

Tubex-groutinjectiepalen proefbelast voor Metrostation CS in Rotterdam

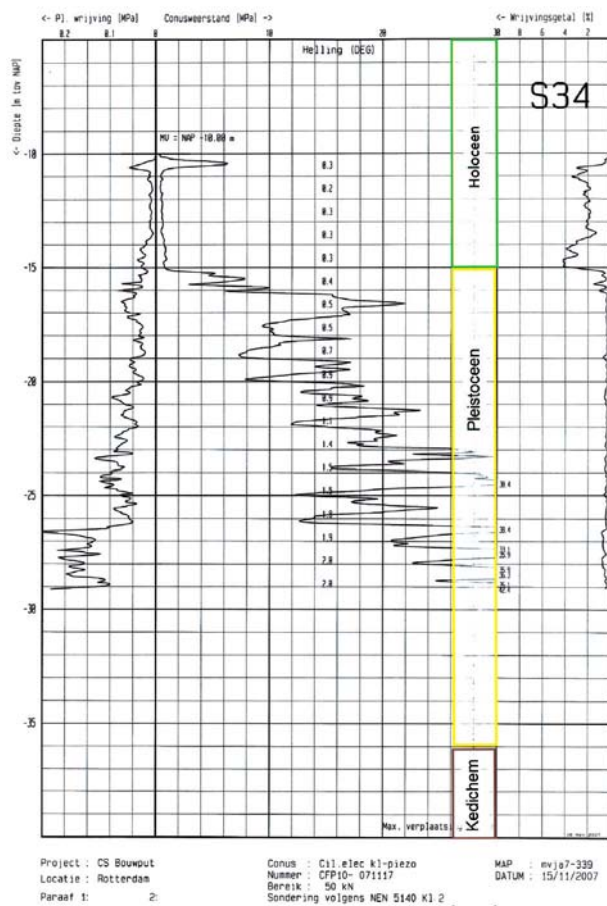
ir. Rodriaan Spruit
Ingenieursbureau
Gemeentewerken
Rotterdam



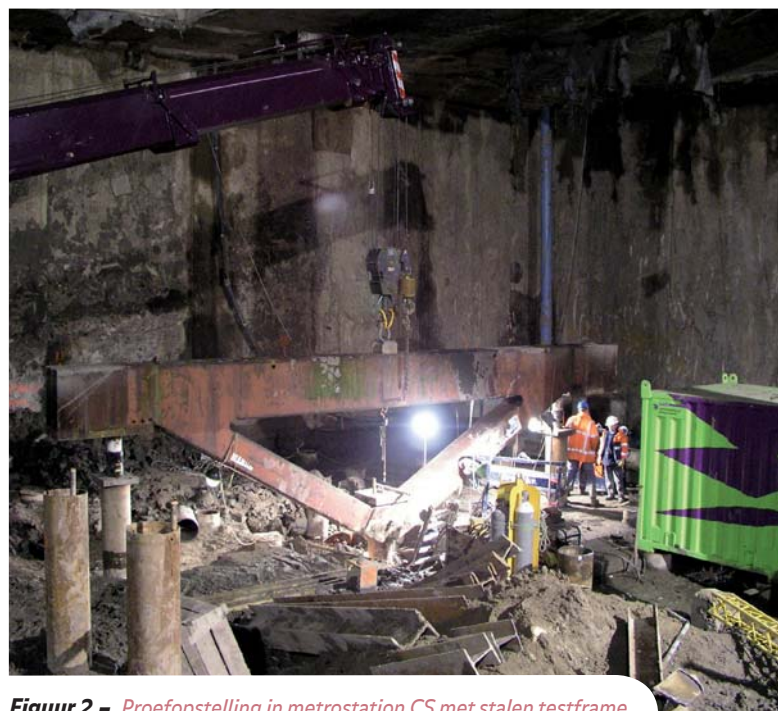
ir. Geerhard Hannink
Ingenieursbureau
Gemeentewerken
Rotterdam



ir. Diederik van Zanten
Ingenieursbureau
Gemeentewerken
Rotterdam



Figuur 1 - Representatieve sondering.



Figuur 2 - Proefopstelling in metrostation CS met stalen testframe.

