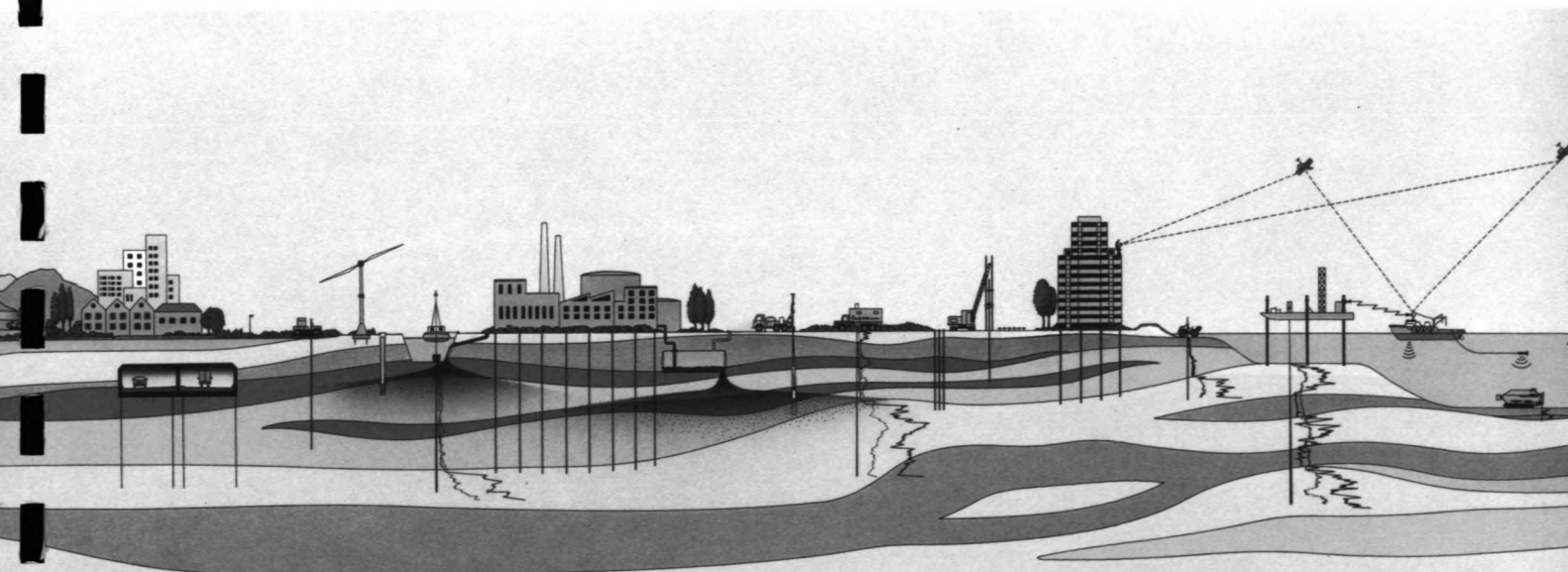


Het heiproces als trillingsbron

Deelrapport I : Modelling

M. Grootenboer
Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Fugro bv. Leidschendam



Het heiproces als trillingsbron

Deelrapport I : Modelling

**M. Grootenboer
Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Fugro bv. Leidschendam**

Het heiproces als trillingsbron

Uit : De Telegraaf 15-2-1994

...den, median lijne... | ...overing van berich- | veiligheid
...ten. | Shirley Lu... | ...in de ja...

Van onze Rotterdamse redactie

ROTTERDAM, dinsdag

Op de bouwplaats voor het nieuwe hoofdkantoor van Credit Lyonnais Bank mag overdag niet geheid worden, omdat dan bij 'buurman' Robeco de computers beschadigd raken.

Nadat zich enkele schadegevallen hadden voorgedaan aan de harde schijven van de kantoor-pc's, besloten Credit

Lyonnais en Robeco in gezamenlijk overleg, dat er voortaan uitsluitend 's avonds en op zaterdag geheid zal worden.

Als de pc's niet in gebruik zijn, kunnen de harde schijven worden vastgezet.

Het gaat met name om 30 palen, die zeer dicht tegen het Robeco-gebouw aan geheid moeten worden. Voor een groot aantal andere palen is alsnog gekozen voor de schroefmethode. De laatste 30 moeten perse worden geheid.

Op de vraag of deze ongebruikelijke heid-uren voor Credit Lyonnais een kostenpost opleveren, zei een woordvoerder gisteren: „We vinden het veel belangrijker, dat het gebouw op tijd wordt opgeleverd. En die termijn loopt geen gevaar.”

De laatste paal zal naar verwachting eind februari de grond in gaan. Robeco wijst erop, dat haar grote computersystemen (mainframes) géén gevaar lopen.

Voorwoord

In het kader van mijn afstuderen aan de Faculteit der Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft heb ik, na een interessante stage bij Fugro-McClelland te Singapore, in overleg met professor Verruijt contact gezocht met Fugro BV. te Leidschendam.

Bij Fugro BV. ben ik betrokken bij het onderzoek naar het ontstaan van trillingen in de grond veroorzaakt door het heien van een paal. Belangrijk bij dit onderzoek is te omschrijven wat er nu eigenlijk vlakbij de paal gebeurt, aangezien hier weinig over bekend is.

Voor u ligt het eerste deelrapport waarin een samenvatting van de modellering wordt gegeven. In deze fase is gezocht naar een model dat het probleem van trillingen ontstaan door heien kan omschrijven. Door verificatie zal nog moeten blijken of dit model echt bruikbaar is. Wel moet gezegd worden dat het gevonden model zich voornamelijk toespitst op het gedrag van de grond vlak bij de paalpunt.

Mijn dank gaat in deze tweede fase ook weer uit naar Maarten Smits en professor Verruijt voor hun aanwijzingen en hulp. Verder wil ik Jeroen bedanken voor het continu beschikbaar hebben van koffie en Anneloes, afstudeerder bij Fugro Engineers, voor de morele ondersteuning.

Delft / Leidschendam,

Maart 1994

M. Grootenboer

Samenvatting

In dit verslag wordt een beschrijving gegeven van het onderzoek naar een model dat het gedrag van de grond tijdens het heien van een paal kan omschrijven.

Allereerst is daartoe de probleemstelling en de probleem afbakening gegeven in hoofdstuk 1. Hoewel dit reeds in een eerdere fase aan de orde is geweest is deze op enkele punten aangepast. Voorts bevat dit hoofdstuk de conclusies van het literatuuronderzoek.

In hoofdstuk 2 wordt een model dat perspectieven biedt nader uitgewerkt. Dit model is gebaseerd op de theorie van de zogenaamde "Spherical cavity expansion", een theorie die reeds eind jaren '50 uitgeschreven werd. Het model is niet echt ingewikkeld van aard.

Hoofdstuk 3 bevat een aantal andere modellen of vereenvoudigingen. Onder andere een simpele massabalans, een ingewikkelder compactie model en twee modellen die reeds in het literatuuronderzoek zijn omschreven, zijn in dit hoofdstuk opgenomen.

