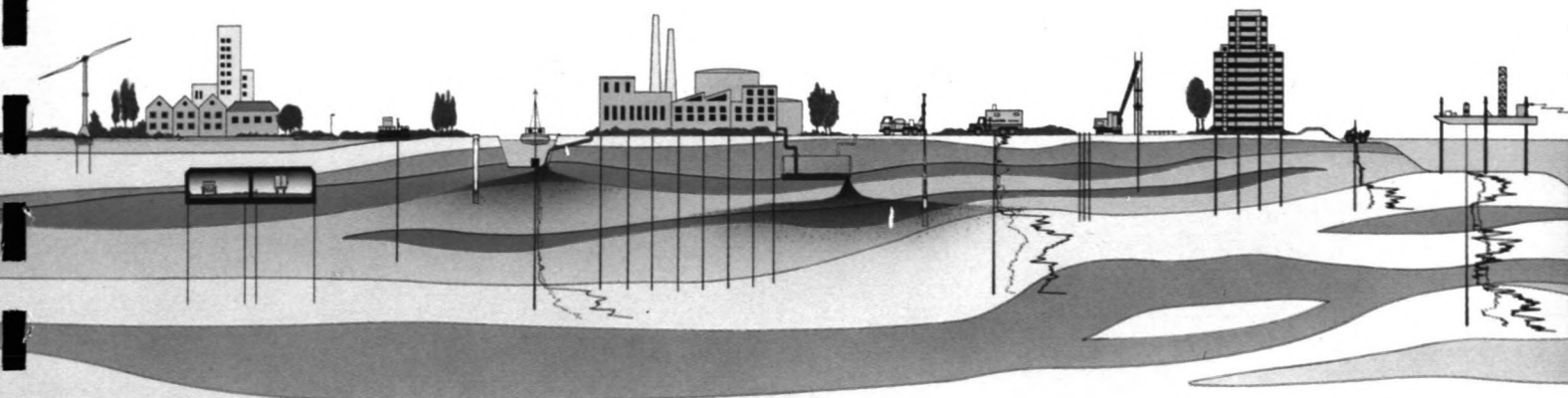


Het heiproces als trillingsbron

Literatuurstudie

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



Het heiproces als trillingsbron

Literatuurstudie

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

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, een literatuuronderzoek. Dit literatuuronderzoek is gedaan om achtergronden en bestaande modellen samen te vatten en zodoende meer kennis te verkrijgen omtrent trillingen bij heien.

Mijn dank gaat in deze eerste fase uit naar Maarten Smits voor zijn aanwijzingen en hulp, professor Verruijt voor het bemiddelen in een afstudeerplaats bij de Fugro, mevrouw Spruit voor het helpen bij het vinden en bestellen van geschikte literatuur, Jeroen voor het continu beschikbaar hebben van koffie en Anneloes, afstudeerder bij Fugro Engineers, voor de morele ondersteuning.

Delft / Leidschendam, Januari 1994,

M. Grootenboer

Samenvatting

Dit rapport bevat de resultaten van een literatuurstudie naar het gedrag van grond en paal tijdens het heiproces, het eerste deel van een totale studie. Het doel van deze studie is een voorspelling te doen aan de hand van een model aangaande de te verwachten trillingen in de naburigheid van het heien.

Hiervoor is het van belang te weten wat er dicht bij de paalpunt gebeurt. Dicht bij de paal immers vervormt de grond blijvend en zal veel van de energie die bij het heien geproduceerd wordt verloren gaan in die vervorming.

Het doel van deze literatuurstudie is een samenvatting van bestaande formules en modellen te geven als een richtlijn voor nader onderzoek. Niet een volledige uitwerking, maar een beknopte omschrijving met verwijzing stond bij het maken van dit rapport voor ogen.

In hoofdstuk 2 is een inleiding in het heiproces als trillingsbron gegeven. Het heiproces wordt in een aantal deelprocessen verder uitgewerkt.

Hoofdstuk 3 behandelt het gedrag van een golf in een paal. De golf in de paal wordt opgewekt door de klap van het heiblok en deze ontstane golf plant zich dan voort door de paal.

Voor het plastische gebied nabij de paalpunt worden in hoofdstuk 4 een aantal bestaande modellen behandeld.

Tenslotte worden in hoofdstuk 5 de golven in het elastische gebied in de grond behandeld. De energie die na de plastische vervormingen over is, zorgt voor trillingen in de grond die weer gevolgen kunnen hebben voor belendende gebouwen.

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 Literatuurstudie	6
Hoofdstuk 2. Trillingen	8
§ 2.1 Inleiding	8
§ 2.2 Deelproces I : Klap op de paal	8
§ 2.3 Deelproces II : Golf in de paal	10
§ 2.4 Deelproces III : Interactie grond en paalpunt	10
§ 2.5 Deelproces IV : Voortplanting van de golf in de grond juist rond de paalpunt	10
§ 2.6 Deelproces V : Voortplanting in de bodem	10
Hoofdstuk 3. Golven in de paal : een eindig medium	12
§ 3.1 Inleiding	12
§ 3.2 Basis vergelijking	12
§ 3.3 Principe van de methode	14
§ 3.4 Trillingstijden van golven in de paal	16
§ 3.5 Trillingsdemping door wandwrijving	18
Hoofdstuk 4. Scheiding tussen paal en grond : bestaande modellen	21
§ 4.1 Inleiding	21
§ 4.2 Model : De Josseling de Jong	21
§ 4.3 Model : Koenders	22
§ 4.4 Model : Appendino & Di Monaco	23

Hoofdstuk 5. Golven in de grond : een oneindig medium	25
§ 5.1 Inleiding	25
§ 5.2 Bewegingsvergelijking	25
§ 5.3 Golven in een halfruimte	27
§ 5.4 Golven in gelaagde systemen	30
§ 5.5 Demping van golven in de grond	31
Hoofdstuk 6. Conclusies literatuuronderzoek	34
§ 6.1 Conclusie	34
§ 6.2 Aanknopingspunten verdere studie	34
Hoofdstuk 7. Gebruikte literatuur	35
Bijlage A. Gebruikte symbolen	38
Bijlage B. Overzicht tabellen en figuren	40
Bijlage C. Heiformule van Sprenger-Potma	41

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-100 [Lit.7-4]. 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. 7-17,7-23].

§ 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 heitruillingen 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 zijn 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 Literatuurstudie

Het doel van de literatuurstudie is om meer inzicht te krijgen in de te hanteren en dus van belang zijnde deelprocessen. Dit zijn zowel parameters van belang voor het heiproces als ook processen die zich in de modulen bodem en gebouw voordoen. De volgende zaken zijn uitgezocht :

Van belang :

- Gedrag van de grond door verdringing door palen
- Golfvoortplanting in de plastische zone dicht bij de paal

Voor begrip :

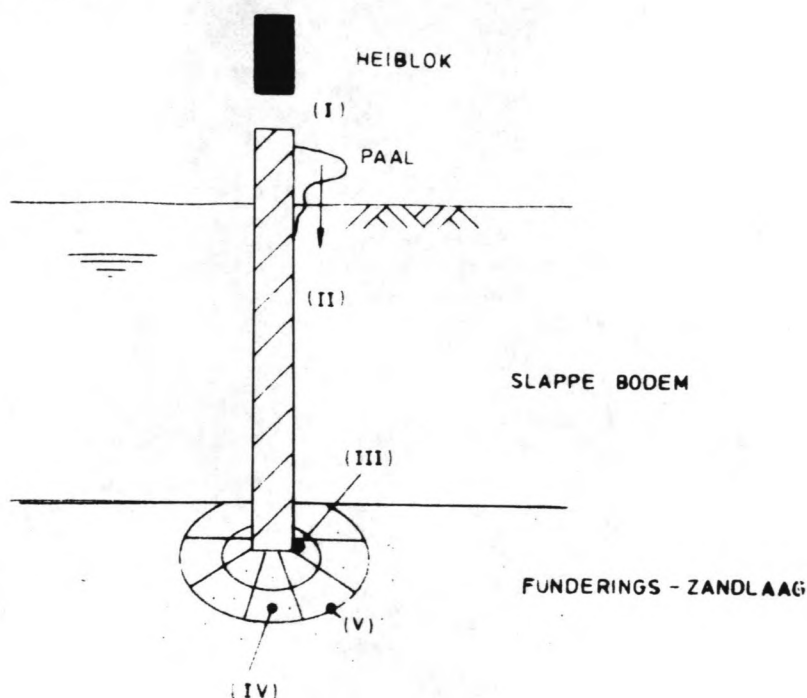
- Algemene golfvoortplanting door de grond verder weg, elastisch gedrag

Tot slot dient opgemerkt te worden dat deze literatuurstudie primair bedoeld is om een samenvatting van de thans beschikbare modellen te verkrijgen, opdat via de bronvermelding meer informatie van ieder model te vinden is. Gelet op de uitgangspunten en randvoorwaarden wordt gestreefd naar een praktisch toepasbaar model, de eindige elementen en differentie methoden op zich zijn dan ook in de literatuurstudie buiten beschouwing gebleven. De resultaten die hiermee verkregen worden zijn echter wel als toetsing te gebruiken.

