurig zijn is een verband tussen het fenomeen dynamische verweking en deze golfparameters slechts nuttig om een indruk te krijgen van het verloop van het risico bij grotere veranderingen in deze parameters. Daarnaast geldt dat wanneer er een vast golfpatroon (zoals in een basin het geval kan zijn) wordt aangehouden, de verweking later optreedt dan wanneer de golven willekeurig (zoals

in een natuurlijke omgeving het geval is) zijn opgebouwd. Verder is bekend dat verweking eerder zal optreden bij een progressieve golf dan bij bijvoorbeeld een staande golf.

### **3.3 Conclusie**

Na in deze paragraaf onderzoek te hebben gedaan naar de invloedsfactoren met behulp van diverse onderzoeken, kan men concluderen dat de grootste factoren van invloed op het verschijnsel dynamische verweking toch de volgende parameters zijn: de permeabiliteit, verzadigingsgraad, consolidatiegraad, relatieve waterdiepte (of relatieve golfhoogte) en zeebodem dikte.

## 4. Randvoorwaarden, theorieën en onderzoek

### 4.1 Randvoorwaarden van optreden

Nu bekend is wat het fenomeen dynamische verweking inhoudt en hoe dit zich kan manifesteren is het van belang om te zien wanneer het verschijnsel optreedt.

Verweking wordt gedefiniëerd als de staat waarin de wateroverspanning even groot of groter is dan de effectieve korrelspanning, in deze staat gedraagt de grond zich als een vloeistof. Deze staat ontstaat wanneer de waterspanning toeneemt in een niet-cohesieve grond, de grond zal namelijk niet verweken ten gevolge van golfslag wanneer de grond over een zekere mate van cohesie beschikt, naast cohesie zijn er nog een aantal andere randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan om de dynamische verweking te zien optreden, deze randvoorwaarden zullen worden beschouwd in deze paragraaf.

Voordat wordt ingegaan op de randvoorwaarden zelf is het van belang hier een onderscheid in aan te brengen. Er zijn zoals ook vermeld in paragraaf 3.2 twee verschillende soorten randvoorwaarden te onderscheiden, randvoorwaarden die volgen uit de grondeigenschappen en randvoorwaarden die volgen uit golfkarakteristieken. Voor deze beide typen randvoorwaarden geldt dat er geen harde grenzen bekend zijn waarin het fenomeen zich wel of niet voordoet. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat men wel kan zeggen dat aan bepaalde kwalitatieve eisen moet worden voldaan, maar er nog geen absolute waarden bekend zijn waarbij het fenomeen wel of niet optreedt.

#### 4.1.1 Grondmechanische randvoorwaarden:

- De grond moet beschikken over een voldoende lage waarde van cohesie
- De grond moet over onvoldoende permeabiliteit beschikken om een drukopbouw in de poriën te faciliteren
- De grond moet over voldoende permeabiliteit beschikken om de drukverschillen toe te laten in de grond, een lage permeabiliteit leidt tot drukverliezen en dus een lager verwekingspotentieel.
- De grond moet beschikken over een hoge verzadigingsgraad, wanneer de verzadigingsgraad van de grond laag is betekent dit dat het porie-water weg kan stromen naar lege poriën.
- De dikte van de verweekbare grondlaag moet binnen bepaalde minimum en maximum waarden vallen.

#### 4.1.2 Hydraulische randvoorwaarden:

- De relatieve golfhoogte is een bepalende factor met betrekking tot het opgebouwde drukverschil veroorzaakt door de golf.
- De golf gradiënt is een bepalende factor met betrekking tot de snelheid waarmee de drukwisselingen plaats vinden, deze drukwisselingen moeten elkaar met een bepaalde snelheid volgen om het verschijnsel te zien optreden.
- Er geldt een maximumwaarde voor de golfperiode evenals een minimumwaarde voor de absolute golfhoogte, de gradiënt van het wateroppervlak hangt hier logischerwijs mee samen.

## 4.2 Theoretische modellen

Grond is een materiaal wat vaak een onvoorspelbaar karakter heeft, er zijn daarom aannames noodzakelijk om het een en ander aan grond te kunnen voorspellen. In beschikbare literatuur rond het verschijnsel dynamische verweking heersen een aantal theoriën, in deze paragraaf zullen verschillende gebruikte theoriën met hun aannames voorbijkomen. Grofweg zijn de volgende vijf theoriën te onderscheiden:

### 4.2.1 Ongekoppelde model (gedraineerde model) (Nakamura, 1973):

Het ongekoppelde model dankt zijn naam aan het feit dat versnellingen ten gevolge van de beweging van de grond of het water worden genegeerd, de grond, het water of beiden worden beschouwd als onsamendrukbaar. Dit leidt tot een ongekoppeld model, er bestaat geen koppeling tussen versnellingen van poriewater en versnellingen van de grond zelf. Om dit ongekoppelde model te modelleren wordt vaak gebruik gemaakt van de Laplace vergelijking of van de diffusie vergelijking.

Wanneer wordt uitgegaan van zowel onsamendrukbare vloeistof als onsamendrukbare grond is de Laplace vergelijking van toepassing, wanneer de vloeistof samendrukbaar wordt aangenomen maar de grond nog wel als onsamendrukbaar wordt beschouwd geldt de diffusie vergelijking, hierbij moet de permeabiliteit wel isotroop worden gemodelleerd.

Dit model is vaak gebruikt om een grove analytische schatting van het probleem te kunnen geven, tegenwoordig maakt men vaak gebruik van andere, gekoppelde modellen. Onderzoekers als bijvoorbeeld Yin en Young waren in hun onderzoek de volgende mening toegedaan: *“The analysis also suggests that the results are highly influenced by the soil permeability and relative compressibility between the pore fluid and solid skeleton, and that a coupled solid/fluid formulation is needed for the soil solver.”* (Yin L. Young, 2009).

### 4.2.2 Consolidatie model (Yamamoto, 1978):

In het consolidatie model wordt uitgegaan van samendrukbare grond en samendrukbare vloeistof, de versnellingen ten gevolge van grond of vloeistof bewegingen worden echter beiden verwaarloosd. Het consolidatie model maakt gebruik van Biot's consolidatie theorie (Biot, 1941)(Zie bijlage C) als basis om te komen tot een oplossing (Cheng, 1993). In Biot's consolidatie theorie worden de volgende aannames worden gedaan:

- De grond wordt beschouwd als elastisch.
- De grond wordt beschouwd als homogeen.
- De grond wordt beschouwd als isotroop.

Deze aannames zorgen ervoor dat het consolidatie model voor dynamische verweking maar een beperkt toepassingsgebied kent. Oplossingen volgens dit model zijn echter vaak wel in staat een goede indicatie te geven van het dynamische verwekingspotentieel, voornamelijk omdat het vaak goed toepasbare formules zijn met betrekking tot het ingenieurs gebied, ze zijn minder complex dan andere modellen.

Wil men echter gebruik maken van een oplossing in een breder toepassingsgebied zal men de benadering volgens de klassieke Biot-theorie aan moeten passen. Een voorbeeld hiervan is het onderzoek van A. Sawicki en J. Mierczynski (A. Sawicki, 2005). Volgens dit onderzoek is het met het Biot's consolidatie model niet mogelijk om het fenomeen “momentary liquefaction”, verweking ten gevolge van het transiënte mechanisme, te ondervinden. Om deze reden ondervond het Biot's consolidatie model enkele aanpassingen.