De verdere aanpak, namelijk validatie, verificatie en afhankelijkheidsonderzoek wordt in hoofdstuk 4 gegeven.

In de bijlagen wordt een overzicht gegeven van de gebruikte literatuur, symbolen en figuren/tabellen. Voorts zijn een tweetal eenvoudige voorbeeldberekeningen gegeven.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting	2
Inhoudsopgave	3
Hoofdstuk 1. Inleiding	5
§ 1.1 Inleiding	5
§ 1.2 Probleemstelling	5
§ 1.3 Opdrachtformulering	5
§ 1.4 Doelstelling	6
§ 1.5 Randvoorwaarden en uitgangspunten	6
§ 1.6 Conclusies literatuurstudie	6
§ 1.7 Korte inleiding modellering	7
Hoofdstuk 2. Bolvormige holte expansie theorie	8
§ 2.1 Inleiding	8
§ 2.2 Theorie	8
§ 2.3 Opmerkingen aangaande de theorie	13
§ 2.4 Modelling	13
§ 2.5 Samenvatting model	16
Hoofdstuk 3. Aanknopingspunten andere modellen	17
§ 3.1 Inleiding	17
§ 3.2 Compactie model : Massa behoud	17
§ 3.3 Compactie model : Chow (1992)	19
§ 3.4 Methode der karakteristieken : De Josselin de Jong (1956)	21
§ 3.5 Micro mechanisch model : Koenders (1992)	21
Hoofdstuk 4. Programma voor validatie en afhankelijkheid	23
§ 4.1 Inleiding	23
§ 4.2 Programma voor V & A	23

Gebruikte literatuur	24
Bijlage A. Gebruikte symbolen	26
Bijlage B. Overzicht figuren en tabellen	28
Bijlage C. Aangepast tijdwerkschema	29
Bijlage D. Voorbeeldberekening "Cavity expansion"	30
Bijlage E. Voorbeeldberekening Compactie	31

Hoofdstuk 1. Inleiding

§ 1.1 Inleiding

Als trillingsbron in een bebouwde omgeving kan bijvoorbeeld wegverkeer, een langsrazende trein of het heien van een funderingspaal gezien worden. In de praktijk blijkt met name het heien van palen te kunnen leiden tot schade aan belendingen en hinder voor omwonenden. Om deze reden is door Fugro nader onderzoek gedaan naar trillingen bij het heien. Het resultaat van dit onderzoek is vastgelegd in Fugro rapport M-0100 [Lit-5] Genoemde verstoring kan worden gekoppeld aan de inmiddels door andere bedrijven in CUR verband opgestelde modellen voor de overdracht door de bodem en belendend gebouw, [Lit-3,Lit-4].

§ 1.2 Probleemstelling

De interactie tussen de dynamisch belaste paal tijdens het heien en de omringende grond is het meest complexe moduul in het prognose model. Om dit fysisch model geschikt te maken als moduul in het prognose model zijn er een aantal zaken die om nadere studie vragen :

- de te hanteren grond- en paalparameters
- de gebruikte parameters en hun relatie met de fysica
- samenhang met de andere modulen

Een betere predictie aangaande heitrillingen vereist verdere studie.

§ 1.3 Opdrachtformulering

In het vervolg onderzoek zullen de grond- en paalparameters die werkelijk van belang zijn gevonden moeten worden. Ook zal er een nader verband tussen bestaande metingen en het empirisch model gezocht moeten worden. Eventuele nieuwe metingen kunnen worden uitgevoerd om meer inzicht te verkrijgen over wat er juist bij de paalpunt gebeurt. Zowel voor het empirisch als het fysisch model moet een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden, mede met gebruik van de modulen bodem en gebouw. Alleen dan kan het verband tussen geproduceerde bronuitvoer, de meetwaarden aan of in een gebouw, en invoerparameters werkelijk geverifieerd worden. Ook zal een vereenvoudigd mechanica model moeten worden opgesteld om de zinnigheid van de andere modellen te omschrijven.

§ 1.4 Doelstelling

Het eindprodukt van het te verrichten onderzoek moet een nader uitgewerkt bronmoduul zijn gericht op het heiproces als bron. Het model zal geverifieerd worden aan de hand van bestaande en eventueel nieuw uitgevoerde metingen.

§ 1.5 Randvoorwaarden en uitgangspunten

De volgende punten zijn in dit kader van toepassing :

- Het heiproces wordt als trillingsbron beschouwd
- Voor de grond gelden Nederlandse omstandigheden
- Niet zozeer een uiterst nauwkeurig model maar een model dat praktisch toepasbaar is door gebruik van meetgegevens wordt beoogd
- De modulen bodem en gebouw blijven onveranderd
- Alleen het gebied vlakbij de paalpunt wordt nader beschouwd
- Het ingewikkelde proces van wrijving langs de paalschacht en de demping van trillingen in de paal zal niet verder uitgewerkt worden
- Het model moet een gelaagd grondprofiel kunnen schematiseren

§ 1.6 Conclusies literatuurstudie

In de literatuurstudie [Lit-13] werd het volgende geconcludeerd :

Hoewel het lijkt alsof er reeds vrij veel bekend is op het gebied van trillingen ontstaan door het heien van een paal, is gebleken dat tot nog toe slechts onderdelen van dit proces beschouwd zijn. Met eindige elementen programma's kan de plastische vervorming goed worden geschematiseerd, maar zoals reeds gesteld, is het de bedoeling naar een praktische uitwerking toe te werken.

Duidelijk is gebleken dat parameters als ν , G, E van belang zijn, maar ook plastische parameters dienen nader toegepast te worden.

In de verdere studie zullen drie aspecten verdiept worden :

- a - Opstellen 1-Dimensionaal model volgens 'Cavity expansion'
- b - Verifiëren en aanpassen model Koenders
- c - Aanpassen empirisch model

Dit zal gedaan worden door een duidelijke filtering van de te gebruiken parameters, waarvan er velen in [Lit-13] genoemd zijn. Ook een nader onderzoek naar de aanwezigheid van grondwater in de grond en de golfvoortplanting in de grond dient uitgevoerd te worden.

- ad a) Het te ontwikkelen model zal eenvoudig van aard zijn en zal geverifieerd worden aan de hand van meetgegevens.
- ad b) Het aanpassen en verifiëren van Koenders' model zal gebeuren aan de hand van oude en eventueel nieuwe meetgegevens. De huidig beschikbare metingen zijn voornamelijk op een relatief grote afstand van de paal genomen. Nieuwe metingen zullen dan ook in de directe omgeving van de paal gedaan worden. Tevens zal het huidige computer programma aangepast moeten worden. Makkelijker te verkrijgen variabelen waaruit andere berekend kunnen worden dienen te worden ingevoerd.
- ad c) Het nader uitwerken van de parameter β zal het nodige werk vergen. Ook dit zal aan de hand van metingen gebeuren.