Hoofdstuk 2. Trillingen

§ 2.1 Inleiding

Om een damwandelement of heipaal op gewenste diepte te krijgen zijn in het algemeen drie methoden beschikbaar in Nederland : heien, intrillen of drukken. Deze laatste is alleen van toepassing voor damwandplanken. In het kader van dit project zal alleen het heiproces uitgewerkt worden. Het totale heiproces is opgebouwd uit een vijftal deelprocessen, te vinden in figuur 2.1.



Figuur 1.1 Het heiproces opgebouwd uit deelprocessen 1 t/m V

§ 2.2 Deelproces I : Klap op de paal

Tijdens heien slaat men de paal of plank als het ware naar beneden door een massa in een zeer korte tijd op de paal terecht te laten komen. De valenergie van het blok wordt dan aan de paal overgedragen.

Beschikbare blokken zijn :

- Valblokken - Hierbij wordt het blok door een kabel omhoog getrokken, waarna het onder vrije val de paal of plank treft. Hier geldt algemeen voor de energie van het blok :

$$m_{\text{blok}} \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m_{\text{blok}} v_{\text{raken}}^2 \quad [2.1]$$

$$v_{\text{raken}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [2.2]$$

- Persluchtblokken - Dit is een variant op het valblok. Het verschil is echter dat het blok niet omhoog wordt getrokken door een kabel maar omhoog wordt geduwd door lucht.

- Hydraulische blokken - Het blok wordt hydraulisch aangedreven en in de val versneld. Voordeel hiervan is dat de slagenergie groter is dan wanneer er alleen sprake zou zijn van een vrije val. Een lichter blok kan zo dezelfde energie leveren als een zwaarder vrije val blok. Nu geldt er :

$$m_{\text{blok}} \cdot (g + a_{\text{extra}}) \cdot h + \frac{1}{2} m_{\text{blok}} v_{\text{begin}}^2 = \frac{1}{2} m_{\text{blok}} v_{\text{raken}}^2 \quad [2.3]$$

$$v_{\text{raken}} = \sqrt{2 \cdot (g + a_{\text{extra}}) \cdot h + v_{\text{begin}}^2} \quad [2.4]$$

- Dieselblokken - Het blok wordt door middel van compressie omhooggetild. Hierna wordt het door middel van explosie neerwaarts versneld. De explosie vergroot de slagtijd.

Bij deze laatste spelen een aantal factoren een rol bij het aantal slagen :

- de heiweerstand die het blok ondervindt
- de werktemperatuur
- de mate van vervuiling en slijtage van het blok
- het gewicht van het blok. Een kleiner blok heeft een snellere slagtijd.

Heiformules zijn ontstaan door de behoefte om een wetenschappelijk verband te leggen tussen de heikalender en het paal draagvermogen. Deze formules zijn gebaseerd op de botsing tussen twee starre lichamen. De heikalender is het aantal slagen dat nodig is om een bepaalde zakking, 0.25 meter, van de paal te bewerkstelligen. In Nederland wordt gebruikelijk de formule van Sprenger Potma [Bijlage C] gehanteerd.

Om een idee te krijgen van wat er zich nog meer afspeelt volgt kort een overzicht :

- eigenschappen van ondergrond tijdens een statische belasting zijn anders dan gedurende een dynamische belasting
- voor de weerstand tijdens het heien (Q) wordt vaak de statische grondweerstand genomen
- door dynamische compactie van zanden kan een tijdelijke verandering van de poriëndrukken ontstaan
- het verdringen van de grond kan van invloed zijn op de schachtwrijving (verkneeding van klei)

§ 2.3 Deelproces II : Golf in de paal

Ten gevolge van de energie die door het heiblok aan de paal wordt doorgegeven, gaat er een spanningsgolf door de paal lopen. Als gevolg van de wandwrijving langs de paalschacht zal de grootte van deze golf en dus de golfenergie afnemen. Wanneer de resulterende kracht groter is dan alle weerstandstermen zal de paal zakken.

§ 2.4 Deelproces III : Interactie grond en paalpunt

De energieoverdracht tussen paalpunt en grond is sterk afhankelijk van de stijfheid van de grond. In een stijve zandlaag zal meer energie aan de grond worden overgedragen, maar zal er meer energie nodig zijn om de gewenste zakking per slag te bewerkstelligen, dan wanneer het een kleilaag betreft. In dit geval wordt minder energie aan de grond overgedragen.

§ 2.5 Deelproces IV : Voortplanting van de golf in de grond juist rond de paalpunt

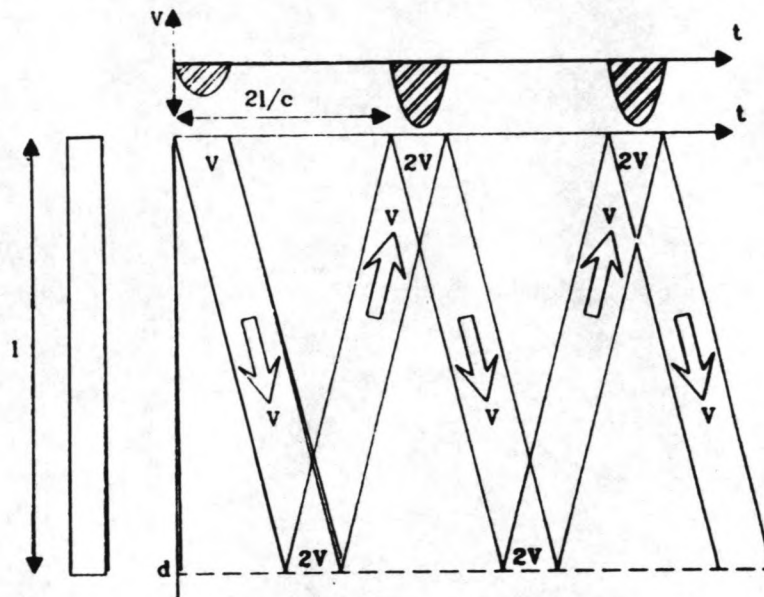
De zone juist bij de paalpunt is door voorgaande slagen of sterk vervormd (klei) of zeer verdicht (zand). Wat er precies gebeurt in deze zone is een ingewikkeld proces, gezien de plastische vervormingen en het bijbehorende energie verlies.

§ 2.6 Deelproces V : Voortplanting in de bodem

De energie die na de processen I tot en met IV nog over is in de golven zal in de grond verder weg van de paal als golven verspreid worden. Hier is sprake van een elastisch golfverschijnsel. Waar nu precies de grens ligt tussen elastisch en plastisch is tot nog toe onduidelijk.

§ 2.7 Golfvoortplanting

De energie die door het vallen van het blok vrijkomt wordt door de paalmuts gedeeltelijk gedempt en aan de paalkop doorgegeven (figuur 2.2). De golf loopt dan met een bepaalde begingrootte door de paal. Wanneer de wrijving langs de paalschacht verwaarloosd wordt zal de golf aan het uiteinde van de paal gereflecteerd worden en weer bij de paalkop aankomen.



Figuur 2.2 Golfvoortplanting door de paal

In dit geval is de looptijd van de golf afhankelijk van de paallengte (l) en de golfvoortplantingssnelheid (c) volgens : $T = 2l/c$.

Met behulp van een energiebalans geven Liang en Husein [Lit.7-18] duidelijk het verband weer tussen de energie-invoer in de paal en de berging daarvan :

$$E_h = (E_{es} + E_{ep}) + E_{ps} \quad [2.5]$$

waarin gegeven is dat :

E_{es}	elastische energie in de grond geborgen
E_{ep}	elastische energie in de paal geborgen
E_{ps}	plastische energie in de grond geborgen

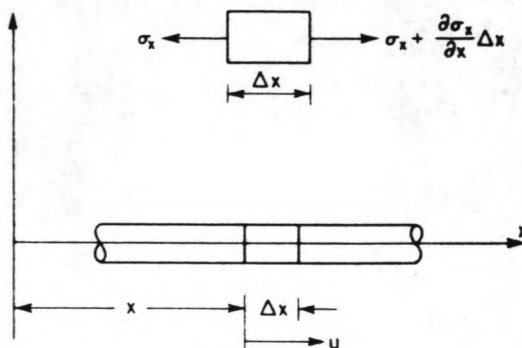
Hoofdstuk 3. Golven in de paal : een eindig medium

§ 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal de theorie nader uitgewerkt worden voor een heipaal. Iedere slag van het heiblok op de paal veroorzaakt een spanningsgolf in de paal. Deze spanningsgolf neutraliseert tijdelijk de grondweerstand langs de schacht (wrijving) en aan de punt (puntweerstand). Wanneer de spanningsgolf in de paal groter is dan de genoemde grondweerstand zal de paal zakken. Deze zakking bestaat uit een tijdelijke en een blijvende zakking. Afhankelijk van de grondgesteldheid en de paal cq. plank afmetingen wordt een geschikt blok gekozen. De begingrootte van deze golf is afhankelijk van het gebruikte heiblok, maar ook van de paalmuts en het heikussen. Deze dempen immers de veroorzaakte golf in allereerste instantie. In dit hoofdstuk zal de voortplanting van de golf in de paal beschreven worden.

§ 3.2 Basis vergelijking

In het basisgeval wordt een klein element (figuur 3.1) van een paal beschouwd, bestaand uit lineair elastisch materiaal met een elasticiteitsmodulus E.