Inleiding

Metrostation CS in Rotterdam is ten behoeve van de aansluiting met RandstadRail recent omgebouwd van een tweesporig naar een driesporig metrostation. Daar was een groter station voor nodig dat om het bestaande station heen is gebouwd. De daarvoor benodigde bouwkuip bestaat uit diepwanden tot NAP -38 m zodat deze aansluiten op de op die diepte aanwezige waterremmende laag van Kedichem. Binnen de zo ontstane tijdelijke polder is in het grootste deel van de bouwkuip ontgraven tot NAP -10 m en onder het oude metrostation tot NAP -14 m. De nieuwe vloer van het station die deels onder het oude station door is aangebracht, wordt tegen opdrijven verankerd met behulp van Vibro-combinatiepalen naast het bestaande metrostation en

Tubex-groutinjectiepalen onder het oude metrostation. De hart op hart afstand van de trekpalen is over het algemeen tussen 2 en 2,5 m. De stijghoogte in het eerste watervoerend pakket is ongeveer NAP -2 m. De freatische grondwaterstand ligt buiten de bouwkuip op ongeveer NAP -2 m.

Er was maar een beperkte werkruimte onder het metrostation aanwezig waardoor de Tubex-groutinjectiepalen in secties van 3 m lengte moesten worden aangebracht. Hierdoor werd bij het oplossen van elke nieuwe sectie het inbrengproces voor enige tijd onderbroken.

Bij het maken van de Tubex-groutinjectiepalen werden problemen ondervonden met het op de gewenste einddiepte krijgen van de palen. Bij het conform bestek toepassen van een water-cement

factor van 0,5 in combinatie met grouten over de gehele draagkrachtige zandlaag, liepen de palen voor het bereiken van de einddiepte vast.

Door een hogere water-cement factor toe te passen, konden de palen wel op diepte worden geboord. Met deze hogere water-cement factor was het onzeker of het benodigde draagvermogen kon worden gerealiseerd. Er zijn daarom proefbelastingen uitgevoerd op een aantal geïnstalleerde palen.

De proeven hadden tot doel om aan te tonen dat het benodigde draagvermogen kon worden gemobiliseerd en tevens of de in CUR-rapport 2001-4 vermelde paalklassefactor α_t van 0,009 wordt gehaald.

Samenvatting

Bij de verbouwing van Metrostation CS in Rotterdam zijn zowel Tubex-groutinjectionpalen als vibro-combinatiepalen toegepast voor de verankering van de stationsvloer. Bij het maken van de Tubex-groutinjectionpalen werden problemen ondervonden met het op de gewenste einddiepte krijgen van de palen.

Door grout met een hogere water-cement factor toe te passen, konden de palen wel op diepte worden geboord. Met deze hogere water-cement factor was het echter onzeker of het benodigde draagvermogen werd gerealiseerd. Er zijn daarom proefbelastingen uitgevoerd op een aantal geïnstalleerde palen. De proeven hadden tot doel om aan te tonen dat het benodigde draagvermogen werd

gemobiliseerd. Het artikel gaat in op de gebruikte testopstelling, waarna de testresultaten worden besproken. De proefbelastingresultaten zijn met een eindige elementen model gesimuleerd zodat de schachtwrijvingsfactor kon worden terugerekend. De uitvoeringswijze blijkt een grote invloed te hebben op het behaalde draagvermogen. Waarschijnlijk als gevolg van de groutinjection lijkt de maximale schachtwrijving vrijwel onafhankelijk van de grootte van de vooraf gemeten conusweerstand in de draagkrachtige laag. Daarnaast bleek het bezwijkgedrag van de geteste Tubex-groutinjectionpalen relatief bros te zijn vergeleken met andere typen palen.

Grondopbouw en geteste palen

Het zandpakket waarin de palen hun draagkracht moeten mobiliseren vangt aan op NAP -16 m met een gemiddelde conusweerstand van 10 MPa. Op een diepte van NAP -30 m is de gemiddelde conusweerstand opgelopen tot ongeveer 25 MPa, zie figuur 1.

De toegepaste Tubex-groutinjectionpalen hebben een buisdiameter van 406 mm met een wanddikte van 11,6 mm. De puntdiameter is 560 mm.

Voor het dimensioneren van de testbelasting is uitgegaan van:

$$\begin{aligned} L_{\text{grout}} &= 12 \text{ m} \\ O &= 1,76 \text{ m} \\ q_{c;\text{gem}} &= 17 \text{ MPa} \\ \alpha_t &= 0,009 \end{aligned}$$

Er wordt dan theoretisch een P_{test} gevonden van 3.230 kN, want $P_{\text{test}} = L_{\text{grout}} \cdot O \cdot q_{c;\text{gem}} \cdot \alpha_t$. Als maximale testbelasting is om praktische redenen de afgeronde waarde van 3.000 kN aangehouden of lager indien de paal eerder bleek te bezwijken (doorgaande vervorming bij gelijke belasting of een te grote kruipmaat).

