

Methode voor de voorspelling van de intrilbaarheid van palen

Alain E. Holeyman, Hoogleraar, Université Catholique de Louvain-La-Neuve, België
Christian Legrand, Hoofd van de Afdeling Geotechniek, WTCB, Brussel, België
Noël Huybrechts, Onderzoeker van de Afdeling Geotechniek, WTCB, Brussel, België

Voor het in de grond brengen van palen of damplanken kunnen drie basistechnieken worden aangewend: heien, trillen en persen. De meest gebruikte methode in los tot matig gepakte zanden en slappe alluviale lagen is het trillen, omdat dit een snelle techniek is. In moeilijke omstandigheden kan heien een oplossing bieden omdat een grote hoeveelheid energie beschikbaar is, maar dit is meestal lawaaiër en heeft een laag rendement in gewone gronden. De hoge kosten van het inpersen van palen kunnen enkel verantwoord worden wanneer strenge eisen gesteld worden met betrekking tot de trillingshinder voor de omgeving; bij het inbrengen wordt gebruik gemaakt van de reactiekracht van een massa of van de wrijvingsweerstand tussen reeds geplaatste damplanken en de grond.

De triltechniek wordt vaak gebruikt voor het plaatsen van damplanken. In tegenstelling tot heien en persen, waarbij de weerstand die moet worden overwonnen tenminste gelijk is aan de statische grondweerstand, wordt bij het intrillen van damplanken de grondweerstand aanzienlijk gereduceerd door het groot aantal spanningswisselingen. Zoals besproken door Dobry en Vucetic (1987) en Holeyman en Legrand (1994), leiden de degradatie van de grondweerstand en de ontwikkeling van poriënwateroverspanningen ten gevolge van de cyclische bewegingen, tot een beduidende vermindering van de statische waarde van de grondweerstand. Wanneer in een verzadigde zandgrond de opbouw van poriënwateroverspanningen zo groot is dat de korrelspanningen quasi nul worden, komt men in een toestand waarbij de sterkte en samenhang van het zand volledig verloren gaan. Deze toestand noemt men liquefactie. Sommigen zijn van oordeel dat de paal niet zozeer door de trilkracht in de grond wordt geheid, maar dat de paal eerder onder invloed van de zwaartekracht in de week geworden grond zakt.

Theoretisch model voor de heikbaarheid van trilpalen

Achtergrond van het model

De intrilbaarheid van palen en damplanken werd uitvoerig onderzocht in het kader van een Europees onderzoeksprogramma (WTCB, 1994). Een eerste gedetailleerd model werd ontwikkeld op grond van de basisanalyse van het dynamisch gedrag van een cilinder in een oneindig medium (Holeyman, 1985). De cilindrische schuifspanningsgolven die zich vanuit de ingetrilde paal voortplanten, werden geëvalueerd met behulp van een eendimensionale radiale

discretisatie van de grond rond de paal. Er werden elementen uit de aardbevingengineering, die normaal gebruikt worden voor de beoordeling van het liquefactiepotentiaal, gebruikt om de kleeftegradatie op de cyclische schuifspanning te beoordelen. De degradatie en de poriënwateroverspanningen werden berekend op basis van correlaties afgeleid van het wrijvingsgetal zoals gemeten in een elektrische CPT (Holeyman, 1993b, en Holeyman en Legrand, 1994).

Er werd een eenvoudiger analytisch model ontwikkeld om de indringingssnelheid in de grond te kunnen voorspellen (Holeyman 1993b). Dit eenvoudigere model heeft aangetoond dat de berekeningen, die in de volgende paragrafen worden besproken, voor iedere gewenste diepte kunnen worden gemaakt.

Raming van de versnellingsamplitude

Een eerste raming van de versnellingsamplitude (a) van de trillende delen kan verkregen worden uit de vergelijking (1), in de veronderstelling dat de paal een vrij lichaam is. Deze eerste raming zal later verfijnd worden, om rekening te kunnen houden met de reacties van de grond.

$$a = \frac{F_c}{M_v} = \frac{m_e \cdot \omega^2}{M_v} \quad (1)$$

met:

F_c : centrifugaalkracht van het trilblok

M_v : massa van de trilelementen (paal, inkleminrichting, trilblok)

m_e : excentrisch moment van het trilblok

ω : de pulsatie van het trilblok

($= 2\pi \cdot f$, met f de frequentie)

Bepaling van de statische grondweerstand

De statische weerstandsprofielen van de voet (q_c) en schacht (τ_s) worden afgeleid uit de CPT resultaten, dit wil zeggen van de conusweerstand q_c en de plaatselijke kleeft f_s (E1-conus).

