

Samenvatting:

Uitgegraven proefpalen te Limelette: observaties en metingen

Deze vierde publicatie over het onderzoek van het WTCB naar grondverdringende schroefpalen gaat in op de techniek voor het uitgraven van de palen en de resultaten van de metingen op de uitgegraven palen.

De metingen en de observaties aan de uitgegraven proefpalen leiden tot de volgende conclusies. Voor de meeste in de grond gevormde grondverdringende schroefpalen zijn de reële diameters minstens gelijk aan de nominale waarden en is de betonkwaliteit in het algemeen goed. De geheide voorgespannen prefabpalen vertonen een regelmatig scheurpatroon ten gevolge van het heien.

Een ernstige en gedetailleerde monitoring van de uitvoeringsparameters gedurende de volledige installatieprocedure van in de grond gevormde schroefpalen (inschroeven én terugtrekken) is absoluut noodzakelijk om de kwaliteit van de gerealiseerde palen te verzekeren.

UITGEGRAVEN PROEF- PALEN TE LIMELETTE: OBSERVATIES EN METINGEN

■ Ir. Noël Huybrechts, Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)

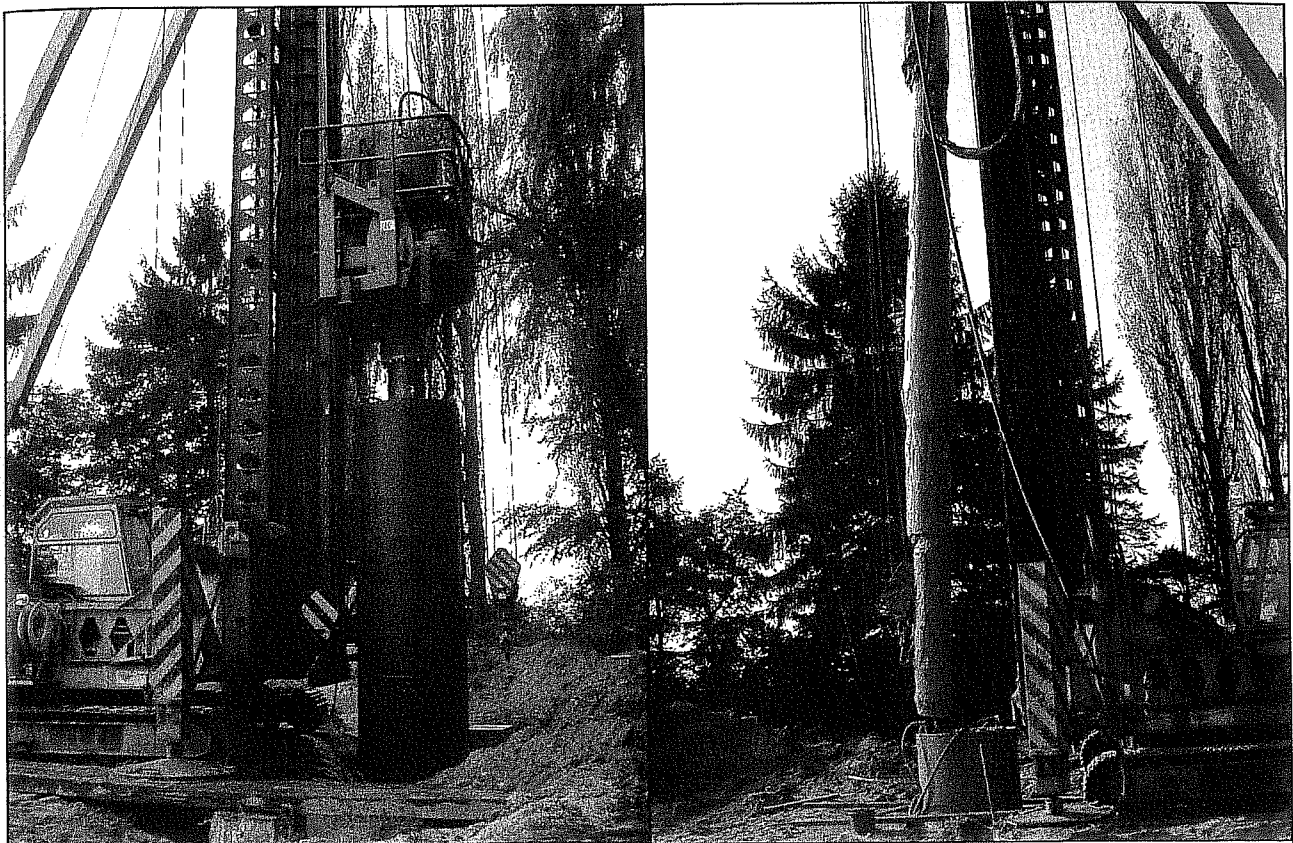
■ Prof. Jan Maertens, Katholieke Universiteit Leuven (KUL) & Jan Maertens bvba

Inleiding

Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB) heeft een omvangrijk onderzoeksproject omtrent grondverdringende schroefpalen uitgevoerd. Dit project werd onder meer mogelijk gemaakt dankzij de samenwerking met vijf Belgische aannemers die deze paaltypes uitvoeren (De Waal, Franki Geotechnics B, Fundex, Olivier en Socofonda) en dankzij de financiële steun van het Ministerie van Economische Zaken (WTCB, 1998-2000 & 2000-2002). Omtrent deze proefcampagne werd reeds uitgebreid gepubliceerd in voorgaande edities van het tijdschrift *Geotechniek*, meer bepaald (Huybrechts en Maertens, 2002), (Huybrechts, Maertens & Mengé, 2002) en (Huybrechts en Maertens, 2004). In deze laatste publicatie werden de resultaten van 12 statische paalbelastingsproeven op 10 grondverdringende schroefpalen en 2 geheide prefabpalen op de site te Limelette toegelicht. Voor deze proefsite werd er beslist om de statisch belaste palen uit te graven. De bedoeling hiervan was:

- Het evalueren van de afmetingen van de verschillende types in de grond gevormde schroefpalen en deze te vergelijken met hun nominale afmetingen die bepaald worden op basis van de afmetingen van de gebruikte verdringingsboren.
- Het vinden van een verklaring voor een aantal anomalieën welke tijdens het uitvoeren van de statische paalbelastingsproeven werden vastgesteld.
- Het bepalen van de invloed van de uitvoeringswijze op de paalafmetingen.
- Het bepalen van de paaldiameter en de betonkwaliteit op verschillende dieptes en dit teneinde de interpretatie van de extensometermetingen die uitgevoerd werden tijdens de statische proeven, aan te passen.

In wat volgt wordt dieper ingegaan op de techniek die toegepast werd voor het uitgraven van de palen, de resultaten van de metingen op de uitgegraven palen, alsook op enkele speciale vaststellingen. Voor meer details omtrent de installatieprocedures van de verschillende types schroefpalen wordt verwezen naar Huybrechts & Whenham, 2004.



■ Foto 1: Illustratie van het uitvoeringsprocedé bij het uitgraven van palen te Limelette

Techniek van het uitgraven

De palen werden uitgegraven door de firma Fundex. Hiertoe werd een stalen boorbuis met een diameter van 1.20 m rondom de palen ingeboord (de nominale diameter van deze palen bedroeg 0.39 à 0.55 m, de afmetingen van de paalkop bedroegen 0.60 x 0.60 m) en dit onder injectie (± 40 bar) van een water-bentonietspecie (3 à 4%) aan de onderkant van deze boorbuis. Er werd in het algemeen geboord tot een diepte van ongeveer één meter onder de paalpunt. Vervolgens werd de boortafel afgekoppeld van de buis, werden de voorafgaandelijk rond de paalkop aangebrachte stroppen aan de boortafel bevestigd en werd deze boortafel opwaarts bewogen en dit terwijl er verder water-bentonietspecie onder de paalpunt geïnjecteerd werd. De paal werd op deze manier getrokken en na het neerleggen van de paal werd de boortafel opnieuw aan de in de grond achtergebleven boorbuis bevestigd teneinde deze te recupereren. Dit proces wordt geïllustreerd in foto 1. Meer details zijn gegeven in Huybrechts & Maertens, 2003.

Met betrekking tot deze uitvoeringsprocedure kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden:

- De palen werden ongeveer 15 maanden na paalinstallatie uitgeboord.
- Voor wat betreft de prefabpalen werd er beslist om er maar één uit te graven, met name de prefabpaal B2 die