Er zijn steeds twee palen van in totaal drie groepen getest (totaal zes palen):

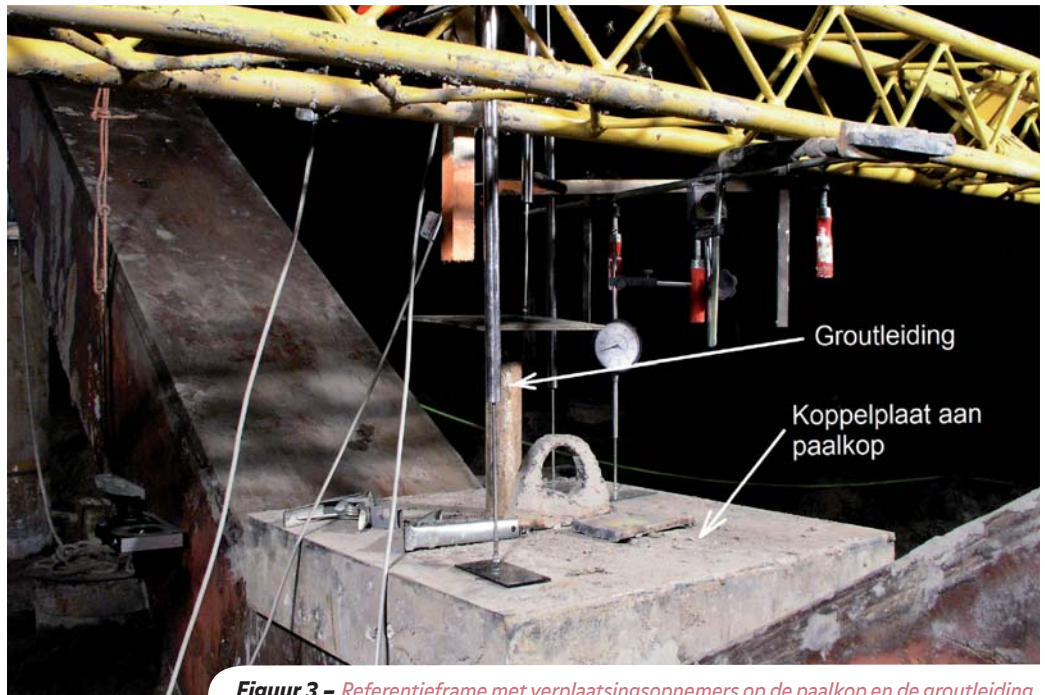
Groep 1: De paal wordt tot op 0,25 m na op diepte gebracht met een dun groutmengsel. Vervolgens wordt de paal 3 m opgetrokken en wordt gelijktijdig gegroot (water-cement factor 0,8). Daarna wordt de paal met gelijktijdig grotten weer op diepte gebracht totdat het grout het maaiveld bereikt. Tot slot wordt de paal de laatste 0,25 m tot einddiepte gedraaid nadat de aanvoer van grout is gestopt.

Groep 2: De paal wordt op diepte gebracht met een dun groutmengsel, waarna de paal wordt afgegroot met grout met een water-cementfactor van 0,8 totdat er grout aan maaiveld wordt waargenomen.

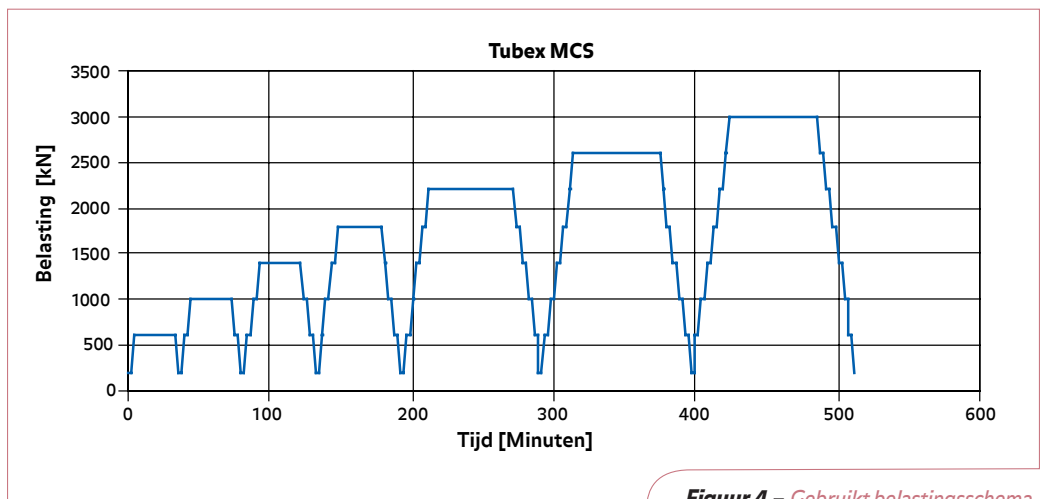
Groep 3: De paal wordt op gelijke wijze gemaakt als bij groep 2, maar wordt 3 m minder diep geplaatst (paalpuntniveau NAP -25 m in plaats van NAP -28 m).