Berekening van de grondweerstand in geval van volledige vervloeijing

De volledig vervloeide voet- (q_1) en schacht- (τ_1) eenheidsweerstand worden afgeleid uit de vorige fase, zich basierend op een exponentiële wet die wordt uitgedrukt in de vergelijkingen (2) en (3):

$$q_l = q_s \cdot [(1-1/L) \cdot e^{-1/FR} + 1/L] \quad (2)$$

$$\tau_l = \tau_s \cdot [(1-1/L) \cdot e^{-1/FR} + 1/L] \quad (3)$$

met:

- q_1 : voetweerstand bij volledig vervloeide grond
- τ_1 : schachtweerstand bij volledig vervloeide grond
- FR: wrijvingsgetal zoals gemeten met een CPT met E1 conus (% van de mantelwrijving ten opzichte van de conusweerstand, dat wil zeggen $FR = 100 f_s/q_c$)
- L: empirische liquefactiefactor die het sterkteverlies ten gevolge van de liquefactie uitdrukt (L zal het grootst zijn voor losgepakte met water verzadigde zanden en de waarde zal gelegen zijn tussen 4 en 10).

Berekening van de heiveerstand van de grond

De weerstanden die aan de voet (q_d) en de schacht (τ_d) tijdens het trillen ondervonden worden, worden afgeleid uit de statische en volledig vervloeide grondweerstand, afhankelijk van de trillingsamplitude, volgens een exponentiële wet zoals uitgedrukt in de vergelijkingen (4) en (5).

$$q_d = (q_s - q_l) \cdot e^{-a} + q_l \quad (4)$$

$$\tau_d = (\tau_s - \tau_l) \cdot e^{-a} + \tau_l \quad (5)$$

met:

- q_d : eenheidshieveerstand van de voet
- τ_d : eenheidshieveerstand van de schacht
- a: versnellingsverhouding (a/g) van de paal, zoals verkregen uit de vergelijking (1).

Op iedere diepte z, wordt de weerstand die de ingetilde paal ondervindt berekend:

$$F_{voet} = q_d \cdot \Omega \quad (6)$$

$$F_{schacht} = \chi \cdot \int_{z=0}^{z=D} \tau_d \cdot dz \quad (7)$$

met

- Ω : paaldoorsnede
- χ : paalomtrek
- D: paalpenetratie

Herberekening van de trillingsamplitude

De grondweerstand veroorzaakt een vermindering van de trillingsamplitude. De vergelijking (1) kan als volgt worden gewijzigd:

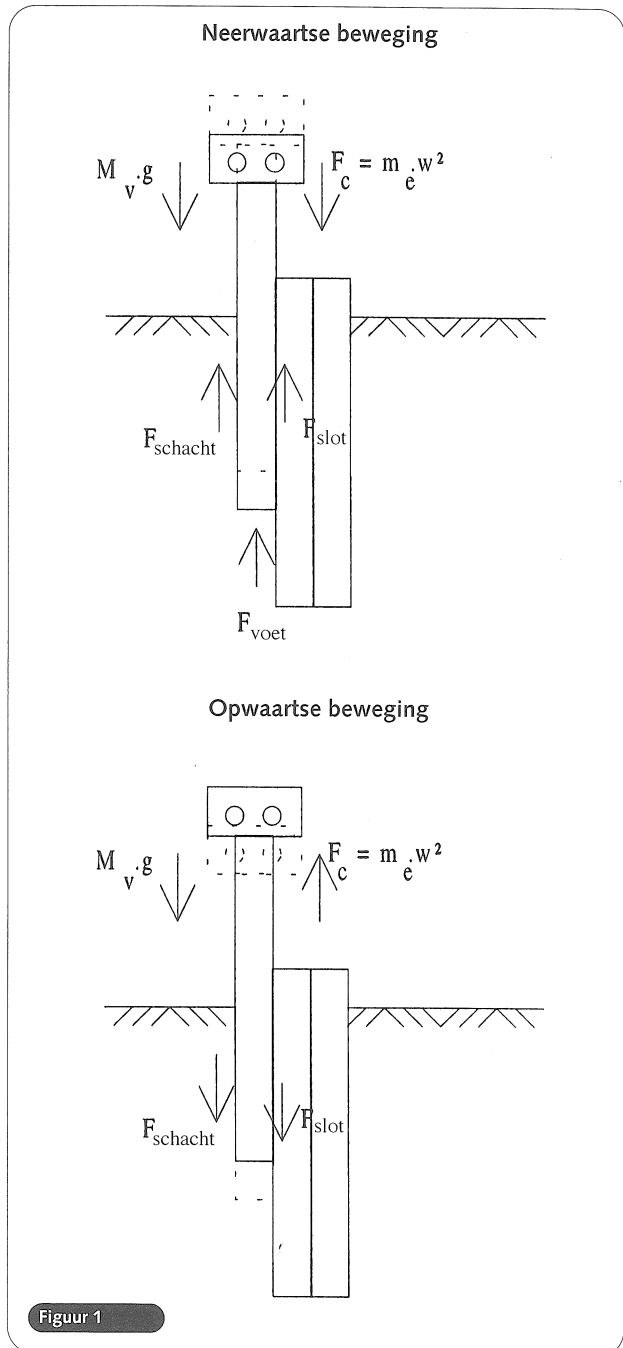
$$a = \frac{m_e \cdot \omega^2 - \delta \cdot F_{schacht}}{M_v} \quad (8)$$