§ 1.7 Korte inleiding modellering

In het voorgaande alsook in [Lit-13] is een afbakening gemaakt van de studie. Randvoorwaarden, uitgangspunten en conclusies naar aanleiding van de literatuurstudie zijn in deze afbakening meegenomen. In dit rapport wordt voornamelijk gezocht naar een model dat het gedrag van de grond beschrijft juist bij de paalpunt. De paalpunt wordt hierbij beschouwd wanneer deze zich in een stijve laag bevindt, een zandlaag. Hier treden immers de grootste trillingsverschijnselen op en is het dus zaak deze situatie nader te beschouwen.

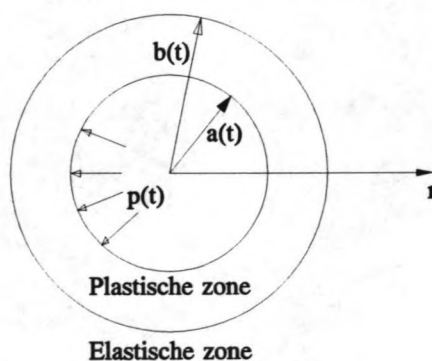
Hoofdstuk 2. Bolvormige holte expansie theorie

§ 2.1 Inleiding

De bolvormige holte expansie theorie (Spherical cavity expansion theory) gaat uit van een bolvormige holte met een bepaalde grootte, die onder invloed van een inwendige drukbelasting uitzet. Deze uitzetting verloopt geheel geometrisch in radiale richting. Hopkins [Lit-1] schreef deze theorie uit voor de uitzetting van een holte in een homogeen materiaal. In dit hoofdstuk zal deze theorie toegepast worden op grond, mede aan de hand van [Lit-2].

§ 2.2 Theorie

De theorie van de bolvormige holte expansie gaat uit van een schematisatie, zoals gegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1 Schematisatie van een holte

Voor deze holte geldt het volgende :

$r < a(t)$	holte
$r \geq b(t)$	elastisch gedefformeerd gebied
$a(t) \leq r \leq b(t)$	plastisch gedefformeerd gebied

Waarin :

r	polaire coördinaat, gemeten vanaf het middelpunt van de cirkel	[m]
$a(t)$	straal van de holte op tijdstip t	[m]
$b(t)$	straal van de plastisch-elastische grens	[m]

De rekincrementen worden dan geschreven als :

$$\varepsilon_r' = -2 \frac{a^2 a'}{r^3} \quad \varepsilon_t' = \frac{a^2 a'}{r^3} \quad [2.6]$$

De bewegingsvergelijking wordt gegeven door :

$$\frac{\delta \sigma_r}{\delta r} + \frac{2}{r} (\sigma_r - \sigma_t) = \rho \left[\frac{a^2 a'' + 2aa'^2}{r^2} - \frac{2a^4 a'^2}{r^5} \right] \quad [2.7]$$

In deze vergelijkingen is gegeven :

a	holte straal op tijdstip t	[m]
a'	snelheid holte uitbreiding op tijdstip t	[m]
a''	versnelling holte uitbreiding op tijdstip t	[m]
σ_r	radiale spanning	[Kn/m ²]
σ_t	tangentiële spanning	[Kn/m ²]
ρ	massa dichtheid	[kg/m ³]
v	deeltjessnelheid	[m/s]

Om tot een oplossing van de bewegingsvergelijking voor zowel elastische als plastische vervormingen te komen zal nu eerst naar een elastische oplossing gezocht worden.

Voor de elastische uitwerking kan gebruik gemaakt worden van elastische vergelijkingen voor kleine vervormingen. De kleine elastische verplaatsing wordt dan ook gegeven door:

$$u = \frac{a^3 - a_0^3}{3r^2} \quad [2.8]$$

Hierin is :

u	verplaatsing van een deeltje	[m]
a ₀	begin straal van de holte	[m]

De bijbehorende rekken zijn als volgt gegeven :

$$\varepsilon_r = -2 \frac{u}{r} \quad , \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r} \quad [2.9]$$

waarvoor de oplossing zowel direct als door middel van een benaderende integraal kan worden gevonden.

De elastische spanning-rek relaties, met $\nu = 1/2$, geven dan :

$$E \frac{\delta u}{\delta r} = \sigma_r - \sigma_t \quad , \quad E \frac{u}{r} = \frac{1}{2} (\sigma_t - \sigma_r) \quad [2.10]$$

Door substitutie van [2.8] en [2.9] in [2.10] wordt dan gevonden :

$$\sigma_t - \sigma_r = 2E \frac{a^3 - a_0^3}{3r^3} \quad [2.11]$$

Door substitutie van [2.10] in [2.7] en door integratie hiervan wordt gevonden, onder aanname dat $\sigma_r(\infty) = 0$,

$$\sigma_r = -\frac{4}{9}E \frac{a^3 - a_0^3}{3r^3} - \rho \left[\frac{a^2 a'' + 2aa'^2}{r} - \frac{a^4 a'^2}{2r^4} \right] \quad [2.12]$$

Hieruit volgt de druk op de wand van de holte :

$$p = \frac{4}{9}E \left(1 - \frac{a_0^3}{a^3}\right) + \rho(aa'' + \frac{3}{2}a'^2) \quad [2.13]$$

De vloeivoorwaarde Y wordt gegeven door $\sigma_t - \sigma_r = Y$. Vloeien gebeurt dus aan de rand van de holte wanneer de holte een straal a_1 heeft, oftewel :

$$\frac{a_1}{a_0} = 1 + \frac{Y}{2E} \quad , \quad a_1' = \sqrt{\frac{Y}{\rho E} \left(p_0 - \frac{1}{3}Y\right)} \quad , \quad p_0 > \frac{1}{3}Y \quad [2.14]$$

In deze vergelijking is :

$$p_0 \quad \text{begindruk van het drukverloop} \quad [Kn/m^2]$$

Nu is de staat van beweging aan het eind van de eerste expansie fase bepaald. Hoewel de verplaatsingen nog zeer klein kunnen zijn, kan de snelheid groot zijn. Om nu de tweede fase te omschrijven wordt allereerst de voortplanting van de grens tussen plastisch en elastisch gebied beschouwd, op $r = b$. Deze grens plant zich radiaal voort vanaf de holte wand. In het plastische gebied wordt voldaan aan de vloeivoorwaarde, immers geen plastische vervormingen zonder vloeien, dus kan de bewegingsvergelijking als volgt omschreven worden :

$$\frac{\delta \sigma_r}{\delta r} - \frac{2Y}{r} = \rho \left[\frac{a^2 a'' + 2aa'^2}{r^2} - \frac{2a^4 a'^2}{r^5} \right] \quad [2.15]$$

§ 2.3 Opmerkingen aangaande de theorie

In het voorgaande is van een aantal zaken uitgegaan, die van belang zijn bij het vervolg van dit onderzoek :

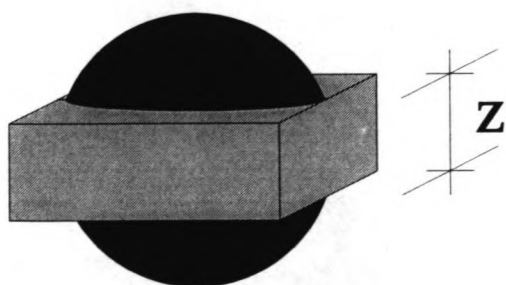
- de ruimte waarin de holte expandeert is oneindig groot
- de initiële druk in het materiaal is nul
- het materiaal is homogeen
- het materiaal is volkomen plastisch
- de bolvormige holte heeft een beginstraal a_0
- de expansiefase verloopt naar buiten toe, er treedt geen terugvering op

In de volgende paragrafen wordt de invloed van deze uitgangspunten verder besproken.

