



BEREKENING VAN ZETTINGEN VAN VERTICAAL BELASTE PALEN: METHODES VOOR HET AFLEIDEN VAN VERVORMINGSPARAMETERS

Inleiding

NBN EN 1997-1 "Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp – Deel 1: Algemene regels" werd in 2005 gepubliceerd in België en heeft een gemeenschappelijk Europees kader gecreëerd voor het ontwerp van geotechnische constructies. Als aanvulling op de EC7, werd in 2014 de Belgische nationale bijlage (ANB) gepubliceerd. Vertrekkende van de algemene EC7 geeft deze ANB een nationale invulling aan deze ontwerpnorm, onder meer met betrekking tot de te hanteren ontwerpbenadering, de ontwerpmethodes, de ontwerpfactoren, de veiligheidscoëfficiënten, enz.

Omdat historisch gezien in België geen geotechnische ontwerpnormen bestonden en daar er in de laatste decennia heel wat nieuwe technieken en methodes op de markt geïntroduceerd werden, zijn er de laatste jaren grote onderzoeksinspanningen gedaan om een wetenschappelijk draagvlak te ontwikkelen voor een uniforme implementatie van de EC7 in België.

Hoewel EC7 verplicht om naast de UGT controle eveneens een controle uit te voeren van de gebruik-

baarheidsgrenstoestand (BGT), zijn er in België hieromtrent geen richtlijnen beschikbaar. Voor paalfunderingen houdt dit in dat men verifieert of de vervormingen van de palen in alle fasen van de werken toelaatbaar zijn voor de nieuw op te richten constructie.

Courant, gaat men ervan uit dat de UGT-verificatie ook de BGT afdekt. Nochtans is het aangewezen om ook de paalzettingen te verifiëren, bv. in het geval van paaltypes die hun weerstand mobiliseren bij grotere verplaatsingen, bij zettingsgevoelige constructies, ...

In het licht van de hiervoor geschetste context en probleemstelling wordt in het kader van huidige WTCB-studies voorgesteld om de lacunes in België met betrekking tot de BGT-verificatie volgens Eurocode 7 op te vullen. Dit artikel heeft tot doel een beter inzicht te krijgen in het gedrag en het bepalen van zettingen van individuele verticaal belaste palen.

Methodes voor de bepaling van de zetting van individuele palen

WINKLER BENADERING – TRANSFERT FUNCTIES

De meest gebruikte methode is de Winkler benadering, waarbij de grond gemodelleerd wordt door middel van onafhankelijke veren. Figuur 1 illustreert het principe van de Winkler benadering. Bij axiale belasting van een paalfundering zal de grond een reactie op de paal uitoefenen langsheen de paalschacht en ter hoogte van de paalpunt. Deze grondreacties worden in deze benadering gesimuleerd door middel van onafhankelijke veren, waarbij iedere veer zijn eigen reactiecurve kan hebben. In de literatuur gebruikt men meestal de terminologie t-z curves indien het de paalschacht betreft en q-z curves indien het de paalpunt betreft.

De algemene differentiaalvergelijking voor de beweging van de paalschacht kan als volgt uitgedrukt worden:

$$\frac{d^2z}{dx^2} - \frac{\chi}{E_p A_p} t = 0 \quad (1)$$

Met z [m] de paalverplaatsing op diepte x [m], χ [m] de perimeter van de paal, E_p [kPa] de elasticiteits-

teitsmodulus van de paal, A_p [m²] de paalsectie en t [kPa] de gemobiliseerde wrijving op diepte x bij een paalverplaatsing z.

De algemene differentiaalvergelijking voor de beweging van de paalbasis is:

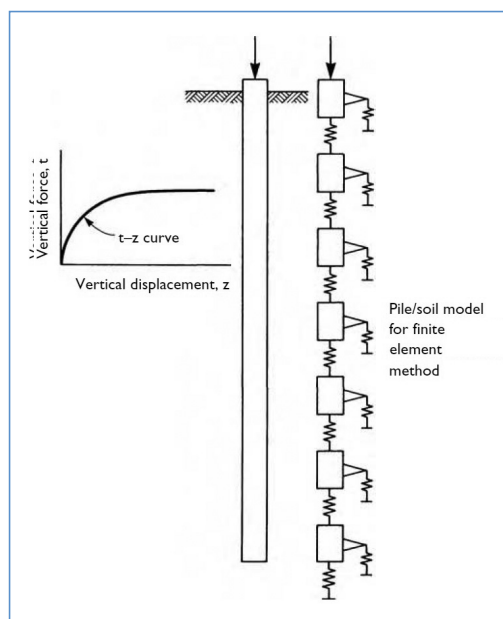
$$\frac{dz_b}{dx} - \frac{q A_b}{E_p A_b} = 0 \quad (2)$$

Met q [kPa] de reactie aan de paalbasis bij een paalbasiszakking z_b , z_b de paalbasiszakking en A_b de paalbasissectie.

In de literatuur kan men zeer veel verschillende benaderingen terugvinden voor de t-z en q-z transfertfuncties. Er kan hiervoor onder andere verwezen worden naar American Petroleum Institute (API) (1993), Gwizdala et Tejchman (1993), Reese et O'Neill (1987), Vijayvergiya (1977), enz. De meeste transfertfuncties zijn afhankelijk van de grondsoort (zand of klei) en van het paaltype. Voor het opstellen van dergelijke transfertfuncties wordt meestal gebruik gemaakt van de intrinsieke grondparameters zoals de ongedraineerde cohesie c_u of de hoek van inwendige wrijving ϕ' . Omtrent de correlaties tussen deze benaderingen en de resultaten van in-situ grondonderzoeksmethoden, zoals sonderingen bv. (CPT), is er weinig tot geen literatuur beschikbaar.

De grondreacties bij een verticale paalverplaatsing (t-z/q-z curves) zijn typisch niet lineair. Meerdere mathematische functies kunnen aangewend worden om deze niet-lineaire reactie weer te geven (zoal bv. machtsfuncties, exponentiële en hyperbolische functies). Vroegere werken bevelen voor de t-z curves in het algemeen vooral machtsfuncties of hyperbolische functies aan. Hierbij kan er nog verwezen worden naar de grafische inverse helling methode van Chin (1970), de hyperbolische vergelijkingen van Chin en Vail (1973), de hyperbolische transfert functie van Caputo & Viggiani (1984), en Fleming (1992) en meer recent de hyperbolische transfertfunctie van (De Cock, 2008).