Proefprocedure en -opstelling

De palen zijn in december 2007 en januari 2008



Figuur 3 – Referentieramen met verplaatsingsopnemers op de paalkop en de groutleiding.



Figuur 4 – Gebruikt belastingsschema.

proefbelast. De proefprocedure is gebaseerd op NEN 6745-2, waarbij voor het bepalen van het bezwijkgedrag gebruik wordt gemaakt van de kruipmaat conform CUR 166 in plaats van het kruipcriterium van NEN 6745-2. Het kruipcriterium van NEN 6745-2 is gedefinieerd als 0,2 mm

per uur. Deze maat wordt vaak pas na vele uren behaald, terwijl het logaritmische kruipcriterium van de CUR 166 meestal al na 15 à 30 minuten stabiliseert. Ervaring met diverse conform NEN 6745-2 uitgevoerde proefbelastingen leert dat het logaritmische kruipcriterium minstens zo be-

trouwbaar is en voor de laatste 2 belastingstappen samen al snel 3 tot 4 uur besparing kan opleveren. De proeven zijn in de ontgraven bouwkuip op ongeveer NAP -10 m uitgevoerd. Met een voor het testen van MV-palen geconstrueerd stalen frame (maximaal toelaatbare belasting 6000 kN) dat aan de te testen paal werd bevestigd, werd de testbelasting geleverd via reactiepalen op 4,5 m afstand aan beide zijden van de te testen paal (figuur 2). Tussen de reactiepalen en de testpaal was steeds nog een paal in het veld aanwezig welke in de testopstelling geen functie had. Tussen de kop van elke reactiepaal en het testframe was een vijzel en een drukdoos (nauwkeurigheid 1 kN) aanwezig. Aan de kop van de testpaal werden verplaatsingsopnemers bevestigd (nauwkeurigheid 0,01 mm).

Ook zijn de verplaatsingen van de paalpunt en de verplaatsing van de paal halverwege het zandpakket gemeten. Voor de meting van de paalpuntverplaatsing is de leiding die het grout naar de paalpunt brengt gebruikt. De verplaatsing van de paal halverwege het Pleistocene zandpakket is bij de eerste 2 proeven niet gemeten. Bij de volgende vier proeven is de vervorming halverwege het Pleistoceen gemeten met behulp van een wapeningsstaaf die werd vastgelast aan de binnenzijde van de paal. Deze is steeds opgelengd bij het oplossen van een volgende buissectie. Op de kop van de groutleiding en op de wapeningsstaaf is m.b.v. een verplaatsingsopnemer t.o.v. het referentiefraam gemeten (figuur 3). Als referentie zijn nabijgelegen palen gebruikt welke niet als reactiepaal fungeren en op een voldoende afstand van de proef staan (> 5m). Het belastingsschema dat is gebruikt tijdens de proeven is weergegeven in figuur 4.