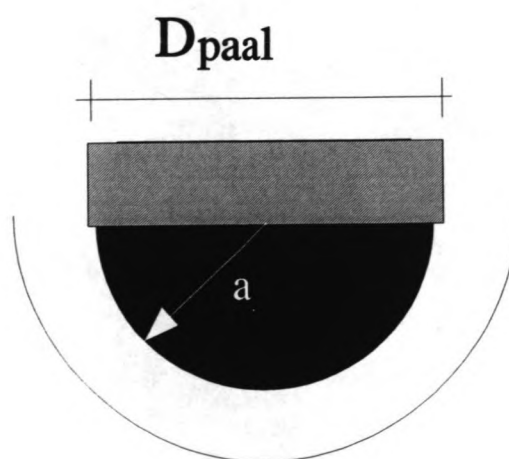
§ 2.4 Modelling

Nu de theorie die gevolgd gaat worden bekend is, dient het heiproces dusdanig geschematiseerd te worden, opdat de theorie toepasbaar is hierop.

Allereerst dient de zakking van de paal verdisconteerd te worden. Het volume van de verplaatste grond ($z \cdot A_{\text{paal}}$) moet op een of andere wijze gelijk gesteld worden aan de grootte van de holte. Hierbij kan het equivalente volume òfwel in een bolvorm of in een halve bolvorm worden uitgedrukt. In figuren 2.2 en 2.3 wordt dit weergegeven.

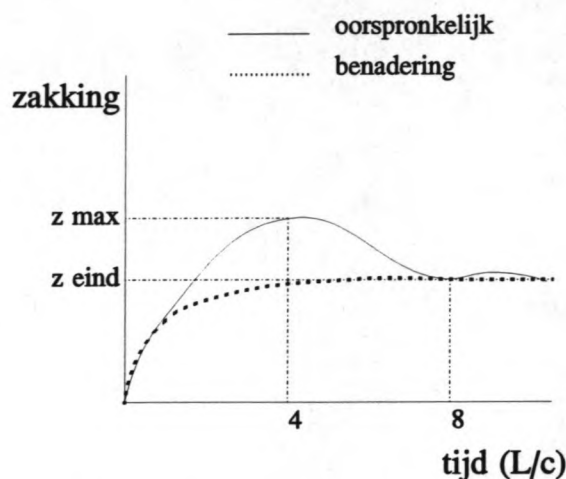


Figuur 2.2 Bolvorm



Figuur 2.3 Halve bolvorm

Verderop in dit rapport wordt het verschil tussen een bolvormige en een halve bolvormige holte expansie verder uitgewerkt. Allereerst dient de zakkingsfunctie in het model opgenomen te worden. In figuur 2.4 wordt een voorbeeld van een zakkingsfunctie gegeven.



Figuur 2.4 Zakkingsfunctie en benadering

Aangezien de theorie, behandeld in paragraaf 2.2, slechts de eerste expansie fase beschrijft, dat is de fase tot aan een maximale verplaatsing, dient de zakkingsfunctie dusdanig geschreven te worden, zodat de eindzakking tevens de maximale zakking is. Immers, de paal verplaatst de grond zijwaarts definitief en voor een gedeelte elastisch naar beneden. Aangezien de elastische samendrukking in het opgestelde model verwaarloosd is, wordt deze ook hier weer verwaarloosd. De zakking wordt uitgedrukt als bolstraal, vanwege de aanname van een equivalent volume. Er volgt dan :

$$\Delta z(t) \cdot A_{paal} = \frac{4}{3} \pi a(t)^3 \quad (\text{bol}) \quad [2.20]$$

$$\Delta z(t) \cdot A_{paal} = \frac{2}{3} \pi a(t)^3 \quad (\text{halve bol}) \quad [2.21]$$

Hieruit is een uitdrukking voor $a(t)$ af te leiden. De gebruikte symbolen zijn aangegeven in de figuren 2.1-2.4.

Voor de trillingen die ontstaan bij de paalpunt zijn voornamelijk de snelheden en versnellingen die in de grond aangebracht worden door het heien van belang. Deze grootheden zijn te berekenen door de uitdrukkingen in [2.20] en [2.21] te differentiëren naar de tijd of door te stellen dat deze waarden als het ware opgelegd zijn door het systeem en dus gelijk zijn aan de waarden onder aan de paalpunt (gemeten).

De laatste onbekende in het opgestelde model is de vloeivaarde Y . Voor Y geldt dat deze gelijk is aan het verschil tussen de radiale en de tangentiële spanningen. Uit de cirkel van Mohr blijkt dat dit verschil gelijk is aan een uitdrukking van σ_0 en ϕ , de radiale en tangentiële spanningen zijn immers de hoofdspanningen. Voor Y geldt dan ook :

$$Y = \sigma_t - \sigma_r = 2 \cdot C_u = 2 (c + \sigma_0 \tan \phi) \quad , \quad \sigma_0 = \gamma_k \cdot z \quad [2.22]$$

Hierin is :

σ_r	radiale spanning	[kN/m ²]
σ_t	tangentiële spanning	[kN/m ²]
σ_0	initiële spanning	[kN/m ²]
γ_k	korrel dichtheid	[kN/m ³]
ϕ	hoek van inwendige wrijving	[°]
z	diepte	[m]
c	cohesie	[kN/m ²]
C_u	ongedraineerde schuifsterkte	[kN/m ²]

Volgens Prandtl kan de ongedraineerde schuifsterkte afgeleid worden als functie van de conusweerstand (q_c in Kn/m²). Aangezien dit een eenvoudig te verkrijgen grootheid is, verdient dit de voorkeur. Prandtl stelt :

$$C_u = \frac{q_c - s_q N_q q}{s_c N_c} \quad , \quad q = \gamma_k \cdot z \quad [2.23]$$

Waarin :

$$s_q = 1 + \sin \phi \quad , \quad N_q = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \cdot e^{\pi \tan \phi}$$

$$s_c = 1 \quad , \quad N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi$$

Tot slot dient de in de grond aanwezige beginspanning nog in het model opgenomen te worden. In de theorie in paragraaf 2.2 is deze namelijk niet in rekening gebracht. In een latere fase wordt deze verder behandeld.

