

Toepassing van dynamisch plofverdichten en resonant trilverdichten binnen een fabrieksgebouw in oprichting - een geotechnische uitdaging.

Ir. Flor De Cock, Geo.be - Geotechnical Expert Office
Ing. J. Moens, Ingenieurs- en Expertisebureau Jopro

Samenvatting

Slechts in een laat stadium van de oprichting van een omvangrijk fabrieksgebouw werd vastgesteld dat de bodemgesteldheid plaatselijk sterk afweek van de ontwerpparameters. De aanwezigheid van los gepakte zandlagen tot 4 à 5 m diepte vereiste aldus een ultieme grondverbetering, zowel onder bestaande funderingszolen als ter plaatse van de nog te realiseren fabrieksvloer met opslagrekken en de talrijke zwaar belaste en zettingsgevoelige machine-fundaties. Er werd gekozen voor een weinig voor de hand liggende toepassing van dynamisch plofverdichten en resonant trilverdichten, dit in combinatie met een voorafgaandelijke PU-injectie onder de funderingszolen. Ontwerp en uitvoering van de verdichting werden nagenoeg continu begeleid en bijgestuurd via trillingsmetingen, zakkingsmetingen op de bestaande kolommen en zakkingsmetingen van het terrein.

De constructie

Recentelijk werd in Belgisch Limburg een omvangrijke fabriekshall (totale investering ca. 75 MIO EURO) opgericht. Het industriegebouw beslaat een oppervlakte van ca 4 ha, en strekt zich uit over een lengte van ongeveer 240 m bij een breedte van 156 tot 172 m. Gevels, dak en loopbruggen worden gedragen door een staalstructuur, met hoofdkolommen in 16 dwarse rijen (C t/m R) alle 14 à 20 m en 14 langse rijen (0 tot 34) alle 13.5 m. Het grootste gedeelte van het gebouw omvat één vrije hoogte van maaiveld tot dak van ca. 12 m. Plaatselijk komen een 2-tal tussenvloeren voor. Tussen assen M en N en tussen assen N en P komt een verdiepte betonnen bakconstructie voor (hieronder benoemd met "kelder 2" en "kelder 1"), met aanzet op peil +7.5 resp. +7.0. De vloeren zijn over grote delen vrij zwaar belast, hetzij door opslagrekken, hetzij door de diverse fabricatie-installaties die meestal op afzonderlijke betonsokkels worden gefundeerd. Terwijl de staalstructuur slechts matig zettingsgevoelig is, zijn de machinefundaties om redenen van precisie-fabricatieprocessen wel sterk gevoelig voor zettingen en zettingsverschillen.

Goed begonnen is ...

Mede omwille van de zettingsgevoeligheid van het industrieel proces, werden in opdracht van de bouwheer in eerste instantie een 6-tal mogelijke bouwterreinen in België grondmechanisch onderzocht, dit door de uitvoering van 3 diepsonderingen 100 kN op ieder bouwterrein in optie, en de confrontatie van deze onderzoeksresultaten met de beschikbare geologische kaarten. Uiteindelijk werd de locatie in Limburg met de aanwezigheid van dicht gepakte zanden weerhouden, evenwel niet het oorspronkelijk geopteerde bouwterrein, maar een perceel op enkele 100 m er vandaan gelegen. Een aantal verkennings-putten op het weerhouden perceel bevestigden de aanwezigheid van de verwachte uitgesproken zandlagen, weliswaar met enige kleurschakeringen.

Voor het gebouw werd aldus in volle vertrouwen een fundering op staal voorzien en uitgevoerd, grotendeels aangezet op ca. 2.5 m diepte onder toekomstig vloerpeil +10.0 (of dus op relatief peil +7.5). De funderingswerken startten in de zomer 2002. De ruwbouw (staalstructuur, gevels en dak) waren beëindigd januari 2003 (Figuren 1a en b). Hierna werd het studie bureau Jopro belast met de studie van de vloeren en machinefundaties. Uit een aanvullend (?) grondonderzoek van 34 diepsonderingen dat begin februari 2003 op zijn verzoek werd verricht, bleek dat het merendeel van de sonderingen de vooropgestelde aanwezigheid van dicht tot zeer dicht gepakte zandlagen bevestigden. Echter tot grote verontrusting bleken een 8-tal sonderingen een sterk verschillend beeld te geven en te wijzen op de lokale aanwezigheid, tussen ca. 1.5 en 3 m diepte, van merkelijk zwakkere zones ten gevolge van een plaatselijke veel lossere pakking van het zand of (zoals uit later onderzoek is gebleken) plaatselijk ten gevolge van het voorkomen van veen.



Figuur 1a : buitenzicht



Figuur 1b : buitenzicht activiteiten

Te trekken lessen uit de situatie

- *Bezuinigen op grondonderzoek is misschien slim, maar niet wijs !*
- *Consultatie van geologische gegevens is nuttig, maar dient op de locatie te worden geverifieerd*
- *Kwantitatieve beoordeling van de dichtheid/draagkracht van (zand)grond (in verkenningsputten of funderingsputten) is niet steeds éénvoudig*

Evaluatie van de problematiek

Aldus stond men middenin de volle rush naar het verder afwerken van het complex (vloeren, machinefundaties, technische uitrusting, rolbruggen, ...) en met een scherpe opleveringsdatum van eind oktober op het bord, voor een dringend antwoord op de volgende vragen :

1. Nauwkeuriger bepaling van de uitgestrektheid, diepte en grondsamenstelling van de zwakkere zones
2. Mogelijke oplossingen voor de machinefundaties en de tussengelegen vloerconstructies
3. Te nemen maatregelen voor de kolommen van de draagstructuur; waarvan de reeds bestaande funderingszolen op zwakkere zones zijn aangezet.
4. Eventueel te nemen maatregelen onder de ingegraven betonnen kelderconstructies, waarop later nog opslagrekken worden geplaatst.

