

# Detectie van afwijkingen in diepwandvoegen

**Ir. Rodriaan Spruit**  
Ingenieursbureau  
Gemeentewerken  
Rotterdam, TUDelft



**Dr. Ir. Wout Broere**  
TUDelft



**Prof. Ir. Frits van Tol**  
TUDelft, Deltares



**Ir. Victor Hopman**  
Deltares



Laureaat 'prijs Hubert Raedschelders 2011', een initiatief van het voormalig TI-KVIV (huidige naam IE-NET)

## Inleiding

In Nederland werden diepwanden beschouwd als een veilige en bewezen technologie voor de kerende constructie van een diepe ontgraving. Door de grote lekkages die zich in de metro bouwprojecten in Amsterdam en Rotterdam voordeden, is de perceptie van het risicoprofiel van de diepwand veranderd.

Voor grote infrastructurele werken in dichtbebouwde omgeving is de behoefte om de onzekerheid in de kwaliteit van de in de grond gevormde elementen te verminderen sterk aanwezig. Daarom is een onderzoeksproject gestart om te bepalen of plekken in de diepwanden met een hoog risico op lekkage kunnen worden opgespoord voordat ontgraving binnen de bouwkuip plaatsvindt. In het onderzoek is verondersteld dat, net als in boorgat geofysica, de combinatie van verschillende meettechnieken zal leiden tot een betrouwbare conclusie. Daarom zijn vijf verschillende meettechnieken onderzocht. Deze zijn: gedistribueerd temperatuurprofiel, natuurlijke gammastraling, Cross-hole Sonic Logging (CSL),

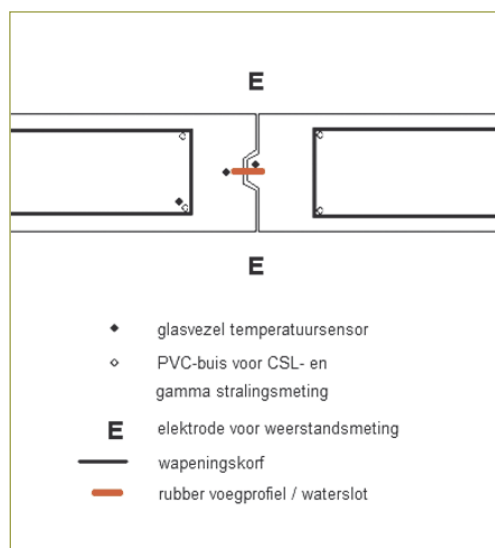
Single-hole Sonic Logging (SSL) en elektrische weerstand. De metingen werden uitgevoerd op twee projectlocaties en op schaalmodellen.

## Test locaties

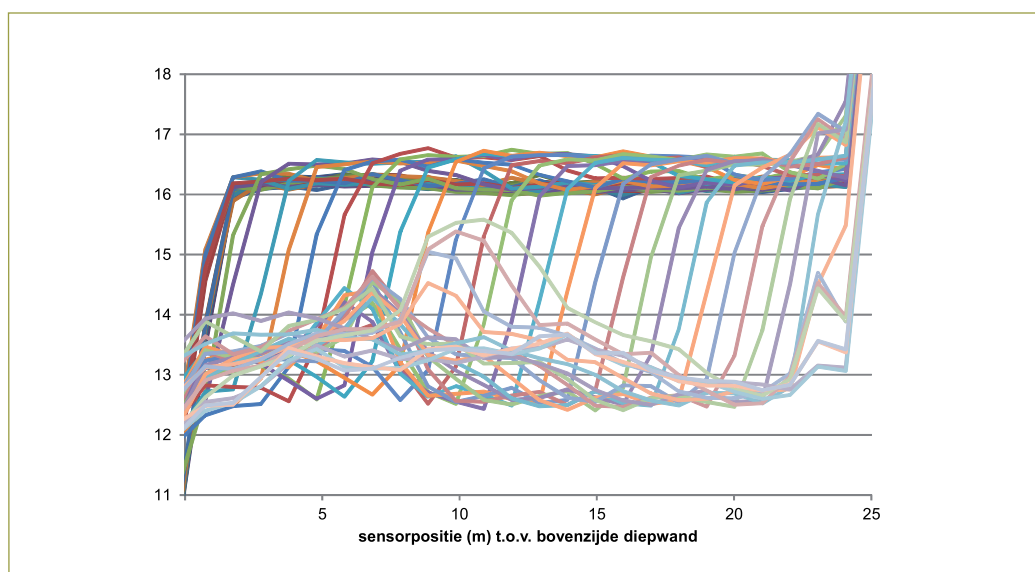
Onder het 'Kruisplein' in het centrum van Rotterdam wordt een ondergrondse parkeergarage van 6 verdiepingen gebouwd. Diepwanden tot 42 m onder maaiveld, tot in een kleiige laag met een hoge hydraulische weerstand, zorgen voor een robuuste en waterdichte grondkerende constructie. In het contract tussen opdrachtgever en aannemer werden verschillende maatregelen om de kwaliteit van de diepwanden te verbeteren opgenomen. Elke vracht beton is bijvoorbeeld getest op consistentie-eigenschappen. Ter vermindering van de onzekerheid van de uiteindelijke kwaliteit van de bouwkuip is de hydraulische weerstand van de wand ook getest door het verlagen van het grondwaterpeil in de bouwput tijdens een pompproef. Toch zullen de potentieel zwakke plekken in de diepwand waarschijnlijk niet worden gevonden in een pompproef als er sprake is van bentonietinsluitingen in de voegen tussen de diepwand-