§ 2.5 Samenvatting model

In de vorige paragraaf zijn een aantal zaken aangedragen om het heiproces in een model uit te drukken. Om te kunnen beoordelen of het model overeenkomt met de werkelijkheid dient de invloed hiervan onderzocht te worden. In tabel 2.1 zijn deze nog eens uitgezet.

Grootheid	Mogelijkheid 1	Mogelijkheid 2
$z(t)$	werkelijke waarden	benadering
$a'(t)$	gemeten waarden	afgeleide $a(t)$
$a''(t)$	gemeten waarden	afgeleide $a'(t)$
Y	C_u uit cirkel van Mohr	C_u uit q_c
E	statisch	dynamisch

Tabel 2.1 Samenvatting model

Kort kan de samenhang tussen de grootte van de plastische zone en de waarden voor Y en E nog beschouwd worden, zie tabel 2.2. Deze samenhang is gegeven volgens [2.19], op andere manier geschreven als :

$$b(t) = a(t)^3 \sqrt{\frac{2E}{3Y}}$$

E groter	Y gelijk	b(t) groter
E kleiner	Y gelijk	b(t) kleiner
E gelijk	Y groter	b(t) kleiner
E gelijk	Y kleiner	b(t) groter

Tabel 2.2 Samenhang b(t) en Y,E

In hoofdstuk 4 wordt het validatie- en testprogramma nader omschreven, waarbij genoemde zaken ook aan de orde zullen komen.

Gezien het bovenstaande, kan wegens het aantal nog te onderzoeken factoren slechts een summiere proefberekening. Deze is opgenomen in bijlage D.

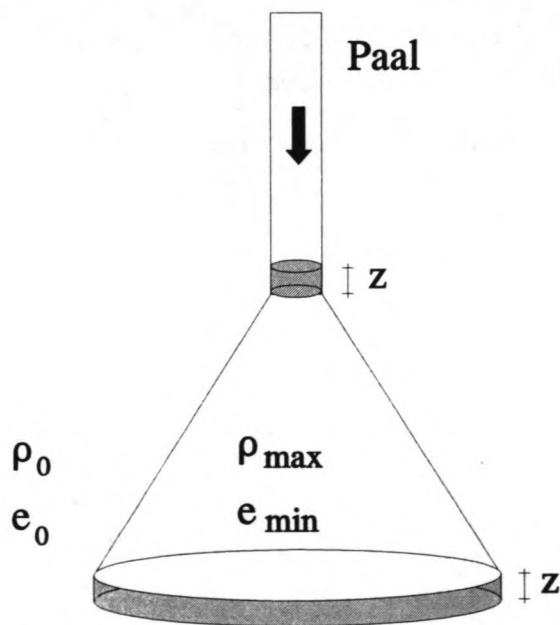
Hoofdstuk 3. Aanknopingspunten andere modellen

§ 3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is een beschrijving van een model gegeven dat geënt is op de theorie van de bolvormige holte expansie. Aangezien de te hanteren parameters eenvoudig van aard zijn, het model praktisch eenvoudig bruikbaar is en het model een dynamische beschrijving van het geheel geeft, biedt dit model het meeste perspectief. Echter, een aantal andere vereenvoudigingen of modellen, welke gestoeld zijn op compactie of karakteristieken, zijn voor de volledigheid onderzocht. In dit hoofdstuk zullen deze aanknopingspunten behandeld worden. De in de paragrafen 3.4 en 3.5 behandelde modellen zijn ook in de literatuurstudie reeds aan de orde geweest. Voor de volledigheid van dit rapport zijn zij ook nu weer opgenomen.

§ 3.2 Compactie model : Massa behoud

De compactie van de grond onder de paal wordt als volgt geschematiseerd (figuur 3.1) :



Figuur 3.1 Schematisatie compactie bij paalpunt

Voor een bepaald gebied onder de paalpunt geldt dus dat daar de maximale dichtheid bereikt is. Deze maximale dichtheid is aanwezig als het poriëgehalte minimaal is. Door een klap op de paal wordt de massa van de verdrongen grond, met volume $z \cdot A_{\text{paal}}$, poriëgehalte e_{min} en massadichtheid ρ_{max} , geborgen in een gebied met diameter D , hoogte z en poriëgehalte e_0 .

De dichtheid van dit gebied gaat dan ook over naar de maximale dichtheid.

Algemeen geldt voor het poriëngehalte :

$$e = \frac{V_p}{V_k}, \quad V_g = V_p + V_k \quad \rightarrow \quad e = \frac{V_g}{V_k} - 1 \quad [3.1]$$

Juist onder de paalpunt geldt dan volgens [3.1] :

$$e_{\min} = \frac{V_{gl}}{V_{kl}} - 1 \quad \rightarrow \quad V_{kl} = \frac{\Delta z \cdot A_{paal}}{e_{\min} + 1} \quad [3.2]$$

De massa van dit volume bedraagt dan $M_1 = \rho_{\max} \cdot V_{k1}$. Volgens de wet van behoud van massa moet gelden dat al deze massa geborgen wordt, oftewel de massa van het gebied onder de paal met diameter D moet gelijk zijn aan de som van de oorspronkelijke massa en de bijkomende massa. In het kegelvormig gebied tussen de beschouwde volumens wordt geen massa geborgen, aangezien ook hier geldt dat $\rho = \rho_{\max}$ en $e = e_{\min}$. Er volgt dan:

$$M_2^* = M_1 + M_2 \quad \rightarrow \quad M_2^* = \rho_{k,\max} \cdot (V_{k1} + V_{k2}) \quad [3.4]$$

Gesteld kan dan worden :

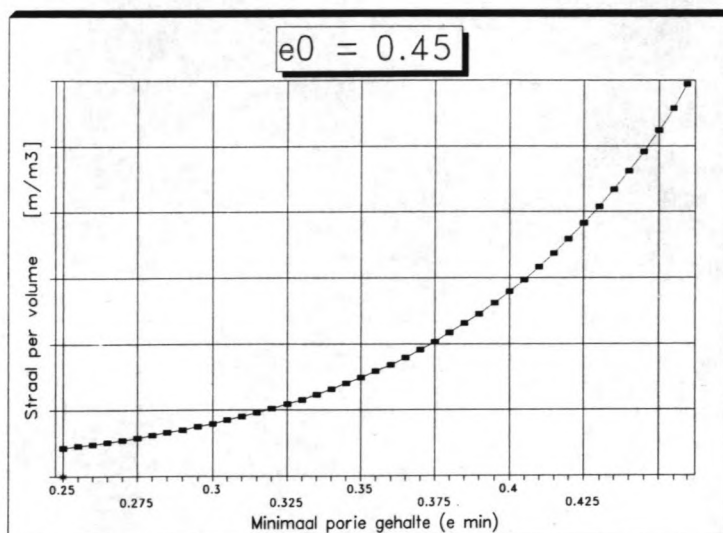
$$V_{k2} = \frac{V_2}{e_0 + 1} \quad \rightarrow \quad V_{k2}^* = \frac{V_1}{e_{\min} + 1} + \frac{V_2}{e_0 + 1} \quad [3.5]$$

Uit bovenstaande volgt dan ook :

$$V_2 = \Delta z \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{V_1}{1 - \frac{e_{\min} + 1}{e_0 + 1}} \quad \rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4}{\pi \Delta z} \cdot V_2} \quad [3.6]$$

De waarden voor e kunnen variëren van 0.25 tot 0.45. Voor ρ variëren de waarden van 1800 kg/m³ voor losgepakt zand tot zo'n 2400 kg/m³ zeer dicht gepakt zand.