Binnen een zeer korte tijdspanne werden de volgende stappen ondernomen :

Dag 1 : Bespreking en definiëring van de problematiek

Evaluatie van mogelijke oplossingen, zoals

- Grondvervangning in open uitgraving
- Paalfundering onder de machinefundaties, bvb. micropalen of kokerpalen
- Grondstabilisatie met Jetgrout-kolommen (hogedruk cementinjectie)
- Grondstabilisatie met lagedruk injectie met cement of harsen (permeation grouting)
- Verdichting en versterking door mortelinjectie (compaction grouting)
- Verdichting door dynamisch oppervlakteverdichten (ploffverdichten)
- Verdichting door trillingen, hetzij in de diepte met trilprofiel, hetzij aan de oppervlakte met trilwals.

Mits dit naar uitvoerbaarheid, termijn en prijs aanvaardbaar was, werd volgende oplossing weerhouden :

- **Voorbehandeling van de aanzetlaag onder de kolomfunderingen d.m.v. injectie met expanderend polyurethaanschuim**
- **Verdichting van de los gepakte zandlagen door middel trilverdichting in de diepte (resonant trilverdichten) en ploffverdichten**
- **Plaatselijk (bvb. bij belangrijke aanwezigheid van veen) : grondvervangning.**

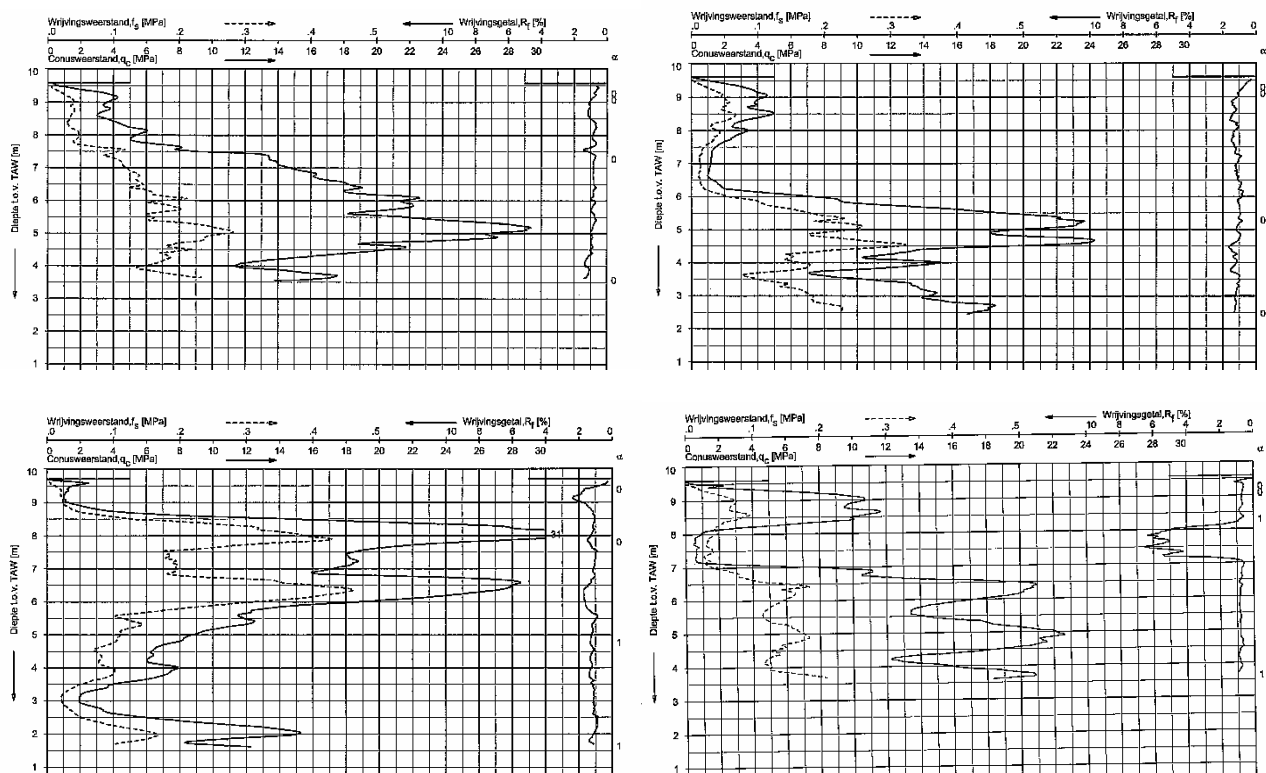
Dag 2 : contactname met aannemers voor injectie- en verdichtingswerken

Dag 3 : bestelling diepsonderingen voor nauwkeuriger bepaling bodemopbouw over de hele bouwoppervlakte

- Dag 4 : bespreking technische voorstellen met aannemers
- Dag 4 en 5 : uitvoering van ca. 350 bijkomende sonderingen met 7 sondeerwagens Fugro
- Dag 6 : evaluatie van 1ste "verdachte" zone en onderinjectie van 6 kolomfunderingen
- Dag 7 : oef !
- Dag 8 : aanvoer installatie voor ploffverdichten
- Dag 9 en 10 : realisatie proefvak met ploffverdichten, onder begeleidende metingen
- Dag 12 : realisatie proefvak met resonant trilverdichten, onder begeleidende metingen.