Figuur 3.1 Staafelement

Wanneer de wrijving langs de paal wordt verwaarloosd, luidt de bewegingsvergelijking van het element als volgt :

$$\frac{\delta N}{\delta z} = \rho A \frac{\delta^2 w}{\delta t^2} \quad [3.1]$$

Hierin is :

N	Normaalkracht op het element	[N]
ρ	Massa dichtheid	[kg/m ³]
w	Axiale verplaatsing	[m]
A	Oppervlakte van de dwarsdoorsnede	[m ²]

Verder geldt :

$$\epsilon = \frac{\delta w}{\delta z} \quad [3.2]$$

en :

$$N = EA\epsilon = EA \frac{dw}{dz} \quad [3.3]$$

Hierin is :

E	Elasticiteitsmodulus van de paal	[kN/m ²]
ϵ	Lengteverandering	[-]

Deze vergelijkingen gesubstitueerd in de bewegingsvergelijking geeft een nieuwe bewegingsvergelijking, de golfvergelijking :

$$E \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} = \rho \frac{\delta^2 w}{\delta t^2} \quad [3.4]$$

of anders gegeven door :

$$\frac{\delta^2 w}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 w}{\delta z^2}$$

Waarin :

c	Voortplantingssnelheid van de golf	[m/s]
---	------------------------------------	-------

Een algemene oplossing voor deze vergelijking wordt verkregen met de methoden der karakteristieken :

$$u = f(ct+x) + g(ct-x) \quad [3.5]$$

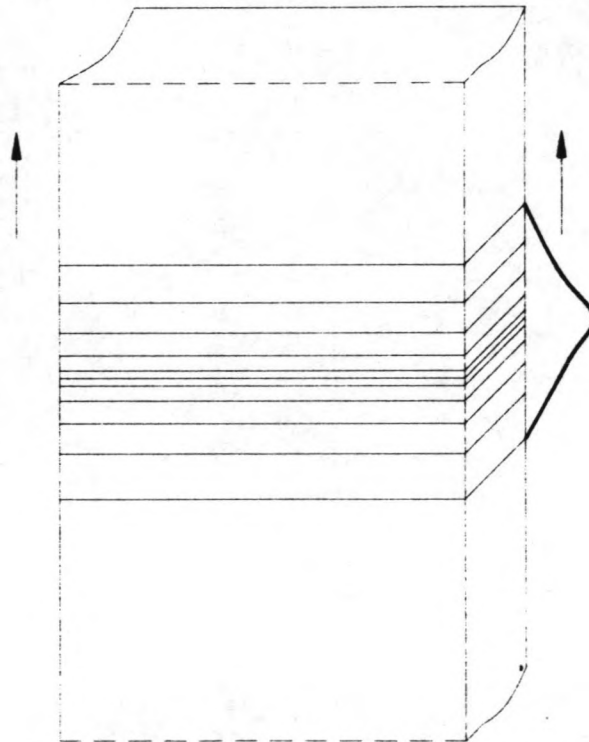
De Josseling de Jong werkte een dergelijke vergelijking uit [Lit.7-7]. Het is echter ook mogelijk de gehele vergelijking numeriek op te lossen.

§ 3.3 Principe van de methode

Spanningsgolven planten zich door een elastisch medium voort met een bepaalde golfsnelheid en amplitude. De demping van deze amplitude wordt bepaald door de materiaaleigenschappen als ook door de geometrische eigenschappen. Voor eerder genoemd element is de golfsnelheid gegeven door :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [3.6]$$

waarbij de golfsnelheid c in m/s wordt verkregen. De voortplantingssnelheid van een golf varieert 4000 m/s voor hout en beton tot 5200 m/s voor staal (figuur 3.2).



Figuur 3.2 Voortplanting van de spanningen in een paal

De grootte en de tijdsduur van de golf door de paal hangen behalve gebruikte middelen ook af van het paalmateriaal en de paaldoorsnede. Deze samenhang wordt impedantie genoemd en gegeven door :

$$I = \frac{EA}{c} \quad [3.7]$$

Of, in iets andere vorm, door :

$$I = \rho c A \quad [3.8]$$

De impedantie is dus de mogelijkheid van een paal om een longitudinale kracht door te geven. Massarch [Lit.7-3] geeft deze kracht als volgt :

$$N = \rho c A v \quad [3.9]$$

In deze formules is :

N	Kracht doorgegeven in paal	[Kn]
ρ	Massa dichtheid	[kg/m ³]
E	Elasticiteitsmodulus	[Kn/m ²]

Deze relatie is ook anders uit te drukken : de kracht (Kn) die in de paal wordt opgewekt is :

$$N = \alpha \cdot v \cdot A \quad [3.10]$$

De trefsnelheid (m/s) van het blok in vrije val beweging is :

$$v = \sqrt{2 g h} \quad [3.11]$$

Verder is α :

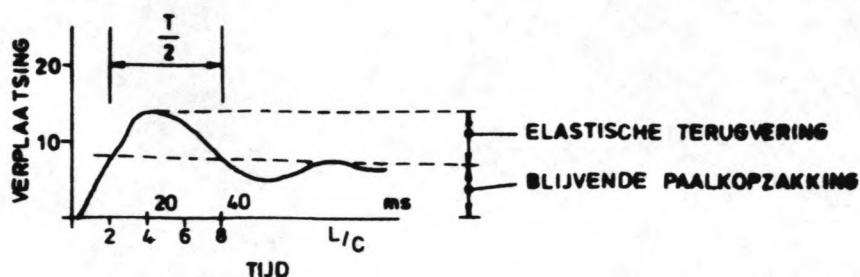
$$\alpha = \frac{\text{Drukspanningbeton}}{\text{Trefsnelheidblok}} = \sqrt{E\rho} \cdot 10^{-2} \quad \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \right] \quad [3.12]$$

Algemeen geldt voor deze laatste relatie :

Beton	:	$\alpha = 10 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$
Staal	:	$\alpha = 40 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$
Hout	:	$\alpha = 2 \text{ à } 4 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$

§ 3.4 Trillingstijden van golven in de paal

De trillingstijd van de golf wordt gegeven door het quotiënt van de totaal afgelegde afstand en de voortplantingssnelheid (figuur 3.3).



Figuur 3.3 Beweging van de paalkop

Echter, de trillingstijd is zeer afhankelijk van de grond om de paal, aangezien deze de mate van demping in de paal bepaalt. Algemeen geldt nu als oplossing voor de verplaatsingen van de paal geschreven als een serie van goniometrische functies :

$$w = W(C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t) \quad [3.13]$$

Deze vergelijking gesubstitueerd in de golfvergelijking geeft :

$$\frac{\delta^2 W}{\delta z^2} + \frac{\omega_n^2}{c^2} W = 0 \quad [3.14]$$

Hierin is :

$$U = C_3 \cos \frac{\omega_n x}{v_c} + C_4 \sin \frac{\omega_n x}{v_c} \quad [3.15]$$

Voor eerdergenoemde formules geldt :

W	Amplitude van de verplaatsing	[m]
$C_{1, \dots, 4}$	Constanten	[-]
ω_n	Quotiënt van de eigenfrequentie en de trillingstijd	[rad/s]

Deze laatste wordt gegeven door :

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \quad [3.16]$$

Om de integratieconstanten te bepalen moeten een aantal randvoorwaarden gegeven zijn. De keuze hieruit is uit twee soorten randen, namelijk een vast uiteinde of een vrij uiteinde.

Voor deze uiteinden gelden de volgende randvoorwaarden :

Vrij uiteinde :	$x = 0$:	$dU/dx = 0$
	$x = 1$:	$Du/dx = 0$
Vast uiteinde :	$x = 0$:	$U = 0$
	$x = 1$:	$U = 0$

Er zijn drie combinaties mogelijk. Voor deze combinaties worden de oplossingen gegeven.

Vrij - vrij

$$U_n = C_3 \cos \frac{n\pi x}{l}, \quad n=1,2,3,\dots \quad [3.17]$$

Vast - vrij

$$U_n = C_4 \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad n=1,3,5,\dots \quad [3.18]$$

Vast - vast

$$U_n = C_4 \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad n=1,2,3,\dots \quad [3.19]$$

Svinkin [Lit.7-12] schematiseerde de genoemde opties tot een paal met vrije uiteinden, een paal met een vast en een vrij uiteinde en een paal met een vast uiteinde en een uiteinde met een gewicht erop, bijvoorbeeld het heiblok. Hij geeft dan ook uitdrukkingen voor de karakteristieke frequenties, behorend bij een grondprofiel. De relatie met het bovenstaande wordt duidelijk. Laagscheidingen worden achterwege gelaten.

Voor een paal met vrije uiteinden is de frequentie gegeven als :

$$f_{\text{vrij}} = \frac{c}{2L} \quad [3.20]$$

voor een paal met een vast en een vrij uiteinde geldt dan :

$$f_{\text{vast-vrij}} = \frac{c}{4L} \quad [3.21]$$

en voor een paal met enerzijds een vast uiteinde en anderzijds een gewicht :

$$f_{\text{gewicht}} = k \frac{\xi_1 c}{2\pi L} \quad [3.22]$$

De factor ξ_1 (tabel 3.1) is een functie van de verhouding tussen het gewicht van het blok en van de paal.