In figuur 3.2 is het verband weergegeven tussen de grootte van de straal als functie van de inhoud van het cirkelvormig gebied juist onder de paal en het minimale porie gehalte e_{min} , bij een bepaalde waarde van e_0 .



Figuur 3.2 Verband tussen grootte straal en e_{min}

Hieruit wordt duidelijk dat naarmate het verschil tussen e_{min} en e_0 kleiner wordt, het volume van het gebied dat beïnvloed is steeds groter wordt. In bijlage C wordt hier een voorbeeld van gegeven.

§ 3.3 Compactie model : Chow (1992)

Het compactie model van Chow [Lit-10] berekent voor een kolom grond die van bovenaf gecompacteerd wordt de zakking, dichtheid, rek en ϕ per compactieslag. Hiertoe wordt de kolom grond geschematiseerd tot een systeem van veren en dempers. Door het laten vallen van een blok op deze kolom gaat er een golf lopen. De bewegingsvergelijking voor dit systeem luidt :

$$m \frac{\delta^2 w}{\delta t^2} + C \frac{\delta w}{\delta t} + Kw = 0 \quad [3.7]$$

Hierin is :

$$K = \frac{4G_s r_{eq}}{1 - v_s} \quad , \quad C = \frac{3.4 r_{eq}^2 \sqrt{\rho_s G_s}}{1 - v_s} \quad , \quad G_s = \frac{E(1 - 2v_s)}{(1 - 2v_s \frac{\sigma_h}{\sigma_v}) (2(1 - v_s))}$$

Verder wordt gegeven :

$$\phi = 29^\circ + 2.5 \sqrt{q_c} = 28^\circ + 15^\circ D_r \quad [3.8]$$

en :

$$D_r = \frac{\rho_{\max}(r_s - \rho_{\min})}{\rho_s(\rho_{\max} - \rho_{\min})}, \quad \frac{D_r - D_{r0}}{D_{r*} - D_{r0}} = \frac{\epsilon_r - \epsilon_0}{\epsilon_* - \epsilon_0} \quad [3.9]$$

Voor de genoemde parameters wordt genomen :

m	elementmassa	[kg]
C	dempingscoëfficiënt van element	[kNs/m]
K	veerconstante van element	[kN/m]
G _s	glijdingsmodulus van zand	[kN/m ²]
E	elasticiteitsmodulus	[kN/m ²]
ν _s	dwarscontractiecoëfficiënt van zand (0.25 à 0.45)	[-]
ρ _s	massadichtheid van zand	[kg/m ³]
r _{eq}	equivalente straal	[m]
D	relatieve dichtheid	[-]
ε	rek (0.4 à 0.5)	

Een prognose kan verkregen worden door een stap-voor-stap methode :

- 1 - Discretizeer het valgewicht en de grondkolom in één-dimensionale elementen.
- 2 - Bepaal de invoer parameters voor :
 - A : valgewicht E en ρ
 - B : grond elementen ε_{*} en ρ_s
 - C : veren en dempers G_s, ρ_s, ν_s, φ en K
- 3 - Per val van het blok in de cyclus, doe :
 - A Voer een wave-equation analyse uit, bijvoorbeeld met GRLWEAP, met gebruik van een schatting van de valsnelheid. Dit geeft de penetratie van het gewicht en de blijvende axiale spanningen en rekken in de kolomelementen.
 - B Verander de oorspronkelijke waarden in de nieuwe, berekende waarden.
- 4 - Aan het einde van de cyclus geeft dit de cumulatieve penetratie, de relatieve dichtheid en de wrijvingshoek van de verbeterde grond.

Wanneer de paal als valgewicht, de valsnelheid als de snelheid van de paal en de grond onder de paal gediscrèteerd wordt, kan deze methode de dynamische compactie onder de paal beschrijven. Een nadeel van deze methode is echter de vrij ingewikkelde aanpak. Met andere woorden : erg praktisch bruikbaar is deze niet.

§ 3.4 Methode der karakteristieken : De Josselin de Jong (1956)

Uitgaande van de voortplanting van drukgolven in een elastische staaf ([Lit-13], hoofdstuk 3) concludeert De Josseling de Jong in [Lit-7] dat een mathematische analyse voor de grond onder de paal niet meer te gebruiken is, vanwege de niet-lineaire, irreversibele spanningsdeformatie eigenschappen van de grond. Hij stelt dan ook dat er slechts een oplossing te verkrijgen is met behulp van de methode der karakteristieken.

Uitgaande van deze snelheden is een snelheidsdiagram te tekenen, waarvan bovenstaande formule de karakteristieke richting aangeeft. Door toepassing van een energiebalans is ook het energietransport met behulp van de methode te tekenen. Aansluitend kan voor de zandcilinder onder de paal hetzelfde gedaan worden.

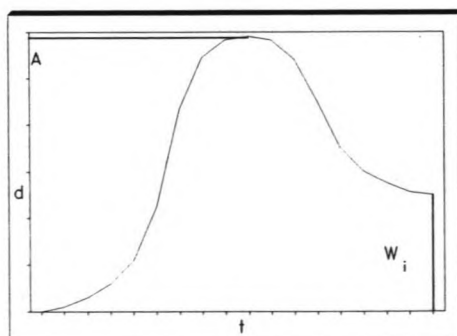
Als meest interessante schematiseert de auteur het effect van de geometrische spreiding van een stoot rondom een paalpunt. Hiertoe beschouwt hij de paalpunt als een bol.

De Josseling de Jong stelt de volgende conclusies :

- Een belasting van korte duur heeft een beperkte indringingsdiepte voor zover het korrelskelet van een zandmassief er irreversibel door wordt gedeformeerd.
- In waterverzadigd zand ontstaat geen verdichtingsdeformatie bij kortstondige belasting, omdat het water alle druk opneemt.
- De paalpunt, geschematiseerd tot een bol, ondervindt meer weerstand van de omringende grond naarmate de frequentie van belasten hoger is.

§ 3.5 Micro mechanisch model : Koenders (1992)

In opdracht van Fugro bv. ontwikkelde Koenders [Lit-6] een oplossing om de grootte van het plastisch vervormde gebied bij de paalpunt te bepalen. De door hem ontwikkelde methode is gebaseerd op de micromechanica.