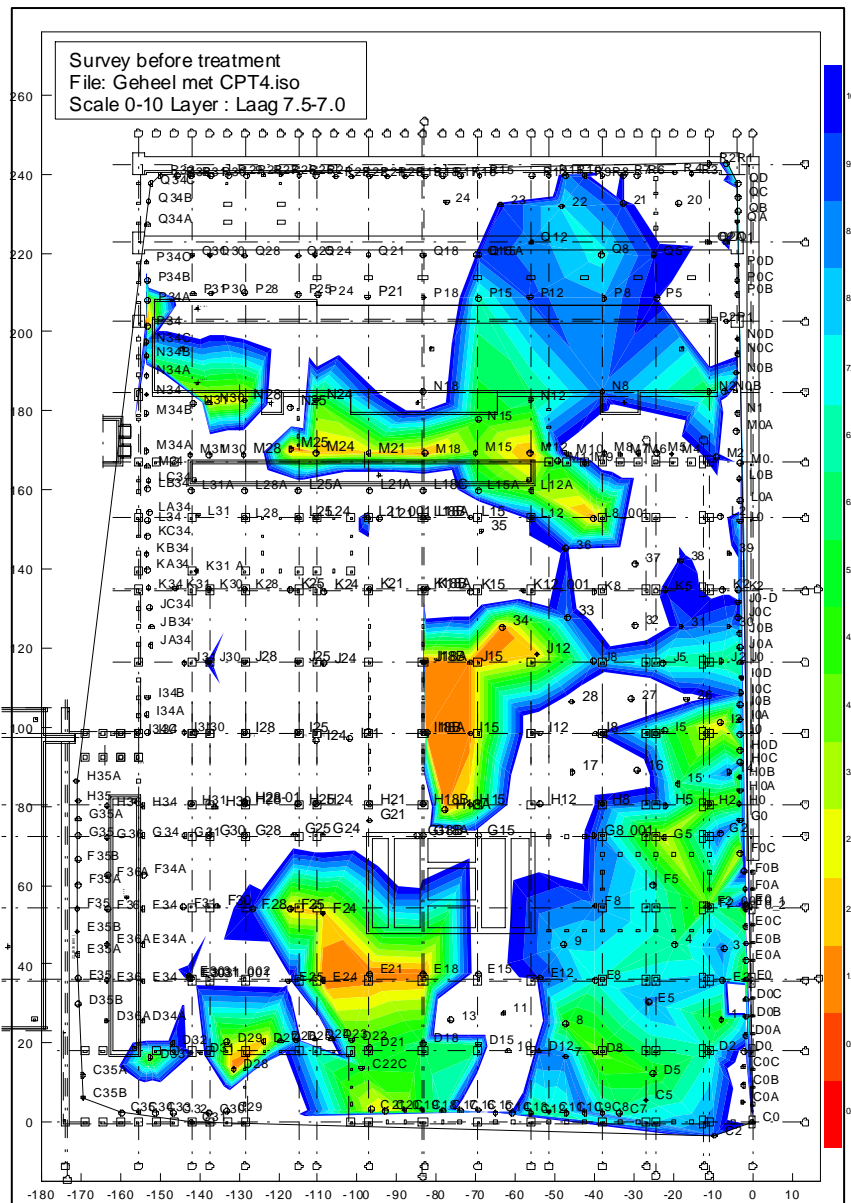
Resultaten en analyse van aanvullend grondonderzoek

Op 2 dagen tijd werden aldus een 350-tal (!) sonderingen met elektrische conus verricht, tot een diepte van ca. 6 à 7 m. In principe werd naast elke draagkolom een sondering uitgevoerd (voor zover niet gehinderd door werfmateriaal of door de rijplaten van de binnen-werkwegen). In latere fase werden ter aanvulling nog een 50-tal sonderingen verricht om het raster te verfijnen en de zoneringen beter af te bakenen. Enkel typische sonderingen zijn gegeven in figuren 2a t/m 2d.



Figuur 2 : enkele typische sondeerdiagrammen : (a) verwachte bodemopbouw; (b) zone met los gepakte bovenzanden; (c) zone met los gepakt zand op diepte; (d) lokaal voorkomen van veenlaag

Terwijl de uitvoering van de proeven vlot en vlug verliep, stelde zich evenwel op korte termijn het probleem van de verwerking van dit uitgebreid bundel van proefresultaten. Er werd gekozen voor het karteren, per 0.5 m laagdikte, van de gemiddelde conusweerstand. Aldus werd een serie geografische kaarten opgesteld, vertrekkend van de eerste 0.5 m deklaag, tot ca. 5.0 m diepte. In figuur 3 wordt bijvoorbeeld de kaart gegeven met aanduiding van de gemiddelde conusweerstand in de laag tussen relatief peil +7.5 en +7.0; de schaal is begrensd op een conusweerstand van 10 MPa (witte zones). Deze kaart is van bijzonder belang, aangezien de meeste funderingszolen zijn aangezet op het peil +7.5, en deze kaart aldus informatie geeft over de pakkingsdichtheid direct onder funderingspeil.



Figuur 3 : kartering gemiddelde conusweerstand tussen peil +7.5 en +7.0

Uit de analyse van de sonderingen en de kartering werden de volgende besluiten afgeleid :

1. In tegenstelling met wat oorspronkelijk was verwacht, wordt de site gekenmerkt door een zeer heterogene bodemgesteldheid, met plaatselijk los gepakt zand en lokaal ook veeninsluitingen.
2. In hoofdzaak kunnen 5 "verdachte" zones worden onderscheiden (zie bijhorende sondeerdiagrammen)
 - Zone 1 : Een zuidelijke zone tussen assen C-G/6-29
 - Zone 2 : Een centrale zone tussen assen H-K/8-21
 - Zone 3 : Een noordelijke zone lopend vanaf de zuid-oostelijke hoek onder kelder 2 tot de zuid-westelijke hoek onder kelder 1.
 - Zone 4 : Nabij kolom F11, waar zeer zettingsgevoelige meetinstallaties worden geplaatst.
 - Zone 5 : Een oostelijk gebied in de omgeving van kolommen I-0 en I-2, waar de sonderingen wijzen op de aanwezigheid van veen.
3. De maximum diepte tot waarop zwakkere zones zijn gevonden bedraagt ongeveer 5 m, met uitzondering van enkele proeven in de noord-westelijke hoek waar op een diepte van ca. 6 m tot 9 m geringe weerstanden zijn opgemeten.