panelen. Een bentonietinsluiting heeft namelijk een hoge hydraulische weerstand, waardoor de instroom van water door de diepwanden wordt voorkomen. Echter, tijdens de ontgraving kunnen de bentonietinsluitingen instabiel worden als gevolg van de verandering in de horizontale grond- en waterdrukken. Door de geleidelijke degradatie van de bentonietinsluiting kan een plotselinge grote lekkage ontstaan, wat resulteert in grote hoeveelheden water en (eventueel) zand die de bouwkuip instromen. Als transport van zand optreedt, zal zakking buiten de bouwput optreden, waardoor schade aan belendingen en aangrenzende infrastructuur kan ontstaan. Ook het verlagen van de grondwaterstand in de omgeving als gevolg van lekkage kan schade aan belendingen veroorzaken.

Het werd vanuit de projectorganisatie dan ook zinvol geacht om de mogelijkheden te onderzoeken om bentonietinsluitingen te detecteren voorafgaand aan de ontgraving. Metingen op locatie in vier diepwandvoegen en in twee grote ( $l \cdot b \cdot h = 2 \cdot 1 \cdot 2 \text{ m}^3$ ) testblokken werden uitgevoerd



**Figuur 1** – Bovenaanzicht van de test configuratie zoals die in Rotterdam is toegepast.



**Figuur 2** – Verse bentoniet ( $12,5^\circ\text{C}$ ) ter vervanging van graafbentoniet ( $16,3^\circ\text{C}$ ), vervangingsfront loopt van 'links naar rechts' in de grafiek, dit is in werkelijkheid in de diepwandsleuf van boven naar beneden.

## Samenvatting

De lekkages in diepwanden bij de metrolijnen in aanleg in Amsterdam en Rotterdam hebben geleid tot heroverweging van de diepwand als grondkerende constructie voor diepe ontgravingen. Bij deze projecten zijn de voegen tussen de panelen de zwakke plek gebleken. Tijdens het betonstorten moet de bentoniet-suspensie worden verdrongen door beton. Als dit niet goed lukt, zullen bentoniet-insluitingen ontstaan (vooral) in de voegen. Deze insluitingen zijn bijna niet te detecteren met een pompproof of reeds beschikbare lekdetectiemethoden, omdat de hydraulische weerstand van de insluiting zeer hoog is. Na het ontgraven kan de bentonietinsluiting instabiel worden en uitstromen, waardoor lekkage optreedt met mogelijk zakking in de omgeving tot gevolg.

Naar aanleiding van deze constatering zijn twee onderzoeksprojecten gestart aan de TU Delft. Een onderzoek is gericht op het optimaliseren van het productieproces

van diepwanden. Dit wordt uitgevoerd door Jan van Dalen en heeft al geresulteerd in het CUR Handboek Diepwanden. Het tweede onderzoek is gericht op het ontwikkelen van meettechnieken voor het vroegtijdig detecteren van defecten in de diepwandvoegen en wordt in dit artikel verder toegelicht.

In twee projecten met diepe ontgravingen zijn veldproeven met vijf verschillende meettechnieken uitgevoerd. Deze meetprincipes zijn in modelproeven gekalibreerd. De geteste principes zijn: gedistribueerd temperatuurprofiel, natuurlijke gammastraling, Cross-hole Sonic Logging (CSL), Singlehole Sonic Logging (SSL) en elektrische weerstand. In dit artikel worden de eerste resultaten gepresenteerd. Van de meest veelbelovende methode, Cross-hole Sonic loggen, wordt de toepassing in een diepwand getoond met aanbevelingen voor de interpretatie van de veldmetingen.

in het najaar van 2009 en het voorjaar van 2010. Na de eerste positieve resultaten van de tests in Rotterdam heeft de aannemer van het 'Spoorzone' spoortunnel-project in Delft besloten om één van de technieken (Cross-hole Sonic Logging) op grote schaal toe te passen. Bij 'Spoorzone Delft' wordt het bestaande spoorwegviaduct vervangen door een 3 km lange 4-sporige tunnel. De tunnel wordt met de wanden-dak methode gebouwd. Alle voegen van de diepwand aan de oostkant van de tunnel en de voegen direct voor het stationsgebouw, waar de tunnel het dichtst bij de bestaande (historische) bebouwing ligt, worden met de CSL methode getest (2010-2011). Een speciaal gedeelte met 10 voegen is (voorjaar 2011) opgezet om de metingen verder te optimaliseren. De diepwanden in dit project steken tot een diepte van 25 m onder maaiveld.