Bij het opstellen van dergelijke functies is het uiteraard de bedoeling om aan de hand van back-calculation een zo goed mogelijke overeenkomst te

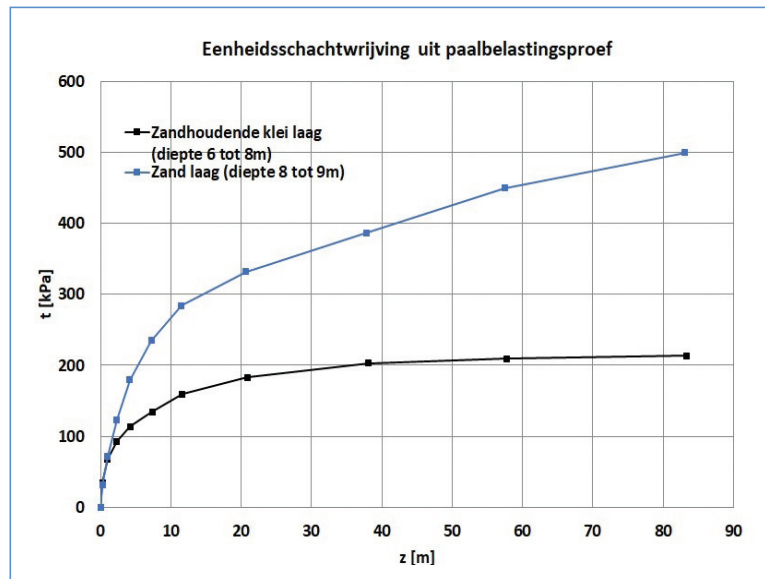


Figuur 1 – Illustratie van de Winkler benadering – modellering van de grond d.m.v. onafhankelijke veren (Tomlinson, 2001).

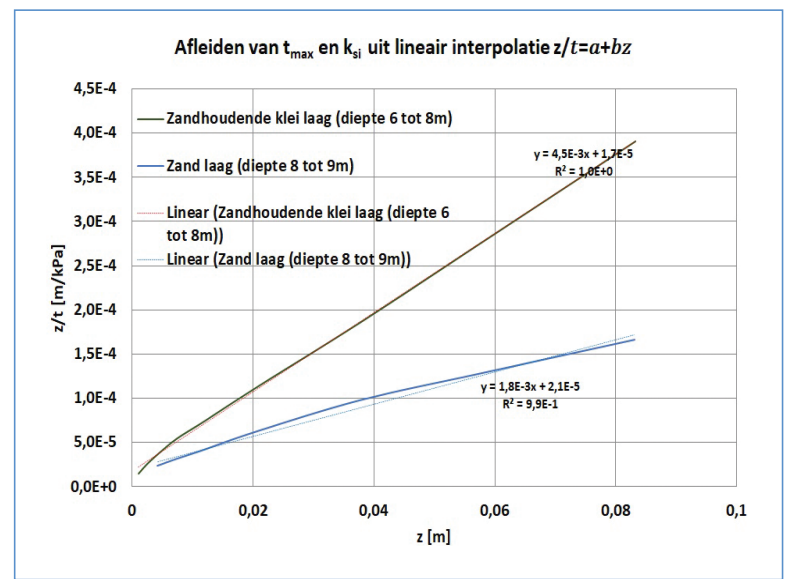
SAMENVATTING

Tot op heden is de aandacht in België hoofdzakelijk uitgegaan naar het ontwerp van palen in de uiterste grenstoestand (UGT). Nochtans verplicht EC7 om naast de UGT controle eveneens een controle uit te voeren van de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT). In het kader van een door de NBN-FOD Economie

gesubsidieerde prenormatieve studie [WTCB (2017-2019)] zijn, op basis van een uitgebreide verzameling van belastingsproeven op paalfunderingen in België, methodes opgesteld voor het afleiden van de zetting van een individuele paal. Deze methodes worden in dit artikel voorgesteld.



Figuur 2 – a) mobilisatiecurves van de eenheidsschachtwrijving (=experimentele T-z curves uit de paalbelastingsproef) voor de verschillende grondlagen.



b) Bepaling van de constanten t_{max} en k_{si} uit de hyperbolische transfertfuncties d.m.v. inverse analyse van de resultaten van een statische paalbelastingsproef op een grondverdringend schroefpaal (C4) te Limelette.

bekomen met de resultaten uit een reële paalbelastingsproef.

Na een zeer uitgebreide literatuurstudie omtrent beschikbare methodes voor het berekenen van zettingen van verticaal belaste palen werd overeengekomen om de methodes van hyperbolische transfertfuncties, toe te passen. Deze methodes zijn opgesteld voor de meest courante paaltypes en grondtypes in België. Men heeft zich hiervoor gebaseerd op de uitgebreide database van geïnstumenteerde paalbelastingsproeven in België die bij het WTCB beschikbaar is.

Type-curves

Met transfert functies worden theoretische onderbouwde tools ontwikkeld die geïmplementeerd kunnen worden in numerieke programma's voor het berekenen van de zetting van een paalfundering onder een welbepaalde belasting.

Met type-curves is het de bedoeling om een eerder pragmatische methodiek aan te reiken, die toelaat om een vrij snelle inschatting te maken van de te verwachten paalzakking. Deze aanpak inspireert zich op de methode die is opgenomen in de NEN 9997-1 +C1 (2012), en bestaat erin om voor verschillende paaltypes een genormaliseerd last-zakkingsdiagramma op te stellen, waaruit dan vrij eenvoudig de te verwachte paalzetting onder een welbepaalde belasting kan afgeleid worden.

Ook voor het opstellen van dergelijke type-curves

is er uitgegaan van de uitgebreide database van geïnstumenteerde paalbelastingsproeven in België die bij het WTCB beschikbaar is.

Verzamelen en verwerken van bestaande cases

In eerste instantie is er een uitgebreid overzicht gemaakt van de beschikbare proefgegevens op paalfunderingen in België (BBRI (2001) en Holeyman et al (1997) voor de proefbelastingen die gerealiseerd werden in de periode [1970-1996] en cf. BBRI (2003) en Huybrechts et al. (2016) voor de recente proefbelastingen in de periode [1997 – 2015]). In totaal werden er 100-tal paalbelastingsproeven geanalyseerd. Voor elke proef waren hierbij de volgende meetgegevens beschikbaar:

- de aangebrachte paalkopbelasting Q en de zetting van de paalkop in functie van de tijd;
- de kruipcurve;
- het afgeleide normaalkrachtenverloop in de paal met de diepte;
- het last zakkingsdiagramma van de paalkop opgesplitst in punt draagvermogen en schachtwrijving;
- de curves van de eenheidsschachtwrijving voor de verschillende lagen.

Op basis van dit zeer uitgebreid overzicht is vervolgens een selectie gemaakt van proeven op basis van de volgende criteria: algemeen kwaliteitsniveau van de proef, de toegepaste instrumentatie

van de paal, de hoeveelheid en het type grondonderzoek, enz. De gegevens zijn gehergroepeerd naargelang grondtype en paalttype.