W_p/W_b	0.50	0.70	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	10.0	20.0	∞
ξ_1	0.65	0.75	0.86	1.08	1.20	1.27	1.32	1.42	1.52	$\frac{1}{2}\pi$

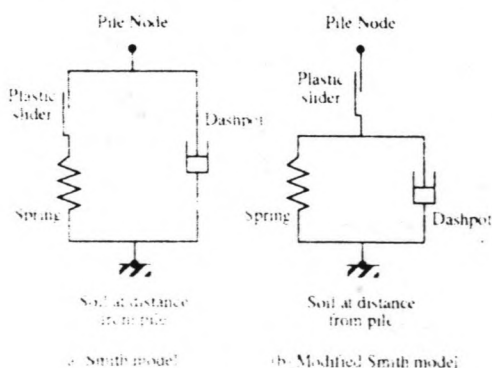
Tabel 3.1 Relatie ξ en verhouding paal- / blokgewicht

De factor k is materiaal- en hei-afhankelijk.

- Betonpalen : $k = 0.4$, bij naheien : $k = 0.5$
- Stalen palen : $k = 0.95$, bij naheien : $k = 1.15$
- Houten palen : $k = 0.7$ bij naheien

§ 3.5 Trillingsdemping door wandwrijving

Algemeen wordt de paal vaak beschouwd als een massa-veer-demper systeem. Smith (1960) maakte een model (figuur 3.4) dat hedentendage de basis vormt van tal van berekeningswijzen.



Figuur 3.4 Smith model

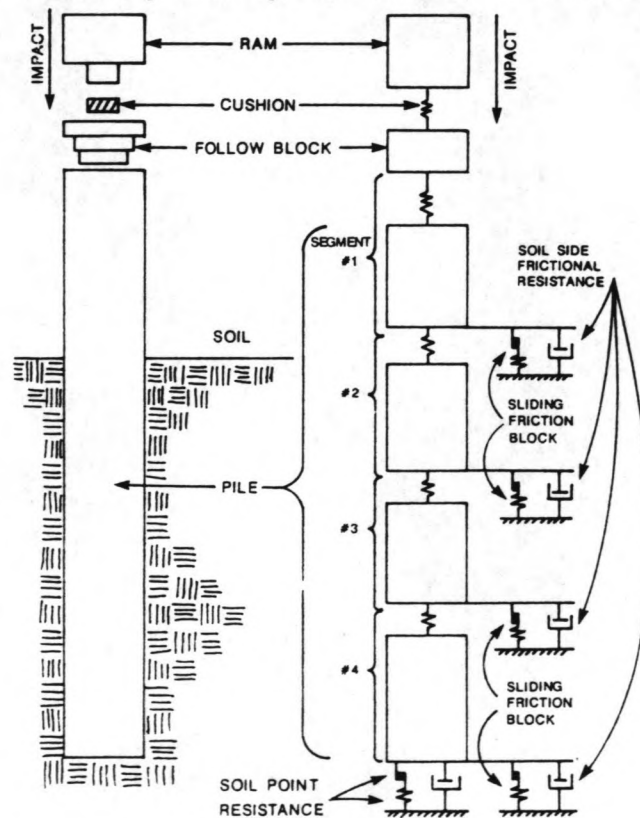
De totale weerstand op een dynamisch belaste paal wordt dan als volgt gegeven:

$$R_t = R_s \cdot (1 + Jv) \quad [3.23]$$

Hierin is :

R_t	Totale weerstand	[Kn]
R_s	Statische weerstand	[Kn]
J	Demping	[s/m]
v	Snelheid	[m/s]

Aangezien het Smith model niet voorziet in demping door traagheid is het model uitgebreid met dempers en zogenaamde 'lumped mass' om alsnog de traagheidsdemping in het model in te bouwen (Middendorp en Van Brederode 1984, Likins et al. 1992). Novak heeft aangetoond dat de dynamische response van de grondlaag rondom de paal benaderd kan worden door een parallel-systeem van veer en dempers (figuur 3.5).



Figuur 3.5 Grond-paal-hamer model

Zo wordt een uitdrukking gevonden van de wandwrijving langs een grondlaag, als een functie van de verplaatsing w en een snelheid van de paal v :

$$\tau_0 \approx \frac{G}{d} w + \sqrt{G\rho} v \quad [3.24]$$

Door het inbouwen van een plastische glijder in het model (Randolph en Simons 1986) kan de dynamische wrijving worden gevonden als een functie de statische wrijving :

$$\tau_d = \tau_s \left(1 + \alpha \left(\frac{\Delta v}{v_0}\right)^\beta\right) \quad [3.25]$$

Deze uitdrukkingen geven de wrijving per ingevoerd demper-glijder element. Bij iedere demper wordt een deel van de golf gedempt, een deel van de golf weerkaatst en een deel van de golf doorgegeven. Hierdoor is de schematisering als in figuur 2.2 niet meer geldig. Slechts met uitgebreide berekeningen met bijvoorbeeld TNO-wave of CAPWAP is de wrijving te berekenen.

In de eerdergenoemde formules is :

v_0	Referentiesnelheid	[1 m/s]
v	Snelheid van de paal	[m/s]
α	Constante, 0.1 voor zand, 1.0 voor klei	[-]
β	Constante, 0.2	[-]
G	Glijdingsmodulus	[kN/m ²]
d	Dikte van de grondlaag	[m]
τ	Schuifspanning (wandwrijving)	[kN/m ²]

Holeyman (1988, [Lit.7-10]) stelt voor de totale demping een sommatie van drie typen demping voor:

Hysterese demping : $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\eta}{1-\eta}$, $\eta = \frac{q_v}{q_u}$ [3.26]

Visceuze demping : $\sigma = E\epsilon + E_{visc} \frac{\delta\epsilon}{\delta t}$ [3.27]

Weerstandsdemping : $R_t = R_s(1 + Jv)$ [3.28]

E_{visc}	Visco-elasticiteitsmodulus	[Kn/m ²]
η	hysterese demping factor	[-]

Hoofdstuk 4. Scheiding tussen paal en grond : bestaande modellen

§ 4.1 Inleiding

Zoals reeds vermeld, is de grote onbekende in het onderzoek naar heitruillingen het gebied vlakbij de paal. In hoofdstuk 3 is de paal besproken en in hoofdstuk 5 wordt de grond besproken. In dit hoofdstuk zullen een aantal modellen die zich voornamelijk richten op het gedrag van de grond vlakbij de paal de revue passeren.

§ 4.2 Model : De Josseling de Jong

Uitgaande van de voortplanting van drukgolven in een elastische staaf (hoofdstuk 3) concludeert De Josseling de Jong in [Lit.7-7] 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.

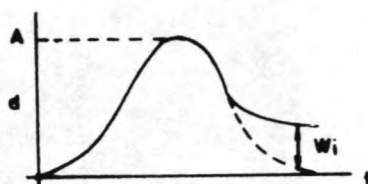
De Josseling de Jong stelt de volgende conclusies :

- 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 belastingen hoger is.

Voornamelijk de tweede conclusie roept enkele vraagtekens op : dit betekent immers dat een paal niet geheid kan worden.

§ 4.3 Model : Koenders

In opdracht van Fugro bv. ontwikkelde Koenders [Lit.7-16] 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 4.1 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 :

$$\rho \frac{\delta^2 u_i}{\delta t^2} = \frac{1}{2} \frac{\delta}{\delta x_j} (E_{ijkl} (\frac{\delta u_k}{\delta x_l} + \frac{\delta u_l}{\delta x_k})) \quad [4.1]$$

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

$$u(t) = A e^{-\frac{(t-t_1)^2}{l^2}} + W_i(t) \quad [4.2]$$

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 [6.4] wordt [6.5] gevonden :

$$u_i(x,t) = A_i e^{-\frac{[(x-y) \cdot \bar{n}]^2}{w^2}} + W_i \quad [4.3]$$

Voor een verdere uitwerking van deze differentiaalvergelijking wordt verwezen naar [Lit.7-4] en [Lit.7-16].

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 invoerparamters 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 hoofdspanningen 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

§ 4.4 Model : Appendino & Di Monaco

In het kader van dit onderzoek is het aardig om [Lit.7-11] mee te nemen. Hierin wordt een twee dimensionaal model opgesteld om de totale spanning en de wateroverspanning te berekenen. Er wordt uitgegaan van een paal die in een cohesieve grond wordt geheid fig. 6.2 t/m 6.4). Als randvoorwaarden stellen de auteurs een plastisch en een elastisch vervormde zone, begrensd door enerzijds een cirkelvormige onvervormbare rand en anderzijds een zogenaamde 'cavity expansion'.