## Beschrijving van de tests en de resultaten

### TEMPERATUUR

Tijdens het vervaardigen van een diepwand wordt het bentonietvolume in de uitgegraven sleuf meerdere keren vervangen. Na het bereiken van de einddiepte wordt de graafbentoniet vervangen door verse (lichtere) bentoniet, die in de volgende fase moet worden vervangen door beton. Elk materiaal heeft een bepaalde temperatuur op het moment dat het in de sleuf wordt gestort. Door gebruik te maken van verticaal geplaatste temperatuursensoren (die het temperatuurprofiel langs de sensor weergeven) is het mogelijk om bij te houden waar de verschillende materialen in de diepwandsleuf blijven. De temperatuur is gemeten met optische vezels (Del Grosso et al. 2001). Voor de uitlezing is gebruik gemaakt van een Sensornet Oryx DTS (Sensornet 2009). De nauwkeurigheid waarmee de temperatuur wordt gemeten ligt rond 0,01°C terwijl volgens de specificaties van de fabrikant de nauwkeurigheid van de positie van de metingen 1 m is. In de projecten in Rotterdam en Delft bleek de meest interessante locatie

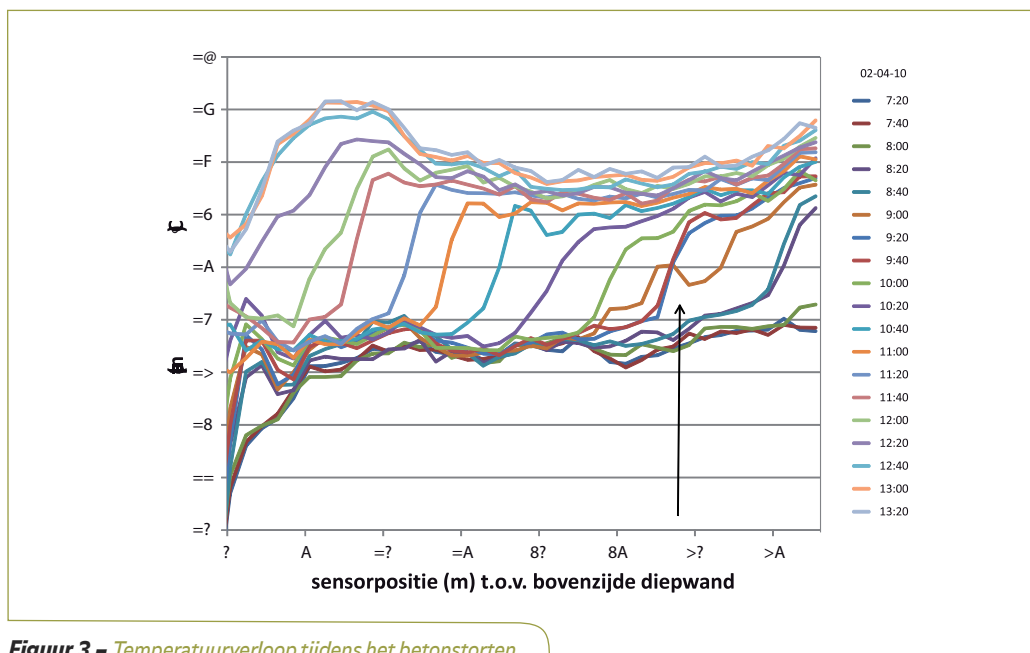
om het temperatuurprofiel te meten in de voeg met het eerder geproduceerd diepwandpaneel te zijn. De optische vezel kan worden neergelaten in de ontgraven sleuf door het aanbrengen van een gewicht aan het gesloten einde van de sensor. De vervanging van de graafbentoniet door verse bentoniet kon in detail worden gecontroleerd (figuur 2). De graafbentoniet bevat relatief veel zand en is daardoor moeilijker te vervangen door beton. Als tijdens het ontzanden graafbentoniet in de sleuf achterblijft, dan neemt de kans op bentoniet-insluitingen toe. Ook tijdens het betonstorten waren we goed in staat om het stortfront in de sleuf te volgen. Figuur 3 toont (aangegeven met een pijl) hoe een korte stortonderbreking wordt gedetecteerd in de meting.