Lessen uit de analyse van het aanvullend grondonderzoek

- Het verwerken van 400 diepsonderingen was vrij tijdrovend en arbeidsintensief door gebrek aan interface tussen sondebestanden en karteringsprogramma.
- Het verwerken werd bemoeilijkt door o.a. moeilijke co-ordinatie tussen topografische inmeting van de sondeerpunten en het sondebedrijf, enkele dubbele of onduidelijke sondeernummers, ...
- De kartering per 0.5 m bleek uiteindelijk een goed werkinstrument te zijn voor evaluatie en besluitvorming over de uitgestrektheid en methodiek van grondverbetering.

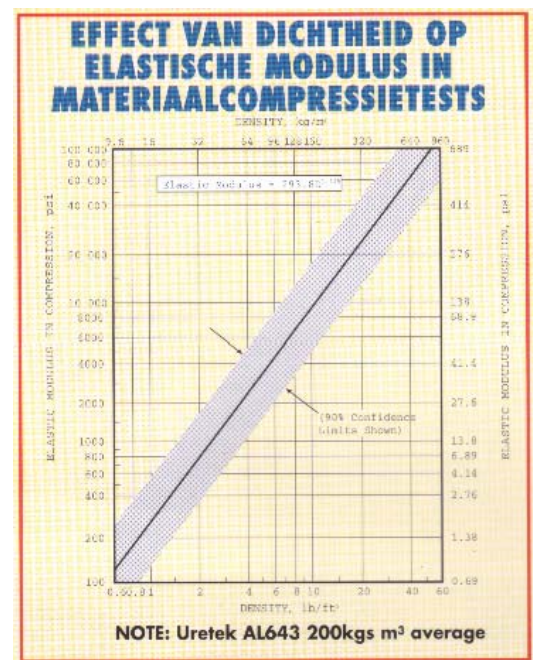
Bondige beschrijving van de weerhouden speciale technieken

1. Polyurethaaninjectie

Bij de bodemstabilisatie volgens het weerhouden procédé URETEK, wordt een 2 componentenhars in diepte in de grond gespoten via dunne (10 of 16 mm) injectiepijpen en een speciaal ontworpen injectiepistool (zie figuur 4). Het samenvoegen van de 2 componenten zorgt voor een belangrijke expansie van het polyurethaan-hars. Het toegepaste hars is gekenmerkt door een maximum vrije expansiefactor van meer dan 10 en een maximum expansiedruk tot 10 MPa. De volume-expansie vermindert en de dichtheid en E-modulus van het hars vermeerderd bij toenemende weerstand van de omgevende grond (zie figuur 5). In zandlagen zorgt de volume-expansie voor een verdichting van de grond ter plaatse, samen met een versterking en binding door het verharde schuim. In cohesieve gronden zorgt het ontstane netwerk van migrerend hars voor een grondversterking, een toename van de draagkracht en een reductie van de samendrukbaarheid.



Figuur 4 : polyurethaaninjectie en laserverklikker



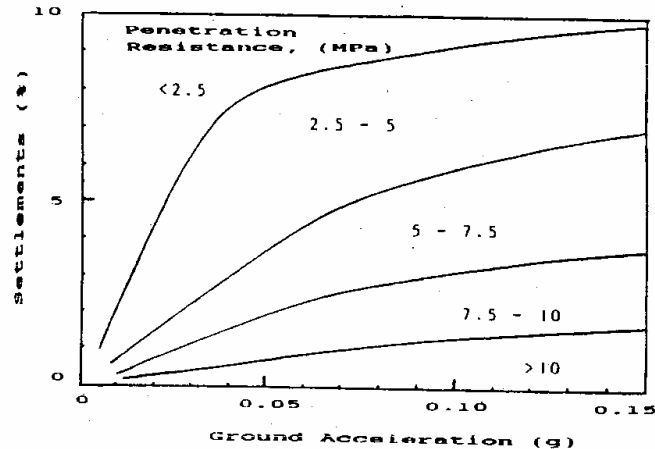
Figuur 5 : E-modulus in functie van dichtheid

Naast of in combinatie met de grondverdichting of grondversterking, beoogt men met de expanderende polyurethaan-injectie vaak ook een onderhogen (oppersen) van verzakte vloerplaten of funderingen, in combinatie met een herstel van het contact tussen grond en constructie.

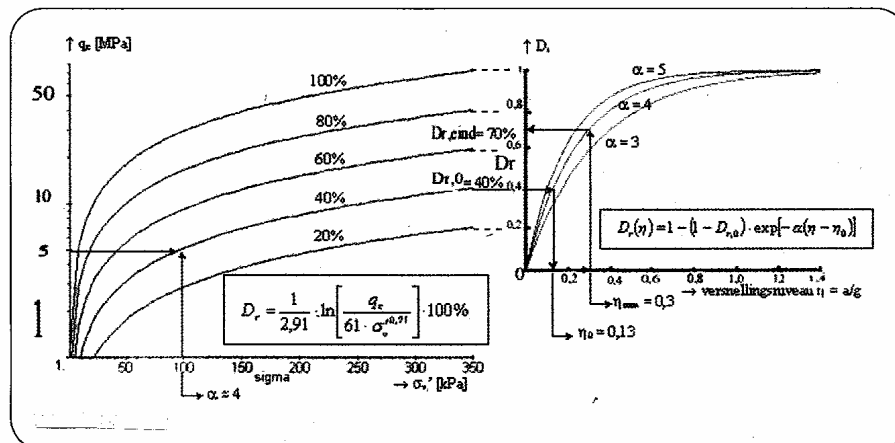
Het ontwerp van de polyurethaaninjectie is nog grotendeels gebaseerd op werfervaring en observatie bij uitvoering. Voor dit laatste maakt men gebruik van laserverklikkers (zie figuur 4) die op de constructie worden aangebracht. Bij stabilisatie-toepassingen wordt veelal de injectie beëindigd wanneer een uplift van 1 à 2 mm wordt geregistreerd.