Ondanks deze aanpassingen heeft het model nog steeds enkele tekortkomingen, deze volgen uit het feit dat de theorie van Biot is gebaseerd op de wet van Hooke en de wet van Darcy. De wet van Hooke mag niet per definitie worden aangenomen met betrekking tot het probleem van dynamische verweking, dit omdat er juist veel plastische vervormingen plaatsvinden tijdens het optreden van het fenomeen, daar waar de wet van Hooke uitgaat van lineair-elastische vervormingen. Wat betreft de wet van Darcy geldt er dat deze wel mag worden aangenomen voor het probleem maar de parameters voor deze vergelijking moeilijk te definiëren vallen.

#### **4.2.3 P-Z Mark III Model (M. Zienkiewicz, 1986):**

Het P-Z Mark III model, ook wel de U-P benadering, lijkt erg op het klassieke consolidatie model zoals beschreven in 4.2.2. Belangrijk verschil van het P-Z Mark III model ten opzichte van het consolidatie model is, dat waar het consolidatie-model versnellingen ten gevolge van zowel grond- als waterbewegingen verwaarloost, verwaarloost het P-Z Mark III model alleen de versnellingen ten gevolge van waterbeweging. Dit één-dimensionale model werd in 1986 geïntroduceerd door Zienkiewicz en Pastor en is vervolgens nog diverse malen aangepast door onder andere de auteurs zelf en Chan.

#### **4.2.4 Dynamische model (Rahman, 2001):**

Wanneer het P-Z Mark III model wordt uitgebreid tot een model waarin de versnellingen ten gevolge van waterbeweging wel worden meegenomen komt men uit op het twee-dimensionale dynamische model. Dit model werd voor het eerst gebruikt door Jeng en Rahman in 2001, zij maakten gebruik van het kader welke was opgesteld met het P-Z Mark III model.

Boven genoemde modellen beschrijven allen een poro-elastische aanpak echter, wanneer men een echt goede analyse van het probleem wil kunnen geven zal men niet alleen naar een poro-elastisch model moeten kijken. Omdat er bij het fenomeen dynamische verweking vrij grote vervormingen optreden is het gedrag van de grond op dit moment niet meer als elastisch te beschouwen en volgt het plastische stadium.

#### **4.2.5 Poro elastoplastische model (Sekiguchi, 1995):**

Boven genoemde modellen beschrijven allen een poro-elastische aanpak echter, wanneer men een echt goede analyse van het probleem wil kunnen geven zal men niet alleen naar een poro-elastisch model moeten kijken. Omdat er bij het fenomeen dynamische verweking vrij grote vervormingen optreden is het gedrag van de grond op dit moment niet meer als elastisch te beschouwen en volgt het plastische stadium. Er zijn nog niet erg veel elastoplastische onderzoeken gedaan naar dynamische verweking omdat het vaak complexe oplossingsmethoden teweeg brengt, wel is gebleken dat dit een goede manier is om het fenomeen te beschrijven.

#### **4.2.6 Artificial Neural Networks (ANN's) (Cha, 2009)**

De laatste 10 jaar gaan onderzoekers steeds meer te werk met zogenaamde "Artificial Neural Networks"(ANN's), dit zijn modellen welke gebaseerd zijn op de inrichting van hersenen van bijvoorbeeld dieren. In deze ANN's wordt geen gebruik gemaakt van een van de bovengenoemde modellen aangezien een ANN zelf in staat is om patronen te herkennen in verschijnselen. Op deze manier legt een ANN een verband tussen bepaalde parameters en uitkomsten. Een voorbeeld hiervan is het onderzoek van (Cha, 2009)

### 4.3 Recent onderzoek

Er is veelvuldig onderzoek gedaan naar het verschijnsel dynamische verweking, in dit hoofdstuk zal worden gekeken naar welke onderzoeken door wie zijn uitgevoerd en wat hun bevindingen zijn.

Chih-Hsin Chang, Lien-Kwei Chien, en Yao-Hsien Chang doen in 2004 een onderzoek naar een drie dimensionaal model welke gesimuleerd kan worden in “Chien’s triaxial test” een test ontwikkeld in het onderzoek (Chih-Hsin Chang, 2004).

Andrzej Sawicki en Jacek Mierczynski bekeken het consolidatie model met betrekking tot dynamische verweking nader en concludeerden dat het model minder goed blijkt te werken dan voorheen werd aangenomen (A. Sawicki, 2005).

D.-S. Jeng en H. Zhang doen in 2005 onderzoek naar het effect van het breken van golven met betrekking tot het verwekingspotentieel. Zij komen tot de ontdekking dat het breken van golven leidt tot een lager verwekingspotentieel. Zij concluderen daarnaast dat een volledig verzadigde zeebodem niet kan verweken en dat de permeabiliteit een grote rol speelt bij het verschijnsel (D.-S. Jeng H. Z., 2005).

Daeho Cha, Dong-Sheng Jeng, Michael Blumenstein en Hong Zhang bekeken in 2006 het verschijnsel dynamische verweking ook met een ANN-model. Zij concluderen dat hun ANN model relatief goed werkt zonder veel complexe oplossingsmethoden toe te hebben gepast (Daeho Cha D.-S. J., 2006). In 2009 gingen zij hier verder op in (Daeho Cha H. Z., 2009)

Yasser E. Mostafa en M. Hesham el Naggar komen in hun onderzoek naar het gedrag van offshore constructies op bodeminstabiliteit tot de conclusie dat de bodemdikte weer een belangrijke rol speelt (Yasser E. Mostafa, 2006).

K. Adalier en M.K. Sharp hebben in 2006 een onderzoek gedaan naar het dynamische gedrag van dijklichamen. In het onderzoek wordt gekeken naar de invloed van de dikte, locatie en diepte van de verwekbare laag. (K. Adalier, 2006)

J.G. Wang, M.R. Karim en P.Z. Lin doen in 2007 onderzoek naar een dimensieloze parameter om het dynamische verwekingspotentieel mee te kunnen weergeven, zij maken hier gebruik van het consolidatie model. Deze parameter blijkt een goede indicatie te zijn om kwalitatief het transiënte mechanisme te kunnen weergeven (Wang, 2007).

Pui Lee Vun, Andrew H. C. Chan en Scott Dunn gebruikten het Pastor-Zienkiewicz Model Mark-III om een eindige elementen model te construeren en kwamen tot de conclusie dat dit model goed in staat is verweking te voorspellen bij een offshore pijpleiding (Pui Lee Vun, 2007).

Haijiang Liu en Dong-Sheng Jeng doen in 2007 onderzoek naar de invloed van willekeurige golfslag ten op zichte van periodiek herhaalde golfslag op het verwekingspotentieel. Zij concluderen dat het verwekingspotentieel groeit met een willekeurige golfaankomst (Haijiang Liu, 2007).

J. Li en Dong-Sheng Jeng doen in 2008 onderzoek naar het effect van golfbrekers op het gedrag van poreuse zeebodems, zij maken hierbij gebruik van een numeriek model en concluderen dat golfdiffractie een belangrijke rol speelt bij de opbouw van poriedruk rond golfbrekers. Ook

bevestigen zij dat de relatieve waterdiepte en golfgradiënt belangrijke invloedsfactoren zijn (D.-S. Jeng J. L., 2008).

Hanbing Bian en Isam Sharour hebben in 2009 een numeriek model geconstrueerd waarin het gedrag van zandige onverzadigde gronden op een dynamische belasting wordt gemodelleerd. Zij maken gebruik van Biot's theorie en de U-P benadering, geconcludeerd wordt dat aanwezigheid van lucht in de poriën leidt tot een lager verwekingspotentieel (Hanbing Bian, 2009).