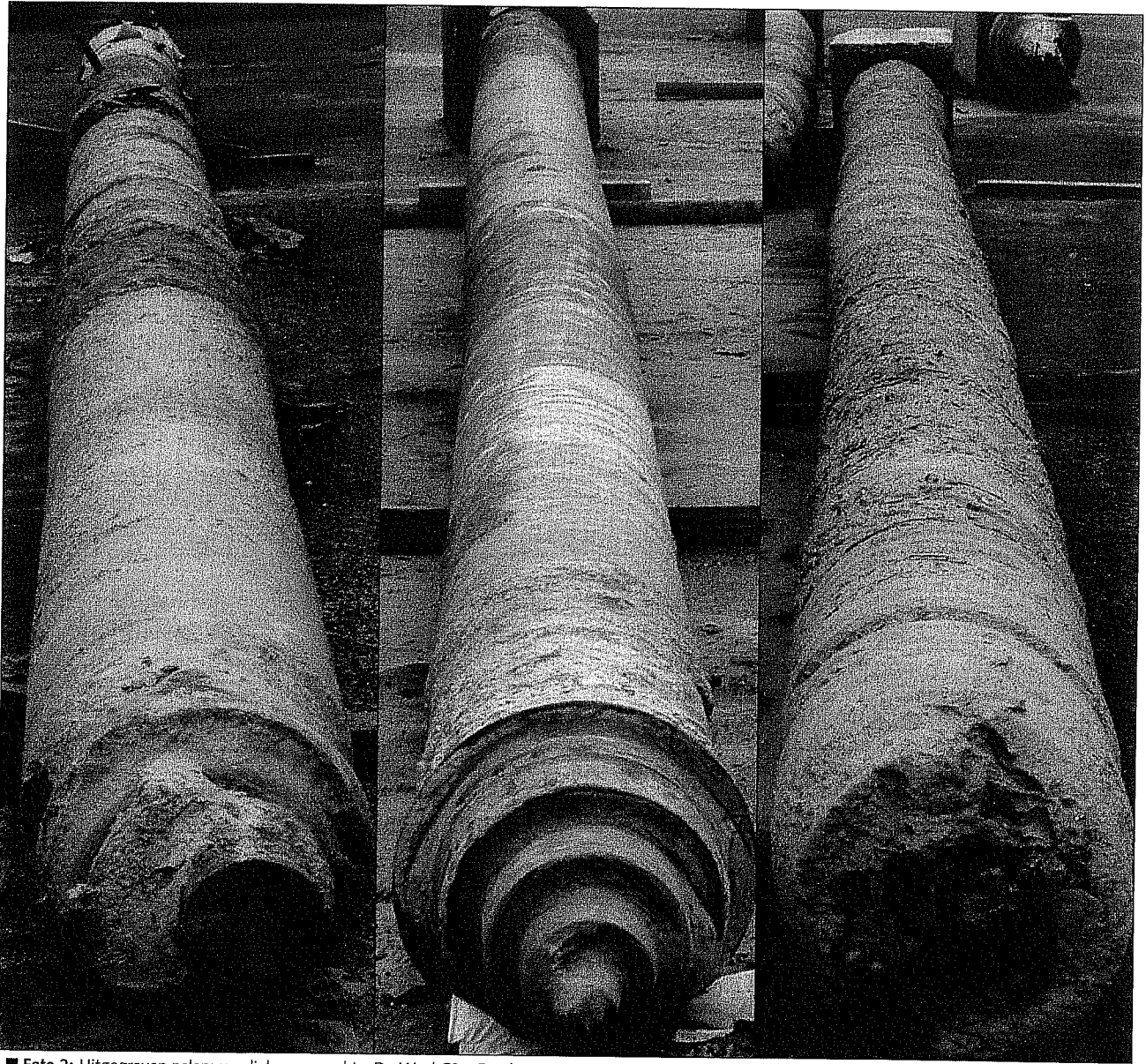
tijdens de statische paalbelastingsproeven een uitzonderlijk hoog draagvermogen ontwikkelde en waarvan inclinometermetingen hebben aangetoond dat de paal een duidelijke kromming vertoonde (zie een eerder artikel in Geotechniek: Huybrechts & Maertens, 2004).

- Tengevolge van de aanwezigheid van zeer cohesieve leem in de bovenlagen te Limelette, vormde er zich tijdens het inboren van de buis meermaals een plug (prop) tussen de binnenkant van de boorbuis en de paal. Hierdoor werden verscheidene palen afgebroken op een zekere diepte, sommige palen waren zelfs bijna volledig verloren.
- Omdat beide statisch geteste De Waal palen afgebroken werden ten gevolge van plugvorming, werd er beslist om de statnamisch geteste De Waal paal C5 (zonder succes) en vervolgens de dynamisch geteste paal C9 (met succes) uit te graven.

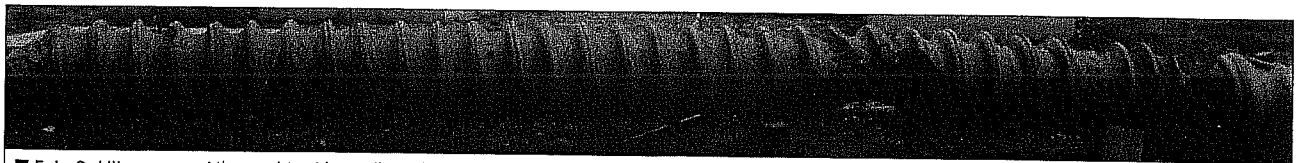
De foto's 2 t/m 4 illustreren de verschillende types grondverdringende schroefpalen die over hun volledige lengte werden uitgegraven.

Resultaten van de metingen op de uitgegraven palen
Overzicht van de uitgevoerde metingen

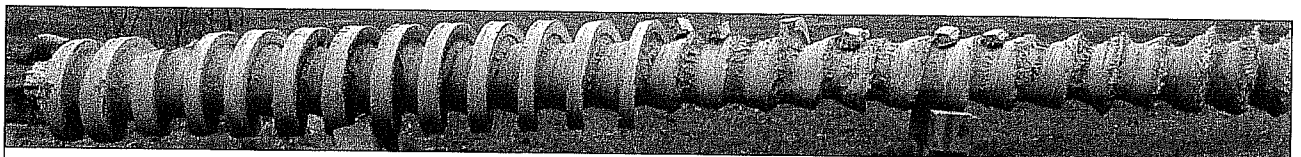
De paaldiameter werd om de 20 cm opgemeten volgens twee loodrechte assen alsook de omtrek van de paal. Tevens werd de paal om de 20 cm ultrasoon doorgemeten,



■ Foto 2: Uitgegraven palen; van links naar rechts: De Waal C9 – Fundex A1_{bis} – Omega A3



■ Foto 3: Uitgegraven Atlas paal B4 (de paalbasis bevindt zich rechts). Op twee niveaus werd de paal beschadigd bij het uitgraven (door plugvorming)



■ Foto 4: Uitgegraven Olivier paal C2 (de paalbasis bevindt zich rechts). Verschillende schroefflensen werden afgebroken tijdens het uitgraven.

teneinde de golfvoortplantingssnelheid van het paal-materiaal c_{pile} te bepalen.

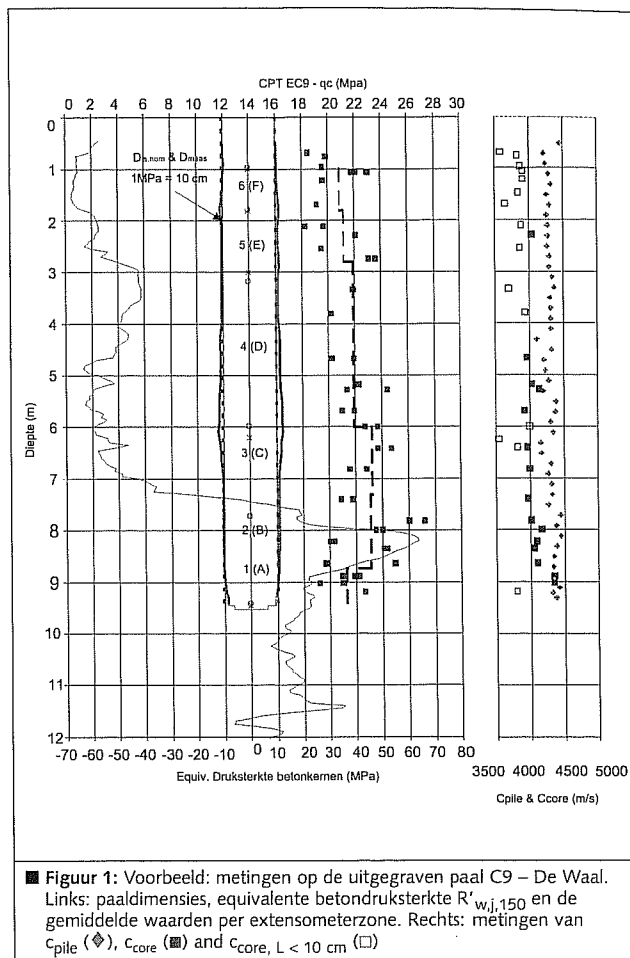
In ieder paalgedeelte dat tijdens de statische paalbelastingsproef overeenstemde met de positie van een extensometer, werden ten minste drie kernboringen uitgevoerd, waarvan de meeste met $\varnothing 50$ mm en sommige met $\varnothing 95$ mm.

Deze kernen werden verder in het labo behandeld en aan proeven onderworpen volgens het volgende schema:

- Afvlakken van de eindvlakken van de volledige kern en bepalen van de golfvoortplantingssnelheid c_{core}
- De kern verzagen tot een gestandaardiseerde hoogte gelijk aan de vierkantswortel van de sectie, meting van de dichtheid en de betondruksterkte R'_{core} overeenkomstig NBN B15-220:1990. Om tot een equivalente betondruksterkte op kubussen met zijde 150 mm ($R'_{w,j,150}$) te komen, dienen de resultaten van de drukproeven op de kernen gereduceerd te worden met een factor 0.85 (voor kernen met $\varnothing 50$ mm) of een factor 0.95 (voor kernen met $\varnothing 95$ mm). Deze factoren werden berekend met de conversieformules gegeven in dezelfde norm NBN B15-220.

Met betrekking tot deze metingen kan worden opgemerkt dat:

- de kernboringen en de laboratoriumproeven ongeveer 21 maanden na paalinstallatie werden uitgevoerd;
- de diameter van de kernboringen meestal beperkt was tot 50 mm ten gevolge van de aanwezigheid van een wapeningskorf in de palen. Normaal gezien dient de diameter van de geboorde kernen minstens vier keer groter te zijn dan de diameter van de grootste aggregaten in het beton. Voor de Atlas en De Waal schroefpalen werd aan deze voorwaarde voldaan, voor de andere schroefpalen was de maximale aggregaatdiameter wat te groot (14 à 20 mm) voor de toegepaste boordiameter. Dit heeft mogelijk een negatieve invloed op de variatie van de proefresultaten.
- de bepaling van de golfvoortplantingssnelheid op de betonnen kernen (c_{core}) in een aantal gevallen werd beïnvloed door de beperkte lengte van de kernen. Voor de kernen met een lengte groter dan 10 cm kwam c_{core} in alle gevallen goed overeen met de waarden van c_{pile} (golfvoortplanting uit het ultrasoon doormeten van de palen zelf).



