

Techniek van jetgroutpalen biedt perspectief voor funderingsherstel in ruimtes met beperkte hoogte

De Lichttoren duurzaam gefundeerd

ir. H.P.C.A. Vianen, Adviesbureau Tielemans

ir. P.J.M. den Nijs, Wareco

ir. M. Baan en ir. G. van Zwieten, Visser & Smit Bouw BV

Het historische gebouw 'De Lichttoren' in Eindhoven krijgt een nieuwe bestemming. De fundatie is echter niet in staat deze nieuwe fase in te gaan: de duizenden houten palen zijn door bacteriën aangetast en moeten worden vervangen. Verschillende varianten zijn bedacht om de fundatiekrachten opnieuw naar de ondergrond af te dragen. Uiteindelijk is gekozen voor jetgroutpalen, een nieuwe toepassing in een dergelijke situatie. Veel aandacht is besteed aan de monitoring, om de theorie aan de praktijk te kunnen toetsen. Het fundatieherstel is afgerond. De techniek bij deze toepassing is veelbelovend.

1 | De Lichttoren, herkenningspunt voor Eindhoven

foto: Norbert van Onna



2 | Originale doorsnede over het skelet van gebouw

ED

De Lichttoren is oorspronkelijk gebouwd als onderdeel van de Philipsfabrieken in het centrum van Eindhoven (foto 1). Het terrein aan de Emmasingel is in verschillende fasen ingevuld. De Lichttoren ontstond in twee fasen in 1908 en 1920 als respectievelijk de bouwdelen EC en ED. De meerlaagse verdiepingsbouw voor een fabrieksfunctie was voor Eindhoven uniek (fig. 2). Het architectonisch ontwerp volgt de ideeën van de Nieuwe Zakelijkheid, met veel glas, staal en gewapend beton. De bouwtechniek in die dagen was danig in ontwikkeling,

wat te zien is aan de verschillen in detaillering tussen de beide bouwdelen. De toepassing van het destijds nog jonge materiaal beton in combinatie met grote raampartijen heeft heldere binnenruimten opgeleverd.

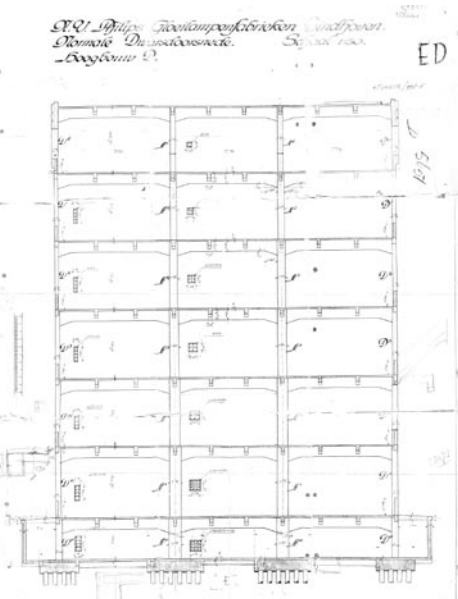
Met het terugtrekken van Philips uit de binnenstad van Eindhoven is De Lichttoren vrijgekomen voor ander gebruik. Het ontwikkelingsprincipe gaat uit van verschillende gebruiksfuncties, waarbij de ruimten worden ingevuld als 'lofts', kantoor of winkel. Als onderdeel van de revitalisatie wordt het complex uitgebreid met extra bouwvo-

lume voor appartementen. Tevens wordt een tweelaagse parkeergarage direct naast het gebouw onder de grond gerealiseerd.

Bestaande paalfundering

Verschillende onderzoeken zijn aan de bestaande paalfundering verricht. Daarbij is duidelijk geworden dat de duurzaamheid van de houten palen niet kan worden gegarandeerd (foto 3). Van grenenhouten palen is bekend dat aantasting door bacteriën tot aan de punt kan plaatshebben. Ook kan bij de punt een groot deel van het oppervlak in de loop der tijd verloren gaan.

Er zijn geen palen getrokken, maar duidelijk werd wel dat de oorspronkelijk aanwezige grondmechanische draagkracht door aantasting minder is geworden en in de loop der tijd verder zal afnemen. Uit het onderzoek bleek dat de constructieve draagkracht van 15% van de grenenhouten palen op dit moment niet voldoet; voor



20% van de palen was de constructieve draagkracht onzeker. Slechts 65% van de palen werd bij de toetsing van de paalschacht voor de korte termijn als voldoende beoordeeld.