R. Noorzad, S. Safari en M. Omidvar deden in 2009 onderzoek naar het effect van constructies op het verwekingspotentieel in zandgronden. Zij komen tot de conclusie dat de aanwezigheid van een constructie het verwekingspotentieel verhoogt in geval van los gepakt zand en een verlaging van het verwekingspotentieel in het geval het om dicht gepakt zand gaat. Ook bestaat er een verschil tussen energie-absorberende constructies en energie-dissiperende constructies (R. Noorzad, 2009).

Daeho Cha ontwikkelde in 2009 een ANN model voor dynamische verweking, zijn model kwam ongeveer overeen met de uitkomsten van voorgaand elasto-plastische modellen (Cha, 2009).

Gao Yu-feng en al. onderzoeken in 2011 opnieuw het fenomeen dynamische verweking, zij bevestigen al bekende correlaties van waterdiepte en relatieve dichtheid met het verwekingspotentieel (Gao Yu-feng, 2011).

Haixia Xu schreef in 2012 een uitgebreide scriptie met hierin onderzoek naar het verschijnsel dynamische verweking en verschillende invloedsfactoren op het verschijnsel. Ook gebruikte hij een numeriek model om het verschijnsel beter te kunnen begrijpen (Xu, 2012).

Anthony Julian beschreef in 2013 het verschijnsel met behulp van een numeriek model uitgaande van een procedure gebaseerd op rekken in plaats van spanningen (Julian, 2013).

Noorzad bekeek het Pastor-Zienkiewicz Model Mark-III opnieuw en concludeerde dat de permeabiliteit van erg groot belang is met betrekking tot het verschijnsel (Noorzad, 2013).

## 5. Voorspelbaarheid en meetbaarheid

In de voorgaande hoofdstukken is besproken wanneer en hoe het verschijnsel dynamische verweking optreedt. Dit alles is zeer nuttig echter, is het voor ingenieurs nog belangrijker om te kunnen meten en vervolgens te kunnen voorspellen waar en wanneer het verschijnsel optreedt en zo een inschatting te kunnen geven van het verwekingspotentieel. Er bestaat namelijk een groot verschil tussen het uitvoeren van geotechnische metingen op een offshore locatie en het uitvoeren van dezelfde metingen op een on-shore locatie. Dit verschil uit zich met name in de uitvoeringsaspecten, de manier waarop de metingen worden verricht is ongeveer gelijk. Wel bestaat er een verschil tussen de opbouw van een zeebodem en de opbouw van een on-shore locatie. Zo bestaat een zeebodem vaak uit sediment in een verzadigde staat, echter kan dit per locatie sterk verschillen door waterstromingen. Verder bestaat er offshore een grote variatie in consolidatiegraad afhankelijk van locatie en belastinggeschiedenis, welke om deze reden een belangrijke rol speelt. Offshore geotechnisch onderzoek is te verdelen in drie fases: Bureau onderzoek, geotechnisch vooronderzoek en geotechnisch onderzoek.

Tijdens het onderzoek naar het verschijnsel dynamische verweking is gebleken dat een aantal parameters een belangrijke rol spelen, deze parameters zijn:

- Grondsoort
- Permeabiliteit
- Consolidatiegraad
- Verzadigingsgraad
- Gelaagdheid
- Waterdiepte
- Verwacht golfpatroon

In deze paragraaf zal van al deze parameters behalve het verwachte golfpatroon worden besproken hoe men deze kan achterhalen op een offshore locatie. De reden dat we het verwachte golfpatroon niet behandelen is omdat deze niet uit geotechnisch onderzoek volgt. Offshore geotechnisch onderzoek is te verdelen in drie fases: bureau onderzoek, geotechnisch vooronderzoek en geotechnisch onderzoek.

### 5.1 Bureau onderzoek

Bij elk project vormt een vooronderzoek de basis van een integer ontwerp, dit vooronderzoek geschiedt overwegend in de vorm van een bureau onderzoek, zo ook bij geotechnisch onderzoek in de offshore industrie. Tijdens dit bureauonderzoek wordt er zoveel mogelijk beschikbare data verzameld om op deze manier zo goedkoop en efficiënt mogelijk een idee te krijgen welke problemen men zal tegenkomen tijdens het ontwerp.

Op zeekaarten bijvoorbeeld zijn de dieptes van bijna alle zeeën te vinden, zo kan al een idee worden gekregen met welke diepte men te maken zal krijgen, deze diepte kan een belangrijke rol spelen bij de keuze van nader onderzoek. Ook de soort grond kan worden ingeschat aan de hand van vooronderzoek, het is afhankelijk van de locatie hoe betrouwbaar deze informatie te vinden is.

Verkregen parameters:	Waterdiepte, grondsoort.
Nauwkeurigheid:	Slecht tot goed, afhankelijk van locatie.
Toepasbaarheid:	Op alle locaties, elke diepte.



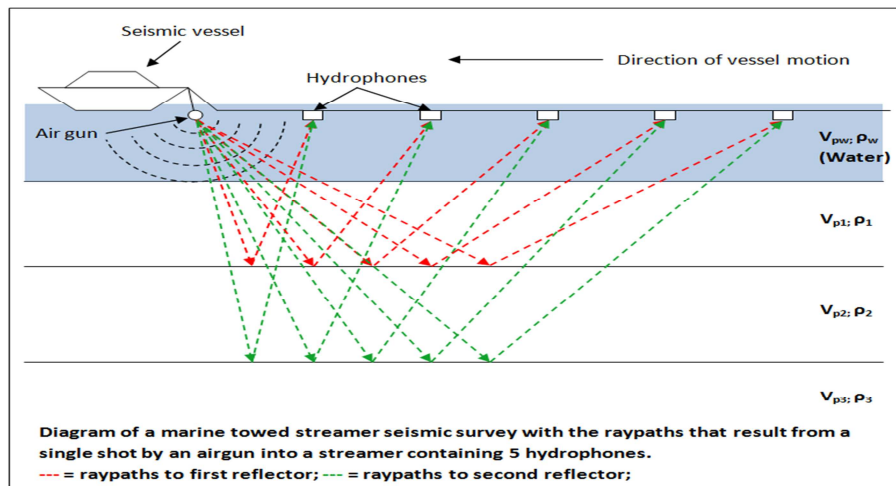
## 5.2 Geotechnisch vooronderzoek

Het doel in deze fase van het onderzoek is om een goeie schatting te krijgen van het verloop en de gelaagdheid van de ondergrond, dit zijn belangrijke factoren met betrekking tot het positioneren en funderen van constructies, zeker bij offshore projecten omdat hier vaak relatief veel onzekerheid over bestaat. Om deze vorm van onderzoek te verrichten bestaan verschillende methoden, deze fase van het geotechnisch onderzoek staat ook wel bekend als geofysisch onderzoek (DeGroot, 2010).