Een voorbeeld van al de uitgevoerde metingen is voor de De Waal paal C9 gegeven in *figuur 1*. Dezelfde gegevens voor alle andere palen of paaldelen zijn gepubliceerd in Huybrechts & Maertens, 2003.

Een samenvatting van de resultaten is gegeven in de *tabellen 1 t/m 10*. In deze tabellen worden per paal en per paaldeel overeenkomstig de positie van een extensometer tijdens de statische belastingsproef, of per relevante grondlaag de volgende gemiddelde waarden gegeven:

- De gemeten paaldiameter D
- De equivalente betondruksterkte $R'_{w,j,150}$

Diepte (Extensometer)	D _{s,meas, min} [m]	D _{s,meas, max} [m]	R' _{w,j,150} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	E _{tg,concr} [N/mm ²]
1.00 - 1.80 m (F)	0.392*	0.496*	40.1	2 266	34 728
1.80 - 3.23 m (E)	0.388	0.508	51.5	2 286	39 361
3.23 - 6.00 m (D)	0.389	0.506	46.3	2 265	37 334
6.00 - 7.90 m (C)	0.368	0.492	48.9	2 309	38 376
7.90 - 8.80 m (B)	0.363	0.511	58.4	2 302	41 930
8.80 - 9.50 m (A)	0.350	0.489	57.2	2 329	41 503

*Op basis van beperkt paalgedeelte

■ **Tabel 1:** Atlas paal B4: gemiddelde waarden uitgegraven paal

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 1.80 m (F)	0.431	44	2 319	36 557
1.80 - 3.00 m (E)	0.421	43	2 322	36 060
3.00 - 6.20 m (D)	0.420	44	2 318	36 550
6.20 - 8.00 m (C)	-	-	-	-
8.00 - 8.75 m (B)	-	-	-	-
8.75 - 9.45 m (A)	-	-	-	-
9.45 - 9.53 m -	-	-	-	-

■ Tabel 2: De Waal paal A4: gemiddelde waarden uitgegraven paal

Diepte	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 1.80 m	0.419	34.5	2 292	32 217
1.80 - 2.80 m	0.433	36.0	2 303	32 929
2.80 - 6.00 m	0.448	39.4	2 333	34 461
6.00 - 7.30 m	0.446	46.1	2 338	37 245
7.30 - 8.73 m	0.422	45.5	2 345	36 998
8.73 - 9.43 m	0.386	36.5	-	33 151
9.43 - 9.53 m	0.361	-	-	-

■ Tabel 4: De Waal paal C9: gemiddelde waarden uitgegraven paal

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 1.80 m (F)	0.384	48.2	2 351	38 099
1.80 - 3.23 m (E)	0.401	45.8	2 372	37 132
3.23 - 6.00 m (D)	0.399	47.7	2 370	37 901
6.00 - 7.90 m (C)	0.373	44.5	2 372	36 596
7.90 - 8.80 m (B)	0.359	56.5	2 411	41 249
8.80 - 9.57 m* (A)	0.346	48.7	2 424	38 296

*Volledig gesegregeerd beton tussen 9.27 en 9.57 m, gemiddelde waarden enkel geldig tot 9.27 m

■ Tabel 6: Fundex paal C1bis: gemiddelde waarden uitgegraven paal

- De densiteit ρ van het beton
- De tangens elasticiteitsmodulus bepaald met de empirische formule (Mortelmans, 1988):

$$E_{tg} = \sqrt{5600 \cdot (0.96) \cdot R'_{w,j,150}}$$

De waarden in de tabellen 1 t/m 10 kunnen vergeleken worden met de nominale waarden van de paalschachtdiameter $D_{s,nom}$ en met de betondruksterkte $R'_{w,28,150}$ na 28 dagen bepaald op kubussen met zijde 150 mm die ontnomen werden gedurende de installatie van iedere proefpaal en die bewaard en getest werden onder laboratoriumcondities: deze waarden worden voor iedere paal gegeven in tabel 11.

Bespreking van de resultaten

Afmetingen van de palen

Wanneer de gemeten paaldiameters $D_{s,meas}$ vergeleken worden met de nominale diameters $D_{s,nom}$ komt men tot de

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
0.97 - 1.77 m (F)	0.431	41	2 292	35 206
1.77 - 3.17 m (E)	0.437	43	2 298	36 005
3.17 - 5.97 m* (D)	0.432	41	2 301	35 116
5.97 - 7.71 m (C)	-	-	-	-
7.71 - 8.71 m (B)	-	-	-	-
8.71 - 9.41 m (A)	-	-	-	-
9.41 - 9.52 m -	-	-	-	-

*alleen waarden beschikbaar tot een diepte van 4.35 m

■ Tabel 3: De Waal paal C4: gemiddelde waarden uitgegraven paal

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 1.80 m (F)	0.393	50.3	2 330	38 912
1.80 - 3.00 m (E)	0.402	48.9	2 342	38 354
3.00 - 6.00 m (D)	0.398	48.4	2 366	38 164
6.00 - 7.30 m (C)	0.390	44.8	2 360	36 708
7.30 - 8.63 m (B)	0.392	45.9	2 386	37 157
8.63 - 9.43 m (A)	0.391	47.4	2 404	37 788
9.43 - 9.59 m	0.386	-	-	-

■ Tabel 5: Fundex paal A1bis: gemiddelde waarden uitgegraven paal

volgende vaststellingen:

- Voor de Omega palen A3 en C3 en de Fundexpaal A1_{bis} is $D_{s,meas}$ minstens gelijk aan de $D_{s,nom}$. Wat opvalt is dat $D_{s,meas}$ van de paal C3 Omega in de zone tussen 4.5 m en 6.5 m diepte significant groter is dan $D_{s,nom}$ (zie verder): de maximale diameter in die zone bedraagt 0.640 m en dit terwijl de nominale diameter 0.410 m bedraagt.
- Voor de De Waal paal A4 en C4 kon enkel het bovenste paalgedeelte in de leemlaag gerecupereerd worden. $D_{s,meas}$ van deze paaldelen is ten minste gelijk aan de $D_{s,nom}$. Voor de De Waal paal C9, die volledig uitgegraven werd, kan eveneens worden vastgesteld dat $D_{s,meas}$ ten minste gelijk is aan $D_{s,nom}$ voor het overgrote gedeelte van de paal. Alleen in een zone van 70 cm boven de paalpunt heeft de paal een schroefvorm en daardoor een licht gereduceerde sectie (zie verder).
- Voor de Atlas paal B4 komt de gemeten maximale (uitwendige) diameter $D_{s,meas,max}$ ongeveer overeen met de nominale paaldiameter $D_{s,nom,max}$ in het bovenste paalgedeelte (leemlaag). In het dichtgepakte zand is $D_{s,meas,max}$ in het begin ongeveer gelijk aan $D_{s,nom,max}$, maar dieper in die laag wordt $D_{s,meas,max}$ wat kleiner dan $D_{s,nom,max}$. De minimale (inwendige) gemeten paaldiameter $D_{s,meas,min}$ is over de gehele paallengte minstens gelijk aan de nominale waarde van de minimale (inwendige) diameter. Men kan ook vaststellen dat de dikte van de op de paalschacht aanwezige schroefvormige flensen in de dichtgepakte zandlaag significant kleiner is dan deze in de leemlaag (zie verder).

- Voor de Olivier paal A2 kon enkel het bovenste paalgedeelte dat zich in de leemlaag bevond, gerecupereerd worden. De gemeten maximale (uitwendige) diameter $D_{s,meas,max}$ van dit paalgedeelte is ongeveer gelijk aan $D_{s,nom,max}$. De gemeten minimale (inwendige) diameter $D_{s,meas,min}$ is meestal wat kleiner dan de nominale waarde. De Olivier paal C2 kon volledig gerecupereerd worden. $D_{s,meas,max}$ van het paalgedeelte in de leemlaag is minstens gelijk aan $D_{s,nom,max}$

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas,min}$	$D_{s,meas,max}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 1.80 m (F)	0.343	0.539	42.6	2 384	35 829
1.80 - 3.00 m (E)	0.345	0.568	48.0	2 389	38 008
3.00 - 5.80 m* (D)	0.336	0.577	-	-	-
5.80 - 7.00 m (C)	-	-	-	-	-
7.00 - 8.45 m (B)	-	-	-	-	-
8.45 - 9.15 m (A)	-	-	-	-	-
9.15 - 9.45 m	-	-	-	-	-

*alleen waarden beschikbaar tot een diepte van 3.2 m
 ■ Tabel 7: Olivier paal A2: gemiddelde waarden uitgegraven paal

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas,min}$	$D_{s,meas,max}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 2.00 m (F)	0.365*	0.554*	45.6	2 369	37 067
2.00 - 3.00 m (E)	0.357	0.567	47.7	2 380	37 913
3.00 - 6.00 m	0.340	0.571	53.9	2 396	40 279
6.00 - 6.80 m	0.298	0.565	51.6	2 395	39 398
6.80 - 8.10 m	0.298	0.563	55.6	2 410	40 902
8.10 - 9.10 m	0.297	-	54.1	2 440	40 351
9.10 - 9.38 m	0.341	-	-	-	-

*Op basis van beperkt paalgedeelte
 ■ Tabel 8: Olivier paal C2: gemiddelde waarden uitgegraven paal

(verschillende schroefvormige flensen werden tijdens het uittrekken van de paal afgebroken ter hoogte van hun aanhechting aan het paallichaam, maar konden gerecupereerd worden). In de zandlaag werden de schroefvormige flensen eveneens afgebroken tijdens het trekken; deze konden echter niet meer gerecupereerd worden. Met betrekking tot $D_{s,meas,min}$ van de Olivier paal C2 kon worden vastgesteld dat vanaf een diepte van 3 m deze gemeten waarde kleiner is dan de nominale waarde. Er kon ook vastgesteld worden dat de dikte van de schroefflensen afneemt met de diepte en dat in het lager gelegen paalgedeelte de aanhechtdikte van de schroefvormige flensen aan het paallichaam klein wordt (zie verder).