Voor een gesloten buispaal wordt dan gevonden dat de 'cavity', de holte, niet uitzet. De maximale druk op de rand van de paal wordt dan :

$$P_{\max} = P_0 + C_u [1 + 3\beta + \ln \frac{1 + \epsilon_z}{(1 - \beta) / I_R + \epsilon_z}] \quad [4.4]$$

De rand van het plastische gebied naast de paal ligt dan op :

$$R_p = R \sqrt{\frac{1 + \epsilon_{z,p}}{(1 - \beta) / I_R + \epsilon_{z,p}}} \quad [4.5]$$

En de rand van de cirkelvormige opsluiting :

$$R_e = \alpha \cdot R_p \quad [4.6]$$

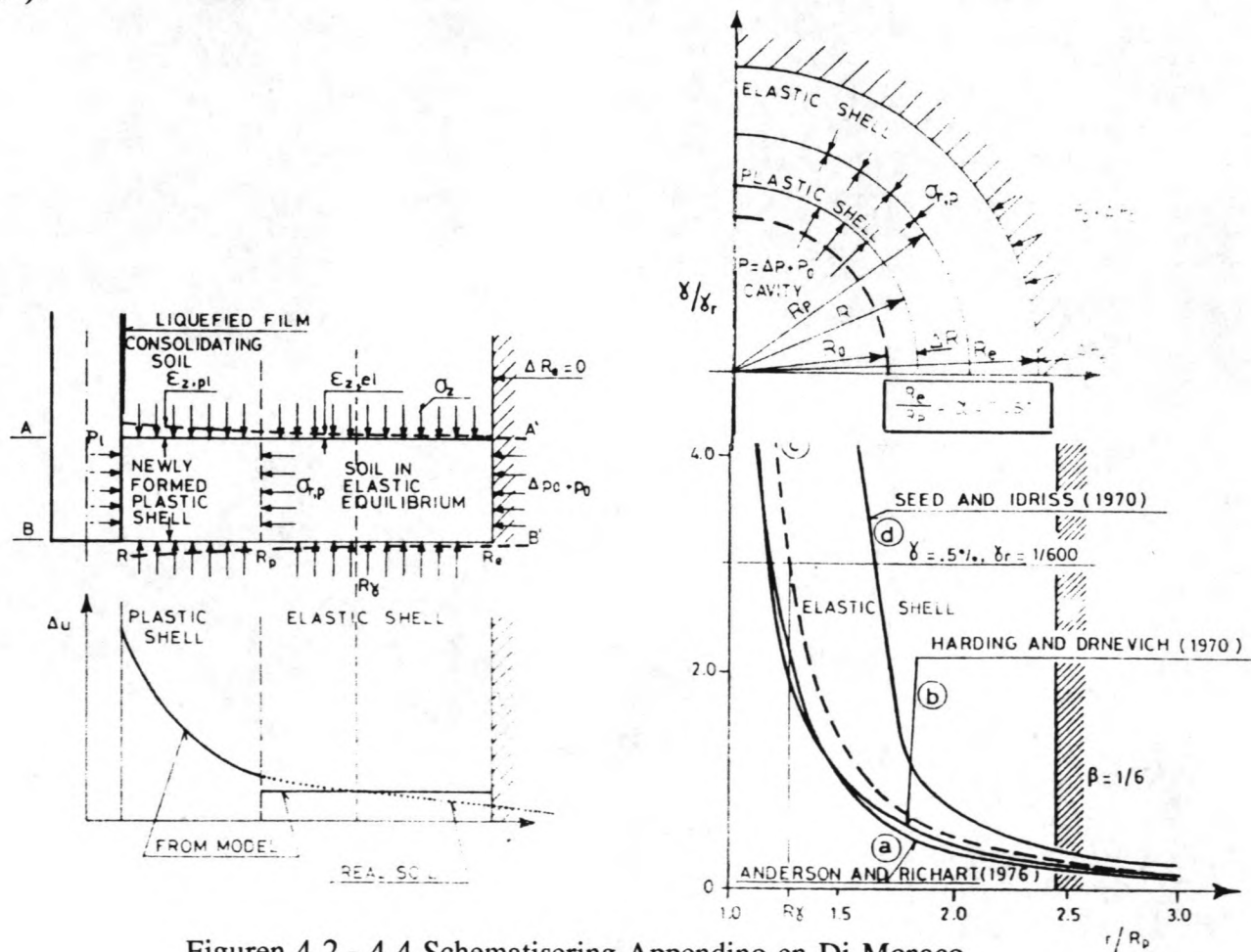
Verder wordt gegeven :

$$I_R = \frac{G}{C_u} \quad [4.7]$$

In deze formules is :

P_0	Horizontale begindruk in de grond	[Kn/m ²]
C_u	Ongedraineerde schuifsterkte	[Kn/m ²]
β	Dimensieloze factor (1/6)	[-]
ϵ_z	Plastische vervorming	[-]
R_p	Straal tot plastisch gebied	[m]
R_e	Straal tot rand opsluiting	[m]

Als conclusie stellen de auteurs dat, omdat de berekeningen volgens hun model vrij sterk met de metingen overeenkomen, het model een goede voorspelling doen kan. Wel geven zij nog enige richtlijnen voor het hanteren van bepaalde parameters (zie ook figuren 4.2 - 4.4).

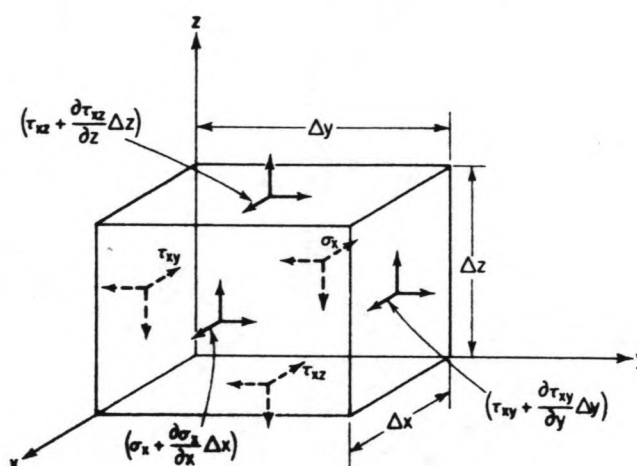


Figuren 4.2 - 4.4 Schematisering Appendino en Di Monaco

Hoofdstuk 5. Golven in de grond : een oneindig medium

§ 5.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is reeds de golfvoortplanting in een eindig homogeen isotroop elastisch medium aan de orde geweest. Een heipaal laat zich schematiseren tot een eindig medium, de grond daar omheen echter niet. In dit hoofdstuk zal dan ook de golfvoortplanting in een oneindig medium, een elastische halfruimte, aan de orde komen.



Figuur 5.1 Spanningen op een klein element van een oneindig medium

§ 5.2 Bewegingsvergelijking

De bewegingsvergelijking voor iedere richting kan worden afgeleid uit het krachtenevenwicht op het te beschouwen element in die richting (fig. 5.1). Voor de x-richting kan deze uitgewerkt worden tot :

$$\left(\sigma_x \frac{\delta \sigma_x}{\delta x}\right) \Delta y \Delta z - \sigma_x \Delta x \Delta z + \left(\tau_{xy} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} \Delta y\right) \Delta x \Delta z - \tau_{xy} \Delta x \Delta z + \left(\tau_{xz} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z} \Delta z\right) \Delta x \Delta y - \tau_{xz} \Delta x \Delta y = 0 \quad [5.1]$$

Het krachtenevenwicht kan ook in de andere richtingen worden uitgedrukt op deze manier. Door verwaarlozing van de krachten op het element en toepassing van de tweede wet van Newton volgt uit vergelijking [5.1] dat in de x-richting geldt :

$$\left(\frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z}\right) \Delta x \Delta y \Delta z = \rho (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad [5.2]$$

Wanneer deze afleiding ook voor de y- en z-richting heeft plaatsgevonden, kunnen de bewegingsvergelijkingen worden uitgedrukt in de spanningen :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} &= \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z} \\ \rho \frac{\delta^2 v}{\delta t^2} &= \frac{\delta \tau_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta z} \\ \rho \frac{\delta^2 w}{\delta t^2} &= \frac{\delta \tau_{zx}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{zy}}{\delta y} + \frac{\delta \sigma_z}{\delta z} \end{aligned} \quad [5.3]$$

Hierin zijn u, v en w de verplaatsingen in respectievelijk de x-, de y- en de z-richting.

De spanningen in de formules in [5.4] laten zich noteren als :

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda \epsilon_v + 2G \epsilon_x & \tau_{xy} &= \tau_{yx} = G \gamma_{xy} \\ \sigma_y &= \lambda \epsilon_v + 2G \epsilon_y & \tau_{yz} &= \tau_{zy} = G \gamma_{yz} \\ \sigma_z &= \lambda \epsilon_v + 2G \epsilon_z & \tau_{zx} &= \tau_{xz} = G \gamma_{zx} \end{aligned} \quad [5.4]$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

waarin ν de Poisson ratio is, λ en G de Lamé constanten zijn (G ook wel glijdingsmodulus genoemd) en ϵ_v de volume rek is. Deze laatste is gelijk aan $\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$. De rekken en rotatie kunnen worden uitgedrukt in verplaatsingen :

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\delta u}{\delta x} & \gamma_{xy} &= \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} & 2\overline{\omega}_x &= \frac{\delta w}{\delta y} - \frac{\delta v}{\delta z} \\ \epsilon_y &= \frac{\delta v}{\delta y} & \gamma_{yz} &= \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} & 2\overline{\omega}_y &= \frac{\delta u}{\delta z} - \frac{\delta w}{\delta x} \\ \epsilon_z &= \frac{\delta w}{\delta z} & \gamma_{zx} &= \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} & 2\overline{\omega}_z &= \frac{\delta v}{\delta x} - \frac{\delta u}{\delta y} \end{aligned} \quad [5.5]$$

Hierin is ϵ_i voor de rek in richting i , γ_{ij} voor de afschuiving en ω_i voor de rotatie om as i gegeven.

Uit substitutie van [5.4] en [5.5] in [5.3] volgt voor de x-richting de bewegingsvergelijking voor een oneindig homogeen isotroop elastisch medium.

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = (\lambda + G) \frac{\delta \epsilon_v}{\delta x} + G \nabla^2 u \quad [5.6]$$

Vanzelfsprekend kan ook voor de y- en de z-richting een dergelijke vergelijking worden opgesteld.