De testblokken werden ook uitgerust met optische temperatuursensoren. Een volledige analyse van deze resultaten is verder uitgewerkt in Doornenbal et al. (2011). Het blijkt mogelijk te zijn om

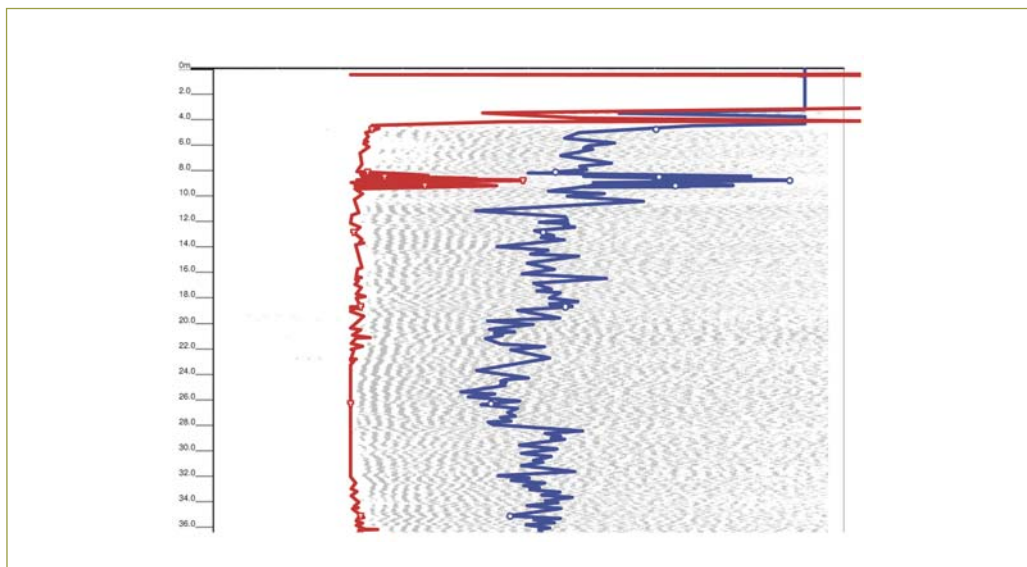
tijdens de hydratatiefase de hoeveelheid bentoniet ten opzichte van beton te herleiden per meter glasvezel. Dit kan een indicatie geven van mogelijke bentonietinsluitingen en kan dienen als (extra) waarschuwing tijdens het ontgravingsproces op plaatsen waar extra aandacht en maatregelen nodig zijn.

Monster	$^{77}\text{K}$ Bq/kg	$^{8-8}\text{Th}$ Bq/kg	$^{8-6}\text{U}$ Bq/kg
Beton	215	20	30
Bentoniet (droog)	160	12	15
Bentoniet (nat)	107	9	7

**Tabel 1 – Radioactiviteit van beton en bentoniet zoals bepaald op monsters van de site (K = Kalium, Th = Thorium, U = Uranium).**



**Figuur 3 – Temperatuurverloop tijdens het betonstorten.**



**Figuur 4** – Cross-hole Sonic Logging profiel met anomalie tussen 8 en 9,5 m.

### NATUURLIJKE GAMMASTRALING

Van kleimineralen is bekend dat ze een hogere natuurlijke radioactiviteit hebben dan de toeslagstoffen van beton. Het zou daarom theoretisch mogelijk moeten zijn om gebieden met grote hoeveelheden achtergebleven bentoniet in de sleuf na het storten van beton aan te tonen door de natuurlijke radioactiviteit te meten. Met behulp van een gamma-ray detector, is de straling langs de voeg gemeten, vanuit de PVC-buizen aangegeven in figuur 1.

Helaas blijkt de natuurlijke radioactiviteit van het beton hoger te zijn dan de radioactiviteit van de bentoniet. Zelfs met een gamma-spectrometer kon geen onderscheid tussen bentoniet en beton worden gemaakt.

Omdat het bijna onmogelijk is om een kleine hoeveelheid laag radioactief materiaal (bentoniet) in de voeg te detecteren wanneer de meerderheid van het materiaal een relatief hoge radioactiviteit (beton) heeft, is deze detectiemethode niet verder onderzocht.

Het gebruik van een radioactieve bron om de respons van de meting te verbeteren is vanwege de strenge uitvoeringseisen in bebouwde omgeving voorlopig niet overwogen.

### CROSS-HOLE SONIC LOGGING (CSL)

De snelheid van geluid in een vast medium is afhankelijk van de dichtheid en de stijfheid. Omdat beton en bentoniet een verschillende dichtheid en stijfheid hebben, is het mogelijk om onderscheid te maken tussen beton en bentoniet met behulp van een akoestisch signaal. Door meetbuizen aan te brengen op de hoeken van de wapeningskorven aan beide zijden van de voeg (figuur 1), kan een akoestisch signaal over de voeg worden gestuurd.

De geluidsbron en -ontvanger worden ieder in een met water gevulde meetbuis neergelaten. Bron en ontvanger worden gelijktijdig opgetrokken, waarmee de zone tussen de twee meetbuizen wordt doorgemeten. De looptijd van het signaal en de demping van het ontvangen signaal worden gebruikt om te bepalen of er afwijkingen aanwezig zijn.

Bij aanvang van het onderzoeksproject was niet bekend welke invloed de voeg zou hebben op de signaaloverdracht, omdat er nog weinig ervaring was in vergelijkbare situaties.