- De gemeten diameter van Fundex paal C1_{bis} vertoont in tegenstelling tot de waarnemingen bij de A1_{bis} paal een wat meer onregelmatig verloop en is in sommige zones wat kleiner dan de nominale diameter. In de zone net boven de paalpunt heeft zich segregatie van het beton voorgedaan. Dit was het gevolg van de verwerking van te droog beton (zie verder).

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1.00 - 1.80 m (F)	0.470	46.4	2 335	37 394
1.80 - 3.00 m (E)	0.430	41.2	2 302	35 204
3.00 - 6.15 m (D)	0.446	43.9	2 303	36 351
6.15 - 7.57 m (C)	0.434	39.0	2 305	34 263
7.57 - 8.27 m (B)	0.436	46.8	2 353	37 523
8.27 - 8.97 m (A)	0.440	61.4	2 431	43 005
8.97 - 9.45 m	0.421	55.7	2 420	40 958

■ Tabel 9: Omega paal A3: gemiddelde waarden uitgegraven paal

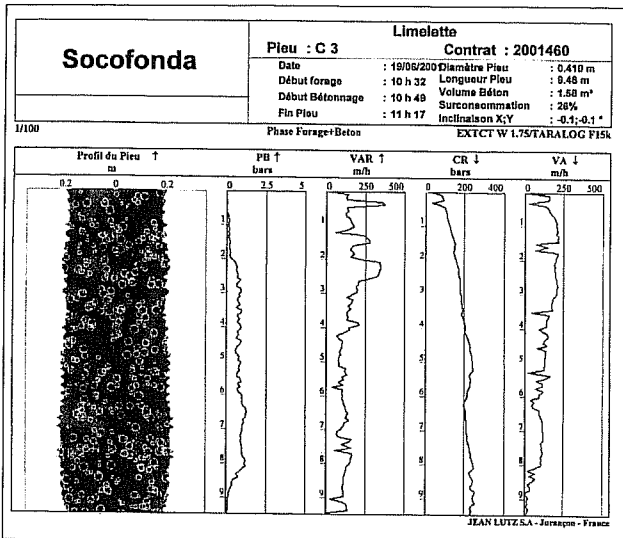
- Voor de geheide paal B2 komen de afmetingen uiteraard overeen met de nominale. Wat echter opvalt bij deze palen, is het regelmatige scheurpatroon dat in de paal (zie verder) kon worden waargenomen.

Diepte (Extensometer)	$D_{s,meas}$	$R'_{w,j,150}$	ρ	$E_{tg,concr}$
	[m]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
0.95 - 1.75 m (F)	0.479	31.7	2 331	30 906
1.75 - 3.35 m (E)	0.481	33.9	2 324	31 956
3.35 - 5.85 m (D)	0.559	34.6	2 299	32 277
5.85 - 7.65 m (C)	0.494	32.3	2 289	31 162
7.65 - 8.35 m (B)	0.437	43.3	2 424	36 105
8.35 - 9.05 m (A)	0.442	56.9	2 427	41 400
9.05 - 9.45 m	0.410	59.6	2 427	42 363

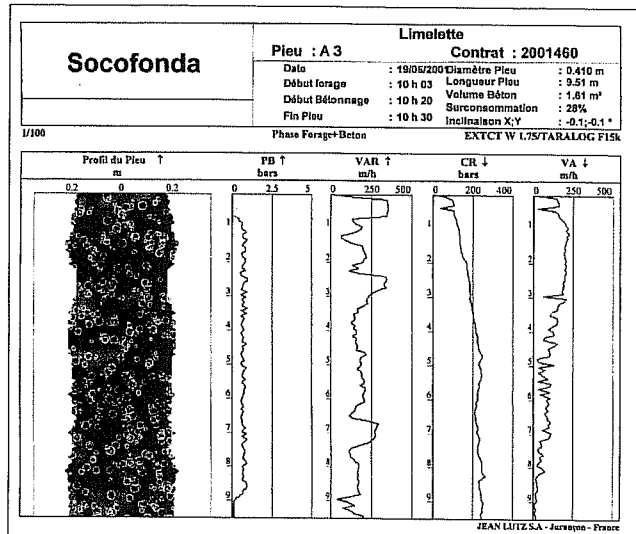
■ Tabel 10: Omega paal C3: gemiddelde waarden uitgegraven paal

Pile	$D_{s,nom}$	$R'_{w,28,150}$
	[m]	[MPa]
Atlas B4	0.360 (min) / 0.510 (max)	44.7
De Waal A4	0.410	38.6
De Waal C4	0.410	38.6
De Waal C9	0.410	40.9
Olivier A2	0.360 (min) / 0.550 (max)	46.1
Olivier C2	0.360 (min) / 0.550 (max)	45.0
Fundex A1bis	0.390	43.2
Fundex C1bis	0.390	41.1
Omega A3	0.410	42.6
Omega C3	0.410	42.6
Precast B2	0.446	71.6

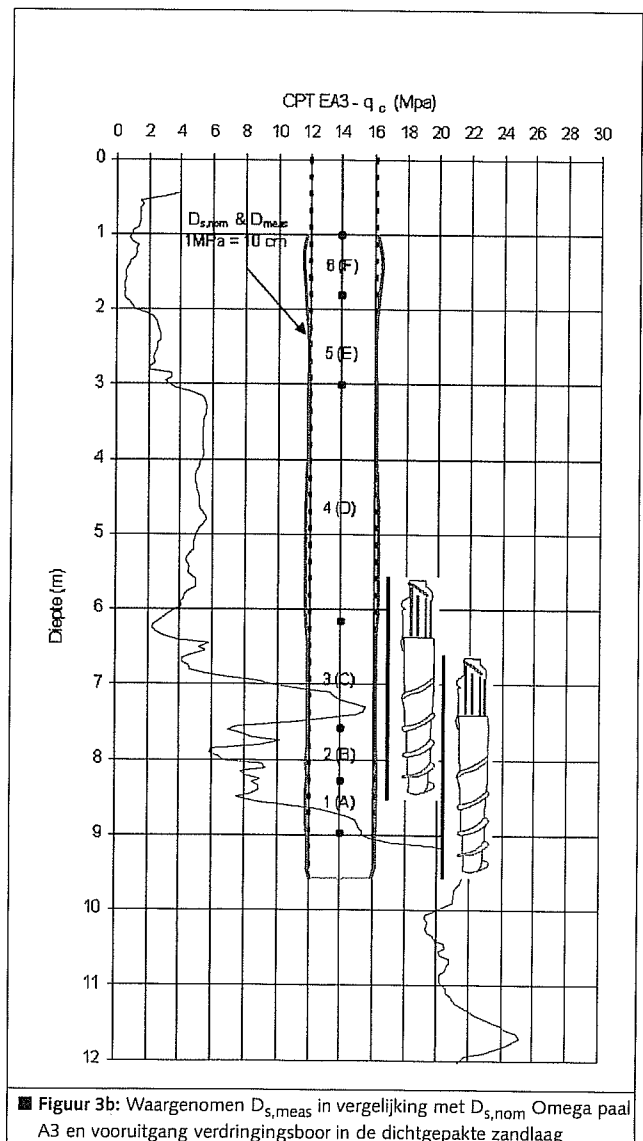
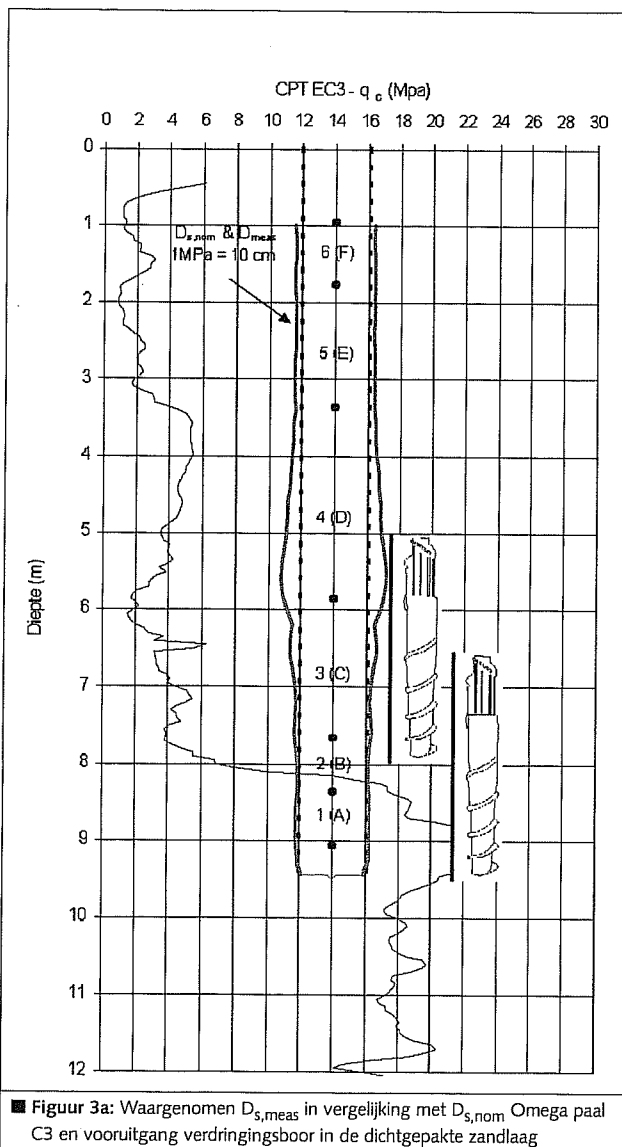
■ Tabel 11: Nominale waarden $D_{s,nom}$ en $R'_{w,28,150}$



■ **Figuur 2a:** Monitoringresultaten tijdens installatie Omega paal C3



■ **Figuur 2b:** Monitoringresultaten tijdens installatie Omega paal A3



Betonkwaliteit

Uit de resultaten van de kernboringen kan het volgende worden afgeleid:

- In het algemeen is de betonkwaliteit goed voor alle palen. De grote spreiding op de individuele druksterktes is te wijten aan de relatief kleine diameter van de betonkernen (50 mm).
- De resultaten van de equivalente betondruksterkte $R'_{w,j,150}$ van de geboorde kernen kunnen vergeleken worden met de resultaten van de druksterkte $R'_{w,28,150}$ bepaald 28 dagen na paalinstallatie op proefstukken ontnomen tijdens de installatie van iedere proefpaal en aangemaakt, bewaard en getest onder laboratoriumcondities volgens NBN B15-001:1992 (zie tabel 11). In het algemeen kan worden vastgesteld dat voor de schroefpalen $R'_{w,j,150}$ 75% à 144% bedraagt van $R'_{w,28,150}$; voor de meeste paaldelen is $R'_{w,j,150}$ groter dan $R'_{w,28,150}$. Dit is vergelijkbaar met de resultaten van de uitgegraven prefabpaal, waarvan $R'_{w,j,150}$ varieert tussen 74% en 123% van $R'_{w,28,150}$ (kubussen aangemaakt volgens NEN 5950:1995).
- Er kan ook worden vastgesteld dat de drukweerstand van de betonkernen uit het paalgedeelte in de dichtgepakte droge zandlaag (meestal) groter is dan de waarden verkregen uit het paalgedeelte in de leemlaag. Het is duidelijk dat dit te wijten is aan de ontwatering van het verse beton in de droge zandlaag tijdens de installatie. Dit effect is vooral significant voor de Omega palen, wat op zijn beurt verklaard kan worden door het feit dat bij dit paaltipe de wapeningskorf achteraf ingetrild wordt in de vers gebetonnerde paal, wat het ontwateringseffect in die droge zandlaag nog kan versterken. Voor alle andere paaltipes werd de wapeningskorf in de voerbuis aangebracht vóór het betonneren.

Speciale vaststellingen

Paal Omega C3: Zone met grote diameter

Bij de Omega paal C3 werd voor het paalgedeelte op een diepte tussen 4.5 m en 6.5 m (in de leemlaag) een diameter vastgesteld die significant groter is dan de nominale. Uit de beschikbare informatie kan niet worden afgeleid of deze grote diameter te wijten is aan het betonneren onder druk in de slappere lagen of ten gevolge van een opwaarts grondtransport tijdens het installeren van de paal. Uit de resultaten van de monitoring en de waarnemingen tijdens de paalinstallatie kan vastgesteld worden dat de penetratiesnelheid van de verdringingsboor sterk afneemt wanneer die de bovenkant van de dichtgepakte zandlaag bereikt (zie figuur 2a). Wanneer de verticale vooruitgang per omwenteling van de verdringingsboor kleiner wordt, kan er een opwaarts grondtransport tussen de schroefbladen van de verdringingsboor plaatsvinden. De opwaarts

getransporteerde grond wordt dan ter hoogte van het verdringingslichaam lateraal verdrongen. Dit effect samen met een wat excentrische rotatie van de verdringingsboor zou de reden kunnen zijn van de grotere diameter.

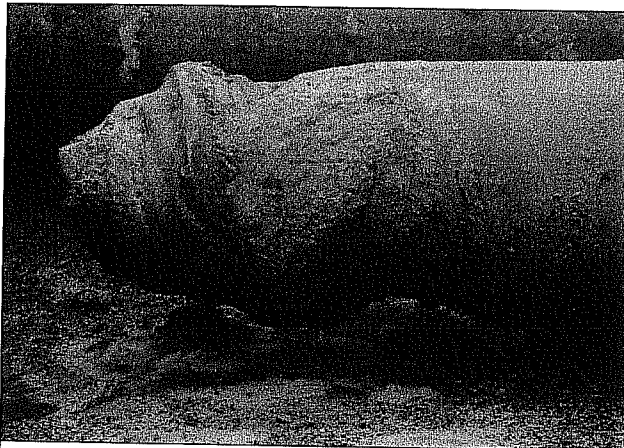
In figuur 3a wordt de vooruitgang van de verdringingsboor in de zandlaag gesimuleerd. Op dezelfde figuur wordt de gerealiseerde diameter van de in de grond gevormde paal gegeven (de lengte van de verdringingsboor is hierbij aangepast aan de diepteschaal, de diameter van de verdringingsboor is daardoor niet relevant ten opzichte van de diameter van de paal).

Wanneer de monitoringresultaten van de aannemer van deze opmerkelijke paal C3 vergeleken worden met de monitoringresultaten van de andere uitgegraven Omega-paal A3, kan men vaststellen dat deze laatste eveneens een zelfde zeer kleine penetratiesnelheid vertoont in de dichtgepakte zandlaag en dat de totale inschroeftijd voor de palen C3 en A3 ongeveer gelijk is (figuren 2a en 2b). Daarentegen kan men vaststellen dat die opmerkelijk grotere diameter die men kon waarnemen bij paal C3 niet aanwezig is bij paal A3 (zie figuur 3b).

Uit de observaties die opgetekend werden door de werfverantwoordelijke tijdens de installatie van deze palen kan een mogelijke verklaring voor dit fenomeen gevonden worden. Er werd opgetekend dat het voor paal C3 zeer moeilijk was om de verdringingsboor tot op de vereiste paalbasisdiepte te schroeven in de dichtgepakte zandlaag en dat het zelfs nodig was om tijdens de laatste 50 cm van de penetratie de verdringingsboor een aantal keren op en neer te bewegen, onder continue rotatie in wijzerszin, om finaal de vereiste diepte te bereiken. Voor deze paal werd hierbij een totale inschroeftijd van 35 minuten opgetekend. Voor de Omega paal A3 werden er geen moeilijkheden waargenomen; de totale opgetekende inschroeftijd voor paal A3 bedroeg 16 minuten. Het is dan ook de mening van de auteurs dat deze observaties het fenomeen van het opwaarts grondtransport en dus ook van de lokaal grote diameter van Omega paal C3 verklaren.

Het betonvolume van de uitgegraven palen C3 en A3 komt niet overeen met de data van het geïnjecteerde betonvolume dat op de monitoring fiche van de aannemer is aangegeven (figuren 2a en 2b). In vergelijking met het nominale paalvolume (op basis van $D_{s,nom} = 0.410$ m) is het reële gemeten betonvolume respectievelijk 43% en 14% groter voor de palen C3 en A3. Op de figuren 2a en 2b is sprake van een overconsumptie van beton gedurende de installatie van 26% respectievelijk 28%.

Wat in elk geval duidelijk is voor dit paaltipe, is dat het verdringingslichaam en de tegenschroef die zich boven het verdringingslichaam bevindt, zeer goed functioneren. Zij verhinderen dat er grondtransport naar het grond-



■ Foto 5: De Waal paal – Afmetingen van de paalvorm boven het paalbasisniveau ten gevolge van een korte rotatie in tegenwijzerszin.

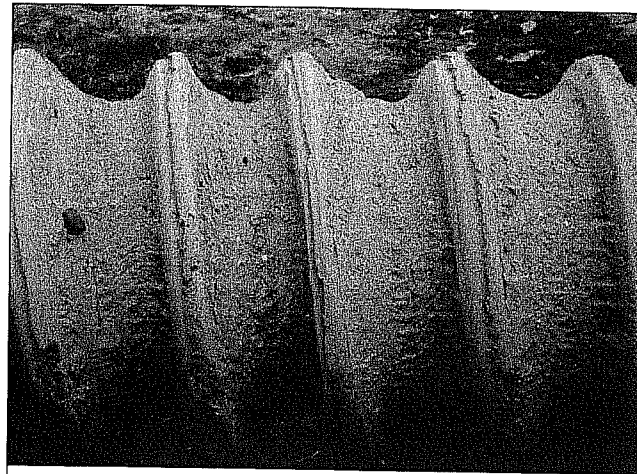
oppervlak kan plaatsvinden. Verder kon vastgesteld worden dat het totale draagvermogen van deze palen niet beïnvloed werd door de vastgestelde fenomenen, dit werd reeds aangetoond in de bijdrage in het vorige nummer van Geotechniek (Huybrechts & Maertens, 2004) en meer in detail in Maertens & Huybrechts, 2003.

De Waal palen: procedure voor het terugtrekken van de verdringingsboor

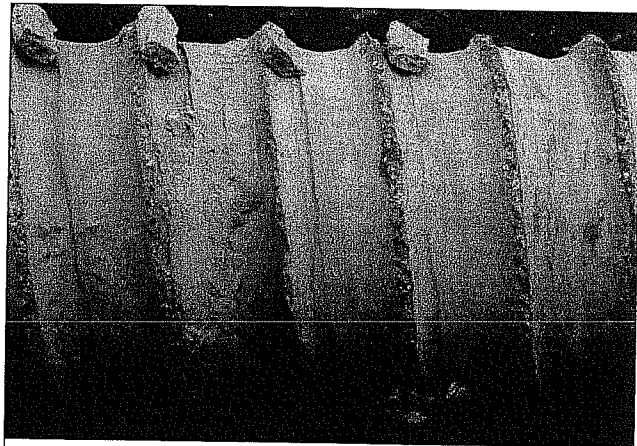
De installatieprocedure van de De Waal palen wordt in detail beschreven in Huybrechts & Whenham, 2003. Bij de installatie te Limelette werd er echter licht afgeweken van de normale installatieprocedure. Normaal is het zo dat wanneer tijdens het inschroeven van de verdringingsboor (in wijzerszin) het paalbasisniveau bereikt wordt, de verdringingsboor in wijzerszin blijft roteren terwijl deze wordt getrokken en het betonneren wordt aangevat. In Limelette echter werd vastgesteld dat, ondanks het feit dat het inschroefproces zeer snel werd uitgevoerd, de verdringingsboor blokkeerde in de dichtgepakte zandlaag op de aanzetdiepte van de paal. Het was dan ook noodzakelijk om een korte rotatie in tegenwijzerszin uit te voeren om het terugtrekproces op gang te brengen en het betonneren van de paal te kunnen aanvatten. De invloed van dit detail in de uitvoeringswijze blijkt duidelijk uit de vorm van het paalgedeelte net boven de paalbasis: zie foto 5. Deze lokaal kleinere paalsectie werd ook waargenomen in de extensometermetingen die uitgevoerd werden tijdens de statische belastingsproef. De beschikbare gegevens laten niet toe om af te leiden of men een groter draagvermogen zou verkregen hebben indien de kleine rotatie in tegenwijzerszin niet was uitgevoerd.