Besloten werd tot het realiseren van een duurzame paalfundering met behoud van de bestaande constructie.

Varianten

Verschillende mogelijkheden voor het funderingsherstel zijn onderzocht. Daarbij was het uitgangspunt dat het draagvermogen van de bestaande houten palen door een nieuwe paalfundering zou moeten worden overgenomen. Twee principeoplossingen zijn

verder uitgewerkt: nieuwe funderingselementen naast de bestaande funderingspoeren en een nieuwe fundatie onder de bestaande funderingspoeren.

Bij het aanbrengen van een nieuwe fundatie naast de funderingspoeren zou de bestaande keldervloer moeten worden gesloopt. Een intensieve bemaling voor het gehele complex zou dan noodzakelijk zijn.

Het aanbrengen van een paalfundering ónder de bestaande funderingspoeren zou inhouden dat dóór het bestaande beton heen een dragende paal zou moeten worden gemaakt. Met de jetgrouttechniek is het mogelijk om vanuit een gat met kleine diameter een grotere paaldiameter te maken.

De varianten zijn getoetst aan kosten, betrouwbaarheid en ruimtebeslag in de kelder.

De variant met de jetgroutpalen is technisch mogelijk en financieel het meest aantrekkelijk. De werking van de poeren wordt nauwelijks aangetast. Er hoeven geen aanvullende constructieve elementen als wanden en balken in de kelder of onder de keldervloer te worden aangebracht.

Gekozen is voor fundatieherstel met jetgroutpalen (fig. 4). De palen worden door de poeren

heen gemaakt. De kelder blijft vrij indeelbaar, wat een groot voordeel is.

De risico's zijn uitvoerig geïnventariseerd. De belangrijkste zijn:

- aansluiting jetgroutpaal op poer;
- samenwerking houten palen en jetgroutpalen tijdens uitvoering en hun invloed op het gebouw;
- sterkte jetgrout.

Zowel voor de gebruiksfase als de uitvoeringsfase zijn diverse controleberekeningen uitgevoerd. De belangrijkste controles zijn:

- sterkte gebouw en poeren;
- draagkracht jetgroutpalen;
- gedrag in uitvoeringsfase.

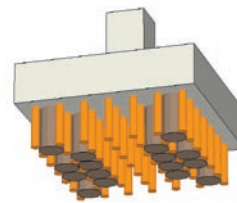
Er zijn proeven voor controle op de uitvoering en de kwaliteit gedaan. Tevens is tijdens de uitvoering gemeten aan zettingen van het gebouw.

Sterktecontrole gebouw / poer

Om te komen tot een juiste positie van de nieuwe jetgroutpalen heeft de bestaande fundering als leidraad gefunctioneerd. Met de beschikbare gegevens uit het archief is een tekening van de bestaande fundering samengesteld. De betonberekeningen en -tekeningen uit het historisch archief vormen de basis voor de controleberekeningen in de nieuwe situatie.

Met drukproeven op boorkernen uit het gebouw is de betonsterkteklasse bepaald en zijn de sterkteberekeningen van de kolommen en poer gecontroleerd (fig. 5).

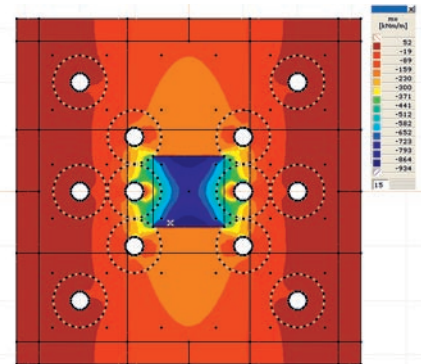
Door het boren van een gat Ø180 voor het aanbrengen van de nieuwe palen is er sprake van een reductie van de wapening. Met het plaatsen van de nieuwe palen verandert daarentegen de benodigde wapening. De benodigde wapening is berekend. Met de wapeningstekeningen van de bestaande constructie en de invloed voor het boren in de poer is berekend dat de overblijvende wapening meer is dan minimaal benodigd.