### 5.2.1 Seismische reflectie

Deze techniek maakt net als de meeste vormen van geotechnisch vooronderzoek gebruik van seismiek, dit is een methode die offshore toe te passen is bij gebruik van een zogeheten “streamer”. Een boot welke een compressie golf in de vorm van een geluidssignaal afgeeft welke vervolgens wordt opgevangen door een serie hydrofoons welke bevestigd is aan een kabel om zo een 2-dimensionaal beeld te krijgen van de bodem en de ondergrond, deze kabel wordt een streamer genoemd. Wanneer onderzoek een 3-D beeld vereist kan gebruik worden gemaakt van meerdere streamers naast elkaar. Omdat de gegenereerde compressie golven verschillende snelheden hebben in verschillende media kan op deze manier een beeld worden gevormd van de bodem. Het is zaak de streamers niet dicht op het wateroppervlak te houden omdat dit oppervlak ruis creëert. Reflectie is nauwkeurig en relatief makkelijk uit te voeren, het nadeel van deze methode is dat deze relatief duur is (Enviroscan, 2003) (IAGC, 2002).

Een andere toepassingen kan gevonden worden in het aanleggen van een streamer op de bodem. Deze kabel wordt op de bodem van de offshore locatie gelegd en kan dus blijvend metingen doen, het principe blijft verder hetzelfde.



**Figuur 11.** Kartoonweergave van seismische reflectie (Reflection seismology, 2014)

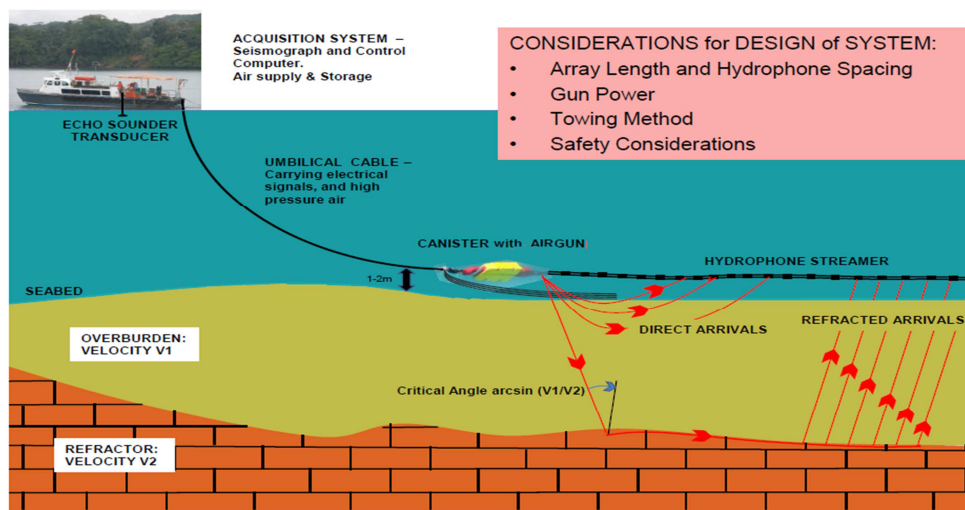
Verkregen parameters:	Waterdiepte, grondsoort, gelaagdheid.
Nauwkeurigheid:	Redelijk tot goed.
Toepasbaarheid:	In diepere wateren, beter toepasbaar in zachtere gronden.

### 5.2.2 Seismische refractie

Het principe van seismische refractie lijkt veel op die van seismische reflectie, bij seismische refractie wordt echter gebruik gemaakt van de brekingswet van Snellius en het verschil in voortplantingssnelheid van golven in verschillende media (SismOcean, 2014) (Seismic refraction,

2014). Net als bij seismische reflectie is er een bron welke een signaal aan de grond afgeeft. Een verplaatsing van de grond ten gevolge van de schokgolf wordt gemeten, dit kan zowel een primaire (compressie) als een secundaire (schuif) golf zijn.

Het voordeel van refractie ten opzichte van reflectie is dat het een stuk goedkoper is, refractie is met een lagere resolutie echter wel minder betrouwbaar en is minder goed in staat diepe grondlagen te herkennen. Een randvoorwaarde voor refractie is dat de zeebodem niet te diep mag liggen, zo rond de < 50m omdat de streamers binnen een bepaalde afstand vanaf de bodem moeten blijven. Nadeel van alle seismische methoden is dat er rekening zal moeten worden gehouden met fauna in de omgeving, met name walvisachtigen zijn gevoelig voor infrasonen signalen. (Seismic Refraction Surveying, 2014)



**Figuur 12. Kartoonweergave van seismische refractie (Fugro, 2012)**

Seismische reflectie en seismische refractie lijken veel op elkaar, er bestaat echter een verschil in toepassing. Op deze manier ontstaat de vraag wanneer het beter is om reflectie te gebruiken en wanneer refractie tot een beter resultaat leidt. Het antwoord op deze vraag is afhankelijk van voornamelijk de diepte van het water, een geïntegreerde oplossing behoort ook tot de mogelijkheden.

Verkregen parameters:	Waterdiepte, grondsoort, gelaagdheid.
Nauwkeurigheid:	Redelijk tot goed.
Toepasbaarheid:	Dieptes < 50 meter, penetratiediepte tot 100 meter, beter toepasbaar in hardere gronden.

### 5.2.3 Seismische tomografie

Een andere methode waarbij ook gebruik wordt gemaakt van seismiek is seismische tomografie. Deze methode wordt toegepast wanneer grondlagen op grote diepte moeten worden geanalyseerd, ook tektoniek wordt met behulp van deze methode in kaart gebracht. Deze methode speelt dus geen optie voor ons onderzoek met betrekking tot dynamische verweking. Wel wordt er aan gewerkt deze methode beter toepasbaar te maken in de offshore industrie (Ltd., 2008).

#### 5.2.4 Magnetische methode

Zoals de naam van deze methode al zegt maakt deze methode gebruik van magnetische velden, aan de hand van kleine variaties in het magnetisch veld van de aarde kunnen dieptes gemeten worden (Geotechnical, 2014). Wanneer het offshore projecten betreft zullen deze metingen geschieden met behulp van een vliegtuig waarin de meetapparatuur zich bevindt of waarachter deze meetapparatuur wordt meegesleept, deze manier van meten heet de aeromagnetische methode. De methode is echter erg vatbaar voor meetfouten ten gevolge van zonnewind, het magnetisch veld van het vliegtuig zelf en andere effecten. (Jones, 2013)

Verkregen parameters:	Waterdiepte.
Nauwkeurigheid:	Redelijk, nauwkeurigheid gaat achteruit met toenemende diepte.
Toepasbaarheid:	Alle dieptes.

#### 5.2.5 Electische methoden

Er bestaan tal van methoden welke gebruik maken van elektrische velden, voorbeelden hiervan zijn: “spontaneous potential, Induced polarization, Electrical resistivity tomography” al deze methoden kunnen gebruikt worden op een offshore locatie, hier zijn voorbeelden van te vinden. Echter, met betrekking tot dynamische verwekingen zullen deze methoden niet erg effectief zijn vergeleken met seismische methoden. Een goede optie is wel om een elektrische geleidingsmeter op een sondering toe te passen, deze optie zal behandeld worden in paragraaf 5.3.1.

Verkregen parameters:	Alle benodigde parameters, afhankelijk van toegepaste methode.
Nauwkeurigheid:	Goed, afhankelijk van toegepaste methode.
Toepasbaarheid:	Dieptes < 50m.