Paal B4 – Atlas: diameter en dikte van de schroefvormige flensen in de zandlaag

Voor wat betreft de uitgegraven Atlas paal B4 kon men vaststellen dat in het paalgedeelte dat zich in de dichtgepakte zandlaag bevond de maximum diameter van de



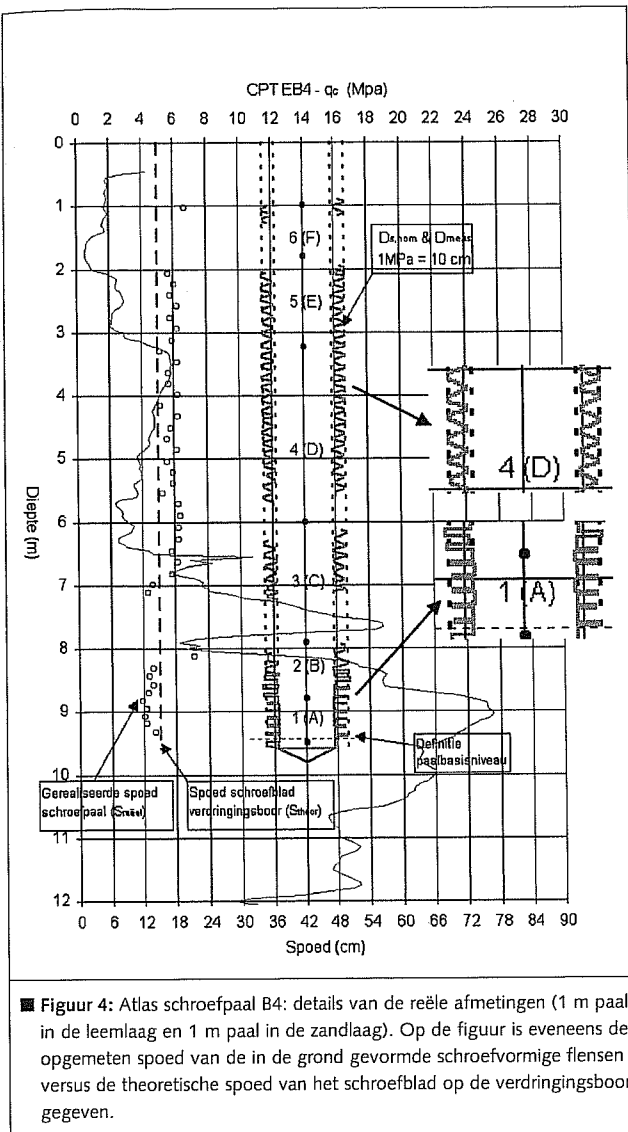
■ Foto 6: Atlas schroefpaal B4 – schroefvormige flensen in de leemlaag



■ Foto 7: Atlas schroefpaal B4 – schroefvormige flensen in de dichtgepakte zandlaag.

paal ($D_{s,meas,max}$) wat kleiner is dan de nominale diameter en dat de dikte van de schroefvormige flensen kleiner is dan bij de schroefvormige flensen in de leemlaag. Dit wordt duidelijk geïllustreerd in de foto's 6 en 7 en figuur 4. Een mogelijke verklaring voor de wat kleinere afmetingen van de schroefvormige flensen in die dichtgepakte zandlaag is de volgende.

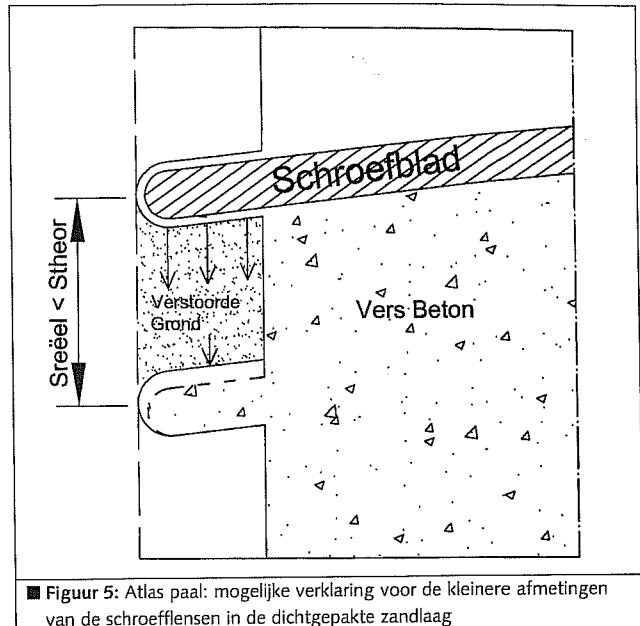
Bij het inschroeven (in wijzerszin) van de verdringingsboor in de weerstandbiedende dichtgepakte zandlaag is de verticale penetratie per rotatie (veel) kleiner dan de theoretische spoed van de schroef op de verdringingsboor (15 cm). Dit resulteert in een verstoring van de grond ten gevolge van een schraapeffect. Wanneer er vervolgens gebetonnerd wordt en de verdringingsboor wordt uitgeschroefd (in tegenwijzerszin), dan kan deze verstoorde grond relatief gemakkelijk verdrongen of verplaatst worden, temeer daar de verdringingsboor tijdens het uitschroeven een ander traject aflegt dan tijdens het inschroeven. Bovendien kan men vaststellen dat de tijdens het terugschroeven gerealiseerde spoed in de dichtgepakte zandlaag kleiner is dan de theoretische spoed van het schroefblad op de verdringingsboor. Dit impliceert dat het schroefblad van



de verdringsboor een neerwaarts gerichte kracht kan uitoefenen op de geroerde grond (ten gevolge van het schrapen tijdens het inschroeven) die zich onder het schroefblad bevindt. Deze grond kan vervolgens een drukkracht uitoefenen op de net daaronder gebetonnerde schroefvormige flens, wat de kleinere afmetingen ervan verklaart. Dit principe wordt geïllustreerd in *figuur 5*.

Paal C1_{bis} - Fundex: segregatie van het beton

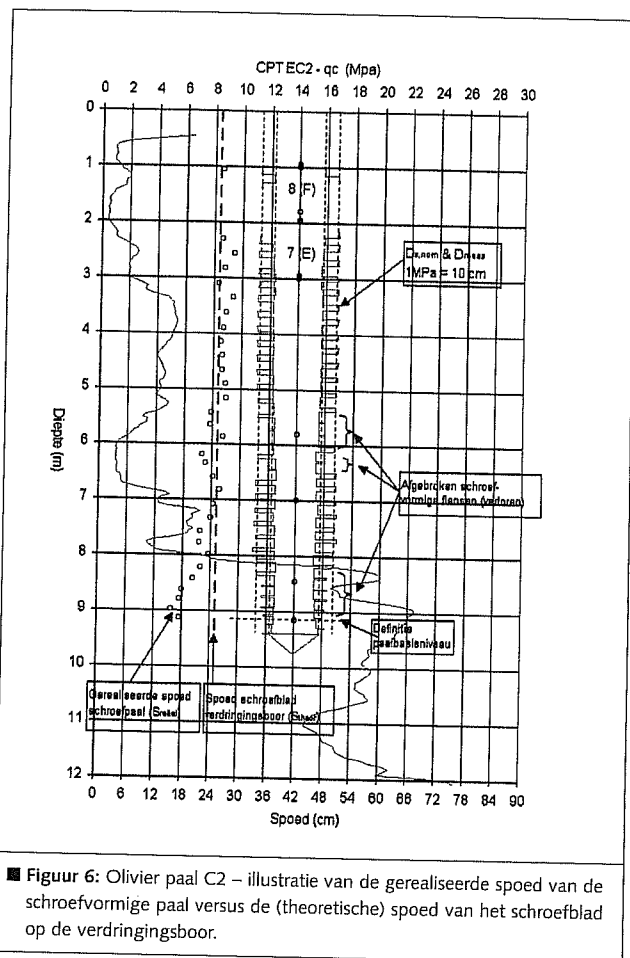
In tegenstelling tot de resultaten van de statische proefbelasting op de paal A1_{bis}, waarvan de resultaten overeenkwamen met de verwachtingen, bleek dit niet het geval te zijn voor de paal C1_{bis}. Deze paal vertoonde reeds grote verplaatsingen onder een beperkte aangebrachte belasting (zie Maertens & Huybrechts, 2003) en uit de extensometermetingen bleek dat de vervormingen net boven de paalpunt zeer groot waren, zelfs in die mate dat de proef vroegtijdig diende stopgezet te worden.