3 | Aangetaste palen

4 | Principeoplossing

5 | Sterktecontrole poer met ESA Prima Win



Controle draagkracht

Voor de jetgroutpalen is aangehouden:

Paalklassefactoren

paalpunt: $\alpha_p = 0,8$, $\beta = 1$.

schachtwrijving: $\alpha_s = 0,005$

Voor α_s wordt 0,005 aangehouden, vergelijkbaar met een pulspaal. Een pulspaal is grondverwijderend en ontspant de grond meer dan een jetgroutpaal. De waarde 0,005 is een ondergrens.

Vormfactor

Jetgroutpalen kunnen aaneengesloten worden aangebracht. Per paalgroep is de vormfactor s bepaald.

Veerkarakteristiek

Aangenomen is dat het zettinggedrag gelijk is aan die van avegapalen. Er wordt verwacht dat het zettinggedrag beter is, omdat de grond minder ontspannen wordt.

Diameter

Door variatie van het jetgroutsysteem kunnen diameters worden gemaakt van 400 tot 2500 mm. Hier is gekozen voor Ø600 mm. De paal raakt dan net de houten palen.

Paalpunt

De jetgroutpalen zijn 0,5 m dieper geplaatst dan de houten palen. Zo ontstaat een volledig oppervlak, ook als er een overlap is met een houten paal.

Controle uitvoeringsfase

De jetgroutpalen zijn tussen vier houten palen aangebracht. Tijdens het jetgrouten verliezen deze palen hun draagkracht, terwijl de totale draagkracht van de poer gehandhaafd moet blijven. De verplaatsingen moeten voldoen aan de normen.

Veiligheid

Door aantasting van de houten palen is de veiligheid afgenomen; hoeveel is onbekend. In de gebruiksfase kan de fundatie de totale belasting inclusief de veranderlijke belasting kennelijk dragen met een minimale veiligheid van 1,0. Er zijn geen noemenswaardige zakkingen gemeten als gevolg van een ‘niet-goed’ functionerende fundering.

In de uitvoeringsfase is de veranderlijke belasting afwezig. Hierdoor ontstaat een rekenkundige marge van extra veiligheid. In de uitvoeringsfase moet de minimale veiligheid 1,2 zijn, ook als houten palen worden uitgeschakeld en de jetgroutpaal nog geen sterkte heeft.

Verplaatsing

De veerstijfheden van de palen zijn bepaald (fig. 6). De veerstijfheid van de houten palen is bilineair. De veerstijfheid van de jetgroutpalen blijft in de lineaire tak. Tijdens de uitvoering vallen houten palen weg en worden jetgroutpalen toegevoegd. Tabel 1 geeft de wijziging van de krachten en verplaatsingen.

De verschilverplaatsing is de verplaatsing tussen twee poeren gedeeld door de afstand tussen de poeren. Om de verschilverplaatsing te beperken, is de uitvoeringsvolgorde aangepast.

Sterkte

Uit tabel 1 volgt de belasting op een jetgroutpaal. De vereiste sterkte is bepaald door de belasting te delen door het oppervlak van de paal. Het oppervlak wordt gereduceerd door het boorgat en door

afwijkingen in de positie van houten palen.

In de uitvoeringsfase moest sterkteklasse C1,5/2 worden gehaald; in de gebruiksfase C3,2/4.