2. Resonant trilverdichten

De methode bestaat in het intrillen van speciaal ontworpen profielen door middel van een krachtig vertikaal trilblok met regelbare frequentie, dat op de kop van het profiel is bevestigd. Het profiel wordt aldus geëxciteerd in verticale richting, waarbij de trillingsenergie over de gehele lengte van het profiel aan de grond wordt overgedragen. Deze trillingen resulteren uiteindelijk in een verdichting van de grond, zonder dat hierbij bijkomend materiaal in de grond wordt aangebracht. Door o.a. Massarsch (De Cock, 1994) zijn empirische curven opgesteld die voor verzadigde zandgronden de relatie geven tussen initiële conusweerstand, opgewekte versnellingsamplitude a en terreinzakking (figuur 6). Andere studies (o.a. Barkan, 1962) beschrijven de relatie tussen verdichting (poriëngetal e) en het versnellingsniveau $\eta = a/g$. Door Hergarden & van Tol (2001) is deze relatie omgezet in een q_c - D_r - η diagram (figuur 7).



Figuur 6 : Terreinzakking in functie van trillingsniveau (De Cock, 1994)



Figuur 7 : Relatieve dichtheid in functie van trillingsniveau (Hergarden & van Tol, 2001)

Bij het resonant-trilverdichten wordt maximaal voordeel gehaald uit de belangrijke verhoging van de trillingsamplituden in de grond wanneer de grond wordt geëxciteerd om en nabij zijn resonantie-frequentie. Een dergelijk gunstig effect wordt bereikt door tijdens het verdichtingsproces het toerental van het trilblok in te stellen op één van de eigen frequenties van het te behandelen grondmassief.

Verdichting door trillingen werkt het meest efficiënt voor zandlagen die met water verzadigd zijn. De opgewekte trillingen veroorzaken hierbij in eerste instantie cyclisch wisselende schuifspanningen in de grond, maar ook waterspanningen. Hierdoor nemen de korrelspanningen af, waardoor de mobiliteit van de zandkorrels toeneemt en de korrels zich gemakkelijk gaan verplaatsen en herschikken naar een dichtere pakking. In onverzadigde gronden worden deze waterspanningen niet opgebouwd, terwijl bovendien enige capillaire cohesie het herschikken van de grondkorrels nog enigszins bemoeilijkt. In onverzadigde gronden zal het dan ook vaak nodig zijn een nauwer stramien van verdichtingspunten toe te passen dan bij verzadigde gronden.

3. Plofverdichten

Bij het plofverdichten wordt de grond verdicht door het herhaaldelijk laten neervallen van een zwaar valgewicht (8 à 20 t) vanaf grote hoogte (10 à 20 m) op het terreinoppervlak. De belangrijke impactenergie wordt in de grond door longitudinale golven (compression waves) en transversale golven (shear waves) verspreid. In los gepakte onverzadigde korrelige gronden leiden de verhoogde korreldrukken en de cyclische schuifspanningen tot een herschikken van de korrels en een reductie van het poriënvolume. Ook voor deze methode zijn de ontwerpregels nog merendeels empirisch en gebaseerd op de werfervaringen. Enkele vuistregels voor onverzadigde zandgronden zijn :

- Invloedsdiepte H in functie van de impactenergie Wh (W in ton, h in m) : $H = 0.6 \text{ à } 0.7 \sqrt{Wh}$
- Vereiste totale impactenergie ΣWh per m³ te verdichten grond : $\Sigma Wh = 35 \text{ à } 50 \text{ tm/m}^3$
- Trillingsamplitudes in de omgeving (v in mm/s, Wh in Nm, D in m) : $v = 0.5 \text{ à } 1.5 \sqrt{Wh/D}$

Ontwerp van de technieken en plan van aanpak

1. Polyurethaan-injectie

Voor de kolommen die in het te realiseren verdichtingsveld zijn gelegen (in het totaal 23 kolommen) is voorafgaand aan de verdichting geïnjecteerd langs de 4 zijden van iedere kolom. Telkens is geïnjecteerd tot via de laserverklikkers een aanzet tot rijzing van ca. 1 à 2 mm werd vastgesteld. De harsverbruiken varieerden tussen ca. 100 en 260 kg/kolom.

Voor de verdachte zone onder kelder 2 werd een injectie uitgevoerd in 2 fasen :

- Fase 1 : een "beschermende" injectie vóór aanvang van de verdichtingswerken, via injectiepijpen die schuin vanaf het terrein onder de zuidelijke rand van de kelder werden aangebracht.
- Fase 2 : een "stabilisatie"-injectie via verticale injectiepijpen door de keldervloer. Er werd in 3 lijnen een totaal van 72 injectiepunten aangebracht in een driehoekig raster van 2.25 x 2.0 m². Iedere lijn bestond opeenvolgend uit 2 "grondverstevigings-injecties" op diepte, afgewisseld met 1 "contact-injectie" direct onder de kelderplaat. A priori was uitgegaan van een maximum verbruik van 50 kg voor de stabilisatie-injectie en van 30 kg voor de contactinjectie. Het reële verbruik bedroeg gemiddeld slechts ca. 68 % van dit maximum.

2. Plofverdichten en trilverdichten

Het ontwerp van de beide verdichtingsmethodes binnen een bestaande constructie stond voor een belangrijk dilemma :

- Enerzijds moet ten behoeve van de verdichting een zo hoog mogelijke energie in een zo kort mogelijke tijd in de grond worden geleid. Het gecreëerde trillingsniveau moet hierbij voldoende hoog zijn en minstens een drempelwaarde overschrijden om tot op de vereiste diepte de gewenste verdichting te bereiken.
- Anderzijds moet worden vermeden dat de opgewekte trillingen geen aanleiding geven tot schade in de constructie :
 - hetzij door inklinking van de losgepakte zanden onder de funderingszolen
 - hetzij door een te hoog trillingsniveau in de bovenstructuur.

Bovendien, zoals hierboven reeds gezegd, steunt het ontwerp van zowel plofverdichten als trilverdichten op een aantal empirische rekenregels en werkervaringen, die tevens vooral van toepassing zijn op verzadigde gronden. Het was vrij onzeker of deze rekenregels ook van toepassing waren voor het betrokken geval van een onverzadigde zandgrond.

