

Paalschachtcontrole met behulp van spanningsgolven.

Een evaluatie van “hamertje tik” als meetmethode voor het controleren van de continuïteit van de paalschacht.
dr.ir. A.J.G. Schellingerhout en ir. T.K. Muller, IFCO BV.

In Nederland worden jaarlijks vele palen gecontroleerd door middel van integriteitsmetingen. Het doel van deze meting: afwezigheid van verstoringen in de paalschacht aantonen, zodat de palen in staat zijn om de belasting op de paalkop door te geven aan de draagkrachtige laag. De meting wordt uitgevoerd door met een hamer op de paalkop te slaan. Deze slag wekt een spanningsgolf op in de paal. De responsie van de paalkop wordt dan geregistreerd tegen de tijd, wat informatie verschaft over de toestand van de paalschacht. Door de analogie met een bekend kinderspel heeft deze meettechniek de naam “hamertje tik” gekregen. Hoewel de techniek reeds jaren wordt gebruikt, zijn de mogelijkheden en beperkingen niet bij iedere betrokkene bekend. Deze bijdrage hoopt dit te verbeteren.

Introductie

Integriteitsmetingen worden toegepast voor het controleren van de paalschacht op voldoende doorsnede, zodat deze de kracht op de paalkop kan doorgeven aan de ondergrond. De controle is vooral van belang bij palen waarvan de schacht in de grond gevormd wordt. Bij deze paaltypen, zoals vibro- en mortelschroefpalen, wordt de gefabriceerde paalschacht namelijk nooit visueel geïnspecteerd. Met integriteitsmetingen kan informatie over de schacht worden verkregen. De meting geeft echter geen informatie over het draagvermogen van de paal.

De meettechniek is gebaseerd op de 1-dimensionale golftheorie. Relevante aspecten van deze theorie zullen navolgend worden behandeld, waarbij de invloed van de grond op de meting slechts zijdelings wordt besproken. Bovendien wordt de theorie verduidelijkt met voorbeelden; een meer theoretische behandeling is reeds geschreven [1]. Na bespreking van een viertal praktijkvoorbeelden volgt een discussie over de praktische toepassing van de meettechniek en hoe deze, ondanks zijn beperkingen, een positieve bijdrage kan leveren aan de kwaliteitscontrole van de fundering.

Theorie

Integriteitsmetingen maken gebruik van de 1-dimensionale golftheorie voor een lineair medium. De oplossing van deze golfvergelijking bestaat uit twee longitudinale vlakke spanningsgolven, welke zich verplaatsen in tegengestelde richting. De voortplantingssnelheid van de golf wordt gegeven door:

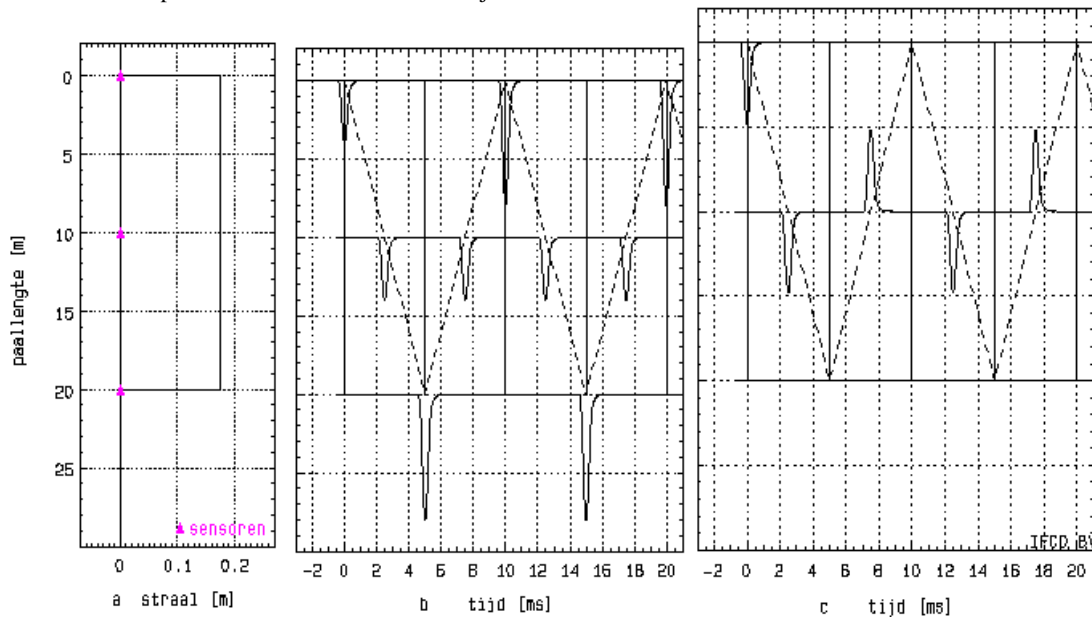
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