Opstellen van hyperbolische transfertfuncties

INVERSE BEREKENING

De transfertfuncties nemen de volgende vorm aan voor respectievelijk de reactie ter hoogte van de schacht t [kPa] en de reactie aan de paalbasis q [kPa] als de paal een verplaatsing z ondergaat:

$$t = \frac{z}{\frac{1}{k_{si}} + \frac{z}{t_{max}}} \quad (3)$$

$$q = \frac{z_b}{\frac{1}{k_b} + \frac{z_b}{q_{max}}} \quad (4)$$

Waarbij

t_{max} [kPa] maximale wrijvingweerstand, k_{si} [kN/m³] een stijfheidsparameter van grondlaag i , q_{max} de maximale basisweerstand en k_b [kN/m³] een stijfheidsparameter grond aan paalbasis.

Men gaat uit van een hyperbolische functies (Eq 3 en 4):

$$\frac{z}{t} = a_1 + a_2 z \quad (5)$$

$$\frac{z_b}{q} = b_1 + b_2 z_b \quad (6)$$

Waarbij

$$a_1 = 1/k_{si}, \quad b_1 = 1/k_b, \quad a_2 = 1/t_{max} \quad \text{en} \quad b_2 = 1/q_{max}.$$

Op basis van de experimentele t-z curves uit de statische paalbelastingproeven zijn, zoals geïllustreerd in figuur 2a, de constanten t_{max} en k_{si} , die voorkomen in de hyperbolische transfertfuncties voor de schachtwrijving, door middel van inverse berekening afgeleid (figuur 2b). Op een gelijkaardige manier kunnen uit de experimentele gegevens van de paalbelastingproeven door middel van inverse berekening de constanten q_{max} en k_b van de hyperbolische transfertfunctie voor de paalbasis afgeleid worden.

Voorgaande inverse analyse van een hele reeks paalbelastingproeven op verschillende paaltypes op verschillende sites is vervolgens onderworpen aan een parameteranalyse, met de bedoeling om dimensieloze weerstands- of reactiecurves van de palen op te stellen.

De belasting (zowel de schachtwrijving als de paalbasisweerstand) worden daarbij uitgedrukt in verhouding tot de grenswaarde van het paaldragvermogen en de paalzakking wordt uitgedrukt in verhouding tot de schacht/basis-diameter van de paal. Volgens verschillende auteurs (Fleming, 1992 en De Cock, 2008), is er een relatie tussen de stijfheidsparameter k_{si} en de dimensieloze flexibiliteitsfactor M_s volgens:

$$M_s = \frac{t_{max}}{k_{si}d} \quad (7)$$

Met d de diameter van de paalschacht.

Op deze manier kan k_{si} afgeleid worden in functie van de maximale weerstand t_{max} . De waarden van M_s bevinden zich volgens (Fleming, 1992) en (Castelli et al., 2002) meestal tussen 0.005 en 0.0005. Door M_s te integreren in de hyperbolische vergelijking van de transfertfunctie voor de schachtwrijving bekomt men een dimensieloze curve. Figuur 3a geeft de vorm aan van dergelijke reactiecurves voor verschillende waarden van M_s ($M_s = 0.0045$ voor eerder slappe grond en $M_s = 0.0005$ voor stijve grond).

Een dimensieloze weergave van de reactie van de paalpuntweerstand is wat complexer. (Fleming, 1992) baseert zich hiervoor op de zetting van een cirkelvormige fundering volgens de theorie van Boussinesq (1985):

$$z_b = \frac{\pi q d_b (1-\nu^2)}{4E_b} f_1 \quad (8)$$

Waarbij E_b [kPa] de elasticiteitsmodulus van de grond onder de paalbasis, ν de coëfficiënt van Poisson, d_b de diameter van de paalbasis en f_1 een invloedscoëfficiënt.

De elasticiteitsmodulus van de grond onder de paalbasis E_b die toegepast wordt, wordt afgeleid bij een belasting van 25 % van de maximale weerstand q_{max} . Men kan vervolgens een verband afleiden tussen k_b en E_b door de voorgaande lineair elastische vergelijking (Eq. 8 met $\nu = 0.3$ en $f_1 = 0.85$ voor cirkelvormige belasting) gelijk te stellen aan de hyperbolische transfertfunctie (Eq. 4).

$$k_b = \frac{E_b}{\beta} \quad (9)$$

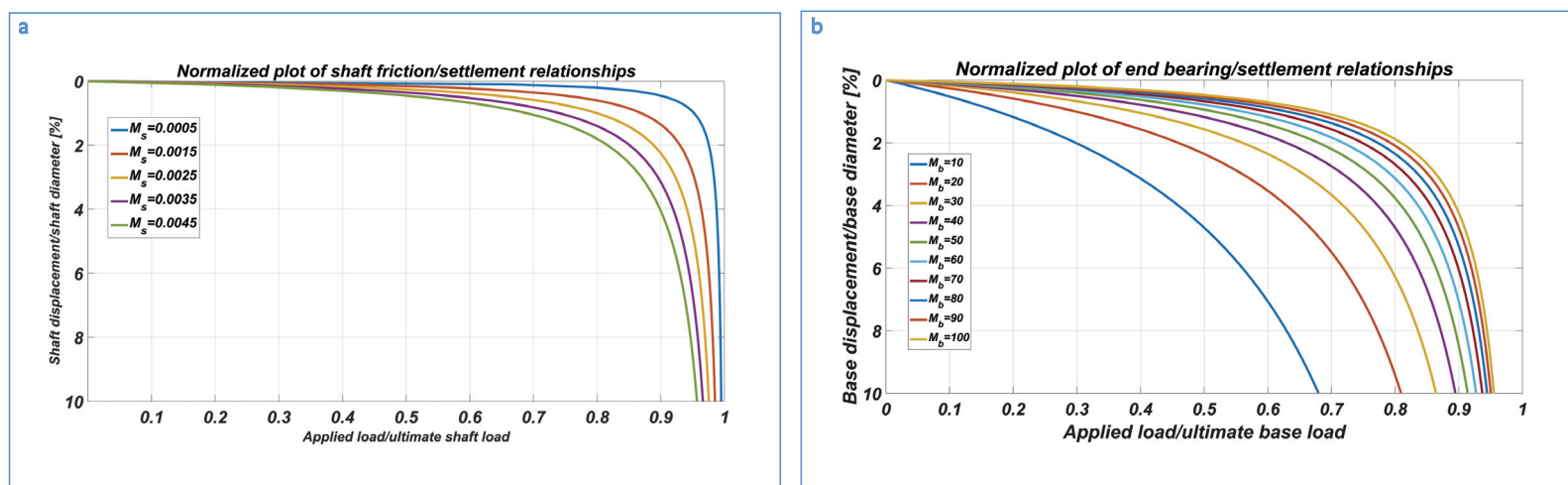
Met

$$\beta \approx \frac{0.58A_b}{d_b} \approx 0.145\pi d_b \approx 0.455d_b \quad (10)$$