Als meetmethode is CSL al commercieel beschikbaar voor het testen van de integriteit van grote diameter boorpalen (Amir et al. 2008). In de tests op het Kruisplein gebruikten we de CHUM apparatuur van PileTest (PileTest 2009). Tijdens de metingen bij Spoorzone is naast de apparatuur van PileTest ook gebruik gemaakt van apparatuur van Olson Instruments. Bij testmetingen in het Stevin laboratorium van de TU Delft zijn apparaten van PileTest, Olson Instruments en PDI gebruikt. Op hoofdlijnen functioneren deze apparaten vergelijkbaar. Op details zijn er verschillen die van invloed zijn op de bruikbaarheid in de toepassing op diep wandvoegen.

In de literatuur worden verschillende meningen over het te gebruiken materiaal voor de buis gevonden. Vanwege robuustheid en een betere hechting met het beton zou voor stalen buizen moeten worden gekozen (Amir et al. 2008). Uit onderzoek van Likins et al. (2004) blijkt echter dat onthechting tussen PVC meetbuis en beton niet op zal treden als de PVC-buizen zijn gevuld met water voorafgaand aan het betonneren. Bij de veldproeven (met PVC-buizen die met water wer-



**Figuur 5** – Laboratorium blok.

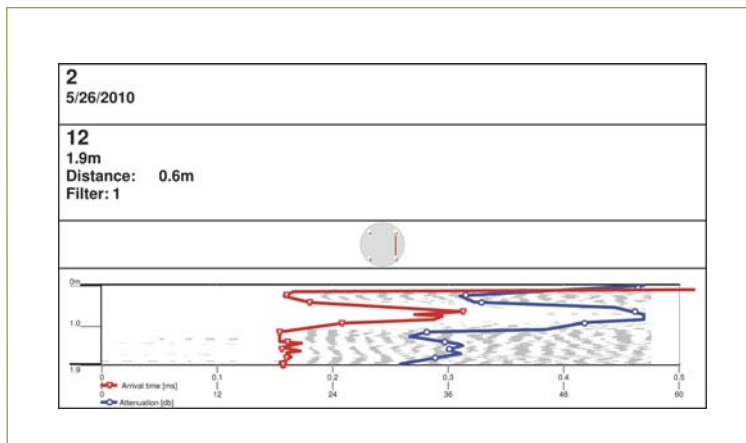
den gevuld) zijn geen tekenen van onthechting waargenomen.

De wapeningskorven in Rotterdam waren niet voorbereid op de meetbuizen, waardoor de meetbuizen later moesten worden ingebouwd. PVC buizen zijn veel gemakkelijker te hanteren en goedkoper dan stalen exemplaren. Daarom zijn 14 van de 16 buizen in Rotterdam in PVC uitgevoerd en waren 2 buizen van staal, waardoor het mogelijk werd om de verschillende buismaterialen te vergelijken. Uit de veldproeven is gebleken dat het signaal dat in de PVC-buizen werd gemeten minder ruis bevatte dan het meetsignaal dat in de stalen buizen werd gemeten.

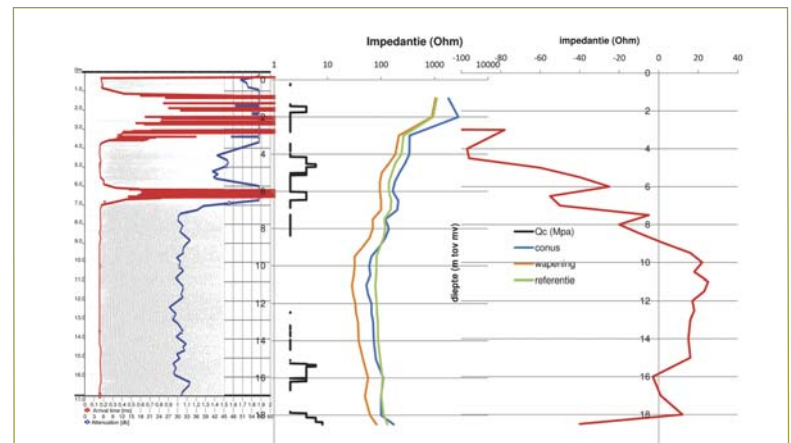
De metingen op locatie konden heel snel worden uitgevoerd, zeker gelet op de diepte van 42 m (Rotterdam). Binnen 30 minuten konden alle 6 cross-hole combinaties worden gemeten. Dit is de tijd die nodig is voor de eenvoudige 'horizontale' meting, waarin zowel de bron als de ontvanger op hetzelfde niveau starten en gelijktijdig worden opgetrokken. Theoretisch is het ook mogelijk te variëren met de bron / ontvanger posities op een zodanige wijze dat 2D tomografie wordt verkregen. Gezien het gemeten signaal was er over het algemeen geen aanleiding om deze extra meetdichtheid uit te voeren.