Uitvoering

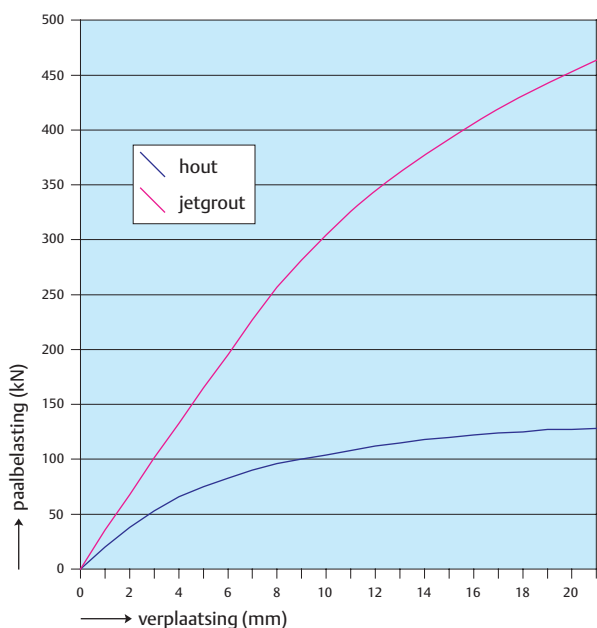
Bij jetgrouten wordt onder hoge druk een groutmengsel in de grond gespoten (fig. 7). Er wordt een boorlans verticaal in de grond gebracht. De lans is aan het uiteinde voorzien van een spuitkop. Zodra de lans de gewenste diepte heeft bereikt, wordt onder hoge druk (300-500 bar) een horizontale water/cementstraal de grond ingespoten. Door de boorlans roterend te trekken wordt de aanwezige grond volledig versneden, vermengd en deels vervangen door grout. Tijdens het jetgrouten ontstaat langs de lans een retourstroom van grout/grond/water (retourspoeling). De retourspoeling wordt naar een tijdelijk depot geleid en na verharden als puin afgevoerd. Buiten staat een groutcentrale, in feite een grote silo met menger waarmee het water-cementmengsel wordt aangemaakt (foto 8). Het mengsel wordt opgeslagen in een buffertank die drie hogedrukpompen voedt. De pompen zorgen ervoor dat het mengsel onder hoge druk bij de stellingen in de kelder komt (foto 9). Er wordt 125 liter per minuut door een gaatje van 3,5 mm geperst.

Monitoring

Voor de start van het werk zijn proefpalen uitgevoerd. Tijdens de uitvoering zijn cruciale delen gecontroleerd. In sommige gevallen heeft dit geleid tot een aanpassing van de werkwijze.

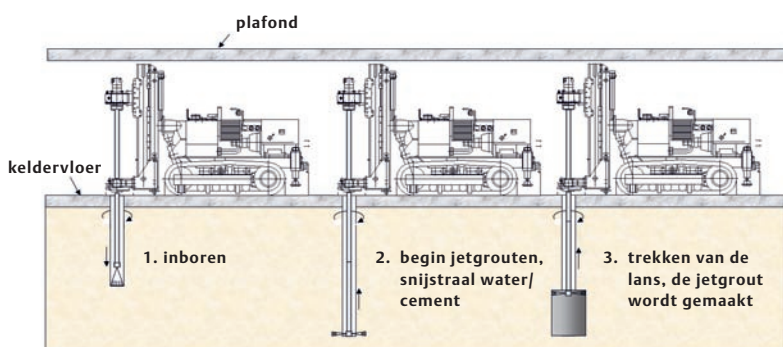
Met de proefpalen is onderzocht welke uitvoeringsparameters moeten worden gehanteerd. Onderzocht zijn:

- sterkte van de jetgroutpalen;
- verhardingssnelheid. De sterkte is bepaald bij een verharding na 24 en 48 uur. De verhardingssnelheid bepaalt wanneer een volgende paal onder dezelfde poer mag worden gemaakt;



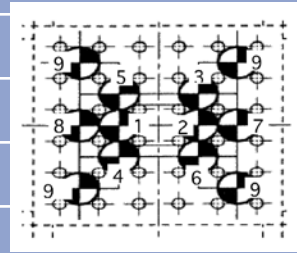
6 | Veerstijfheden

7 | Werkmethode jetgrouten met hoogte



Tabel 1 | Theoretische krachten en verplaatsingen tijdens de uitvoering

uitvoerings- fase	aantal palen		totale stijfheid	kracht op de palen										totale kracht	verplaat- sing	
	hout	jetgrout		hout	paal 1	paal 2	paal 3	paal 4	paal 5	paal 6	paal 7	paal 8	rest			
oorspronkelijk	36	0	523636	65											2335	0,0
jetten paal 1 verharden	32	0	465455	73											2335	0,6
jetten paal 2 verharden	28	1	453701	82	30										2335	1,2
jetten paal 3 verharden	26	2	378857	87	50	20									2335	1,6
jetten paal 4 verharden	24	3	403286	92	70	40	20								2335	2,1
jetten paal 5 verharden	22	4	427714	97	90	60	40	20							2335	2,5
jetten paal 6 verharden	20	5	385385	102	107	77	57	37	17						2335	3,8
jetten paal 7 verharden	18	6	396462	108	124	94	74	54	34	17					2335	4,3
jetten paal 8 verharden	16	7	251539	109	152	122	102	82	62	45	28				2335	5,2
jetten paal 9 definitief	4	8	269615	115	312	282	262	242	222	206	189	160			2335	10,0
-	-	-	396923	0	434	404	384	364	344	327	310	282	122		3336	13,0
-	-	-	kN/m	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	mm