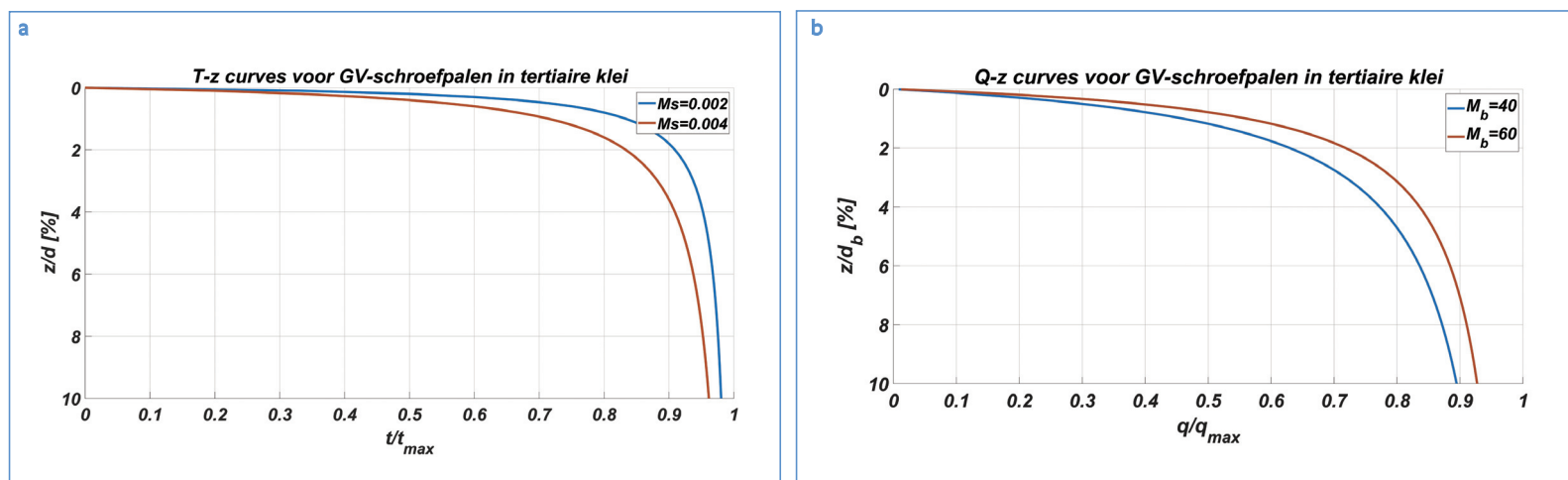
Figuur 3b geeft de genormaliseerde (of dimensieloze) curves weer van de reactie van de paalbasisweerstand voor verschillende waarden van M_b ($M_b = 10$ i.g.v. slappe grond en $M_b = 100$ i.g.v. stijve grond) met:

$$M_b = \frac{E_b}{q_{max}} \quad (11)$$

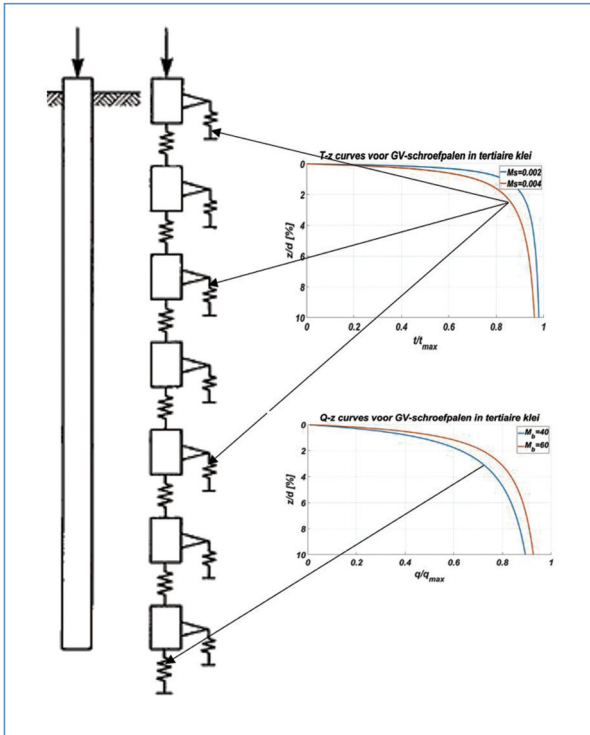
De hiervoor geïllustreerde analyse is toegepast op al de beschikbare experimentele resultaten, zodat er voor een welbepaalde paalsysteem dimensieloze type-transfertfuncties opgesteld zijn in verschillende grondsoorten zand, tertiaire klei en leem-zandhoudende klei/leem-kleihoudend



Figuur 3 - Genormaliseerde weerstandscurve voor a) de paalschachtwrijving en b) voor de paalbasisweerstand.



Figuur 4 - Dimensieloze curves voor voor grondverdringende schroefpalen in tertiaire klei a) schachtwrijving en b) paalbasisweerstand.



Tabel 1 – De dimensieloze flexibiliteitsfactor M_s in functie van paalsysteem en grondsoort

Grondsoort	Paalsysteem Geheide palen	Grondverdringende schroefpalen (GV-S)	CFA en boorpalen
Zand	$7 \cdot 10^{-3}$ à $11 \cdot 10^{-3}$ *	$7 \cdot 10^{-3}$ à $11 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-3}$ à $26 \cdot 10^{-3}$
Leem zandhoudende klei/leem kleihoudend zand/leem (L-Z-K)	$2 \cdot 10^{-3}$ à $6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$ à $6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$ à $12 \cdot 10^{-3}$
Tertiaire klei	$1 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-3}$ *	$2 \cdot 10^{-3}$ à $4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$ à $4 \cdot 10^{-3}$ *