#### 5.2.6 Gravimetrie, geodesy, seismo-electrische- en andere methoden

Gravimetrie is een methode waarbij gebruik wordt gemaakt van zwaartekrachtsvelden, zware objecten hebben een meetbaar zwaartekrachtsveld, aan de hand van dit veld kunnen locaties van bepaalde zware elementen worden opgespoord. Deze methode wordt wel toegepast in de offshore om metingen van aardolievelden te kunnen doen, echter heeft deze methode geen toegevoegde waarde met betrekking tot het funderen van offshore constructies (Stenvold, 2008). Hetzelfde kan gezegd worden over geodesy, deze methode is erg gevoelig voor meetfouten (Danson, 2005). Dat deze methoden niet gebruikt worden voor onze toepassing kan ook gezegd worden over seismo-electrische metingen, seismoelektrische metingen zijn voornamelijk toepasbaar op land. Daarnaast zijn er nog tal van andere mogelijkheden omtrent offshore vooronderzoek (well logging, hyperspectral imaging, sidescan sonar, Multibeam echosounder, etcetera).

## 5.3 Geotechnisch onderzoek

Wanneer het geotechnisch vooronderzoek gedaan is kan men een inschatting maken van wat voor soort methode er gebruikt zal moeten worden in het volledige geotechnische onderzoek. In deze fase van het onderzoek is het zaak parameters als de permeabiliteit, veradigingsgraad en consolidatiegraad te achterhalen. In de praktijk zal deze fase van geotechnisch onderzoek ongeveer tegelijk of iets later aanvangen dan de tweede fase (geofysisch onderzoek). Het geotechnische onderzoek kan op meerdere manier worden uitgevoerd, deze verschillende manieren zullen worden behandeld in deze paragraaf.

### 5.3.1 In-situ meetsystemen

Een veelvoorkomende mogelijkheid is het gebruik van een in-situ meetsysteem. Het grote voordeel van een dergelijk systeem is dat er een grondmeting wordt verricht in onverstoorde staat van de grond, dit kan zeker bij cohesieloze gronden een grote rol spelen. Daarnaast zijn de meetwaarden van een in-situ test direct bekend en kan men zo snel een idee krijgen over de grondeigenschappen. Een nadeel van een in-situ test is dat er geen wetenschappelijk onderbouwde formules beschikbaar zijn. Om tot een bepaalde grond parameter te komen wordt daarom veel gebruik gemaakt van empirie, dit brengt weer onzekerheden met zich mee.

#### Sondering

De sondering is de meest gebruikte grond test binnen de geofysica, ook offshore wordt deze manier van onderzoek gebruikt. De offshore sondering verschilt niet heel erg van de standaard on shore sondering, er wordt een systeem afgezonken naar de bodem. Op de bodem aangekomen wordt er een staaf de grond in geperst waarbij de conusweerstand en de schachtwrijving worden gemeten, uit deze parameters kan de gelaagdheid van de grond worden bepaald alsmede verschillende grondparameters. Er bestaan verschillende soorten sonderingen waarbij verschillende waarden gemeten kunnen worden, voorbeelden hiervan zijn: waterspanning, warmtegeleidendheid, elektrische weerstand, seismische/dynamische weerstand, gammastraling, horizontale grondstijfheid (Danson, 2005). Uit een sondering met waterspanningsmeting kunnen bijvoorbeeld de OCR, permeabiliteit en verzadigingsgraad worden bepaald (Mayne, 2010).

Deze OCR kan als volgt bepaald worden wanneer gebruik wordt gemaakt van een sondering met waterspanningsmetingen (CPTU) (Mayne, 2010):

$$OCR = 2 \left[ \frac{1}{1,95M + 1} \left( \frac{q_T - u_b}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^{1/\Lambda}$$

$$M = \frac{6 \sin(\phi')}{3 - \sin(\phi')}$$

$$\Lambda = 1 - \frac{C_s}{C_c}$$

$\sigma'_{v0}$  = *Initiële verticale korrelspanning*

$u_b$  = *Wateroverspanning*

$\phi'$  = *Effectieve wrijvingshoek*

$C_s$  = *Zwelling index*

$C_c$  = *Compressie index*

Permeabiliteit ( $k_h$ ) kan worden bepaald met de volgende iteratieve formule (Robertson, 2011):

$$k_h = \frac{(c_h \gamma_w)}{M}$$

$$c_h = (1,67 * 10^{-6}) 10^{(1 - \log(t_{50}))}$$

$$M = \alpha_m (q_t - \sigma_{v0})$$

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_v}{p_a} \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

$$\alpha_m = Q_{tn} \text{ when } Q_{tn} \leq 14$$

$$\alpha_m = 14 \text{ when } Q_{tn} > 14$$

$$n = 0,381(I_c) + 0,05 \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)$$

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log(Q_{tn}))^2 + (1,22 + \log(F_r))^2}$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} * 100\% - 0,15$$

$q_t$  = CPT corrected total cone resistance  
 $f_s$  = CPT sleeve friction  
 $\sigma_{v0}$  = pre-insertion in-situ total vertical stress  
 $\sigma'_{v0}$  = pre-insertion in-situ effective vertical stress  
 $(q_t - \sigma_v)/p_a$  = dimensionless net cone resistance, and,  
 $(p_a/\sigma'_{v0})^n$  = stress normalization factor  
 $n$  = stress exponent that varies with SBT  
 $p_a$  = atmospheric pressure in same units as  $q_t$ ,  $\sigma_v$  and  $\sigma'_{v0}$

**Figuur 13. Betekenis symbolen (Robertson, 2011)**

Er bestaan verschillende systemen om onder water een sondering af te nemen. Het zogeheten “wheeldrive penetration system” bijvoorbeeld, een systeem dat wordt afgezonken tot de bodem waar vervolgens een staaf de grond in wordt geduwd om de sondering af te nemen, dit apparaat bestaat ook in een lichte variant met een maximale penetratie diepte van 50 meter tot 70 meter (Danson, 2005).

Een ROV, of op afstand bestuurbare onderzeeër werkt volgens hetzelfde principe als het wheeldrive penetration system echter kan met een ROV de locatie van de sondering exacter worden bepaald met behulp van een camera. ROV's zijn over het algemeen een stuk lichter dan andere sondeersystemen dus is het conusoppervlak verkleind tot een waarde van 500 mm<sup>2</sup> (Fugro N. , 2001). Kortom, sonderingen kunnen nuttig zijn met betrekking tot het fenomeen dynamische verweking om zo de gelaagdheid van de aarde en eventueel de waterspanning of dynamische weerstand te bepalen.

Verkregen parameters:	Permeabiliteit, preconsolidatiegraad, verzadigingsgraad, gelaagdheid, waterdiepte, afhankelijk van soort sondering.
Nauwkeurigheid:	Waterdiepte, gelaagdheid en verzadigingsgraad: zeer goed. Permeabiliteit, preconsolidatiegraad: redelijk tot goed
Toepasbaarheid:	Dieptes < 2000 meter, penetratiediepte 20 meter tot 70 meter.

### Vinproef

De zogeheten vinproef is een test om de afschuifweerstand van een grond te bepalen. Er bestaat ongetwijfeld een verband tussen de afschuifweerstand en het verwekingspotentieel echter is dit

verband nog niet direct in kaart gebracht, om deze reden heeft de vinproef geen waarde voor dit onderzoek (Vane Shear Test, 2010).

Verkregen parameters: Afschuifweerstand.  
Nauwkeurigheid: Redelijk.  
Toepasbaarheid: Dieptes tot 2000 meter, penetratiediepte tot 0,5 meter

### **T-bar- en bal-penetratie tests**

Voor een nauwkeurigere meting dan die van de sondering kan men gebruik maken van een T-bar of bal-penetratie test, TBT en BPT. Beide tests maken gebruik van een meting over een groot oppervlak wat ervoor zorgt dat de tests beperkt worden tot een zachte gronden.