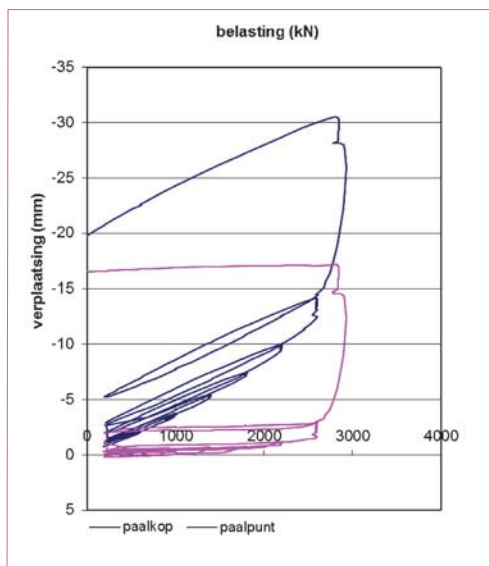
Afbreukcriterium

Tijdens de proeven is beoordeeld of de optredende kruip niet te groot is om, indien de paal veel slechter presteert dan verwacht, bezwijken van de paal te kunnen voorkomen. Hiervoor is de volgende formulering gehanteerd:

$$k = \frac{u_2 - u_1}{\log(t_2) - \log(t_1)}$$

waarbij:

- k kruipmaat (mm);
- u_2 kopverplaatsing op t_2 (mm);
- u_1 kopverplaatsing op t_1 (mm);
- t_2 laatste afleestijdstip van de te beschouwen kruipperiode ten opzichte van het begin van de belastingstap (minuten);
- t_1 eerste afleestijdstip van de te beschouwen kruipperiode ten opzichte van het begin van de belastingstap (minuten).



Figuur 5 – Last-verplaatsingsdiagram van paal 1.

Een kruipmaat van $k > 1$ mm duidt bij ankers en MV-palen op naderend bezwijken. De grootte van de volgende belastingstap werd dan ook gehalveerd wanneer aan het einde van de belastingstap bleek dat $k > 1$. Tijdens de eerste proefbelasting bleek het criterium $k > 1$ mm echter te dicht bij bezwijken te liggen. Bij de volgende vijf proeven is daarom $k > 0,7$ mm als criterium gehanteerd.

Wijze van interpretatie

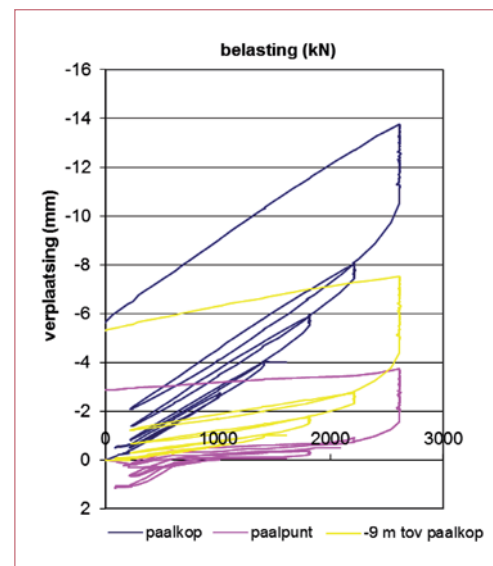
Bij het bezwijken van de paal tijdens de proef is het bezwijkdraagvermogen direct uit de testresultaten afgeleid.

Indien een testpaal tijdens de proef niet bezweek, is met behulp van de extrapolatiemethode van het Ingenieursbureau van Gemeentewerken Rotterdam (IGWR) het bezwijkdraagvermogen bepaald. Deze extrapolatiemethode lijkt op de extrapolatiemethode van Chin, alleen wordt bij de methode van IGWR de blijvende vervorming van de paal als maatgevend beschouwd voor het extrapoleren ter bepaling van de bezwijkbelasting. Uit diverse proeven tot bezwijken op trekpalen en ankers is gebleken dat de methode Chin geen realistische waarden oplevert en de methode IGWR wel tot geloofwaardige resultaten leidt. De formulering van IGWR is als volgt:

$$\delta_b = \delta_b * F * b + a$$

waarbij:

- δ_b blijvende paalkopverplaatsing (mm);
- F belasting (kN);
- 1/b bezwijkbelasting (kN);
- a een constante die voor het bepalen van de verwachte bezwijkdraagkracht geen betekenis heeft, deze wordt bepaald op basis van de parameter b. Parameter a geeft het snijpunt met de y-as aan, en is daarmee een indicator voor



Figuur 6 – Last-verplaatsingsdiagram van paal 5.

het elastisch gedrag van de paal. Voor het bepalen van de bezwijkdraagkracht wordt de blijvende verplaatsing (x-as) uitgezet tegen het product van de blijvende verplaatsing en de belasting (y-as). De hellingscoëfficiënt b geeft vervolgens een schatting van de inverse van de bezwijkdraagkracht [kN_{-1}].