met δ de dempingsfactor, die het vermogen van de schachtweerstand om de beweging van de damplank te dempen, uitdrukt.

Bovenvermelde rekenstappen (vergelijkingen 2 tot en met 8) kunnen worden doorlopen tot het verschil tussen twee opeenvolgende waarden van de trillingsamplitude verwaarloosbaar wordt.

Berekening van de intrilsnelheid

De intrilsnelheid wordt bekomen door de wet van Newton toe te passen op het trilproces (fig. 1).



Figuur 1

Heikbaarheid van ingetilde damplanken

De netto effectieve neer- en opwaartse krachten worden als volgt berekend:

Tabel 1 - Vergelijking tussen metingen en berekeningen van de heibaarheid met het rekenmodel

Site	Bodem	Triëlblok (f [Hz]/m _e [kg.m])	Profiel			d _{vdj} = m _e /M _v [mm]	Voorspelling [min' sec'']	Meting [min' sec'']
			Type	Lengte [m]	Installatie Diepte [m]			
Hingene (B)	fijn los tot matig gepakt zand/klei	PTC 50H2 (25/50)	AZ 13	9,8	9	6,2	1' 44"	1' 55"
			BZ 17	11,7	10	6,1	2' 31"	2'
			BZ 17	16,1	14	5,7	5' 35"	3' 40" à 4'
		PTC 30HF (36/26)	BZ 17	11,7	10	4,2	2' 03"	2' 20"
			BZ 17	16,1	14	3,9	4' 31"	6' 35"
		PTC 30HFV (38/26)	BZ 17	16,1	14	3,2	4' 15"	6' à 8'
St-Stevens- Woluwe (B)	silt of klei	PTC 50H2 (25/50)	AZ 26	14,5	13	5,2	3' à 4' (*)	3' 30"
Watermaal- Bosvoorde (B)	losgepakt zand	PTC 13HF (34/13)	BZ 12 double	8	6,4	4,4	55"	32"
			BZ 12 simple	8	6	5,3	29"	11"
Moerzeke (B)	slappe klei/matig gepakt tot vrij vastgepakt zand	PTC 15HF (38/15)	AZ 18	11,5	+/-11	3,8	2' 30" à 3' 30" (*)	15' à 16' tot 10.6 m (vastgelopen op vastgepakt zand)
North-Sea	klei	ICE 1412 (22.5/115)	Buispaal (Ø 1.067 m)	28		2,5	Vastgelopen op 8.5 m	Vastgelopen tussen 10 & 12.75 m
			Buispaal (Ø 1.067 m)	27		3,2	Vastgelopen op 9 m	Vastgelopen tussen 10 & 12.75 m
Kortrijk (B)	klei	PTC 30HFV (38/26)	Buispaal (Ø 1.01 m)	20,6	20	2,3	14' 36" à vastgelopen op 18.2 m na 18' (*)	Vastgelopen op 10.7 m (25')
		PTC 110 HD (20/105)	Buispaal (Ø 1.01 m)	20,6	11 tot 20	6,5	3' à 5' (*)	5' 25"
Boortmeerbeek (B)	zand/klei	PTC 30HFV (38/26)	Larssen IIN	12	11,4	3,9	2' 28" tot 11.4m à vastgelopen op 10.3 m na 8' (*)	10' à 15'
Koksijde (B)	zand	PTC 15HFV (38/15)	Omega 8	7	6,5	5	30"	46"
			Omega 8	8	7,5		35"	55"
Wielsbeke (B)	leem- of kleihoudend zand	PTC 23HFV (38/23)	AZ 18	12,5	10,5	4	1' 04" à 1' 23" (*)	+/- 2'
Gent-Zeehaven (B)	zand-klei/leem	PTC 25H2 (28/25)	AZ 13	18,5	17,5	4	5' 44" à 9' 20" (*)	5' à 6' 30"
Genk (B)	land	DIESEKO 50M (28/50)	Larssen 2S	14	12,6	5,7	5' 12" à 7' 51" tot 7.8 m (*)	12' tot 7.8m