Verkregen parameters: Grondsterkte.  
Nauwkeurigheid: Zeer goed.  
Toepasbaarheid: Dieptes tot 2000 meter, zachte grondsoorten, kleine penetratiediepte.

### **Standaard penetratie test**

De standaard penetratie test is een test die veelvuldig in andere landen dan Nederland gebruikt wordt, bij deze test wordt een profiel met N klappen 30 cm de grond in geslagen, hierbij is het getal N een maat voor de grondsterkte (Terreinonderzoek, 2002). Voordeel is, naast dat de SPT relatief goedkoop is, dat uit de SPT ook een maat voor de dynamische sterkte of seismische gevoeligheid volgt, dit feit maakt de SPT met betrekking tot dynamische verweking aantrekkelijk. Daarentegen is een groot nadeel van deze methode dat deze niet erg betrouwbaar is, hij is minder betrouwbaar dan bijvoorbeeld een sondering, daarnaast kan deze meettechniek alleen worden toegepast in ondiepe wateren, wat deze methode ongeschikt maakt voor offshore metingen.

Verkregen parameters: Grondsterkte.  
Nauwkeurigheid: Slecht.  
Toepasbaarheid: Ondiepe wateren, kleine penetratiediepte.

### **Drukmeter**

De drukmeter is een test om de horizontale grondstijfheid te meten, bij het verschijnsel dynamische verweking is met name de verticale grondstijfheid van belang, om deze reden wordt de drukmeter niet behandeld in dit onderzoek.

Verkregen parameters: Grondstijfheid.  
Nauwkeurigheid: Goed.  
Toepasbaarheid: Ondiepe wateren, penetratiediepte van 20 meter tot 70 meter.

## **5.3.2 Laboratorium onderzoek**

### **Boormonster systemen**

Alvorens in een laboratorium een grondonderzoek te verrichten moet er een monster genomen worden. Het nemen van een monster is doorgaans geen hele grote uitdaging, in de offshore industrie ligt dit iets anders, zeker wanneer het om projecten gaat welke op grote diepte geplaatst moeten worden. De meeste boorsystemen worden eerst naar de zeebodem gebracht alwaar zij een onderdeel van het systeem in de grond persen om zo op de gewenste diepte te komen. Er bestaan

verschillende type systemen, deze systemen verschillen in de manier waarop het monster genomen wordt en zo in hun nauwkeurigheid, het principe is verder hetzelfde.

De volgende systemen zijn beschikbaar om offshore grondmonsters te nemen:

Equipment Description	Maximum Water Depth (m)*	Penetration (m)*
Drill mode borings from vessels	Unlimited**	Unlimited**
Rock corer (seabed unit)	200 m	2 m to 6 m
PROD™ seabed drilling/coring	20 m to 2,000 m	2 m to 100 m
Basic gravity corer	Unlimited**	1 m to 8 m
Piston corer	Unlimited**	3 m to 30 m
Vibrocorer	1000 m	3 m to 8 m
Box Corer	Unlimited**	0.3 m to 0.5 m
Seabed Push-in Sampler	250 m	1 m to 2 m
Grab Sampler (mechanical)	Unlimited**	0.1 m to 0.5 m
Grab Sampler (hydraulic)	200 m	0.3 m to 0.5 m

\* These figures should be used for general guidance only.

\*\* Water depth is limited by the deployment winch and handling capabilities.

**Figuur 14. Verschillende offshore-samplers (Danson, 2005)**

### Laboratorium onderzoek

Wanneer het monster genomen is kan deze opgestuurd worden naar het laboratorium voor een grondig onderzoek, hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld een cyclische triaxiaaltest. Deze laboratorium onderzoeken geschieden op dezelfde wijze als laboratorium onderzoeken voor onshore locaties. Om de permeabiliteit te achterhalen kan gebruik worden gemaakt van een constant of falling head permeability test. Voor de andere parameters kunnen andere laboratorium tests worden gebruikt, in bijlage D vindt de lezer een overzicht met geschiktheid van verschillende tests waarbij een score van 1 zeer slecht geschikt betekent en een score van 5 zeer goed.

Verkregen parameters: Alle benodigde parameters.  
 Nauwkeurigheid: Zeer goed.  
 Toepasbaarheid: Dieptes zie figuur 14, penetratiedieptes zie figuur 14.

## 5.4 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat voor het probleem dynamische verweking twee methoden van geotechnisch vooronderzoek het meest in aanmerking komen, namelijk seismische reflectie en seismische refractie. Afhankelijk van de grondsoort en waterdiepte kan een keuze gemaakt worden uit deze twee, een derde optie is nog om beide technieken samen toe te passen. Uit deze metingen volgt data over de gelaagdheid, waterdiepte en zeebodem dikte en kan men de exacte locatie bepalen. Ook volgt er uit het vooronderzoek data waarmee een voorontwerp gemaakt kan worden zodat vervolgens bepaald kan worden welk volledig geotechnisch onderzoek er vereist is.

Vervolgens kan men de preciese locatie van het project kiezen waar aansluitend nader onderzoek kan worden gedaan. Dit nadere onderzoek kan prima geschieden met een sondering waarin de waterdruk wordt gemeten, hieruit volgen de preconsolidatiegraad en verzadigingsgraad, ook kan men met deze informatie een schatting geven van de permeabiliteit wanneer bekend is met welke grondsoort men te maken heeft. Wanneer men meer betrouwbare informatie wil hebben zal er in het geotechnische onderzoek gebruik moeten worden gemaakt van een grondmonster welke in het laboratorium onderzocht kan worden. Dit monster kan genomen worden met een van bovengenoemde methoden, weer afhankelijk van locatie en grondsoort.

## 6. Conclusie

Het verschijnsel dynamische verweking is een ingewikkeld verschijnsel welke moeilijk is te modelleren of te voorspellen. Hoe het fenomeen optreedt is inmiddels al wel duidelijk, echter is het onderzoek naar dynamische verweking nog verre van compleet. Vooral onderzoek om het residuele mechanisme van het verschijnsel te kunnen voorspellen en een volledig wiskundige analyse van het verschijnsel te kunnen geven ontbreken.

In deze thesis is vooral gekeken naar de onderdelen van het verschijnsel welke al wel bekend zijn, het gaat hier dan voornamelijk om invloedsfactoren, theoretische modellen, verricht onderzoek en meetprocedures.

Geconcludeerd kan worden dat benodigde randvoorwaarden voor het probleem erg met elkaar samenhangen. De belangrijkste grondmechanische randvoorwaarden kunnen worden gevonden op het gebied van: cohesie, permeabiliteit, verzadigingsgraad en de bodemdikte. De belangrijkste hydraulische randvoorwaarden liggen in het gebied van: relatieve golfhoogte en golfgradiënt. Er zijn geen grenswaarden bekend waarin het verschijnsel wel of niet zal optreden, ook hier ligt nog ruimte voor nader onderzoek.

De vraag hoe het verschijnsel kan worden voorspeld wordt behandeld in hoofdstuk 5, uit dit hoofdstuk kan men concluderen dat de beste onderzoeksmethoden met betrekking tot het in kaart brengen van het dynamische verwekingsrisico, bestaan uit seismische metingen. Vervolgens kan men nog gebruik maken van andere methoden zoals een sondering met waterspanningsmeter om een meer accuraat beeld te krijgen van het verwekingspotentieel van de grond. Wanneer voor een project nog meer zekerheid is vereist kan altijd worden uitgeweken naar laboratorium onderzoek zoals een dynamische triaxiaaltest.