- parameterkeuze. Ter bevestiging van de gekozen parameters voor het behalen van de paaldiameter en om de retourspoeling tot een minimum te beperken;
- aansluiting paal op poer. De aansluiting is visueel gecontroleerd met een endoscoop en vervolgens is een poer volledig vrij gegraven.

De aansluiting van de paal op de poer was goed (foto 10). De benodigde sterkte werd na 72 uur gehaald.

Verplaatsingsmetingen

De verplaatsingen in het gebouw zijn gemeten voor en tijdens het maken van de jetgroutpalen. In

eerste instantie is dagelijks gemeten. Daarmee ontstond een volledig beeld van het vervormingsgedrag van het gebouw tijdens de werkzaamheden (fig. 11). De verplaatsingen bleken kleiner dan werd voorspeld. De grootste verplaatsing bedraagt circa 6 mm. Kennelijk is de krachtoverdracht van de houten palen op de groutpalen gunstiger verlopen. Er zullen in de toekomst nog enkele herhalingsmetingen worden verricht om eventueel nazakken in beeld te krijgen.

Inspectie aansluiting paal/poer

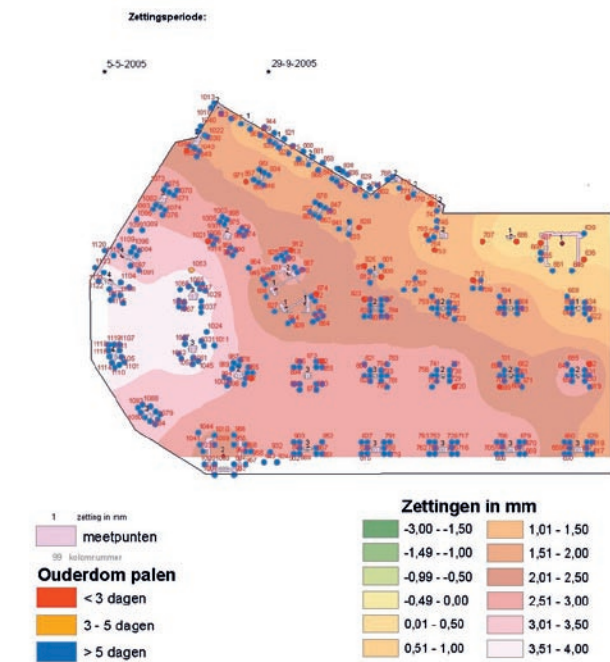
Steekproefsgewijs zijn met behulp van een endoscoop inspecties uitgevoerd naar de

kwaliteit van de aansluiting tussen de nieuwe paal en de onderkant van de poer. De inspectie had plaats door drie kleine gaten die zijn geboord in het beton rondom het hart van de jetgroutpaal. In het beginstadium is geconstateerd dat de aansluiting in een aantal gevallen niet voldoende was. De aansluiting is beïnvloed door de lokale grondslag en de mate van vlakheid van de onderzijde van de poer. In sommige gevallen bleek een spleet van 5 à 10 mm aanwezig door het nazakken van het jetgrout. Door aanpassing van het productieproces en na-injectie van de spleet is dit probleem opgelost.