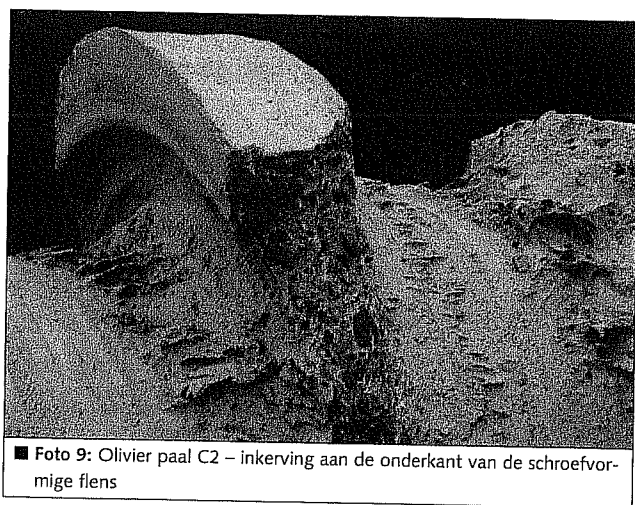
Na het uitgraven van de paal kon worden vastgesteld dat er zich in die zone juist boven de paalpunt segregatie van het beton had voorgedaan. Dit wordt geïllustreerd in *foto 8*. De oorzaak van deze segregatie kan gevonden worden in de accumulatie van een aantal factoren. Eerst en vooral kon men vaststellen dat het geleverde beton te droog was en niet overeenkwam met de door Fundex vereiste fluiditeit. In vorige bijdragen werd reeds aangehaald dat Fundex de toelating kreeg om zijn palen A₁ en C₁ te vervangen door de twee extra palen A_{1bis} en C_{1bis} en dit omdat het geleverde beton voor de palen A₁ en C₁ niet voldeed aan de fluiditeitseisen van Fundex. Voor de reservepalen A_{1bis} en C_{1bis} werden echter ook nog problemen met betrekking tot de fluiditeit van het geleverde beton genoteerd, maar onder tijdsdruk van het proefprogramma werd er evenwel beslist om dit beton toch te accepteren.

Een mogelijke reden voor de beperkte fluiditeit van het geleverde beton kan gevonden worden in het feit dat





Fundex per proefpaal een vracht beton bestelde, waardoor er slechts een beperkt volume beton in de mixer aanwezig was. Uit ervaring is het geweten dat het in dat geval (beperkt volume) moeilijker is om een homogene mix te bekomen wanneer er additieven op de werf worden toegevoegd. Het valt dus niet uit te sluiten dat er lokaal te grote concentraties additief aanwezig zijn geweest in het beton, wat op zijn beurt segregatie van het beton



veroorzaakt heeft.

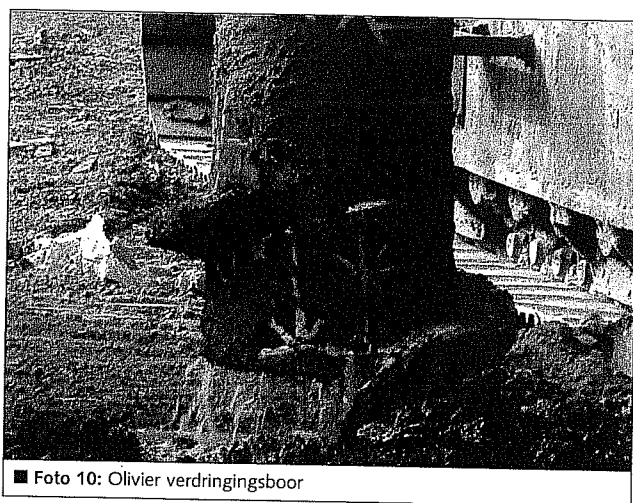
Een andere factor die het segregatie-effect kan beïnvloeden hebben, is de aanwezigheid van de instrumentatiebuis voor de extensometers ($\varnothing 50$ mm) en de manier waarop deze aan de wapeningskorf bevestigd werd. Mogelijk resulteerde dit in een snij-effect wanneer het beton in de voerbuis gestort werd.

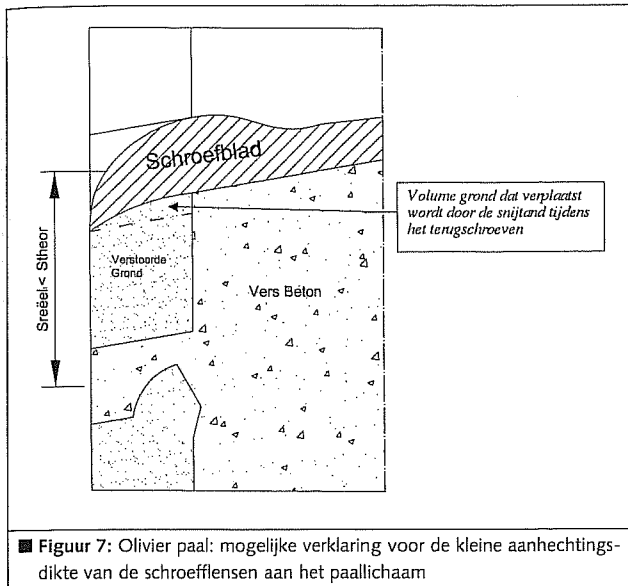
Paal C2 – Olivier: aanhechtingsdikte schroefvormige flensen

Bij de Olivier schroefpaal werd vastgesteld dat de maximale dikte van de schroefvormige flensen relatief groot is tot een diepte van 9 m en dat deze dikte afneemt wanneer de spoed van de gerealiseerde schroefpaal kleiner wordt dan de theoretische spoed (zie figuur 6). De maximale dikte van de schroefvormige flensen in de dichtgepakte zandlaag is niet gekend daar deze afgebroken werden tijdens het uitgraven van de paal en niet gerecupereerd konden worden. Wat echter meer is opgevallen bij de uitgegraven Olivier paal, is de aanhechting van de schroefvormige flensen aan het paallichaam. Vanaf een diepte van ongeveer 3 m kan men aan de onderkant van de schroefvormige flensen een inkerving waarnemen dicht tegen het paallichaam (zie foto 9), waardoor de aanhechtingsdikte van de flensen aan het paallichaam afneemt. Dit fenomeen neemt lichtjes toe met de diepte in de leemlaag. In de zandlaag, waar de flensen afgebroken werden tijdens het uitgraven, kon na inspectie van de breukvlakken worden geconcludeerd dat de aanhechtingsdikte van de schroefvormige flensen met het paallichaam zeer dun is geweest.

Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen kan gevonden worden in de vorm van de verdringingsboor (zie foto 10) en dit in combinatie met de gerealiseerde spoed tijdens het uitschroeven van de verdringingsboor versus de theoretische spoed van het schroefblad op de verdringingsboor (25 cm), wat geïllustreerd wordt in figuur 6.

Op foto 10 is duidelijk te zien dat de onderkant van het op de verdringingsboor aangebrachte schroefblad voorzien is





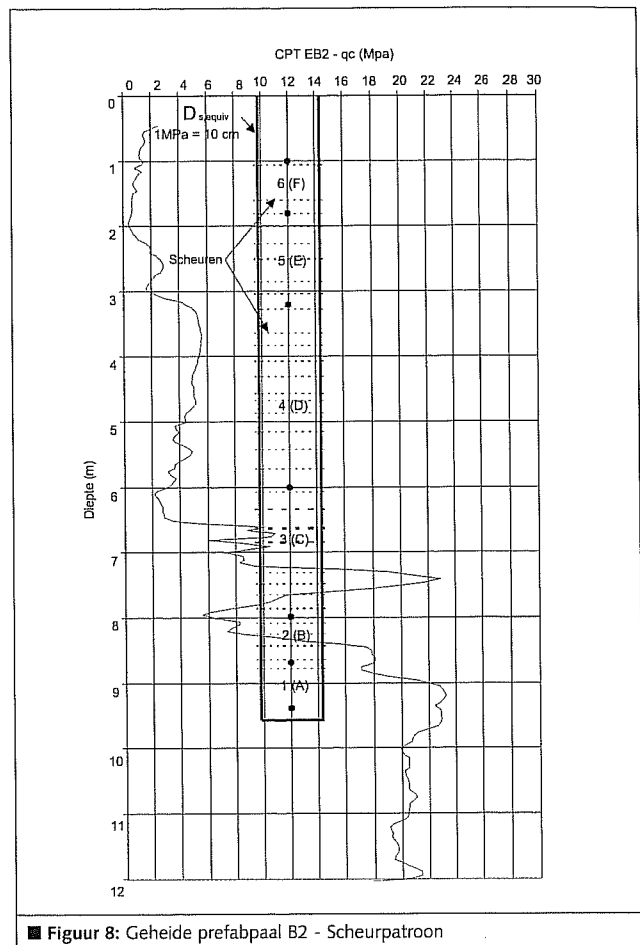
van een verdikking waarmee de relatief dikke flens van de Olivier palen gerealiseerd worden. Het uiteinde van dit schroefblad is voorzien van een snijtand. Doordat de onderkant van deze snijtand zich onder de helocoidale lijn van de schroef bevindt, wordt een zeker volume grond weggeduwd door de snijtand wanneer de verdringsboor teruggeschroefd wordt. Vermits er zich tijdens het terugtrekken van de verdringsboor vers beton langs deze snijtand bevindt (zie foto 10) doet er zich een ploegeffect voor, waardoor de bijzondere vorm van de schroefflens kan verklaard worden. Het geobserveerde fenomeen wordt hoogstwaarschijnlijk nog versterkt door het feit dat de grond in de dichtgepakte zandlaag reeds geroerd is door het schrapen tijdens het inschroeven enerzijds en door de neerwaarts gerichte kracht die het schroefblad van de verdringsboor uitoefent op de geroerde grond vlak onder het schroefblad wanneer deze teruggeschroefd wordt (in tegenwijzerszin) met een spoed die kleiner is dan de theoretische.

Het principe van deze theorie wordt geïllustreerd in *figuur 7*.

Er dient ook nog te worden opgemerkt dat tijdens de installatie van de Olivier palen er zich problemen hebben voorgedaan met het geleverde beton. De fluiditeit van het geleverde beton was, net zoals Fundex ervaarde, te droog in vergelijking met de door de aannemer vereiste fluiditeit. Dit werd ook opgetekend in de monitoringdata van de aannemer. Uit de beschikbare informatie kan men echter niet afleiden of de vorm van de schroefvormige flens dezelfde zou zijn als waargenomen indien beton met een juiste fluiditeit gebruikt zou zijn.