Proefresultaten

Doordat zowel de krachten als de verplaatsingen digitaal en continu werden geregistreerd, is een gedetailleerd verloop van de proef verkregen. Bij de palen uit groep 1 werd alleen de verplaatsing van de paalkop en van de paalpunt gemeten (figuur 5).

Het (vrijwel) niet verplaatsen van de paalpunt tot een paalkopbelasting van 2.200 kN is duidelijk te zien. Daarboven treden ook aan de paalpunt toenemende verplaatsingen op, waarbij vanaf een belasting van ongeveer 2.800 kN de paalkop en paalpunt eenzelfde verplaatsingssnelheid krijgen. Dit betekent dat de volledige paal is gemobiliseerd en aan het bezwijken is.

Als voorbeeld van een paal die op drie niveaus werd gemeten (paalkop (NAP -10 m), 9 m onder de paalkop (NAP -19 m) en ter plaatse van de paalpunt (NAP -25 m)) zijn in figuur 6 de resultaten van paal 5 weergegeven.

De palen uit de groepen 1 en 3 bezweken voor het bereiken van de testbelasting van 3.000 kN. De palen uit groep 2 doorstonden de belasting van 3.000 kN. De belangrijkste resultaten van de proefbelasting zijn opgenomen in tabel 1.

Op de palen 1, 2 en 6 is na het bezwijken een relaxatietest uitgevoerd, waarbij de vijzels niet zijn bijgepompt, maar alleen de krachten in de tijd

Tabel 1 - Resultaten van de proefbelastingen

Paal-nr.	Groep	Maximale testbelasting (kN)	Kruipmaat (mm)	Bezwijkdraag(kN)-vermogen	Bezweken tijdens test
1	1	2.900	0,7 (op 2.600 kN)	2.666 *	ja
2	1	2.600	4 (na 15 minuten op 2.600 kN)	2.404 *	ja
3	2	3.000	0,2 (op 3.000 kN)	4.000 **	nee
4	2	3.000	0,2 (op 3.000 kN)	3.400 **	nee
5	3	2.600	2,5 (na 60 minuten op 2.600 kN)	2.600	ja (op kruip)
6	3	2.400	oplopend (vooral tussen 10 en 15 min)	2.071 *	ja

* Op basis van de relaxatietest.

** Op basis van de extrapolatiemethode IGWR.

Tabel 2 - Teruggerekende α_t -waarden op basis van bezwijkdraagvermogen volgens Tabel 1

Paal-nr.	Groep	Maximale schuifweerstand /m paal in zand (kN)	Schachtwrijving (kPa)	q_c . gemiddeld zonder/met afsnuiten op 15 MPa (MPa)	α_t zonder afsnuiten	α_t met afsnuiten op 15 MPa (MPa)	voldoet aan $\alpha_t=0,009$?
1	1	198	113	12,7 / 11,1	0,0089	0,0101	ja
2	1	182	103	15,6 / 12,8	0,0066	0,0081	nee
3	2	290	165	17,5 / 13,2	0,0094	0,0125	ja
4	2	264	150	14,4 / 11,6	0,0104	0,0129	ja
5	3	251	143	14,5 / 11,9	0,0098	0,0120	ja
6	3	238	135	14,5 / 11,9	0,0093	0,0113	ja

zijn waargenomen. Door extrapolatie van de afnemende belasting naar 100.000 dagen op een logaritmische schaal, is het rest-bezwijkdraagvermogen gevonden (figuur 7).

Paal 5 bezweek op kruip op de belastingstap van 2600 kN (kruipmaat = 2,5 mm na 60 minuten). Er is daarom geen extrapolatie of relaxatietest uitgevoerd om het bezwijkdraagvermogen te bepalen.

Alle palen leverden de voor het project benodigde trekdraagkracht. Om een idee te krijgen van de invloed van de uitvoeringswijze op het draagvermogen, is de plaatselijke schachtwrijving in de zandlaag teruggerekend.