Figuur 3.3 Verplaatsing volgens model Koenders

Belangrijk is te bepalen hoe de plastische zone rond de paal zich voortplant. Veel van de energie gaat hier namelijk verloren wegens de plastische vervorming. Aangezien de verstoring de dominante factor is, zijn alle spanningseffecten een gevolg hiervan. Koenders stelt de rekenkundige golfvergelijking, afgeleid van de constitutieve betrekkingen van een elementje grond als volgt op :

$$\rho \frac{\delta^2 u_i}{\delta t^2} = \frac{1}{2} \frac{\delta}{\delta x_j} (E_{ijkl} (\frac{\delta u_k}{\delta x_l} + \frac{\delta u_l}{\delta x_k})) \quad [3.10]$$

De verplaatsing nabij de voet van de paal is wordt als het ware aan de grond opgedrongen. Deze verplaatsing kan als volgt uitgedrukt worden :

$$u(t) = A \cdot e^{-\frac{(t-t_1)^2}{l^2}} + W_i(t) \quad [3.11]$$

Hierin is A de amplitude en W_i de restterm, die langzaam in de tijd toeneemt. Door de bewegingssnelheid van de verplaatsing in te voeren in [3.11] wordt [3.12] gevonden :

$$u_i(x,t) = A_i e^{-\frac{[(x-y) \cdot \underline{n}]^2}{w^2}} + W_i \quad [3.12]$$

Voor een verdere uitwerking van deze differentiaalvergelijking wordt verwezen naar [Lit-5] en [Lit-6].

Concluderend stelt Koenders :

- Bij het voortplanten van de golven door het plastische gebied neemt de amplitude af. Dit komt enerzijds door het breder worden van de puls en anderzijds doordat de blijvende vervorming W_i zich opbouwt.

Een aantal invoerparameters kunnen onderscheiden worden in het computerprogramma dat Koenders schreef om de differentiaalvergelijkingen op te lossen :

\underline{n}	vector die de richting van de te berekenen verplaatsing aangeeft
R_f	de verhouding van de hoofdspansingen bij bezwijken
K	stijfheidsparameter, afhankelijk van de dichtheid van de grond en de isotrope spanning
ϕ_μ	inwendige wrijvingshoek, sterk afhankelijk van de dilatantie van het materiaal

Hoofdstuk 4. Programma voor validatie en afhankelijkheid

§ 4.1 Inleiding

In het vorige rapport n[Lit-13] is een literatuuronderzoek uitgevoerd. In aansluiting op deze fase is het gedrag van de grond vlak bij de paalpunt nader beschouwd en is hier een model voor opgesteld. Kort wordt in de volgende fase een werkplan gegeven voor de verdere fasen in dit project.

§ 4.2 Programma voor V & A

Een aantal zaken dienen uitgevoerd of onderzocht te worden te worden, alvorens te kunnen spreken van een werkend prognosemodel. Daartoe is een programma voor verificatie/validatie en afhankelijkheid opgesteld. In het tijdwerkschema in bijlage C. is alles tegen de tijd uitgezet. Kort worden de volgende fasen behandeld.

Parameterstudie

De afhankelijkheid van bepaalde parameters van het opgestelde model alsmede van het door Koenders opgestelde model dient onderzocht te worden. Door het variëren en/of constant houden van bepaalde parameters kan de invloed hiervan onderzocht worden. Deze studie moet resulteren in een overzicht van afhankelijkheid, onderbouwd met fysische aspecten.

Validatie

Door het gebruik van bestaande metingen kunnen de hierboven genoemde modellen en het model gestoeld op empirie (zie [Lit-5]) gecontroleerd worden op bruikbaarheid. Om dit te kunnen doen dient ook de (elastische) golfvoortplanting in de grond in rekening gebracht te worden. In deze fase zal dit dan ook ingebouwd worden in het opgestelde model. Indien nodig wordt geacht dat nieuwe metingen uitgevoerd moeten worden, zal er een meetprogramma worden opgesteld en zullen ook deze metingen in de beoordeling meegenomen worden.

Afronden studie

Als laatste fase in dit project zal de gehele studie nogmaals beoordeeld worden. Wanneer het model goed bevonden is zal dit ook in deze fase door middel van het schrijven van een computerprogramma in het prognosemodel geïntegreerd worden. Het geheel wordt afgesloten met een eindrapport.

Gebruikte literatuur

- [Lit-1] H.G. Hopkins
"Dynamic expansion of spherical cavities in metals"
Progress in solid mechanics - volume 1
North Holland Publishing Company - Amsterdam
1960
- [Lit-2] P. Chadwick
"The quasi-static expansion of a spherical cavity in metals and ideal soils"
Quarterly Journal for Mechanics and Applied Mathematics, Vol. XII, Pt. 1
1959
- [Lit-3] P. Hölscher
"Ontwikkeling module bodem voor prognose model - voorstudie"
Grondmechanica Delft, rapport CO-329530/22
Mei 1992
- [Lit-4] Peutz & Associés
"Trillingen van bodem naar gebouwelement"
Rapportno. RA 683-1, Peutz & Associés BV. - Nijmegen
1992
- [Lit-5] ir. M.Th.J.H. Smits
"Rapport betreffende : studie naar het heiproces als trillingsbron"
FUGRO BV. - Leidschendam
Juli 1993
- [Lit-6] M.A. Koenders
"Displacements associated with Pile Driving"
Department of physics, Kingston University
November 1992
- [Lit-7] ir. G. de Josselin de Jong
"Wat gebeurt er in de grond tijdens het heien ?"
De Ingenieur Bouw- en Waterkunde, no. 25
Juni 1956
- [Lit-8] Prof.dr.ir. A. Verruijt
"Soil dynamics"
Department of Civil Engineering - Delft
Januari 1993
- [Lit-9] A.S. Vesic'
"Expansion of cavities in an infinite soil mass"
Journal of the Soil Mechanics and Foundations division - ASCE
Maart 1972
- [Lit-10] Y.K. Chow
"Dynamic Compaction Analysis"
Journal of Geotechnical Engineering, Volume 118, No. 8
Augustus 1992

- [Lit-11] W.F. Chen and E. Mizuno
"Non-linear analysis in soil mechnaics"
Elsevier - Amsterdam
1990
- [Lit-12] "Sondeer symposium - 15 jaar Fugro"
Fugro BV. - Leidschendam
Oktober 1977
- [Lit-13] M. Grootenboer
"Het heiproces als trillingsbron - literatuurstudie"
TU Delft / Fugro bv. - Delft / Leidschendam
Januari 1994