In twee voegen werden afwijkingen gevonden. Beide afwijkingen zijn alleen zichtbaar in één van de zes CSL profielen van die specifieke voeg. Er werd daarom verwacht dat de afwijkingen maar aan één kant van de diep wand zichtbaar zouden zijn. Op de diepte waar de anomalieën werden verwacht worden buiten de bouwkuip kleilagen aangetroffen. Daarom zijn geen verdere maatre-





**Figuur 6** – Typisch CSL profiel van het laboratorium blok, loodrecht door de voeg gemeten.



**Figuur 7** – Weerstand profiel.

gelen genomen om lekkage te voorkomen, omdat de klei zelf fungeert als barrière. Na het ontgraven bleek één anomalie een grindnest te zijn. Verder onderzoek op het materiaal in de anomalie is gepland voor een later stadium van het bouwproces. De andere anomalie bestaat uit bentoniet.

Een typische CSL grafiek uit de test blokken is weergegeven in figuur 6. De anomalie is aanwezig van 0,1 m tot 1 m en varieert in dikte van 0 tot 0,3 m. In geval van een voeg verontreinigd met 0,3 m bentoniet, is de (over twee testblokken) gemiddelde extra aankomsttijd loodrecht door de voeg 0,23 ms en 0,35 ms diagonaal door de voeg. Omdat het 'loodrechte' signaal gedeeltelijk om de anomalie heen kan, is naar verwachting de extra reistijd rond de 0,1 ms per 0,1 m bentoniet insluiting.

De gemiddelde demping van het signaal is 20 dB voor een voeg met 0,3 m bentoniet. Er wordt daarom rekening gehouden met 7 dB demping per 0,1 m bentoniet.

De anomalie die werd gevonden in het in-situ profiel van figuur 4 vertoont 0,25 ms extra aankomsttijd in combinatie met 24 dB demping. Indien de testblokken representatief zijn, zou rekening moeten worden gehouden met een anomalie in de orde van 0,25 m (op basis van aankomsttijd) of 0,35 m (op basis van demping). Door de extra aankomsttijd te combineren met de demping werd een bentonietinsluiting van ongeveer 0,3 m dik in de voeg verwacht.

Na ontgraving werd duidelijk dat deze anomalie een grindnest was met grotere afmetingen dan verwacht op basis van de laboratoriumproeven. Het materiaal nabij de voeg bestond uit lage kwaliteit beton met een hogere geluidssnelheid dan bentoniet. Bij de anomalie met bentoniet was de grootte wel in overeenstemming met de laborato-

riumresultaten.

In het vervolgonderzoek werken we aan een frequentiedomein analyse van het signaal dat door de voeg komt, dit in de verwachting dat hiermee een betrouwbaarder onderscheid tussen bentoniet-, zand- en grindinsluitingen kan worden gemaakt. Op basis van de resultaten van de testblokken lijkt het erop, dat door een bentoniet insluiting de hoogfrequente componenten van het signaal meer worden geabsorbeerd dan de laagfrequente componenten. De spectrale analyse van het gemeten signaal zou kunnen helpen bij het bepalen van het soort materiaal in de anomalie. Materialen met een lage stijfheid (bijv. bentoniet) hebben de neiging om de hoge frequenties meer te absorberen dan stijvere materialen zoals zand of lage sterkte beton.

Ook zijn testmetingen uitgevoerd op testblokken met een wigvormige uitsparing, waarin van bovenaf verschillende materialen kunnen worden aangebracht. Zo wordt inzicht verkregen in de verandering van het CSL signaal bij passage door water, verzadigd zand, verzadigd grind en bentoniet. De eerste resultaten daarvan duiden op een zeer sterk signaalverlies bij granulair materiaal. De nadere uitwerking van deze metingen zal worden gerapporteerd in een separate publicatie.

#### SINGLE-HOLE SONIC LOGGING (SSL)

In Delft is een proefvak van 10 voegen uitgevoerd, waarin drie pvc-buizen per kant van de voeg werden gebruikt in tegenstelling tot de 2 buizen per kant bij Kruisplein. Vanuit deze middelste buizen zijn Single-hole Sonic Logging (SSL) testen uitgevoerd. SSL metingen zijn alleen mogelijk vanuit plastic buizen. Bij de SSL methode zijn zender en ontvanger boven elkaar gepositioneerd in dezelfde meetbuis. De geluidsgolf kan dan door reflectie op een sterke overgang in dichtheid weer-

terugkomen in de meetbuis. Doordat de geluidssnelheid in beton aanzienlijk hoger ligt dan de geluidssnelheid in water, kan een signaal met een langere weg door beton toch eerder aankomen dan het directe signaal dat door het water in de meetbuis loopt. Er werd verwacht dat de SSL methode een aanvulling zou vormen op de CSL metingen. Als er veel signaal verloren gaat in de CSL metingen, moet de energie die niet door de voeg is gepasseerd gereflecteerd zijn, zodat op die locatie een sterke reflectie in de SSL-metingen wordt verwacht.