In het betrokken geval is gebruikt gemaakt van :

- Een valgewicht van 4.5 t, met valhoogtes tot maximum 5 m (figuur 8a)
- Een trilprofiel met een lengte van 6 m (figuur 8b).



Figuur 8a : Plofverdichten



Figuur 8b : Trilverdichten

Het plan van aanpak bestond uit de volgende stappen.

Stap 1 : Voorafgaandelijke stabilisatie-injectie onder de kolommen in de te verdichten zones (zie hierboven)

Stap 2 : Realisatie van een proefvak, zowel met het plofverdichten als met het trilverdichten, begeleid met :

- Trillingsmetingen op het terrein en op de nabijgelegen kolommen
- Zakkingsmetingen op de nabijgelegen kolommen
- Zakkingsmetingen van het terrein, in casu meting van de diepte van de impacttrog in functie van de toegepaste plofenergie of de trilverdichtingstijd
- Bepalen van de eigen frequentie van de grond en afregelen van het toerental van het trilblok voor maximale grondrespons.
- Uitvoering van controlesonderingen in en tussen de verdichtingspunten bij verschillende energieniveau's.

Stap 3 : Vastleggen van het verdichtingsstramien, de maximum toegestane valhoogte, het aantal impacts per verdichtingspunt, tijd en de frequentie voor het trilverdichten

Stap 4 : Verdere opvolging en bijsturen van de verdichting, door verdere trillingsmetingen, zakkingsmetingen van structuur en terrein en controlesonderingen (in het totaal ca. 100)

Stap 5 : Eindcontrole verdichting door 3 controlesonderingen in ieder kolomraster (nogmaals ca. 150 sonderingen).

Beschrijving en analyse van de uitgevoerde metingen

1. Trillingsmetingen

Tijdens de verdichtingswerken zijn met een bemand meetsysteem Fugro (figuur 9a) trillingsmetingen uitgevoerd op 5 (steeds wisselende) punten, nl. 4 meetpunten op de meest nabijgelegen kolommen en één meetpunt op het maaiveld (figuur 9b). In ieder meetpunt zijn de versnellingen gemeten in drie orthogonale richtingen, namelijk verticaal (V), horizontaal loodrecht op de kolomvoet (H1) en horizontaal evenwijdig met de kolomvoet (H2). Een typisch signaal voor het plofverdichten en voor het trilverdichten is gegeven in figuur 9b.



Figuur 9a : Trilmeetsignaal



Figuur 9b : Versnellingsopnemer op de kolomvoet

Onderstaande tabel geeft een samenvattend overzicht van de meetresultaten (rapport Fugro, 2003)

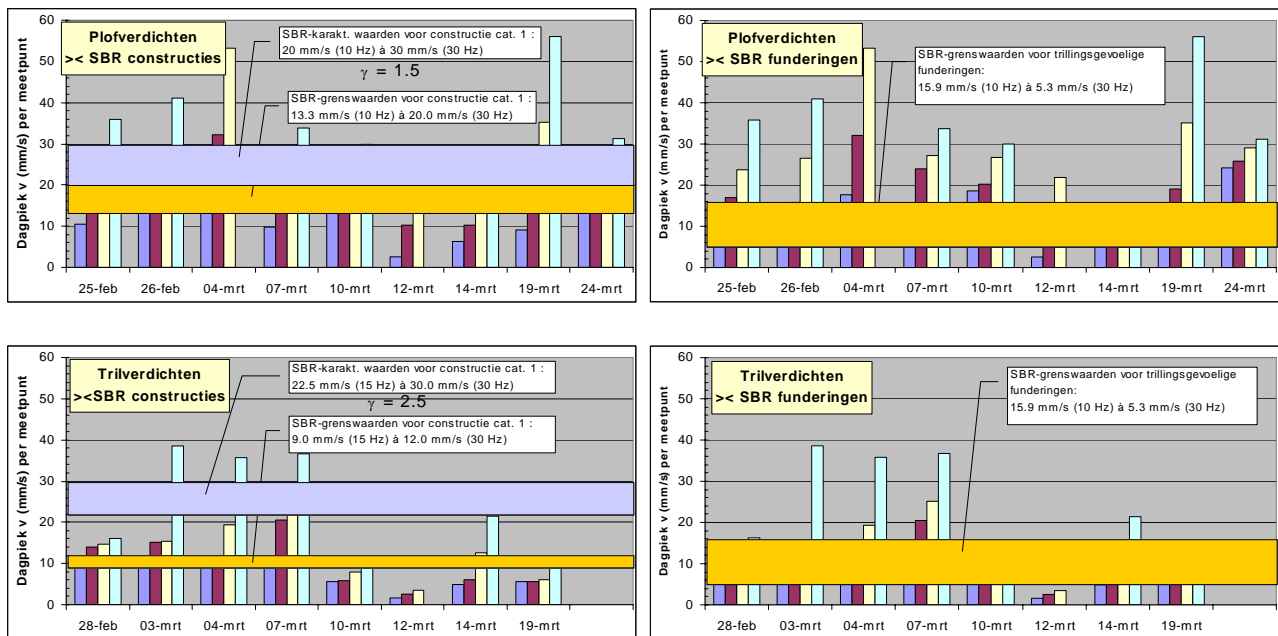
Dag	Activiteit	Plofverdichten			Trilverdichten				
			Piek a (mm/s ²)	Dominante frequentie (Hz)	Piek v (mm/s)	Activiteit	A piek (mm/s ²)	Dominante frequentie (Hz)	Piek v (mm/s)
25-2	Klappen 1, 2 en 3 m	V	651/2179	10/14	10.5/24.9				
		H	587/3136	10/14	9.5/35.9				
26-2	Klappen 3 m	V	484/2388	11/12	7.0/31.9				
		H	723/3607	7/14	15.6/41.0				
28-2					Trillen 15 Hz	V 298/832	12/17	3.9/7.7	
						H 416/1803	13/18	5.0/16.2	
3-3					Trillen 20 Hz	V 456/3248	17/22	4.4/23.8	
						H 772/3881	18/16	6.9/38.6	
4-3					Trillen 25 Hz	V 387/1374	15/20	4.1/11.1	
						H 725/4485	18/20	6.6/35.7	
4-3	Klappen 3 en 4 m	V	737/2868	10/12	11.9/37.4	Trillen 35 Hz	V 820/3446	18/35	7.4/15.7
		H	1684/4348	16/13	16.6/53.2		H 773/4153	17/18	7.3/36.7
7-3	Klappen 3.5 m	V	444/3557	11/22	6.6/25.7	Trillen naast	V 301/759	15/15	3.2/7.9
		H	657/5100	16/24	6.6/33.8	kelder 2	H 171/1080	16/15	1.7/11.5
10-3	Klappen 4 m	V	892/2671	15/18	9.4/23.4				
		H	1291/3376	23/18	8.9/29.9				
12-3	Klappen 4 m Meten op kelderwand	V	290/1928	19/14	2.4/21.5	Metten op	V 140/348	31/16	0.7/3.5
		H	152/3029	19/22	1.3/21.9	kelderwand	H 51/496	20/31	0.4/2.6
14-3	Klappen 4 m	V	494/1140	13/12	6.2/15.2	Trillen naast	V 298/511	16/15	3.0/5.3
		H	168/1649	9/18	3.0/15.0	L12	H 151/2042	16/15	1.5/21.4
19-3	Klappen 4 en 5 m	V	640/4540	11/13	9.0/55.6		V 347/890	17/18	3.2/7.8
		H	353/4516	14/13	4.2/56.1		H 291/1270	16/18	2.8/11.5
24-3	Klappen 4 en 5 m	V	1458/2932	11/18	21.1/25.7				
		H	1743/5153	14/26	19.7/31.2				