Vilvoorde (B)	leem-zand grind-klei	DIESEKO 50M (28/50)	Larssen 7	14	16	5,7	3' 12 à 3' 50" (*)	6' 20"
Gent-Ringvaart (B)	land – leem/klei	ICE 23RF (38/23)	ZN41/1670	14,5	15,5	3,8	1'47" à 1' 58" tot 12.5m diepte (*)	+/- 1' tot 12.5 m
Anderlecht (B)	leem/klei	ABI VRZ 600GL (37/8.6)	DWZ 135	10	9	2,9	2' 46" à vastgelopen op 8.6 m in 5' 38" (*)	3' 21" (in het slot) 1' 28" (vrij)
Landen (B)	leem	ABI VRZ 600GL (37/8.6)	AZ13	7	6,7	3	30" (38 Hz) à 1'04(33Hz)"	1'18"
Erembodegem (B)	leem/zand	PTC 30HF3 (32/26)	BZ17	10,7	10	4,4	1' 56" à 2' 25" (*)	3' 40" (in het slot) 3' 15" (vrij)
Hamburg (D)	zand/klei	Müller MS-25 HF (26/25)	Gesloten buis Ø 273 mm ST2	17	17	5,1	Vastgelopen op q _c pieken (zand) op 2m en 9m	4'
		Müller MS-25 HF (28/25)	Gesloten buis Ø 356 mm ST3	12		6,1	Vastgelopen op 1m	Vastgelopen op 5m
		Müller MS-25 HF (28/25)	Open buis Ø 356 mm ST3	12	5 tot 12	6,1	54" à 1' 15 (**)	1'
		Müller MS-25 HF (28/25)	Open buis Ø 356 mm ST4	17	17	5,8	4' 24"	1'
Luik (HsA) (B)	grind	ICE 14 RF (35/14)	BZ17	9,8	7,5	3,3	4' 18"	3' 10"
		ICE 14 RF (37/14)	BZ17	12	8,2	3,1	8' 10"	4' 40"
		ICE 14 RF (39/14)	PU25	11,6	8,2	3,5	2' 07"	Vastgelopen op 8 m na 7' 40'
		ICE 416 (17/23)	BZ17	12	8,2	4,6	Vastgelopen op 6.9 m (5m bereikt na 8')	Vastgelopen op 5 m na 6'
Limelette (B)	leem	ICE 14 RF (38/14)	PU16 (S)	14	13	3,5	Intrillen mogelijk tot 13 m (8m bereikt na 2' 16")	Vastgelopen op 8 m na 10'
Kortrijk-Leie (B)	alluviale klei	Dieseko PVE2315 (35/15)	PU16 (D)	12	11,5	3,5	4' à 11' (*)	3' à 3' 20"
Etten-Leur (N)	dichtgepakt tot zeer dichtgepakt zand	Dieseko VM40 (33/40)	AZ18	19	18,5	5,8	7' tot 9 m waarna plank vastloopt	± 10' tot 9 m waarna zeer moeizaam getrild werd (tot me dan 1 h tot op 18,5 m)
		ABI MRZV40 (43/8) (+statische drukkracht van 6 ton)	PU32 (D)	14,2	13,5	1,7	9' tot 9,1 m waarna plank vastloopt	8' tot 9 m, waarna zeer moeiza getrild werd (tot meer dan 1 h op 13,5 m)
			PU16 (D)	13	12,5	2,6	2' à 3' tot 9,3 m waarna plank vastloopt	± 4' tot 9 m waarna zeer moeiza getrild werd (1 h tot 12,5 m)

(*) Indien de sondering uitgevoerd is met een mechanische conus wordt de lokale kleef afgeleid hetzij uit de totale wrijving, hetzij uit de conusweerstand

(**) Al dan niet met inbegrip van wrijving over de eerste 5 m

$$F\downarrow(t) = m_e \cdot \omega^2 \cos(\omega t) + M_v g - F_{voet} - F_{schacht} - F_{slot} \geq 0 \quad (9)$$

$$F\uparrow(t) = m_e \cdot \omega^2 \cos(\omega t) - M_v g - F_{schacht} - F_{slot} \geq 0 \quad (10)$$