Welke onderzoeksmethode men ook kiest om het verwekingspotentieel te analyseren, men zal altijd te maken hebben met een bepaalde mate van onzekerheid omdat er nog te veel onbekend is met betrekking tot het analyseren van het probleem.



## 7. Bijlagen

### Bijlage A: Bibliography

*Terreinonderzoek*. (2002). VSSD.

*Vane Shear Test*. (2010, 11 25). Opgeroepen op 06 10, 2014, van geotechdata:

<http://www.geotechdata.info/geotest/vane-shear-test.html>

*Redwave*. (2014, 01 01). Opgeroepen op 04 04, 2014, van <http://www.redwave.nl/2743981/Turbine-foundations-722x318.jpg?v=0>: <http://www.redwave.nl/2743981/Turbine-foundations-722x318.jpg?v=0>

*Reflection seismology*. (2014, 06 03). Opgeroepen op 06 13, 2014, van Wikipedia:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Reflection\\_seismology#mediaviewer/File:Diagram\\_of\\_a\\_marine\\_seismic\\_survey.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_seismology#mediaviewer/File:Diagram_of_a_marine_seismic_survey.png)

*Seismic refraction*. (2014, 01 01). Opgeroepen op 06 13, 2014, van Wikipedia:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Seismic\\_refraction#mediaviewer/File:Refracted\\_wave.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_refraction#mediaviewer/File:Refracted_wave.png)

*Seismic Refraction Surveying*. (2014, 01 01). Opgeroepen op 06 13, 2014, van [www.ukm.my](http://www.ukm.my):

<http://www.ukm.my/rahim/Seismic%20Refraction%20Surveying.htm>

A. Sawicki, J. M. (2005). Wave-Induced Stresses and Liquefaction in Seabed. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. No.2, 131 - 145.

Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, 155 - 164.

Cha, D. (2009). *Prediction of wave-induced seabed maximum liquefaction using artificial neural network model*. Brisbane: Griffith university.

Cheng, E. D.-D. (1993). *Fundamentals of Poroelasticity*. Pergamon Press.

Chih-Hsin Chang, L.-K. C.-H. (2004). 3-D LIQUEFACTION POTENTIAL ANALYSIS OF SEABED AT NEARSHORE AREA. *Journal of Marine Science and Technology*. Vol. 12 No. 3, 141 - 151.

D.-S. Jeng, H. Z. (2005). An integrated three-dimensional model of wave-induced pore pressure and effective stresses in a porous seabed: II. Breaking waves. *Ocean engineering* 32, 1950 - 1967.

D.-S. Jeng, J. L. (2008). Response of a porous seabed around breakwater heads. *Ocean Engineering* 35, 864886.

Daeho Cha, D.-S. J. (2006). Evaluation of Wave-induced Liquefaction in a Porous Seabed: Using an Artificial Neural Network and a Genetic Algorithm -based model. *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 302 - 308). San Francisco, California, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers.

Daeho Cha, H. Z. (2009). Accurate prediction of wave-induced seabed liquefaction at shallow depths using Multi Artificial Neural Networks. *Journal of Coastal research*, 927 - 931.

- Danson, E. (2005). *GEOTECHNICAL & GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS FOR OFFSHORE AND NEARSHORE DEVELOPMENTS*. Technical Committee 1, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- DeGroot, D. J. (2010). *Recommended site investigation practice for offshore energy systems*. Massachusetts: University of Massachusetts.
- Dr. Harmon, D. M. (2013, 01 01). <http://maps.unomaha.edu/maher/>. Opgeroepen op 05 16, 2014, van Department of Geography and Geology, University of Nebraska at Omaha: <http://maps.unomaha.edu/maher/GEOL3300/week5/Mohrcircles.jpeg>
- Enviroscan. (2003, 01 01). *Seismic refraction versus reflection*. Opgeroepen op 06 13, 2013, van Enviroscan: [http://www.enviroscan.com/html/seismic\\_refraction\\_versus\\_refl.html](http://www.enviroscan.com/html/seismic_refraction_versus_refl.html)
- Ferrel, S. (2012, 01 01). *The Ferrel law firm*. Opgeroepen op 18 05, 2014, van <http://ferrell-lawfirm.com/houston-auto-accident-news/page/3/>: <http://ferrell-lawfirm.com/wp-content/uploads/2011/03/Offshore-Platform.jpg>
- Fugro. (2012). *SEISMIC REFRACTION as a TOOL for SUBSEA ENGINEERING RISK*. Leidschendam: Fugro.
- Fugro, N. (2001). *GEOPHYSICAL & GEOTECHNICAL TECHNIQUES FOR THE INVESTIGATION OF NEAR-SEABED SOILS AND ROCKS*. Leidschendam: Fugro.
- Gao Yu-feng, S. Y. (2011). Analysis of Wave-Induced Liquefaction in Seabed Deposits of Silt. *Chinese Ocean Engineering Vol. 25, No. 1*, 31 - 44.
- Geotechnical, S. (2014, 01 01). *MAGNETIC SURVEYS*. Opgeroepen op 06 13, 2014, van GEOPHYSICAL SERVICE FACT FILE: <http://www.geophysical.biz/magnetic.htm>
- Haijiang Liu, D.-S. J. (2007). A semi-analytical solution for random wave-induced soil response and seabed liquefaction in marine sediments. *Ocean Engineering 34*, 1211 - 1224.
- Hanbing Bian, I. S. (2009). Numerical model for unsaturated sandy soils under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29*, 237–244.
- IAGC. (2002). *Marine seismic operation - An overview*. IAGC.
- Jones, R. D. (2013, 05 22). *Geophysical Series, Western Newfoundland Offshore Aeromagnetic Survey; Scale 1:100 000*. Opgeroepen op 06 13, 2014, van New Foundland, Labrador, Canada: <http://www.nr.gov.nl.ca/nr/mines/geoscience/publications/openfiles/OffshoreWestNFLD/OffshoreWestNFLD.html>
- Julian, A. (2013). *A STRAIN-BASED PROCEDURE TO SCREEN FOR WAVE-INDUCED PORE PRESSURE GENERATION IN THE SEABED*. RHODE ISLAND: UNIVERSITY OF RHODE ISLAND.
- K. Adalier, M. S. (2006). *Dynamic behavior of embankment dam on liquefiable foundations*. London: Taylor & Francis Group plc.
- Ltd., M. a. (2008). *High-res marine seismic tomography for port survey*. Bulimba, Queensland, Australia: Mapping and Hydrographic Surveys Pty Ltd.