De gemeten trillingsintensiteiten zijn getoetst aan de SBR meet- en beoordelingsrichtlijnen, uitgave september 2002. Met andere woorden : de rekenwaarde van de gemeten topsnelheid wordt vergeleken met de rekenwaarde van de grenswaarde waarbij volgens de SBR richtlijn de kans op constructieve schade aan gebouwen (of onderdelen daarvan) aanvaardbaar klein is. Hierbij is het volgende gehanteerd :

- Aangezien er sprake is van een uitgebreide meting, is de partiële veiligheidsfactor gelijk aan 1.0

- Het bouwwerk is geklasseerd onder categorie 1, nl in goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout. De SBR richtlijn merkt op dat gebouwen bestaande uit staal in wezen buiten het toepassingsgebied vallen, maar in het algemeen minder kwetsbaar zijn dan categorie 1.
- Als trillingsbron beschouwen we het plovverdichten, net als heiwerkzaamheden, als een herhaald kortdurende trillingsbron en het trilverdichten als een continue trillingsbron. Omwille van vermoeiingseffecten in bouwmaterialen moet worden uitgegaan van een partiële veiligheidsfactor van 1.5 (heien) en 2.5 (trillen) op de karakteristieke grenswaarde.
- Gezien het risico op verdichting van de funderingsaanzet, worden de funderingspoeren als trillingsgevoelig bestempeld.

De toetsing van de dagelijks gemeten maximum piekwaarden aan de SBR grenswaarden voor de constructie resp. voor de fundering is in de figuren 10a t/m 10d gegeven. Men kan hieruit besluiten dat zowel de plovverdichting als de trilverdichting hebben geleid tot een overschrijding van de SBR grenswaarden (rekenwaarden, inclusief partiële veiligheidsfactor), zowel met betrekking tot schade aan de draagconstructie als schade aan trillingsgevoelige funderingen. Dat dergelijke schade niet is opgetreden is wellicht voor een groot gedeelte te wijten aan de toegepaste vóórbehandeling met de PU-injectie.



Figuur 10a t/m 10d : Toetsing van de gemeten trillingen aan de SBR (sept. 2002) toelaatbare rekenwaarden

2. Zakkingsmetingen

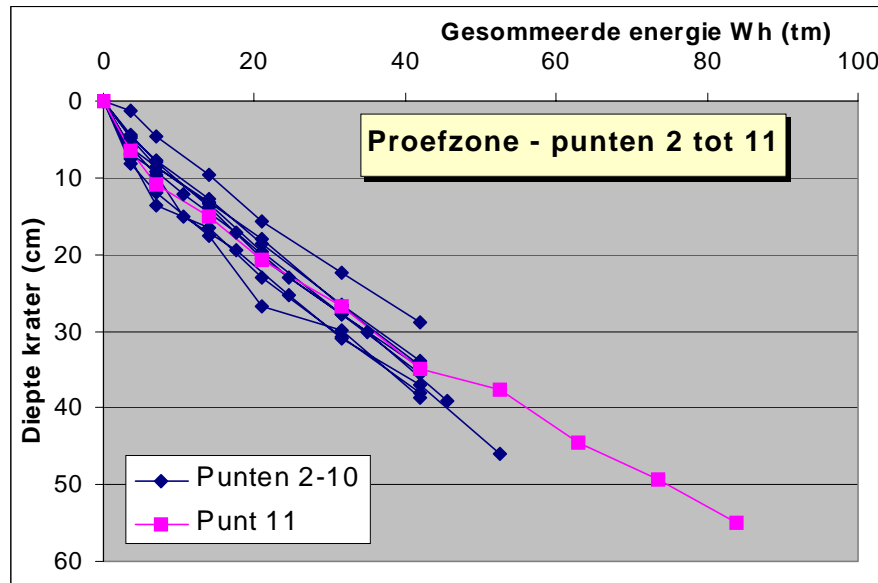
Een aantal foto's met de ontstane verdichtingskraters is gegeven in figuren 11a t/m 11c.