Tenslotte wordt de resulterende intriëlsnelheid berekend door de netto effectieve neer- en opwaartse versnellingen te integreren over een cyclus met als duur $T = 2\pi/\omega$:

$$v = v\downarrow + v\uparrow = \int_0^T F\downarrow(t) / M_v \cdot dt - \int_0^T F\uparrow(t) / M_v \cdot dt \quad (11)$$

Vergelijking tussen de voorspelde en waargenomen indringingstijden

Er werd een computerprogramma ontwikkeld op basis van de algemene benadering die hierboven werd uiteengezet. Teneinde de rekensnelheid te vergroten, werden bepaalde vereenvoudigingen, die hier verder buiten beschouwing blijven, doorgevoerd. Voor een groot aantal bouwplaatsen met verschillende grondkarakteristieken, en verschillende trilblokken en profielen zijn berekeningen uitgevoerd. In tabel 1 worden deze berekeningen samengevat en

vergeleken met de metingen. (zie pag. 20)

Evaluatie en beperkingen van het voorgestelde model

Uit de verschillende meetcampagnes blijkt, dat de gemeten indringingstijden in de meeste gevallen overeenstemmen met de voorspelde tijden. Daaruit kan besloten worden dat de berekening van de dynamische grondweerstand een zeer goede overeenkomst vertoont met de fysieke realiteit. Bij bepaalde metingen echter is een groot verschil waargenomen, ten gevolge van de aanwezigheid van respectievelijk dichte zandlagen en stijve kleilagen. Uit een gedetailleerde analyse van de stuitvoorwaarden blijkt dat de bepaling van de dynamische grondweerstand niet de enige factor is die de berekening van de heikbaarheid beheerst.

Op grond van meetcampagnes op diverse bouwplaatsen (WTCB, 1994), geeft de volgende tabel (tabel 2) een samenvatting van de mogelijke stuitvoorwaarden die toe te schrijven zijn aan het trilblok, de palen, en de bodem. Niet al deze verschijnselen zijn opgenomen in het rekenmodel, wat wijst op de beperkingen van de voorgestelde benadering.

Tabel 2 - Mogelijke stuitvoorwaarden

Toe te schrijven aan het trilblok:

- De cyclische bewegingen reduceren de statische grondweerstand, zodat de paal onder invloed van de zwaartekracht de verweekte grond indringt. Een te kleine indringingssnelheid kan te wijten zijn aan een onvoldoende gewicht van het niet-trillend gedeelte van het trilblok.
- Een onvoldoende excentrisch moment van het trilblok leidt tot een te kleine trillingsamplitude.
- Een onvoldoende capaciteit van het trilblok leidt tot een daling van de trillingsamplitude of van de trillingsfrequentie van het trilblok.
- Slecht onderhouden hamers zijn niet in staat om aan hun nominale amplitude of frequentie te werken.

Toe te schrijven aan de paal:

- Een te zware paal vermindert de trillingsamplitude volgens de vergelijkingen (1) en (8). Anderzijds is een zware paal gunstig zoals blijkt uit de vergelijkingen (9) en (10). Hier moet een compromis worden gevonden.
- Wanneer de paal te elastisch is (bijvoorbeeld te kleine paaldoorsnede W), kan de trillingsamplitude te klein zijn aan de paalvoet, kan te veel dwarstrilling ontstaan waardoor de paal niet kan penetreren, en kan de paal worden beschadigd.
- Damplanken van slechte kwaliteit kunnen leiden tot een toename van de slotwrijving.

Toe te schrijven aan de bodem:

- Een te grote voetweerstand (bijvoorbeeld gesteente) leidt tot "springen" van de trilpaal.
- Toename van de grondweerstand ten gevolge van verdichting (bijvoorbeeld zand), zoals meer gedetailleerd wordt beschreven door Youd (1992).
- Onvoldoende vermindering van de dynamische grondweerstand (bijvoorbeeld harde klei). Sommige referenties behandelen dit onderwerp (Dobry en Vucetic, 1987; Holeyman en Legrand, 1994).
- Beperking van de trillingsamplitude van de paal ten gevolge van grond die aan de trilpaal blijft kleven (bijvoorbeeld stijve klei).
- Een te elastisch spannings-ervormingsgedrag van de grond leidt tot een onvoldoende verplaatsing van de paal ten overstaan van de grond (bijvoorbeeld klei).