Bijlage A. Gebruikte symbolen

Romaanse karakters

a	Holte straal	[m]
A	Maximale verplaatsing	[m]
b	Straal van plastische zone	[m]
c	Golfvoortplantingssnelheid	[m/s]
c	Cohesie	[kN/m ²]
C	Schuifsterkte	[kN/m ²]
C	Dempingscoëfficiënt	[kNs/m]
D	Diameter	[m]
D	Dichtheid	[-]
e	Porie gehalte	[-]
E	Elasticiteitsmodulus	[kN/m ²]
G	Glijdingsmodulus	[kN/m ²]
K	Veerconstante	[kN/m]
L	Lengte paal	[m]
m	Massa	[kg]
M	Massa	[kg]
N	Factor (Prandtl)	[-]
p	Druk	[kN/m ²]
r	Polaire coördinaat, afstand gemeten vanaf middelpunt	[m]
s	Vormfactor (Prandtl)	[-]
t	Tijdstip t	[s]
u	Kleine elastische verplaatsing	[m]
u	Verplaatsing	[m]
v	Deeltjessnelheid	[m/s]
V	Volume	[m ³]
w	Zakking	[m]
x	Coördinaat	[m]
y	Coördinaat	[m]
Y	Vloeiwaarde	[kN/m ²]
z	Zakking	[m]

Griekse karakters

δ	Verschil	[-]
ϵ	Rek	[-]
ϕ	Hoek van inwendige wrijving	[°]
γ	Soortelijk gewicht	[kN/m ³]
ν	Dwarscontractiecoëfficiënt	[-]
π	Getal pi (≈ 3.14159)	[-]
ρ	Massadichtheid	[kg/m ³]
σ	Spanning	[kN/m ²]

Sub- en superscripten

c	Conus
e	Elastisch
eq	Equivalent
f	Breuk, bezwijken
g	Grond
k	Korrel
max	Maximaal
min	Minimaal
p	Plastisch
p	Porie
paal	Paal betreffend
r	Radiaal
r	Relatief
s	Zand (sand)
t	Tangentiaal
u	Ongedraineerd
'	Eerste afgeleide naar t
''	Tweede afgeleide naar t
0	Initieel
1	Eerste
2	Tweede

Bijlage B. Overzicht figuren en tabellen

Figuren

- 2.1 Schematisatie van een holte
- 2.2 Bolvorm
- 2.3 Halve bolvorm
- 2.4 Zakkingsfunctie en benadering

- 3.1 Schematisatie van compactie bij de paalpunt
- 3.2 Verband tussen grootte straal en e_{\min}
- 3.3 Verplaatsing volgens model Koenders

Tabellen

- 2.1 Samenvatting model
- 2.2 Samenhang $b(t)$ en Y, E

Bijlage C. Aangepast tijdwerkschema

Tijdwerkschema	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Fase																			
Modellieren																			
Parameterstudie																			
Validatie model																			
Validatie empirie																			
Afronden studie																			
Produkt																			
Model																			
Deelrapport I : Modelling																			
Deelrapport II : Validatie																			
Eindrapport																			*

Bijlage D. Voorbeeldberekening "Cavity expansion"

Neem het volgende aan :

Lengte paal	L	= 20 m
Doorsnede paal	A	= 0.16 m ²
Voortplantingssnelheid in paal	c	= 4000 m/s
Tijdstap	dt	= L/c = 0.005 s
Gewicht korrels	γ_k	= 20 kN/m ³
Elasticiteitsmodulus	E	= 50 MPa
Conusweerstand	q_c	= 20 MPa
Hoek van inwendige wrijving	ϕ	= 32.5°
Duur verplaatsing	T	= 8 · dt

Benaderende zakkingsfunctie : $0 < t < 8dt$ $z(t) = -6947 \cdot t^4 + 883.26 \cdot t^3 - 43.26 \cdot t^2 + d \cdot t$

Uitbreiding van de holte is bolvormig $a(t) = [0.75 \cdot A_{\text{paal}} / \pi]^{1/3} \cdot z(t)^{1/3}$
 $a_{\text{max}} = 0.10626 \text{ m}$

Snelheid van de uitbreiding is $z'(t)$

Versnelling van de uitbreiding is $z''(t)$

Dan geldt voor de vloeiwaaarde Y, berekend uit de cirkel van Mohr :

$$Y = 2 \cdot (\gamma_k - \gamma_w) \cdot z \cdot \tan\phi = 2 \cdot 10 \cdot 20 \cdot \tan 32.5 = 254.828 \text{ kN/m}^2$$

of berekend uit de conusweerstand :

$$Y = \frac{q_c - N_q \cdot s_q \cdot q}{s_c \cdot N_c} = \frac{20 \cdot 10^3 - 1.537 \cdot 26.092 \cdot 20 \cdot 10}{38.638} \text{ kN/m}^2$$

Voor de grootte van de plastische zone wordt dan gevonden, op $t = 0.04$ (8·dt)

$$b = a^3 \sqrt{\frac{2E}{3Y}} = 0.34 \text{ m (Mohr) en } 0.36 \text{ m (} q_c \text{)}$$

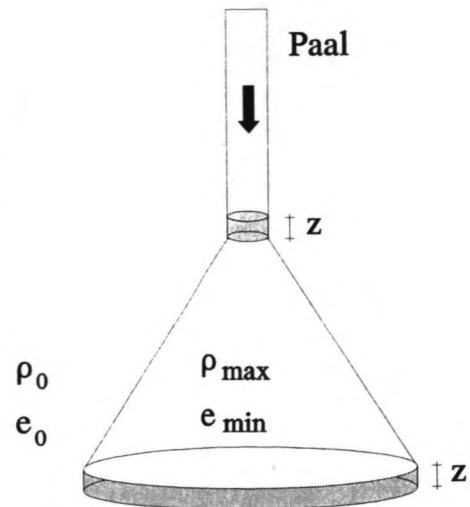
Nogmaals dient gezegd te worden dat deze uitkomsten slechts een eerste benadering zijn.

Bijlage E. Voorbeeldberekening Compactie

In de nevenstaande figuur, zie ook figuur 3.1 is aangegeven hoe de plastische zone onder de paal is geschematiseerd. Om een indruk te krijgen in welke orde van grootte de massabalans een plastische zone geeft is deze proefberekening opgenomen.

Neem aan voor :

ρ_0	=	2000 kg/m ³
ρ_{\max}	=	2400 kg/m ³
e_0	=	0.45
e_{\min}	=	0.35
A_{paal}	=	0.16 m ²
z	=	0.01 m



Het volume van de verdrongen grond juist onder de paal is dan :

$$V_1 = A_{\text{paal}} \cdot \Delta z = 0.16 \cdot 0.01 = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Het volume van de zone die naar een minimale e toegaat (de plastisch vervormde zone) is dan gegeven door :

$$V_2 = \frac{V_1}{1 - \frac{e_{\min} + 1}{e_0 + 1}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{1.35}{1.45}} = 0.0232 \text{ m}^3$$

Aangezien ook geldt dat :

$$V_2 = \Delta z \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

wordt de diameter van de plastische zone gegeven door :

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi \Delta z} \cdot V_2} = \sqrt{\frac{4}{0.01 \pi} \cdot 0.0232} = 1.72 \text{ m}$$

Waaruit blijkt dat de grootte van ρ niet van belang is, echter de waarde voor de e hangt hier mee samen.