Paal B2 – Geheide prefabpaal: scheurpatroon

In de geheide (voorgespannen) prefabpaal werd een regelmatig scheurpatroon gedetecteerd dat veroorzaakt is door



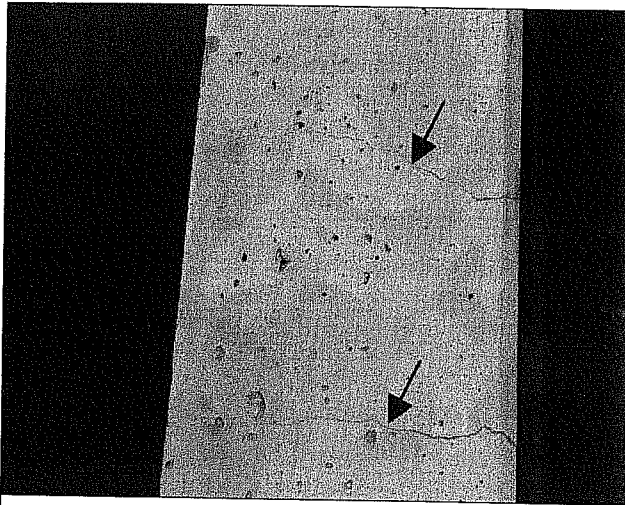
het heiproces (zie *figuur 8* en *foto 11*). Vooral in de zone tussen 1.7 m en 8.8 m diepte is het scheurpatroon regelmatig (scheuren om de 25 à 30 cm).

Bij de uitgegraven paal B2 werd bovendien met inclinometermetingen een duidelijke kromming opgemeten op een diepte van ongeveer 7 m (zie *figuur 9* en het artikel in het vorige nummer van *Geotechniek*). In dit paalgedeelte kan men drie scheuren terugvinden waarvan de scheurwijdte significant groter is dan die van de andere scheuren. Dit scheurpatroon alsook de aanwezigheid van de meer belangrijke scheuren op een diepte van 7 m werd eveneens waargenomen in de extensometermetingen uitgevoerd tijdens de statische belastingsproef op de paal B2.

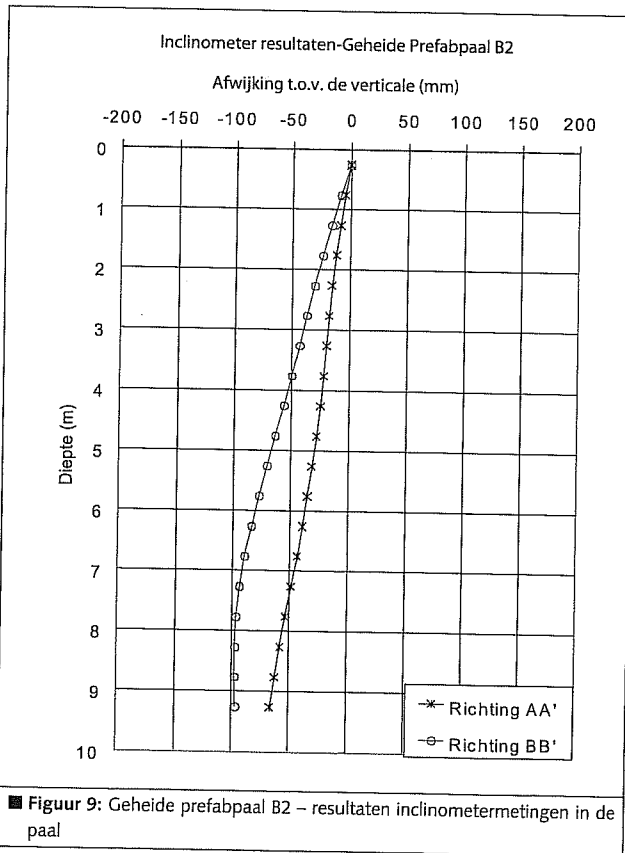
Conclusies

Op basis van de metingen en de observaties op de uitgegraven proefpalen te Limelette kan het volgende geconcludeerd worden:

1. Voor de meeste in de grond gevormde grondverdringende schroefpalen zijn de reële diameters minstens gelijk aan de nominale waarden. Voor de palen met een schroefvormige schacht (Atlas en Olivier) kan men vaststellen dat de afmetingen van de schroef-



■ Foto 11: Geheide prefabpaal B2 – Scheuren ten gevolge van het heien



vormige flensen in het dichtgepakte zand kleiner zijn dan die in de leemlaag.

2. De betonkwaliteit is in het algemeen goed en de druksterktes zijn vergelijkbaar met de druksterktes verkregen na 28 dagen op betonmonsters ontnomen tijdens de installatie van de palen en bewaard onder laboratoriumcondities. In het onderste paalgedeelte dat zich in de droge zandlaag bevindt, is de druksterkte van

het beton groter ten gevolge van een ontwateringseffect. Dit fenomeen is meer expliciet aanwezig indien de wapeningskorf in het verse beton getrild wordt na het installeren van de paal.

3. Zoals hiervoor aangetoond, kunnen details in de uitvoering een belangrijke invloed hebben op de vorm en de afmetingen van de gerealiseerde paal.

4. Externe factoren, zoals de kwaliteit van het geleverde beton, kunnen ernstige gevolgen hebben, zoals bijvoorbeeld segregatie.

5. De geheide voorgespannen prefabpalen vertonen een regelmatig scheurpatroon ten gevolge van het heien.

6. Het is de mening van de auteurs dat een ernstige en gedetailleerde monitoring van de uitvoeringsparameters gedurende de volledige installatieprocedure van in de grond gevormde schroefpalen (inschroeven én terugtrekken) absoluut noodzakelijk is om de kwaliteit van de gerealiseerde palen te verzekeren. Er dient nog onderzocht te worden in welke mate de metingen op de uitgegraven palen te Limelette gelinkt kunnen worden aan de beschikbare monitoringdata van de paaluitvoering.

7. Tenslotte kan uit de resultaten worden geconcludeerd dat er aanzienlijke verschillen bestaan zowel voor wat betreft de paaldimensies als voor de elasticiteitsmodulus van het beton. Deze variaties hebben een belangrijke invloed op de interpretatie van de extensometermetingen die uitgevoerd werden tijdens de statische paalbelastingproeven, en bijgevolg dus ook op paalbasisweerstand, de schachtwrijving en de mobilisatiecurves van de eenheidswrijving in de verschillende grondlagen die men uit deze data kan afleiden.

Een meer gedetailleerde analyse van deze extensometermetingen wordt momenteel uitgevoerd.

Literatuur

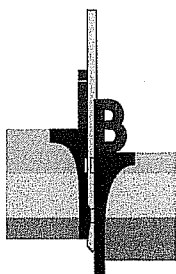
- [1] Huybrechts, N. & Maertens, J., 2002. Statische paalbelastingproeven op palen op grondverdringende schroefpalen in Boomse klei, Geotechniek, 6^e jaargang, nummer 3, juli 2002.
- [2] Huybrechts, N., Maertens, J., Mengé P., 2002. Resultaten van een uitgebreide grondonderzoekscampagne in de Boomse klei te Sint-Katelijne-Waver, Geotechniek, 6^e jaargang, nummer 4, oktober 2002.
- [3] Huybrechts, N. & Maertens, J., 2003. Excavation of the test piles on the Limelette site: observations and

measurements, Proceedings of the 2nd Symposium on screw piles, May 7th 2003, Brussels

- [4] Huybrechts, N. & Whenham, V., 2003. Pile testing campaign on the Limelette test site & Installation techniques of screw piles, Proceedings of the 2nd Symposium on screw piles, May 7th 2003, Brussels
- [5] Huybrechts, N. & Maertens, J., 2004. Statische paalbelastingsproeven op grondverdringende schroefpalen aangezet in tertiair zand, Geotechniek, 8^e jaargang, nummer 2, april 2004
- [6] Maertens, J. & Huybrechts, N., 2003. Belgian Screw Pile Technology: Design and Recent Developments, Lisse, The Netherlands (ISBN 90 5809 578 9).
- [7] Maertens, J. & Huybrechts, N., 2003. Results of the static pile load tests at the Limelette test site,

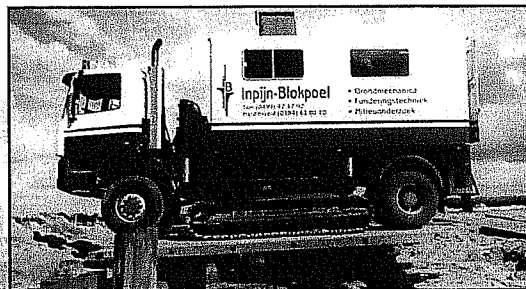
Proceedings of the 2nd Symposium on screw piles, May 7th 2003, Brussels

- [8] Mortelmans, F., 1988. Berekening van constructies deel 3 - Gewapend beton, Acco, Leuven.
- [9] 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 CC CIF - 562
- [10] 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



INPIJN-BLOKPOEL
ingenieursbureau

GEFUNDEERD OP GRONDIGE KENNIS



Op basis van gedegen in-situ en laboratoriumonderzoek geeft de adviesafdeling adviezen ten aanzien van ondermeer:

- bouwputontwerp
- bemaling / drainage
- bouwrijp maken
- funderingen
- gestuurde boringen
- schade expertise
- trillings- en geluidsmetingen
- akoestisch doormeten palen
- heibegleiding
- bouwkundige expertise
- milieu-onderzoek en advisering
- asbest inventarisatie

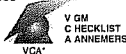
Zijn deze vakgebieden een uitdaging voor u, wilt u zich hierin verder ontwikkelen, of wenst u nadere informatie, neem dan contact op met Ing. G.J.P. Six.

INTRON
CERTIFICATIE
Erkend door de Staat voor Accreditatie



BNL SIKB 1000 VKB 1016
BNL 5052 ASBESTINVENTARISATIE

NEN-EN-ISO 9001: 2000



GECERTIFICEERD BEDRIJF

Ekkersrijt 2058 5692 BA Son
Kubus 121 3364 DG Sliedrecht
E-mail: post@inpijn-blokpoel.com

Telefoon (0499) 47 17 92
Telefoon (0184) 61 80 10
Internet: www.inpijn-blokpoel.com

Telefax (0499) 47 72 02
Telefax (0184) 61 87 82