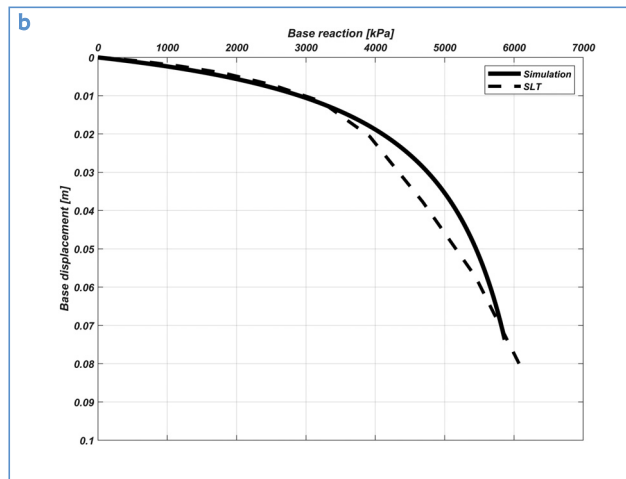
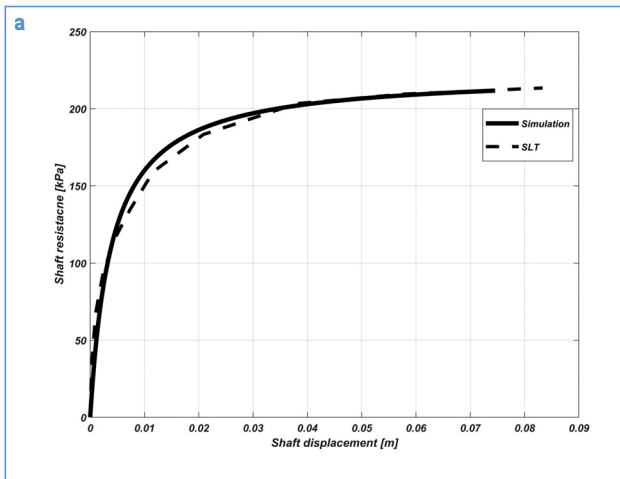
*Beperkt aantal of onvoldoende gegevens om factoren af te leiden.

Tabel 2 – De dimensieloze stijfheidsfactor M_b in functie van paalsysteem en grondsoort

Grondsoort	Paalsysteem Geheide palen	Grondverdringende schroefpalen (GV-S)	CFA en boorpalen
Zand	30 à 35	10 à 25	2 à 5
Leem zandhoudende klei/leem kleihoudend zand/leem (L-Z-K)	*	5 à 10^*	2 à 5^*
Tertiaire klei	100 à 120^*	40 à 60	2 à 5^*

*Beperkt aantal of onvoldoende gegevens om factoren af te leiden.

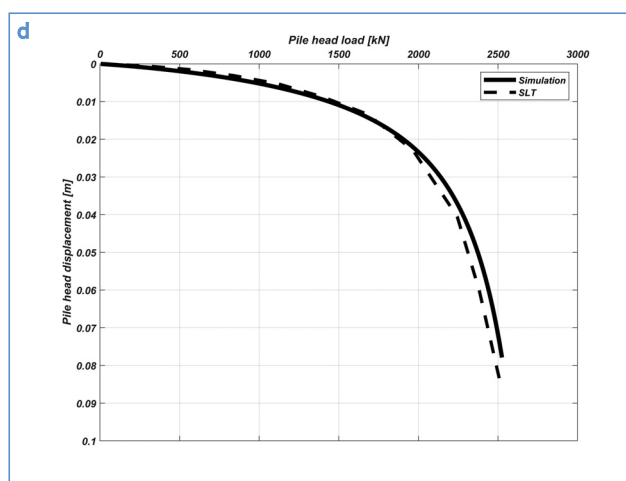
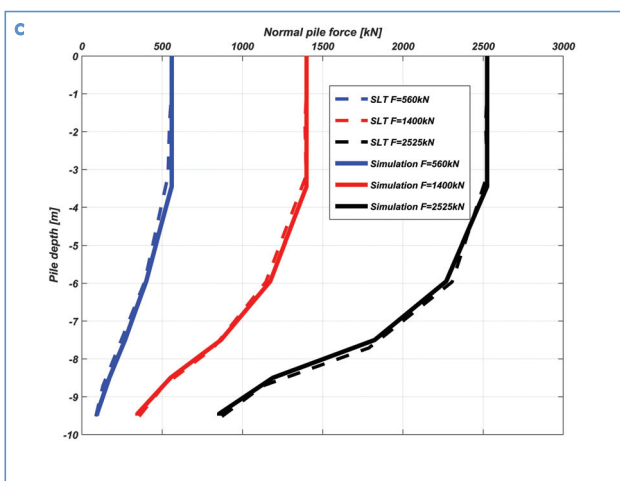
Figuur 5 – Structuur van de ontwikkelde numerieke programma's voor het bepalen van de zetting van alleenstaande axiaal belaste paal d.m.v. transfertfuncties.



Figuur 6 – Vergelijking van de simulatie met het berekeningsmodel en de experimentele resultaten voor paal C4 te Limelette:

a) mobilisatie van de eenheids-schachtwrijving

b) mobilisatie van de paalbasisweerstand



c) normaalkrachtverdeling in de paal en

d) Last zakkings-diagramma van de paalkop.

zand/ leem (genoteerd als L-Z-K).

Gezien het niet altijd evident is om de parameters M_s en M_b in te schatten, zijn op de dimensieloze type-curves telkens een ondergrens en bovengrens aangegeven. Figuren 4a en 4b tonen deze dimensieloze reactiecurves voor de schachtwrijving en de

paalbasisweerstand van grondverdringende schroefpalen (GV-S palen) in tertiaire klei.

De alzo uit deze studie afgeleide dimensieloze factoren M_s en M_b worden in functie van paalsysteem en grondsoort in Tabel 1 en Tabel 2 gegeven.

Herberekening en validatie

Deze dimensieloze transfertfuncties kunnen aangewend worden in numerieke programma's om de te verwachte zetting voor een alleenstaande axiaal belaste paal te berekenen. In het kader van deze prenormatieve studie is er op basis van een eindige

elementen model een numeriek programma ontwikkeld om de zettingen van alleenstaande palen te berekenen. In dit numerieke programma zijn de dimensieloze type-transfertcurves geïntegreerd (figuur 5).

Voor de validatie van de geïmplementeerde methode en van het ontwikkelde numerieke programma wordt een voorbeeld hieronder gegeven. Het betreft de grondverdringende schroefpaal C4 in Limelette (cf. BBRI (2001) voor meer details). De vervormingsparameters van t-z en q-z curves die afgeleid werden uit inverse berekening van de paalbelastingproefgegevens werden vervolgens geïntegreerd in het numerieke programma. Een goede overeenkomst is gevonden tussen experimentele en numerieke resultaten (figuur 6).