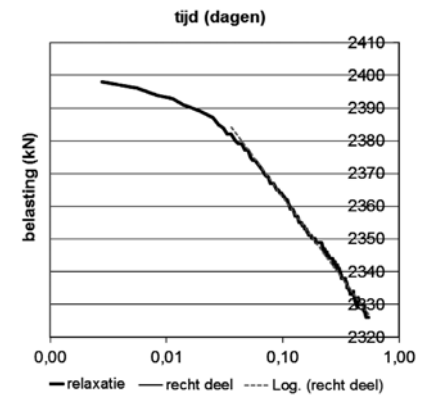
Interactie analyse

Met het eindige elementen programma INTER 2.1 (van Dalen 1994) is het last-verplaatsingsgedrag van de paal in de grond gesimuleerd. De paal wordt in INTER opgedeeld in elementen met een axiale stijfheid en per element wordt een maximale lokale schachtwrijving met de grond toegekend. Ook aan de punt kan (in geval van op druk belaste palen) een maximale puntweerstand worden toegekend. Bij het numeriek opleggen van een belasting wordt iteratief de elastische verlenging of verkorting per element berekend, waarbij steeds per element op basis van de verplaatsing wordt bepaald welk deel van de maximale schachtwrijving voor dat element is gemobili-

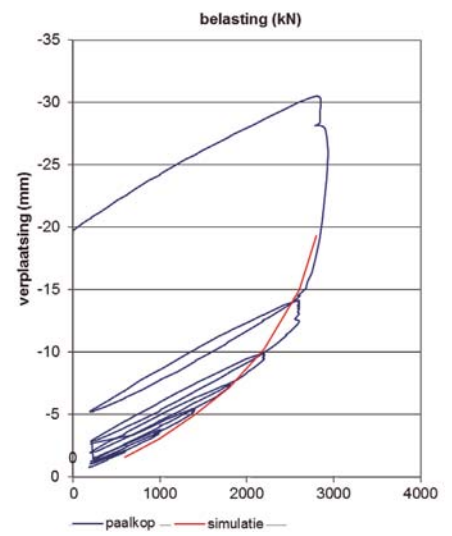
seerd. Na enige iteratieslagen wordt een oplossing gevonden waarna het verloop van de normaalkrachten en verplaatsingen als functie van de paal per belastingsgeval worden weergegeven.

De resultaten van de simulatie zijn vergeleken met de proefbelastingresultaten. De beste overeenkomst werd gevonden indien voor zowel de topzandlaag als de diepe zandlaag een constante maximale schachtwrijving per meter paal werd gebruikt. Uit de simulatie blijkt dat het mobilisatiegedrag van de geteste palen het beste wordt benaderd met de mobilisatiecurve voor schachtwrijving van grondverdringende palen conform NEN 6743-1. Er is hierbij aangenomen dat de schachtwrijving bij belasting op trek op gelijke wijze mobiliseert als bij belasting op druk. De maximale schachtwrijving is per paal constant, maar is tussen de beproefde palen onderling verschillend. Dit wordt in tabel 2 zichtbaar in de kolommen 3 en 4. Gemiddeld is de maximale schuifsterkte 110 kPa voor groep 1 en 150 kPa voor groepen 2 en 3. Een voorbeeld van het vergelijken van de simulatie met de gemeten vervormingen is gegeven in figuur 8.

De omhullende van de gemeten verplaatsingen tijdens de proefbelasting laat een brosser verloop zien dan volgt uit de INTER simulatie (zie figuur 8). Dit is vooral zichtbaar bij de belasting van 2600 kN: de gemeten verplaatsingen zijn daar aan het



Figuur 7 - Relaxatietest van paal 6.



Figuur 8 - Vergelijking van het last-verplaatsingsdiagram van paal 1 met de uitkomsten van INTER 2.1.

begin van de belastingstap 12 mm, oplopend naar 14 mm aan het einde van de stap, de simulatie komt uit op 15 mm verplaatsing. De overgang van 'slap' naar 'stijf' is in de simulatie geleidelijker dan in het gemeten gedrag. Omdat ook per proefpaal de conusweerstand licht kan afwijken, is vooraf per paal een sondering uitgevoerd. Uit deze sonderingen is per paal op twee manieren een gemiddelde conusweerstand bepaald namelijk een rekenkundig gemiddelde (zonder afsnuiten van de conusweerstand) en een gemiddelde waarbij de conusweerstand werd afgesnoten op 15 MPa. Voor het bepalen van α_t is uitgegaan van een diameter van de paal van 0,56 m. Er is dus aangenomen dat de ruimte tussen de paalschacht (diameter 406 mm) en wat wordt verdrongen door de paalpunt (diameter 560 mm) wordt gevuld met grout. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2. Uit tabel 2 volgt dat:

- Palen uit groep 1 met een α_t van gemiddeld

0,009 +/- 0,001 (op basis van op 15 MPa afgesloten q_c) nog net conform het CUR-rapport 2001-4 zijn.