De SSL-metingen zijn alleen uitgevoerd vanuit de extra buizen die in het hart van de panelen waren geplaatst. Deze centrale buizen waren nodig omdat de buizen aan de buitenzijde van de diepwand vooral de reflectie in de buurt van het grensvlak tussen de wand en de grond zullen laten zien en niet de reflectie op de voeg in de diepwand. De SSL veldgegevens van het Spoorzone-project lijken de CSL gegevens tegen te spreken. Ook in het laboratoriumonderzoek met de wigvormige uitsparingen blijken de SSL-metingen tot nu toe niet tot bruikbare resultaten te leiden.

#### WEERSTAND

Gebaseerd op het principe dat uitgehard beton een hoge elektrische weerstand heeft (in vergelijking met grond), wordt verwacht dat een onvolkomenheid in de voeg zichtbaar kan worden gemaakt door de elektrische weerstand over de voeg te meten (Hwang et al. 2007). Voor deze meting is een referentie-elektrode (stalen staaf) buiten de bouwput in de grond gedrukt met een sondeerwagen. Door een geleidbaarheidsconus met de sondeerwagen binnen de bouwkuip in de grond te drukken kon de weerstand naar een steeds dieper gelegen elektrode worden gemeten.

De lokale elektrische weerstand van de grond

werd gemeten met de sondeerconus (aangeduid met 'conus' in figuur 7). De elektrische weerstand van de conus naar de referentie-elektrode buiten de bouwput werd gemeten ('referentie' in figuur 7) en de weerstand tussen de conus en de wapeningskorf ten noorden van de voeg ('wapening' in figuur 7) werd gemeten. De rode curve is de weergave van 'referentie' minus 'conus'.

In de linker grafiek is een representatieve CSL meting weergegeven van dezelfde voeg. Tussen de 6 en 7 m minus bovenzijde diepwand wordt met beide metingen een afwijking gevonden. De afwijking in de weerstandsmeting is minder overtuigend (plaatselijk is de weerstand van de wand laag ten opzichte van de lokale grondweerstand) dan in de CSL metingen. De meetopzet moet nog worden geoptimaliseerd. Hiervoor wordt in 2012 een meetopstelling gemaakt met behulp van de reeds gefabriceerde testblokken die voor de CSL- en temperatuurmetingen zijn gebruikt.

### Aanbevelingen voor veldproeven

De CSL meting is op dit punt in het onderzoeksproces de meest veelbelovende methode voor het opsporen van afwijkingen in diepwanden. De belangrijkste redenen daarvoor zijn de beschikbaarheid van apparatuur, de korte meettijd per voeg en de daaruit voortvloeiende relatief lage kosten van de meting. Hoewel aan de interpretatie nog veel kan worden verbeterd en nog veel inspanning nodig is voor het verwerven van betrouwbare referentiegegevens uit veld- en laboratoriumproeven, kan de techniek al worden toegepast in een projectomgeving. Als het CSL profiel alleen rechte lijnen vertoont, wat duidt op een zeer constant en homogeen materiaal tussen de meetbuizen, en het signaal vertoont een geringe demping, dan kan worden geconcludeerd dat de voeg geen defecten heeft. Als plaatselijke afwijkingen in het signaal zichtbaar worden dan zijn de extra tijd die nodig is voor het signaal om bij de ontvanger aan te komen en de demping van het signaal de eerste indicatoren om de grootte van de anomalie in te schatten. Uit proeven met verschillende materialen in de anomalie is gebleken dat bij granulaair materiaal zeer veel signaalverlies optreedt.

Voor optimale kwaliteit van de CSL meting kan het beste PVC als materiaal voor de meetbuizen worden gebruikt. Hierdoor wordt minder ruis in de metingen verkregen ten opzichte van staal. De PVC-buizen voor de CSL metingen worden aan de buitenkant van de buitenste hoeken van de wapeningskorven geplaatst. Het gebruik van 4 meetbuizen (2 aan beide zijden van de voeg) blijkt in de praktijk een goed compromis tussen kosten en detailniveau van de verkregen informatie.

### Conclusies

De metingen die zijn uitgevoerd op de locatie van het 'Kruisplein' in Rotterdam, de 'Sporzone' in Delft en in het laboratorium hebben ons inzicht in het productieproces van diepwanden verbeterd. De meting van de natuurlijke gammastraling heeft niet gefunctioneerd als voorzien als gevolg van de hoge natuurlijke radioactiviteit van het beton. Als de ingrediënten van het beton zouden kunnen worden gescreend op lage radioactiviteit, dan kan deze methode nuttig zijn. Het gebruik van een radioactieve bron tijdens de meting kan de resultaten verbeteren maar maakt dat de meting aan zeer veel vergunningsvoorwaarden moet voldoen. Hier is voorlopig niet mee verder gegaan.