Toepassing in overeenstemming met EC7/Belgische richtlijnen

Vooraleer de vervormingsparameters k_s en E_b te berekenen door middel van dimensieloze factoren (Tabellen 1 en 2) is de berekening van maximale waarden (t_{max} en q_{max}) noodzakelijk. Hier wordt voorgesteld om de Belgische Rapport 19 (WTCB, 2016) "Richtlijnen voor de toepassing van de Eurocode 7 in België volgens de NBN EN 1997-1 ANB; Deel 1: het grondmechanische ontwerp in uiterste grenstoestand (UGT) van axiaal belaste funderingspalen op basis van statische sonderingen (CPT's)" te gebruiken.

Eerst worden de waarden van de paalbasisweerstand en de wrijvingsweerstand (genoteerd in dit artikel als $q_{b,10\%}$ en $t_{10\%}$) volgens Rapport 19 berekend ($t_{10\%} = \alpha_{s,i} q_{s,i}$ en $q_{b,10} = R_a/A_b$). De som van beide componenten geeft de totale draagkracht van de paalfundering en komt overeen met de belasting waarbij de paalbasis een zetting van 10% van de paalbasisdiameter ondergaat. De maximale waarden (t_{max} en q_{max}) kunnen dan afgeleid worden door middel van hyperbolische trans-

fertfuncties-vergelijking (Eq. 3 & 4):

$$t_{max} = t_{10\%}(1 + 10M_s) \quad (12)$$

en

$$q_{max} \approx q_{b,10\%} \left(1 + \frac{\beta}{M_b \frac{d_b}{10}}\right) \approx q_{b,10\%} \left(1 + \frac{4.55}{M_b}\right) \quad (13)$$

Ter illustratie wordt de voorgestelde berekeningsmethode toegepast voor een grondverdringende schroefpaal B2, die getest werd in Sint-Katelijne-Waver (cf. BBRI. (2003) voor meer details), waar de ondergrond uit tertiaire Boomse klei bestaat. De paal heeft een lengte van 11.73 m en een nominale diameter van 0.41m. Er worden vervormingsparameters $M_s=3 \cdot 10^{-3}$ en $M_b=60$ gebruikt in het numerieke programma voor dit voorbeeld.

In figuur 7 worden de resultaten van het numerieke programma vergeleken met de experimentele data en dit in termen van de last-zakking van de paalkop (Figuur 7a). Op deze manier verkrijgt men een vrij goede inschatting van de paalzetting vooral bij belastingen overeenkomstig de rekenwaarde van de belasting in BGT.

Een laatste opmerking betreft de invloed van de UGT parameters (q_{max} en t_{max}) voor een goed BGT-inschatting. Ter illustratie wordt de normaalkrachtverdeling in de paal vergeleken met de gemeten normaalkracht tijdens de paalproef voor een aantal belastingstappen (Figuur 7b). Het verschil tussen de numerieke en de experimentele waarden van de normaalkracht is vooral te wijten aan de berekening van de UGT waarden (q_{max} en t_{max}) met de methode opgenomen in Rapport 19, die wat kunnen afwijken van de experimentele bezwijkwaarden.

Opstellen van type-curves

Type-curves worden bepaald aan de hand van beschikbare experimentele gegevens, waarbij men paalsystemen en grondsoorten groepeerd. De last-zakkingdiagramma's zijn hierbij genormali-

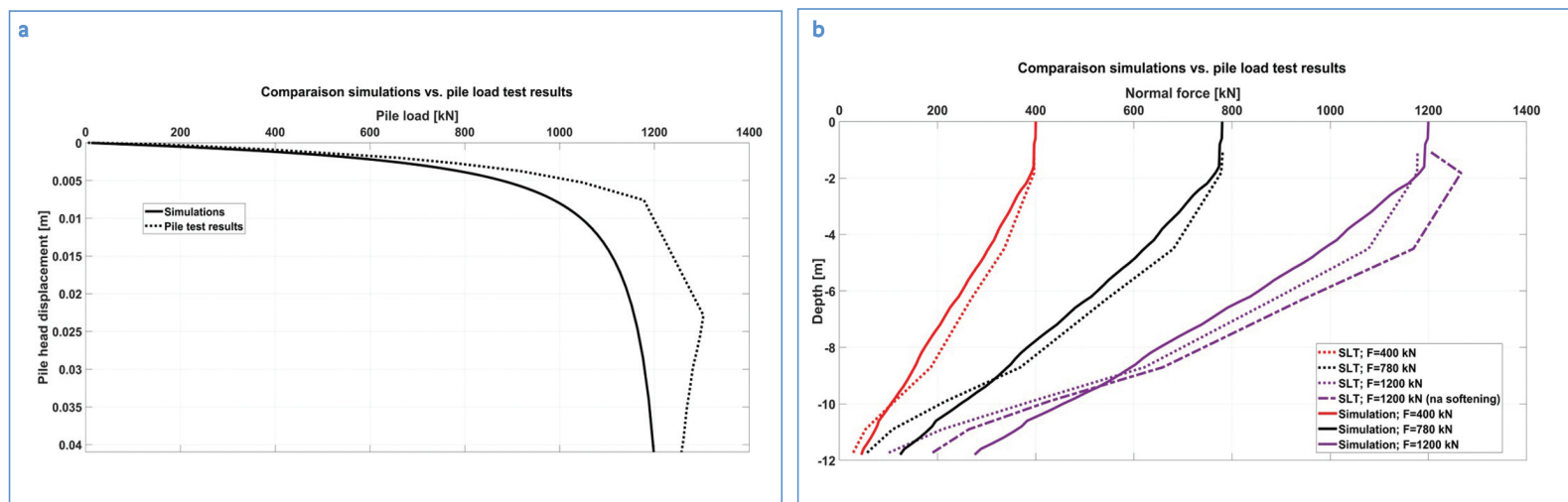
seerd. Dit betekent dat de belasting procentueel uitgedrukt wordt in verhouding tot de grenswaarde van de paalweerstand. De paalbasiszakking wordt procentueel uitgedrukt in verhouding tot de diameter van de paalbasis. Gezien de grenswaarde van de paalweerstand in België conventioneel is vastgelegd op de belasting bij een paalbasiszakking van 10% van de paalbasisdiameter, is het logisch dat de genormaliseerde curves allen door hetzelfde punt lopen bij een paalbasiszakking van 10% van de diameter.

Deze analyse is uitgevoerd op een groot aantal palen uit de experimentele database, aan de hand van dewelke een voorstel van genormaliseerde last-zakkingcurves voor de in België gangbare paalsystemen en grondsoorten uitgewerkt is, en dit naar analogie met de principes opgenomen in de Nederlandse norm (NEN 9997-1). Het voordeel van een dergelijke vereenvoudigde methode is dat ze toelaat om aan de hand van de resultaten van de UGT berekeningsmethode conform WTCB Rapport 19 en NBN EN-1997 +ANB, een snelle inschatting te verkrijgen van het zettingsgedrag van een alleenstaande paalfundering.