8 | Buitenopstelling

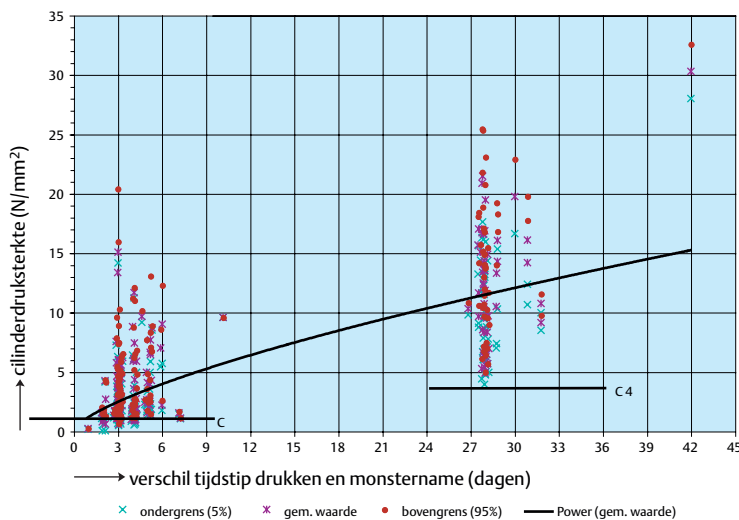
9 | Binnenopstelling

10 | Proef aansluiting paal-poer. Jetgroutpaal is door een gat in de stelconplaat gemaakt, uitgegraven en losgetrokken



11 | Totaaloverzicht verrichte metingen

12 | Drukwaarden monsters



Meting sterkte jetgrout

Met een monsterbus werd nog voordat de jetgroutpaal was verhard, een monster uit de paal genomen. De beginsterkte en de 28-daagse sterkte werden bepaald in het Pieter van Musschenbroeklaboratorium aan de TU Eindhoven.

De gemiddelde beginsterkte was 3,7 N/mm²; de 28-daagse sterkte was 13,0 N/mm² (fig. 12). Als karakteristieke waarden voor de cilindersterkte zijn aangehouden: na 72 uur: 1,5 N/mm²; na 28 dagen: 4,0 N/mm².

Aan de spreiding is duidelijk te zien dat een product wordt

gemaakt waarin de lokale grondslag is verwerkt.

Conclusies

Voor de realisatie van het funderingsherstel van De Lichttoren is in het voortraject uit de verschillende mogelijkheden de variant met jetgroutpalen als meest realistisch en kostenverantwoord naar voren gekomen. In een lang voortraject zijn alle constructieve aspecten belicht en de risico's geanalyseerd. In het bouwteam zijn de risico's geminimaliseerd. In een vroegtijdig stadium is overlegd met de verantwoordelijken bij de gemeente Eindhoven. Daarbij is veel aandacht geschonken aan het beheersbaar houden van de kwaliteit van de jetgroutpalen

de bestaande palen geheel spanningsloos werden aangehouden. De metingen hebben aangetoond dat er sprake is van een gecombineerd systeem. De bestaande palen hebben de dragende functie behouden voor zover de aantasting dit toelaat. Het gebouw staat daarmee op nieuwe én op oude palen met behoud van de bestaande funderingspoeren.

Blik naar de toekomst

De techniek van het aanbrengen van jetgroutpalen in minder toegankelijke omstandigheden is met dit project belangrijk verder ontwikkeld. Met het meetprogramma zijn bij andere projecten betere voorspellingen te geven over het gedrag van een constructie tijdens het aanbrengen van jetgroutpalen. Met name de informatie over het verlies aan draagkracht van de bestaande palen in combinatie met de opbouw van draagkracht van de jetgroutpalen geeft perspectief voor het toepassen van deze techniek bij funderingsherstel van andere constructies. Een herstellmethode die kan worden ingezet in beperkte ruimte met weinig bijkomend herstelwerk heeft belangrijke voordelen voor de eigenaren. ■

Projectgegevens

opdrachtgever:

Stam & de Koning/Stichting Trudo

constructeur:

Adviesbureau Tielemans

geotechnisch adviseur:

Wareco

aannemer fundering:

Visser & Smit Bouw

en de standzekerheid van het monumentale gebouw. Tijdens de realisatiefase is met het inspecteren van de aansluiting van paal met poer naar voren gekomen dat de grondslag anders was dan uit de sonderingen bleek, en dat de onderkant van de poeren veel grilliger was dan mocht worden aangenomen. De aanpassingen die daarop hebben plaatsgehad, hebben ervoor gezorgd dat de kwaliteit van de nieuwe palen dermate hoog is, dat De Lichttoren feitelijk op nieuwe palen is komen te staan. Met het berekenen van de zakkingen tijdens de uitvoering is uitgegaan van een zeer ongunstig scenario, waarbij