§ 5.3 Golven in een halfruimte

Door de vergelijking [5.6] uit te drukken in de volumerek of de rotatie kunnen de golfsnelheden voor volumerek en rotatie worden bepaald. In een oneindig elastisch medium zijn deze als volgt gedefinieerd :

Dilatatie golf :	primaire golf, compressie golf, irrotationele golf, golf plant zich voort via het aanwezige grondwater opgenomen met een snelheid : v_p [m/s]
Distorsie golf :	secundaire golf, afschuivingsgolf, golf waarbij het volume constant blijft, golf plant zich voort via het korrelskelet met een snelheid : v_s [m/s]

Voor de voortplantingssnelheden dilatatie (P-) golf en voor de distorsie (S-) golf geldt nu :

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [5.7]$$

In hoofdstuk 3 is reeds de voortplantingssnelheid van een compressiegolf in een eindige staaf aan de orde geweest. Hoewel de beweging van de deeltjes in een staaf of oneindige ruimte hetzelfde is, zijn de snelheden anders. In een oneindige ruimte plant een compressiegolf zich sneller voort dan in een staaf, vanwege het feit dat in een oneindige ruimte er geen laterale beweging mogelijk is. De voortplantingssnelheid van een afschuivingsgolf is in zowel een oneindige als eindige ruimte gelijk.

In een elastische halfruimte komen zowel de compressie- als de afschuivingsgolven voor. Deze verplaatsen zich met de vorm van een groeiende hemisfeer in een diepte. Behalve deze twee golven is er nog een derde golf mogelijk in een elastische halfruimte, de zogenaamde oppervlakte golf (figuur 5.2). Deze wordt ook wel Rayleigh-golf genoemd. In tabel 5.1 zijn een aantal eigenschappen voor de genoemde golven opgenomen.

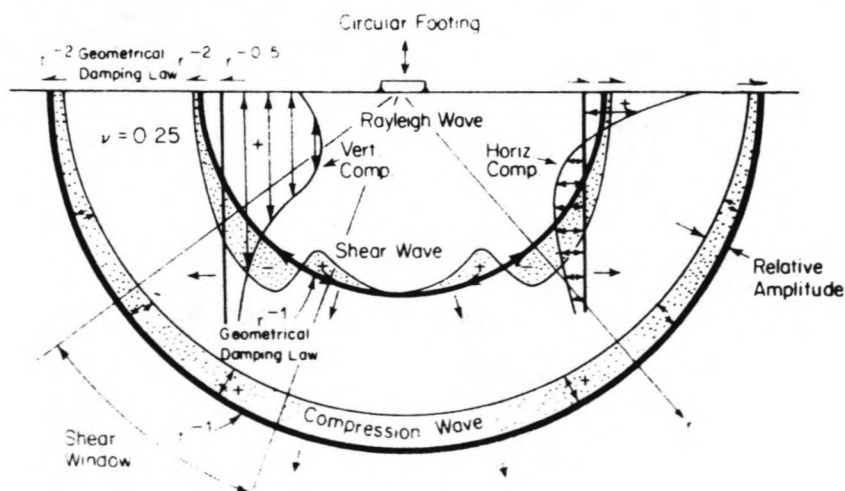
Soort golven	(%) Totale energie	Factor geometrische demping	Formule
Rayleigh	67	$r^{-0.5}$	$v_R < v_s$
Compressie	7	r^{-2}	$v_p > v_s$
Afschuiving	26	r^{-2}	$v_R < v_s < v_p$

Tabel 5.1 Vergelijking golven

De genoemde percentages geven een idee van de energieverdeling. Echter, voor verschillende auteurs zijn bovenstaande nog immer een twistpunt. Voor bovenstaande golven gelden een aantal beperkingen :

- Aanstotingen via maaiveld
- Cirkelvormig vlak waarop aanstoting plaatsvindt
- Aanstoting is verticaal

Echter, de aanstoting kan ook plaatshebben op een scheidingsvlak tussen twee lagen.



Figuur 5.2 Verdeling van de golven in een halfruimte

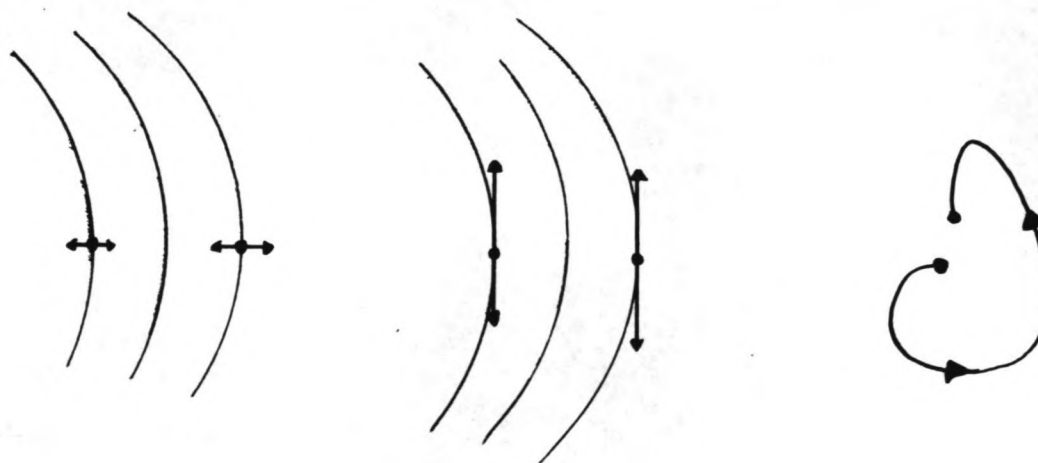
Biot (1956) vond dat naast een dilatatiegolf in de grond ook een dilatatiegolf in het aanwezige grondwater optreedt. Deze twee golven zijn gekoppeld via zowel de stijfheden van de grond en het water als de bewegingen van de grond en waterdeeltjes.

De afleiding van de Rayleigh-golf is vrij ingewikkeld. Hier wordt slechts volstaan met een benaderingsformule van de voortplantingssnelheid van de Rayleigh-golf :

$$v_R \approx \frac{0.863 + 1.14\nu}{1 + \nu} \cdot v_s \quad [5.8]$$

Behalve deze Rayleigh-golf komen er ook wel andere oppervlaktegolven voor, te weten Stonely-golven en Love-golven. Deze golven planten zich voort langs een scheiding tussen twee grondlagen of de oppervlakte. De amplituden hiervan nemen exponentieel en dus snel af naar de diepte. Een Stonely-golf treedt alleen op als de dichtheden en stijfheden van een scheidingsvlak in een bepaalde verhouding staan.

In het voorgaande zijn voornamelijk de optredende snelheden besproken. De verplaatsing van de deeltjes bij de drie afzonderlijke golftypen wordt verduidelijkt in (figuur 5.3).



a) Compressie golf

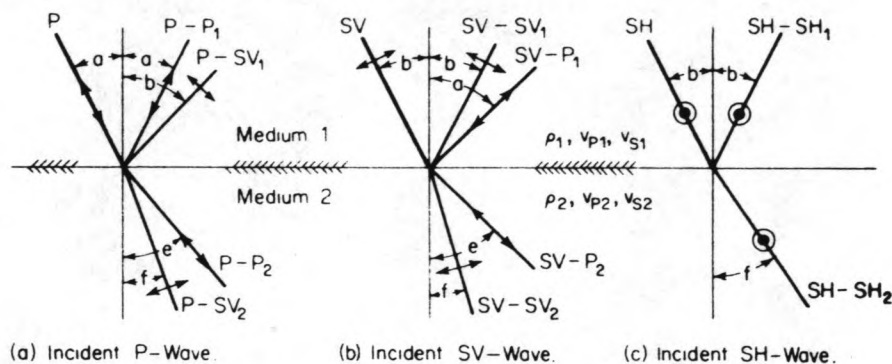
b) Schuifgolf

c) Rayleigh golf

Figuur 5.3 Richtingen van deeltjesverplaatsing

§ 5.4 Golven in gelaagde systemen

Wanneer er sprake is van gelaagdheid is er dus sprake van een overgang van het ene medium naar het andere, bijvoorbeeld van klei naar zand. Golven vanuit een trillingsbron worden dan op dit scheidingsvlak gedeeltelijk weerkaatst en doorgegeven in het andere medium. Hier treedt afbuiging op. De totale energie wordt verdeeld. In figuur x.xx worden de mogelijke gevallen aangegeven. De subscripten 1 en 2 staan voor de lagen (media) 1 en 2. SH en SV staan voor respectievelijk de horizontale en de verticale componenten van de schuifgolf (figuur 5.4).