Figuur 8 t/m 10 illustreren de type-curves die, op basis van de analyse van database gegevens, opgesteld werden voor geheide palen, grondverdringende schroefpalen en CFA & Boorpalen in respectievelijk zand, leem en heterogene grondsoorten en in tertiaire klei. De type-curves in de figuren 8 t.e.m. 10 vormen hierbij eerder een voorzichtig inschatting op basis van de experimentele gegevens.

Op basis van voorgestelde type-curves kan de zakking van de paalpunt afgeleid worden. Hierbij gaat men als volgt te werk:

- Eerst dient rekenwaarde van de belasting in BGT (F_{rep}) bepaald te worden.
- Vervolgens worden de paalbasisweerstand R_b en de schachtwrijving R_s van de paal berekend



Figuur 7a-b - Vergelijking van de simulatie met het berekeningsmodel en de experimentele resultaten voor paal B2 te Sint-Katelijne-Waver: a) Last zakkingsdiagramma van de paalkop, en b) normaalkrachtverdeling in de paal voor een aantal belastingstappen.

conform Rapport 19.

- Bij een welbepaalde paalbasiszakking kan men dan uit de figuren 8 t/m 10 afleiden welk aandeel/percentage van de paalbasisweerstand ($R_{b,mob}/R_b$) en de schachtwrijving ($R_{s,mob}/R_s$) gemobiliseerd worden.
- De verwachte paalbasiszakking komt dan overeen met die waarde waarbij de som van de absolute waarden van de gemobiliseerde paalbasisweerstand ($R_{b,mob}$) en schachtwrijving ($R_{s,mob}$) uit figuren 8 t/m 10 gelijk is aan de F_{rep} .

De paalkopzakking kan vervolgens bepaald worden door deze te vermeerderen met de elastische samendrukking van de paal zelf.

Gezien er een analogie bestaat tussen de type-curves en de transfertfuncties, bestaat er de mogelijkheid om verschillende type-curves voor een bepaald paaltype te combineren, bv. de type-curve voor de paalbasisweerstand uit figuur 8 (zand), met de type-curve voor de schachtwrijving uit figuur 9 (leem).

Deze methode is toepasbaar in het geval dat er een eerder homogene grondgelaagdheid bestaat langsheen de paalschacht. Voor lange palen is deze methode minder geschikt.

Besluit

In dit artikel zijn twee methodes voorgesteld om de zettingen van verticaal belaste palen in te schatten.

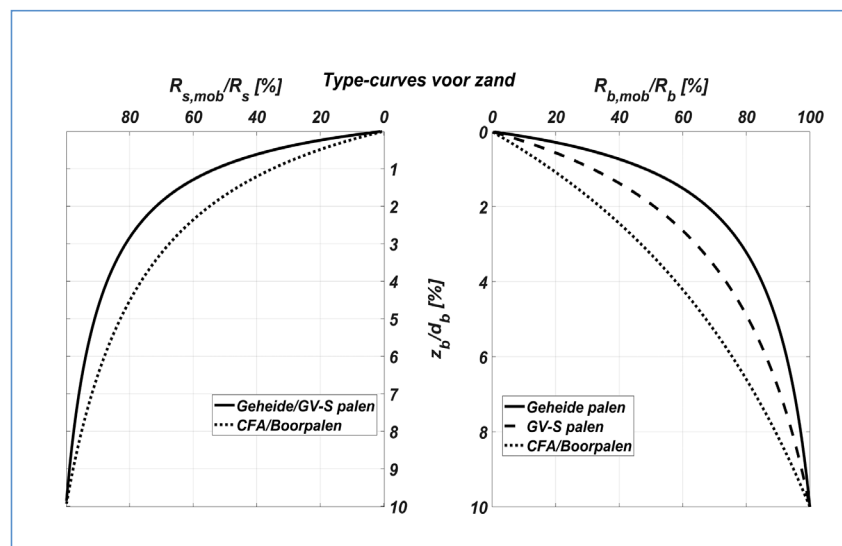
In een eerste methode zijn er hyperbolische transfertfuncties, gebaseerd op de benadering van Winkler, voorgesteld. De voorgestelde methode werd geïmplementeerd in numerieke programma's voor validatie. De methode biedt enerzijds de mogelijkheid om een goede inschatting te maken van de verplaatsing van de paal onder een welbepaalde belasting en anderzijds laat ze toe om het normaalkrachtverloop in de paal te bepalen.

De tweede methode met type-curves is een eerder pragmatische methodiek, die toelaat om een vrij snelle inschatting te maken van de te verwachten paalzakking. De methode is echter alleen maar toepasbaar in het geval van een eerder homogene grondgelaagdheid langsheen de paalschacht (althans in de weerstandbiedende lagen) en voor paalfunderingen met een beperkte lengte (minimale mobilisatie van de paalbasisweerstand vereist).

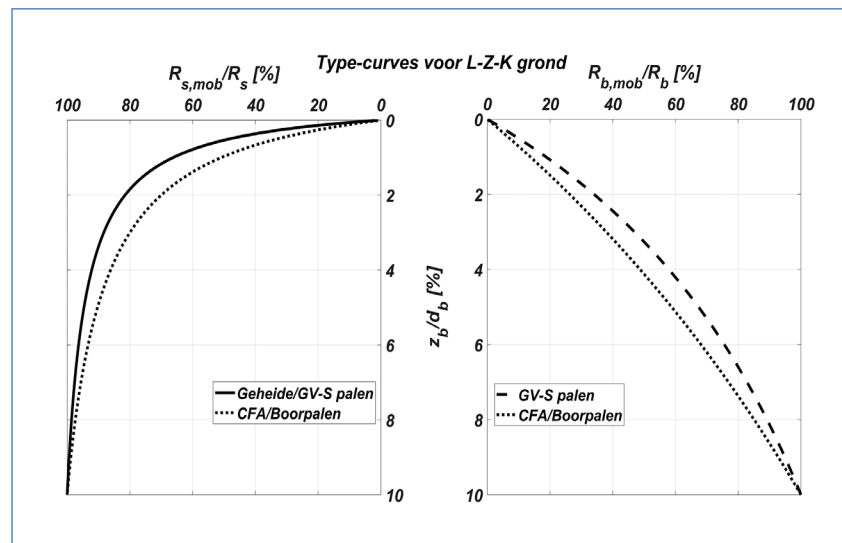
Beide methodes werden opgesteld voor de meest courante paaltypes en grondtypes in België op basis van een uitgebreide database van geïnstrumenteerde paalbelastingsproeven in België en bieden een houvast om de te verwachten zettingen van alleenstaande palen die axiaal op druk belast worden in te schatten.