De temperatuurmetingen met glasvezels kunnen worden gebruikt om de efficiëntie van het ontzanden van de bentoniet te controleren voorafgaand aan het beton storten. Tijdens het beton storten kan het proces waarin de bentoniet wordt vervangen door beton worden gecontroleerd. Met de gedistribueerde temperatuurmeting is het al in het productie stadium mogelijk om gebieden aan te geven die een grotere kans op defecten hebben. Tijdens het ontzanden is het zelfs mogelijk om nog in te grijpen: als sub-optimale ontzanding wordt gedetecteerd, kan bijvoorbeeld door te borstelen het ontzanden in de voeg worden verbeterd.

De CSL metingen blijken gedetailleerde informatie over de kwaliteit van de voegen op te leveren. Met de referentie-informatie van de testblokken is het mogelijk gebleken om een schatting te maken van de omvang van de onregelmatigheden die werden aangetroffen in het testgebied. Na ontgraving van de bouwput op Kruisplein bleek dat er inderdaad afwijkingen waren op de locaties waar het signaal afwijkingen vertoonde. Eén anomalie bestond niet uit bentoniet, maar bleek een grindnest te zijn. De andere anomalie bevatte inderdaad bentoniet. De grootte van de bentonietinsluiting kwam overeen met de verwachtingen op basis van de laboratoriumproeven.

De weerstandsmetingen kunnen in het geval er anomalieën in de CSL metingen zijn gevonden nuttig zijn ter controle. De weerstandsmetingen kunnen ook worden uitgevoerd als vooraf geen voorzieningen in de diepwanden zijn aangebracht. Verder onderzoek op de CSL-methode richt zich op de verdere uitwerking van de verandering in het signaal (looptijd, demping en frequentie karakteristiek) tijdens de passage van verschillende materialen in de voeg.

Ook wordt bekeken of er een paneel met in het werk ontstane anomalieën kan worden gemaakt.

Deze proef wordt in samenwerking met het onderzoek naar de productieparameters (promovendus Jan van Dalen) voorbereid.

Nader onderzoek van de weerstandsmeting zal zich richten op verbetering van de meetopstelling, zodat de uitvoeringstijd korter wordt en de resolutie hoger wordt.

### MET DANK AAN

De tests in Rotterdam zijn gefinancierd door de gemeente Rotterdam en de aannemer Besix / Franki. Een deel van de metingen werd gesponsord door Deltares, Medusa Exploration, Gemeentewerken Rotterdam-VLG, Fugro en Brem Funderingsexpertise.

Vanaf begin 2010 is het onderzoek ondergebracht bij 'Geolimpuls', het initiatief van Rijkswaterstaat om in 5 jaar tijd de faalkosten in de bouw te halveren. Het onderzoek is daar onderdeel van werkgroep 4 'Kwaliteitsverbetering in de grond gevormde elementen'.

De metingen in Delft zijn gefinancierd door ProRail, Combinatie Cromme Lijn, Geolimpuls en TUDelft met bijdragen van Brem Funderingsexpertise, Strukton, Bundes Anstalt für Materialforschung en Deltares.

### Referenties

- Amir, J.M. & Amir, E.I. 2008. *Capabilities and Limitations of Cross Hole Ultrasonic Testing of Piles*; [www.piletest.com/papers/IFCEE2009.Capabilities\\_and\\_Limitations\\_of\\_Cross\\_Hole\\_Ultrasonic\\_Testing\\_of\\_Piles.pdf](http://www.piletest.com/papers/IFCEE2009.Capabilities_and_Limitations_of_Cross_Hole_Ultrasonic_Testing_of_Piles.pdf)
- Del Grosso, A. & Inaudi, D. 2001. *Monitoring of Bridges and Concrete Structures with Fibre Optic Sensors in Europe*; <http://195.186.87.221/Bibliography/PDF/C92.pdf>
- Doornenbal, P. & Hopman, V. & Spruit, R. 2011. *High resolution monitoring of temperature in diaphragm wall concrete*; FMGM2011 Berlin
- Hwang, R.N. & Ishihara, K. & Lee, W.F. 2007. *Forensic Studies for Failure in Construction of An Underground Station of the Kaohsiung MRT System*; [http://civil.iisc.ernet.in/~gls/Courses\\_files/FORENSIC%20GEOTECHNICAL%20ENGINEERING.pdf](http://civil.iisc.ernet.in/~gls/Courses_files/FORENSIC%20GEOTECHNICAL%20ENGINEERING.pdf)
- Likins, G. & Webster, S. & Saavedra, M. 2004. *Evaluation of defects and tomography for CSL*; [www.pile.com/reference/stresswave2004/SW2004-046Eval\\_of\\_Defects\\_and\\_Tomography\\_for\\_CSL.pdf](http://www.pile.com/reference/stresswave2004/SW2004-046Eval_of_Defects_and_Tomography_for_CSL.pdf)
- PileTest 2009 [www.piletest.com/show.asp?page=chum](http://www.piletest.com/show.asp?page=chum)
- Sensornet 2009 [www.sensornet.co.uk/news/product-literature/](http://www.sensornet.co.uk/news/product-literature/) ●