- M. Zienkiewicz, P. (1986). A generalized plasticity hierarchical model for sand under monotonic and cyclic loading. *Proceedings of the second international Conference on Numerical Models in Geomechanics*, 131 - 150.
- Mayne, P. W. (2010). *Profiling Overconsolidation Ratio in Clays by Piezocone and Flat Dilatometer Tests*. Georgia: Georgia Tech.
- Mei, C. F. (1981). Wave-induced responses in a fluid-filled poroelastic solid with a free surface – a boundary layer theory. *Geophysical Journal Royal of Astronomical Society* 66, 597 – 631.
- Mutlu Sumer, J. F. (2012). Residual Liquefaction under Standing Waves. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1392.
- Nakamura, O. M. (1973). On the seepage in the seabed due to waves. *Coastal engineering conference*, 421 - 428.
- Noorzad, A. (2013, 01 01). *Modeling saturated porous media with elasto-plastic behavior and non-Darcy flow law considering different permeability coefficients*. Opgeroepen op 06 11, 2014, van [www.academia.edu](http://www.academia.edu):  
[http://www.academia.edu/1986264/Modeling\\_saturated\\_porous\\_media\\_with\\_elasto-plastic\\_behavior\\_and\\_non-Darcy\\_flow\\_law\\_considering\\_different\\_permeability\\_coefficients#](http://www.academia.edu/1986264/Modeling_saturated_porous_media_with_elasto-plastic_behavior_and_non-Darcy_flow_law_considering_different_permeability_coefficients#)
- Pui Lee Vun, A. H. (2007). *Numerical Analysis of Wave-Induced Liquefaction around Buried Pipeline*. Birmingham: Department of Civil Engineering, University of Birmingham.
- R. Noorzad, S. S. (2009). The effect of structures on the wave-induced liquefaction potential of seabed. *Applied ocean research*, 25 - 30.
- R. Noorzada, S. S. (2009). The effect of structures on the wave-induced liquefaction potential of seabed. *Applied ocean research*, 25 - 30.
- Rahman, D. J. (2001). Wave-induced oscillatory soil response: Difference between quasi-static and dynamic response. *Computer methods and advances in geomechanics*, 1103 - 1106.
- Rijksoverheid. (2014). <http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/energie/energiebeleid-nederland>. Opgeroepen op 2014, van <http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/energie/energiebeleid-nederland>: <http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/energie/energiebeleid-nederland>
- Robertson, P. (2011). *Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu*. Signal Hill, California, USA: Gregg Drilling & Testing Inc, .
- Sakai, T. H. (1992). Wave-induced effective stress in seabed and its momentary liquefaction. *Ocean engineering* 118, 202 - 206.
- Sekiguchi, H. K. (1995). Response of poro-elastoplastic beds to standing waves. *Soils and foundations*, 31 - 42.
- Shin'ichiro Mori, T. I. (1992). Influence of soil liquefaction on dynamic response of structure on pile foundation. *Earthquake engineering*, 1777 - 1780.

SismOcean. (2014). *Seismic Refraction Surveying*. Montpellier: SismOcean.

Stenvold, T. (2008). *Offshore Gravimetric and Subsidence Monitoring*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Petroleum Engineering and Applied and Geophysics.

Wang, K. a. (2007). Analysis of seabed instability using element free Galerkin method. *Ocean Engineering*, 247 - 260.

Xu, H. (2012). Wave-induced liquefaction processes in marine sediments. *University of Dundee*, 142.

Yamamoto. (1978). On the response of poro-elastic bed to water waves. *Journal of fluid mechanics* 78, 193- 206.

Yasser E. Mostafa, M. H. (2006). Effect of seabed instability on fixed offshore platforms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1127 - 1142.

Yin L. Young, J. A. (2009). Liquefaction potential of coastal slopes induced by solitary waves. *Acta Geotechnica*, 17 - 34.

Zhang, J. a. (2005). An integrated three-dimensional model of wave-induced pore pressure and effective stresses in a porous seabed: II. Breaking waves. *Ocean Engineering*, 1950 - 1967.

**Bijlage B: Lijst van figuren**

Figuur 1. Verschillende offshore funderingen (Redwave, 2014).....	6
Figuur 2. Interactie golf-zeebodem (Wang, 2007) .....	9
Figuur 3. Concept van poriendruk verhoging en verweking (Zhang, 2005) .....	10
Figuur 4. Opbouw van poriedruk in zeebodem ten gevolge van golfslag (D.-S. Jeng J. L., 2008) .....	12
Figuur 5. Relatie tussen $\tau$ en $\sigma$ (Dr. Harmon, 2013) .....	14
Figuur 6. Invloed van permeabiliteit op verwekingdiepte (Xu, 2012).....	15
Figuur 7. Belasting cycli tot verweking uitgezet tegen verzadigingsgraad (Hanbing Bian, 2009).....	15
Figuur 8. Invloed golfhoogte op verwekingsproces (Xu, 2012).....	16
Figuur 9. Invloed waterdiepte op verwekingspotentieel (Xu, 2012).....	16
Figuur 10. Invloed van bodemdikte op verwekingsproces (Xu, 2012) .....	17
Figuur 11. Kartoonweergave van seismische reflectie (Reflection seismology, 2014) .....	25
Figuur 12. Kartoonweergave van seimische refractie (Fugro, 2012) .....	26
Figuur 13. Betekenis symbolen (Robertson, 2011) .....	29
Figuur 14. Verschillende offshore-samplers (Danson, 2005) .....	31

## **Bijlage C: Biot's theorie**

Bron: (Cheng, 1993)

## Bijlage D: Geschiktheid verschillende grondtests

Bron: (Danson, 2005)

Soil parameters	In-situ testing			Laboratory testing		
	Type of test	Applicability		Type of test	Applicability	
		Sand	Clay		Sand	Clay
Consolidation characteristics and permeability	(P)CPT	1	3	Oedometer	3 (a)	5
Soil parameters	In-situ testing			Laboratory testing		
	Type of test	Applicability		Type of test	Applicability	
		Sand	Clay		Sand	Clay
Interpolation of soil layering	Seismic reflection profiling	2	2			
Soil classification	Swath bathymetry, sidescan sonar	1	1	Grain size distribution	5	2
	CPT	2	2	Grain size + hydrometer		4
	(P)CPT	4 to 5	4 to 5	Water content	2	3
				Atterberg limits		5
Soil density	CPT, (P)CPT	2	2	Unit weight and water content	1 to 2	5
Soil strength (undrained shear strength)	CPT, (P)CPT VST PMT or DMT T-bar, ball probe		3 to 4	Triaxial shear strength		3 to 4
			4 to 5	Triaxial CIU	4	4
			2 to 3	Simple shear		3 to 4
			4 to 5	Fall cone, torvane, Pocket penetrometer		3
						2
Angle of shearing resistance (drained shear strength)	CPT, (P)CPT	3 to 4	2	Triaxial CIU, CID (a)	5 (a)	5
				Simple shear	4	1
Sensitivity	CPT, (P)CPT VST T-bar, ball probe		2	Fall cone, lab vane		3 to 4
			3 to 4	Triaxial shear strength (intact/remoulded)		
			3 to 4(b)			3 to 4
Soil parameters	In – situ testing			Laboratory testing		
	Type of test	Applicability		Type of test	Applicability	
		Sand	Clay		Sand	Clay
Interpolation of soil layering	Seismic refraction profiling	3 to 4(a)	3 to 4(a)			
	Electrical resistivity profiling	2 to 3(b)	2 to 3(b)			
Classification of carbonate soils	CPT,(P)CPT	4(c)	3	Carbonate content	5	5
Compressibility of carbonate sands				Oedometer	4	
				Crushability	3	
Shear strength anisotropy (clay)				Triaxial CAUc, CAUe Simple shear		5
Rate effects, cyclic response				Consolidated triaxial, simple shear (static, cyclic)	5	5
Thixotropy				Thixotropy tests		4
Interface behaviour (piles, caissons)				Ring shear tests (soil/soil and soil/steel)	3 to 4	3 to 4
				Shear box(soil/soil and soil/steel)	3 to 4	
Initial shear modulus	Seismic cone	4 to 5	4 to 5	Resonant column (d)	4 to 5	4 to 5
				Bender elements in triaxial simple shear and oedometer tests	4 to 5	4 to 5
Corrosion potential	Electrical resistivity cone	4	4	Electrical resistivity	4	4
Liquefaction potential	CPT, (P)CPT	3				
	Electric resistivity cone	4		Electrical resistivity	4	