De voorgestelde methodes zullen in de nabije toekomst nog wel ter discussie voorgelegd worden aan de Belgische normalisatiecommissie voor de Eurocode 7 met de bedoeling ze op termijn om te

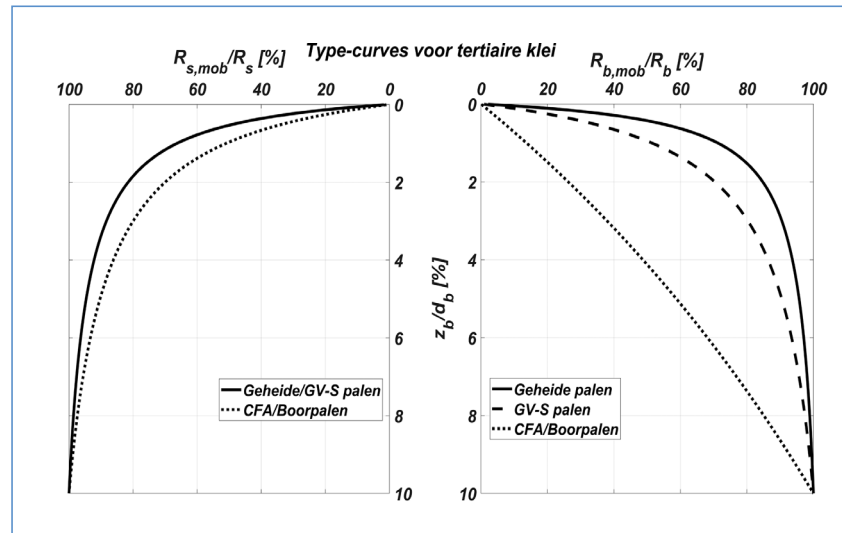
Figuur 8 –
Voorstel van type curves voor zand.



Figuur 9 –
Voorstel van type curves voor Leem en heterogene grond.



Figuur 10 –
Voorstel van type curves voor tertiaire klei.



zetten in "Belgische" BGT methode ter bepaling van het zettingsgedrag van alleenstaande palen.

Literatuur

- American Petroleum Institute (API) (1993), Recommended practice for planning, designing and construction Fixed offshore platforms: Working stress design, API RP 2A-WSD. American

Petroleum Institute, Washington, DC.

- BBRI. (2001). Screw Piles-Installation and Design in Stiff clay. In A. E. Holeyman (Red.), Proceedings of the symposium on screw piles. Brussels, Belgium: A.A Balkema.
- BBRI. (2003). Belgian screw pile technology- Design and recent developments. In J. M. Huybrechts (Red.). Brussels; Belgium: A.A. Balkema.

- Boussinesq, J. (1885) Applications des Potentiels à L'étude de L'équilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
- Caputo, V., Viggiani, C., 1984. Pile foundation analysis: a simple approach to nonlinearity effects. Riv. Ital. Geotec. 18 (2), 32–51
- Chin, F. (1970). Estimation of the ultimate load on piles from tests not carried to failure. Proc. 2nd South East Asian Conference on Soil Mech. and Found. Eng. (pp. 81-92). Singapore.
- Chin, F. K., and Vail, A. J. (1973): Behavior of piles in alluvium, Proc., 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Moscow, Soviet Union, 2.1, 47-52.
- Fleming W.G.K.; (1992). A new method for single pile settlement prediction and analysis, Geotechnique no 42, vol3, pp411-425
- De Cock, F. (2008). Sense and sensitivity of pile load-deformation behaviour. Proceedings of the 5th international conference on Bored and Auger Piles – BAP V, Ghent
- Gwizdala, K., & Tejchman, A. (1993). Evaluation of bearing capacity and settlement of Wolfsholz piles bored into layered subsoil. In V. Impe (Red.), Deep Foundations on Bored and Auger piles (pp. 285 – 288). Rotterdam: Balkema,.
- Holeyman, A., Bauduin, C., Bottiau, M., Debacker, P., De Cock, F., Dupont, E., Hilde, J.L., Legrand, C., Huybrechts N., Mengé P., Simon G. 1997. Design of axially loaded piles – Belgian practice. Proceedings of the ERTC3 seminar, Brussels.
- Huybrechts, N., De Vos, M., Bottiau, M. & Maertens, L. 2016. Design of piles – Belgian practice. Proceedings of the ISSMGE – ETC3 International Symposium on Design of Piles in Europe, Leuven, Belgium.
- Maertens, J. & Huybrechts, N. (eds). 2003b. Belgian screw pile technology – design and recent developments. Proceedings of the 2nd symposium on screw piles, Brussels 7 May 2003. Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clays. Proceedings of the II Annual Offshore Technology Conference, (pp. 577-594). Houston, Texas.
- NEN 9997-1 +C1 (2012). Geotechnische ontwerp van constructies-Deel 1: algemeen.
- Reese, L. O'Neill. (1987). Drilled shafts: construction procedures and design method.
- Tomlinson, M. J. (2001). Pile design and construction practice. London, England: Spon Press.
- Vijayvergiya, N. V (1977), soil-pile interaction for offshore structures, Proceedings 14th annual meeting of the society of Engineering Science. Inc Bethlhem, Pa.
- WTCB, 1998-2000. Grondverdringende Schroefpalen: calibratie van semi-empirische berekeningsmethoden met inbegrip van automatisering van statische paalbelastingsproeven. Onderzoeksproject gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken, Conventie CCCIF – 562.
- WTCB, 2000-2002. Grondverdringende Schroefpalen: calibratie van semi-empirische berekeningsmethoden met inbegrip van optimalisatie van statische paalbelastingsproeven. Onderzoeksproject gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken, Conventie CC-CI – 756.
- WTCB, 2002 – 2004. Valoriatie van statische paalbelastingsproeven en ontwikkeling van een geharmoniseerde berekeningsmethode voor het axiaal draagvermogen van palen Onderzoeksproject gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken, Conventies CC-CIF 964.
- WTCB. (2016). Richtlijnen voor de toepassing van de Eurocode 7 in België volgens de NBN EN 1997-1 ANB. Deel 1: het grondmechanische ontwerp in uiterste grenstoestand (UGT) van axiaal belaste funderingspalen op basis van statische sonderingen (CPT's) (herziening van Rapport nr. 12).
- WTCB 2017-2019 ; GEBRUIKSGRENSTOESTAND VAN GEOTECHNISCHE CONSTRUCTIES II: Methodes voor het afleiden van vervormingsparameters van de grond, het berekenen van vervormingen van geotechnische structuren & richtlijnen voor toelaatbare vervormingen. Onderzoeksproject gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken, Conventie CCN/NBN/PN18B07. ●