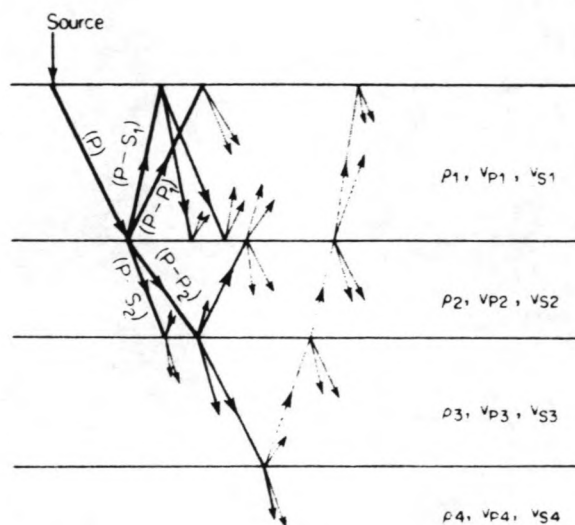


$$\frac{\sin a}{v_{p1}} = \frac{\sin b}{v_{s1}} = \frac{\sin e}{v_{p2}} = \frac{\sin f}{v_{s2}}$$

Figuur 5.4 Golven op een scheidingsvlak

Love (1911) beschreef dat meerdere totale reflecties (fig. 5.5) tussen het oppervlak en een laagscheiding een oppervlakte golf kunnen opwekken, de zogenaamde Love-wave. Ewing (1957) definieerde dit als "een horizontaal gepolariseerde schuifgolf gevangen in een oppervlaktelaag en voortgeplant door meerdere totale reflecties".

Yuan & Nazarian (1993) geven in [Lit.7-19] een numerieke oplossing voor het bepalen van de oppervlakte golven. Uitgaande van een aantal (j) lagen met eigenschappen $v_{s,j}, \rho_j, \nu_j$ en h_j , begrensd aan de onderkant door een halfruimte M, hebben zij een wiskundig algoritme opgesteld waarmee de snelheid van de oppervlaktegolven wordt verkregen. Nadeel van deze methode is dat deze vrij tijdrovend is.



Figuur 5.5 Golfreflectie en -refractie in een lagen systeem

§ 5.5 Damping van golven in de grond

In [Lit.7-22] stelt Barkan dat de trillingsamplitude in een punt met een straal r vanaf de bron kan worden omschreven met behulp van een exponentiële uitdrukking :

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad [5.9]$$

Hierin is α de dempingscoëfficiënt. Deze formulering is afgeleid uit metingen en dus empirisch van aard. Heel wat auteurs zijn met deze formule aan de slag gegaan en zijn op zoek geweest naar andere belangrijke factoren die hieraan toegevoegd konden of moesten worden. Een aantal empirische methoden zullen kort aan de orde komen.

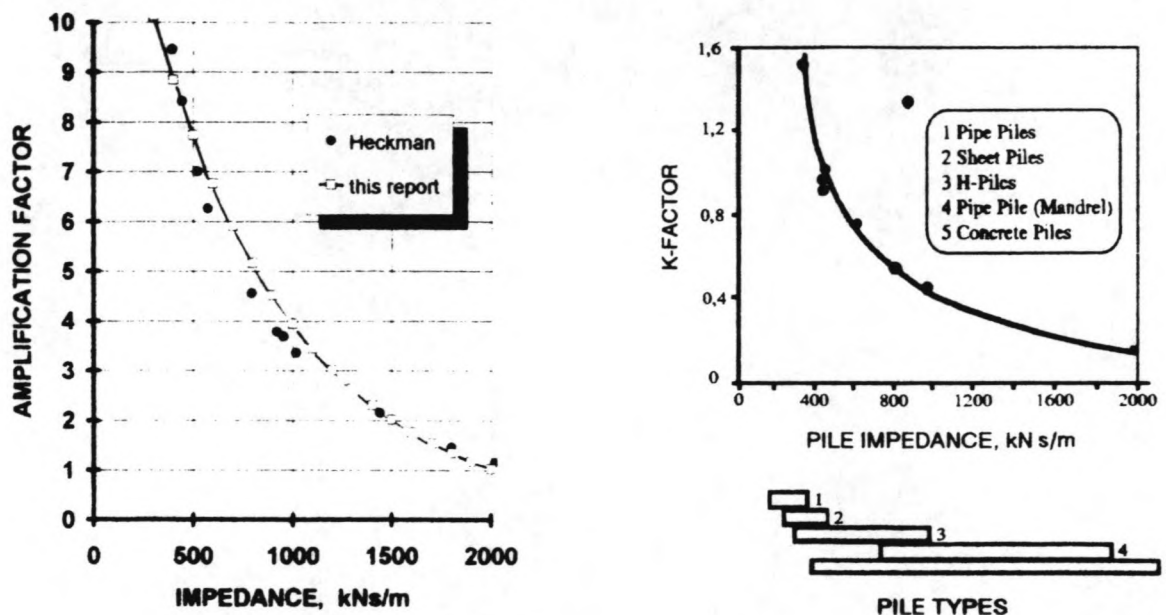
In [Lit.7-20] hebben Van Stalduinen en Waarts aan de hand van metingen de betrouwbaarheid van de Barkan-formule getest. Zij concluderen dat voor een eerste benadering de empirie een goede benadering geeft, echter zodra er parameters van andere gemeten waarden moeten worden afgeleid (bijv. conusweerstand) daalt de betrouwbaarheid van het model.

Totaal anders van aard is de formule van Atwell & Farmer (1973), die in [Lit.7-3] te vinden is. Hierin is de amplitude van de grondtrilling in een bepaald punt afhankelijk van een empirische coëfficiënt (k), de energie in de paal (E_h) en de afstand van dat punt tot de paal (D).

De amplitude wordt dan gegeven met :

$$v = k \frac{\sqrt{E_h}}{D} \quad [5.10]$$

Een waarde voor k wordt gevonden in figuur 5.6.



Figuur 5.6 Grafisch bepalen van de k-waarde

Tenslotte wordt deze formule bepaald voor een afstand dusdanig dicht bij de paal dat de samenhang nog steeds juist is (voor elastische toestand). Met invullen van de heienergie en door invoering van een extra modelfactor β wordt dan gevonden voor de amplitude op 5 meter afstand van de paal :

$$v_{5,0} = 0.2 \cdot k \cdot \beta \cdot \sqrt{E_h} \quad [5.11]$$

Waarin voor β grofweg kan worden aangenomen :

0.25	minder vast zand	($q_c < 5$ MPa)
0.50	vast zand	($q_c < 15$ Mpa)
1.00	zeer vast zand	($q_c > 15$ Mpa)

q_c Conusweerstand [Mpa]

Het Lysmer analogon [Lit.7-10] (figuur 5.7) is gebaseerd op een cirkelvormige plaat op een halfruimte waarop een dynamische belasting werkt, gegeven door $Q(t) = Q_0 \sin(\omega_0 t)$.

De bewegingsvergelijking is algemeen gegeven door :

$$m \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} + c \frac{\delta u}{\delta t} + ku = Q(t) \quad [5.12]$$

De statische stijfheid k wordt gegeven door :

$$k = \frac{4GR}{1-\nu} \quad [5.13]$$

De geometrische demping wordt gegeven door :

$$c = \frac{3.4R^2}{1-\nu} \sqrt{\rho G} \quad [5.14]$$

Verder is de elasticiteitsmodulus in verticale richting :

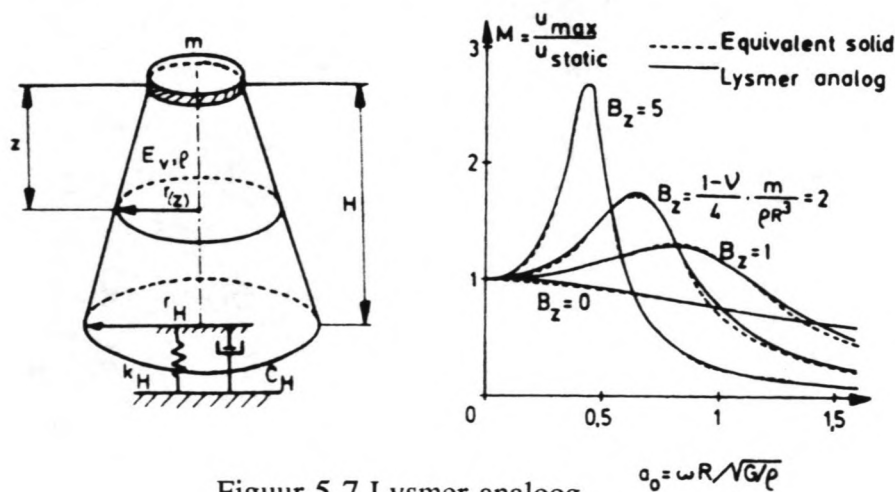
$$E_v = \frac{G}{0.85(1-\nu)^2} \quad [5.15]$$

Het elastische gebied onder de paal is kegelvormig. De straal R op een hoogte z onder de paal wordt verkregen met :

$$R = r_{paal} + \frac{1-\nu}{\sqrt{0.85}} z \quad [5.16]$$

Voor de parameters geldt :

G	Glijdingsmodulus	[Kn/m ²]
ν	Dwarscontractiecoëfficiënt	[-]



Figuur 5.7 Lysmer analoog

Hoofdstuk 6. Conclusies literatuuronderzoek

§ 6.1 Conclusie

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 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.

§ 6.2 Aanknopingspunten verdere studie

In de verdere studie zullen drie aspecten verdiept worden :

- a - Opstellen 1-Dimensionaal model volgens 'Cavity expansion' of iets dergelijks
- 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 dit rapport genoemd zijn. Ook een nader onderzoek naar de aanwezigheid van grondwater in de grond en de golfvoortplanting dient onderbouwd 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 aan de hand gebeuren van oude en 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.