- Palen uit groepen 2 en 3 ondanks hun verschillende lengte duidelijk van dezelfde populatie zijn en met een α_t van gemiddeld 0,012 +/- 0,001 (op basis van op 15 MPa afgesloten q_c) beter dan het CUR-rapport 2001-4 zijn.

Conclusies

De manier van uitvoeren van de Tubex-groutinjectiepaal heeft in belangrijke mate het werkelijk draagvermogen bepaald, want de behaalde paalfactoren zijn verschillend voor groep 1 en de groepen 2/3. Bij een nog niet eerder vertoonde werkwijze van grouten of bij een afwijkende water-cement factor zullen daarom proefbelastingen moeten uitwijzen met welke α_t mag worden gerekend.

Gebleken is dat het eerst op diepte brengen van de Tubex-groutinjectiepaal en het daarna optrekken en opnieuw op diepte brengen, leidt tot een lagere paalklassefactor voor wrijving dan in het geval dat de paal direct na het op diepte brengen wordt afgegrout. Dit verschil is waarschijnlijk het gevolg van de door het optrekken van de paal veroorzaakte ontspanning van de zandlaag waaraan de wrijvingskracht moet worden ontleend.

Uit de interactie berekeningen blijkt dat een

constante maximale schachtwrijving over de zandlagen de beste 'fit' met de gemeten vervormingen oplevert. Daarmee lijkt de maximale schachtwrijving vrijwel onafhankelijk van de q_c . Blijkbaar hebben zandlagen met een relatief lage conusweerstand meer baat bij de groutinjectie dan lagen met een hoge q_c . In de lagen met een (zeer) hoge q_c treedt mogelijk tijdens het inboren ontspanning op in de grond waardoor een deel van de draagkracht verloren gaat. Voor de palen uit groep 1 is een gemiddelde maximale schachtwrijving in zand gevonden van 110 kPa. Voor groepen 2 en 3 is dit gemiddeld 150 kPa. De uitvoeringswijze lijkt daarmee bepalender voor het draagvermogen dan de q_c .

Het meten van de paalpuntverplaatsing door middel van de groutleiding heeft tijdens het proefbelasten van de palen goed gefunctioneerd. De verplaatsing van de paalpunt bleek een belangrijke en betrouwbare indicator voor het bezwijken van de paal. Het hanteren van het logaritmische kruipcriterium van de CUR 166 heeft in deze proeven goed gefunctioneerd. De logaritmische kruipmaat bleek prima geschikt om tijdens de proefbelasting het naderend bezwijken van een funderingselement te monitoren. Voor een nieuwe versie van de norm moet worden overwogen om het lineaire kruipcriterium te vervangen

door de logaritmische kruipmaat.

De Tubex-groutinjectiepalen blijken, ten opzichte van proefbelastingen op trek van andere typen palen, een relatief bros bezwijkgedrag te vertonen. Dit bleek uit de noodzaak om het kruipcriterium voor het verkleinen van de belastingstapgrootte te verlagen van $k=1$ mm naar $k=0,7$ mm. Ook lijkt de mobilisatie van de schachtwrijving (vooral van de palen uit groepen 2 en 3) stugger (mobilisatiestijfheid is groter) te verlopen, dan de mobilisatiecurves voor schachtwrijving van grondverdringende palen volgens NEN 6743-1.

Literatuur

- Chin, F.K. *Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure*. Proc. 2nd S.E. Asian Conf. Soil Engng, Singapore, 81-92. 1970.
- CUR (2001): *Ontwerpregels voor trekpalen*. Rapport 2001-4
- CUR: *Damwandconstructies*. CUR-publicatie 166, 5e druk.
- Dalen, J.H. van, Opstal, A.Th. *Verankering van steile taluds*; syllabus gezamenlijke studiedag KVIV en KIVI te Antwerpen 1994.
- NEN 6743-1 (2006): *Geotechniek – Berekeningsmethode voor funderingen op palen – Drukpalen*.
- NEN 6745-2 (2005): *Geotechniek – Proefbelasting van funderingspalen – Deel 2: Statische axiale belasting op trek*. ●



Gemeentewerken
Gemeente Rotterdam

Ingenieursbureau

Postbus 6633
3002 AP Rotterdam
Tel. 010-489 6621
ingenieursbureau@gw.rotterdam.nl
www.gw.rotterdam.nl

INGENIEURSBUREAU



Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam (IGWR) realiseert grote en kleine infrastructurele projecten en verzorgt daarbij het complete geotechnisch onderzoek en advies. **De Rotterdamse aanpak!**