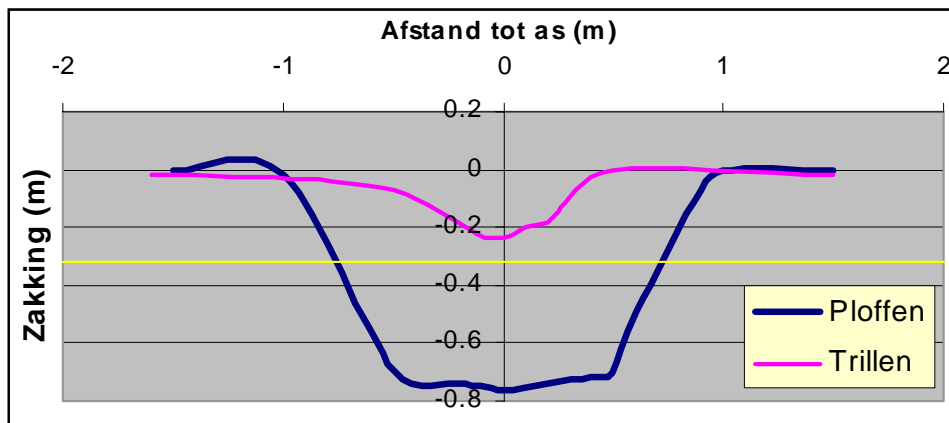
Figuren 11 a t/m 11c : Verdichtingskraters

De resultaten van de zakkings-metingen van het terrein die een goede en directe maat zijn voor het verdichtingseffect, zijn samengevat in de figuren 12a en 12b :

- Figuur 12a geeft een bundeling van de metingen in het proefvak voor de plofverdichting.
- Figuur 12b geeft de vorm van een typische verdichtingskrater bij plofverdichten en trilverdichten. Tevens is op deze figuur de gemiddelde terreinzakking van 32 cm gegeven, die na verdichting en hernivelleren in een zuidelijk vak is gemeten.



Figuur 12a : Diepte van de plofkrater in functie van toegepaste energie



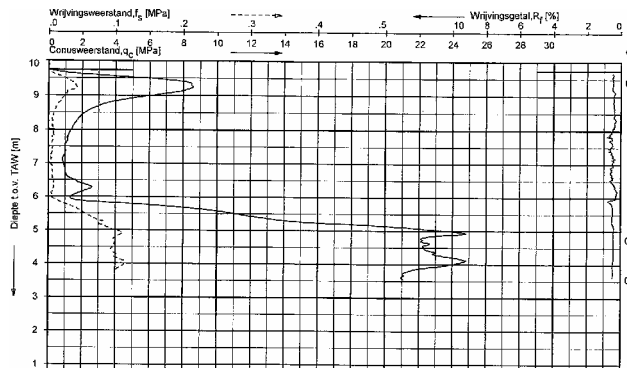
Figuur 12 b : Typische vorm van de krater bij plofverdichten en bij trilverdichten

De kolomzakkingen bleven meestal beperkt tot 3 à 4 mm. Hogere waarden werden enkel gemeten bij :

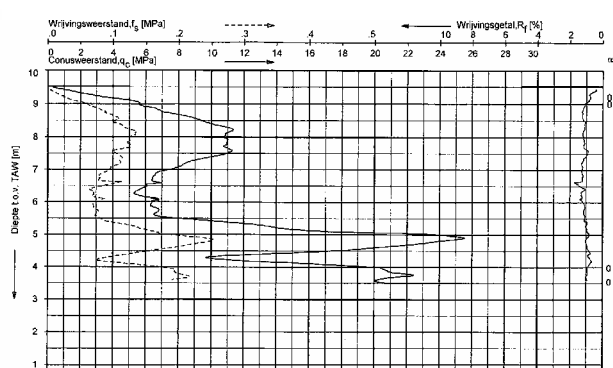
- Kolommen J15 (5 mm) en I15 (11 mm), die om reden van toegankelijkheid slechts langs 3 zijden van de kolom waren voorgeïnjecteerd
- Kolommen E18 (10 mm) en E24 (23 mm, maar mogelijk meetfout), met initieel los gepakt zand tot 4 m diepte.

3. Bereikte verdichting

De bereikte verdichting werd zowel tijdens de uitvoering als na afloop gecontroleerd door het uitvoeren van sonderingen. Daartoe was er gedurende de gehele verdichtingswerken, die ca. 3 weken in beslag namen, permanent een sondeerwagen ter plaatse. In het geheel zijn ca. 250 controlesonderingen verricht. Een aantal typische resultaten is in de figuur 13 gegeven.



Figuur 13 a : Vóór verdichting



Figuur 13b : Na verdichting

Besluiten

Het toepassen van plofverdichten en diepte-trilverdichten binnen een bestaande constructie en tot op geringe afstand van ondiep gefundeerde dragende kolommen is zover bekend vrij uniek en zou door velen als bijzonder risicovol worden beschouwd. Mede door het uitvoeren van een voorbehandeling met polyurethaaninjectie onder de nabijgelegen kolommen en in combinatie met een intense werkbegeleiding door middel van o.a. trillings- en zettingsmetingen, konden de betrokken verdichtingstechnieken evenwel succesvol en zonder noemenswaardige moeilijkheden tot een goed einde worden gebracht.

Dankwoord

Hierbij willen we nog onze appreciatie betuigen voor de medewerking en vakkundige opvolging van de werken door de mandatarissen van de bouwheer en van de heren P. Haeck (URETEK) en B. Verstraeten (FRANKI GEOTECHNICS B) voor hun bereidwilligheid en hulp bij de redactie van dit artikel.

Referenties

- BARKAN, D. *Dynamics of bases and foundations*. New York. McGraw-Hill Book Cy Inc. 1962
- DE COCK, F. *The application of stone columns and vibro-compaction in harbour construction*. 11^{de} Internationaal Havencongres, Antwerpen, 1996.
- FUGRO. Rapport betreffende grondverdichting in loods. Opdrachtnummer M01075-000. Projectleider ir. A.J. Snethlage. Juni 2003
- HERGARDEN, R.H. & VAN TOL, A.F. *Zakkingen tijdens het trillend trekken van damwanden*. Geotechniek, nr. 3, 2001.