Hoofdstuk 7. Gebruikte literatuur

- [7-1] ir. C. van der Veen e.a.
"Grondmechanica met beginselen van de funderingstechniek"
Uitgeverij Waltman - Delft
Oktober 1983
- [7-2] Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR)
"CUR publicatie 166 Damwandconstructies"
CUR - Gouda
Oktober 1993
- [7-3] K.R. Massarch
"Static and dynamic soil displacements caused by pile driving"
Proceeding of the Fourth International Conference on the application of Stress-wave
Theory to Piles, edited by F.B.J. Barends
A.A. Balkema - Rotterdam
September 1992
- [7-4] ir. M.Th.J.H. Smits
"Rapport betreffende : studie naar het heiproces als trillingsbron"
FUGRO BV. - Leidschendam
Juli 1993
- [7-5] prof. ir. A. van Weele
"Moderne Funderingstechnieken"
Uitgeverij Waltman - Delft
Oktober 1981
- [7-6] H.G. Poulos & E.H. Davis
"Pile Foundation Analysis and Design"
John Wiley and sons - New York
1980
- [7-7] ir. G. de Josseling de Jong
"Wat gebeurt er in de grond tijdens het heien ?"
De Ingenieur Bouw- en Waterkunde, no. 25
Juni 1956
- [7-8] Prof.dr.ir. A. Verruijt
"Soil dynamics"
Department of Civil Engineering - Delft
Januari 1993
- [7-9] F.E. Richarts, J.R. Hall, R.D. Woods
"Vibrations of soils and foundations"
Prentice-Hall Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey
1970

- [7-10] Alain E. Holeyman
"Modelling of dynamic behaviour at the pile base"
Proceedings of the Third International Conference on the application of Stress-wave Theory to piles, edited by Bengt H. Fellenius
BiTech publishers, Vancouver
1988
- [7-11] M. Appendino & F. Di Monaco
"Determination of the effects due to pile installation into clay"
Proceedings of the Third International Conference on the application of Stress-wave Theory to piles, edited by Bengt H. Fellenius
BiTech publishers, Vancouver
1988
- [7-12] M.R. Svinkin
"Pile driving induced vibrations as a source of industrial seismology"
Proceeding of the Fourth International Conference on the application of Stress-wave Theory to Piles, edited by F.B.J. Barends
A.A. Balkema - Rotterdam
September 1992
- [7-13] G.G. Meyerhof
"Compaction of sand and bearing capacity of piles"
December 1959, Journal of the soil mechanics division
Technical University of Nova Scotia, Halifax (Canada)
1981
- [7-14] M.F. Randolph & A.J. Deeks
"Dynamic and static soil models for axial pile response"
Proceeding of the Fourth International Conference on the application of Stress-wave Theory to Piles, edited by F.B.J. Barends
A.A. Balkema - Rotterdam
September 1992
- [7-15] K. Terzaghi
"Theoretical Soil Mechanics"
J. Wiley and sons, inc., New York
1943
- [7-16] M.A. Koenders
"Displacements associated with Pile Driving"
Department of physics, Kingston University
November 1992
- [7-17] P. Hölcher
"Ontwikkeling module bodem voor prognose model - voorstudie"
Grondmechanica Delft, rapport CO-329530/22
Mei 1992

- [7-18] R.Y. Liang & A.I. Husein
"Simplified dynamic method for pile-driving control"
Volume 119, no. 4, Journal of Geotechnical Engineering
April 1993
- [7-19] D. Yuan & S. Nazarian
"Automated surface wave methods"
Volume 119, no. 7, Journal of Geotechnical Engineering
July 1993
- [7-20] P.C. van Staalduinen en P.H. Waarts
"Prediction of vibrations due to pile driving"
Proceedings of the Fourth International Conference on the application of Stress-wave
Theory to Piles, edited by F.B.J. Barends
A.A. Balkema - Rotterdam
September 1992
- [7-21] R.D. Woods & L.P. Jedele
"Energy attenuation relationships from construction vibrations"
Proceedings of the ASCE symposium on vibration problems in geotechnical engineering
Detroit
1985
- [7-22] D.D. Barkan
"Dynamics of bases and foundations"
McGraw-Hill Book Company, inc. - New York
1962
- [7-23] Peutz & Associés
"Trillingen van bodem naar gebouwelement"
Rapportno. RA 683-1, Peutz & Associés BV. - Nijmegen
1992

Bijlage A. Gebruikte symbolen

A	doorsnede paal	[m ²]
A	amplitude	[m]
c	factor voor elastische vering tussen paal en bodem	[-]
c	golfvoortplantingssnelheid	[m/s]
E _n	energie vrijgekomen bij het heien	[kNm]
E _{cs}	elastische energie in de grond geborgen	[kNm]
E _{ps}	plastische energie in de grond geborgen	[kNm]
E _{ep}	elastische energie in de paal geborgen	[kNm]
E	elasticiteitsmodulus paal	[kN/m ²]
F	kracht op element	[kN]
f	frequentie	[Hz]
G	glijdingsmodulus	[kN/m ²]
g	gravitatieacceleratie	[m ² /s]
h	valhoogte	[m]
I	impedantie	[Ns/m]
J	dempingsfactor	[s/m]
k	factor materiaal en werk afhankelijk	[-]
k	veerconstante	[N/m]
l	lengte paal	[m]
L	lengte paal	[m]
m	massa	[kg]
m	veerkrachtcoëfficiënt	[-]
n	veerkrachtscoëfficiënt	[-]
P _{max}	maximale druk	[kN/m ²]
Q	paalweerstand, statisch paal draagvermogen	[kN]
R	weerstand	[kN]
R	straal van cirkel	[m]
R _α	afstand tot laterale begrenzing	[m]
R _p	afstand tot plastische begrenzing	[m]
r	afstand	[m]
S	gemiddelde blijvende zakking	[m]
u	verplaatsing in x-richting	[m]
v	snelheid	[m/s]

v_c	voortplantingssnelheid van de drukgolf	[m/s]
v_p	voortplantingssnelheid compressiegolf	[m/s]
v_s	voortplantingssnelheid schuifgolf	[m/s]
v_R	voortplantingssnelheid Rayleighgolf	[m/s]
w	axiale verplaatsing	[m]
w	pulsbreedte trilling	[m]
W	amplitude van de verplaatsing	[m]
W_h	gewicht heiblok	[kN]
W_p	gewicht paal	[kN]
$W_i(t)$	blijvende zakking	[m]
z	zakking per slag	[m]
Z	impedantie	[Nm/s]
α	energieverlies factor	[-]
β	modelfactor	[-]
δ	integratie increment	[-]
Δ	verschil	[-]
λ	Lamé constante	[kN/m ²]
η	hysterese damping factor	[-]
ξ	efficiency coëfficiënt	[-]
ξ	functie van verhouding paal-/blokgewicht	[-]
ϵ	rek	[-]
ρ	massa dichtheid	[kg/m ³]
ω_n	omwentelingsfrequentie behorend bij eigenfrequentie	[rad/s]
ω	rotatie om as	[rad]
σ	spanning	[kN/m ²]
τ	schuifspanning	[kN/m ²]
ν	Poisson (dwarscontractie) coëfficiënt	[-]

Verder zijn x,y,z,u,v,w richtingen en de subscripten i en j tellers.

Bijlage B. Overzicht tabellen en figuren

Gebruikte figuren

- Figuur 2.1 Het heiproces opgebouwd uit deelprocessen I t/m V
- Figuur 2.2 Golfvoortplanting door de paal
- Figuur 3.1 Staafelement
- Figuur 3.2 Voortplanting van de spanningen in een paal
- Figuur 3.3 Beweging van de paalkop
- Figuur 3.4 Smith model
- Figuur 3.5 Grond-paal-hamer model
- Figuur 4.1 Verplaatsing volgens model Koenders
- Figuren 4.2 - 4.4 Schematisering Appendino en Di Monaco
- Figuur 5.1 Spanningen op een klein element van een oneindig medium
- Figuur 5.2 Verdeling van de golven in een halfruimte
- Figuur 5.3 Richting van de deeltjesverplaatsing
- Figuur 5.4 Golven op een scheidingsvlak
- Figuur 5.5 Golfreflectie en -refractie in een lagen systeem
- Figuur 5.6 Grafisch bepalen van de k-waarde
- Figuur 5.7 Lysmer analoog

Gebruikte tabellen

- Tabel 3.1 Relatie ξ en verhouding paal- / blokgewicht
- Tabel 5.1 Vergelijking golven

Bijlage C. Heiformule van Sprenger-Potma

$$E_h = [Qz + Q^2 \cdot \frac{l}{\alpha EA}] \cdot C \cdot \xi \quad [2.8]$$

Hierin is :

E_h	benodigde energie van het blok	[kNm]
α	energieverlies factor (2)	[-]
h	valhoogte	[m]
ξ	efficiency coëfficiënt	[-]
n	veerkrachtscoëfficiënt	[-]
Q	weerstand (dynamisch grensdragvermogen) van paal	[kN]
l	lengte van de paal	[m]
A	doorsnede van de paal	[m ²]
E	elasticiteitsmodulus van de paal	[kN/m ²]
z	zakking per slag	[m]

Verder is C gegeven door :

$$C = \frac{W_h + W_p}{W_h + m^2 \cdot W_p} \quad [2.9]$$

Met voor :

W_h	gewicht heiblok	[kN]
W_p	gewicht van de paal	kN]

Voor m, die evenals eerdergenoemde n het energie verlies aangeeft, gelden de volgende waarden :

m	=	0.3	betonpalen
m	=	0.5	houten palen
m	=	0.8	stalen palen