waarin: E de elasticiteitsmodulus en ρ de soortelijke massa.

De golfvergelijking is betrekkelijk eenvoudig en de oplossing kan met behulp van een computersimulatie worden berekend.

Figuur 1. Simulatie van een ronde vrije massieve paal met een straal van 0.175 m en een lengte van 20 meter. De onderbroken lijn geeft de plaats van de golf in de paaldoorsnede.

- straal van de paal
- snelheid van de paaldoorsnede als functie van de tijd
- kracht in de paaldoorsnede als functie van de tijd

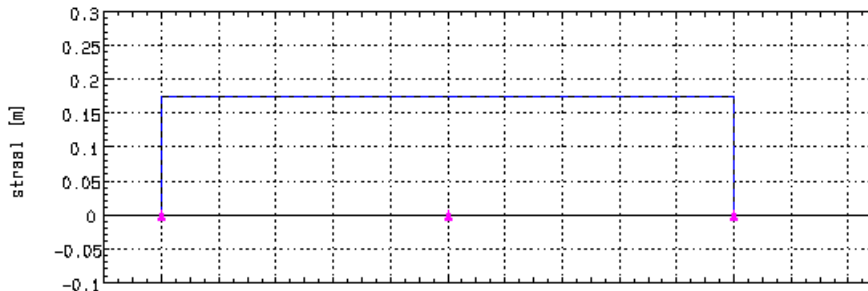


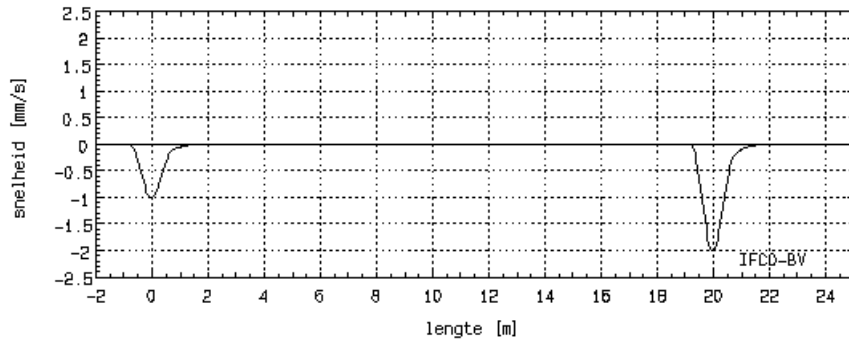
In figuur 1 is de golfvoortplanting bij een integriteitsmeting schematisch weergegeven. De ronde paal heeft een lengte van 20 meter en een straal van 0.175 meter. De figuur toont de straal van de paal als functie van de afstand onder de paalkop. De driehoeken in de figuur geven de posities van de meetsensoren aan. Bij een integriteitsmeting, zoals uitgevoerd in de praktijk, wordt slechts één enkele sensor op de paalkop gebruikt, welke de bewegingssnelheid als functie van de tijd bepaalt.

In een computersimulatie daarentegen kunnen verscheidene fictieve sensoren geplaatst worden, welke meetsignalen registreren op verschillende diepten. In figuur 1 wordt de kracht en de snelheid op drie verschillende posities weergegeven. De slag van de hamer wekt een krachtgolf op in de doorsnede van de paal. Deze golf verplaatst zich met een voortplantingssnelheid c , die in deze simulatie 4000 m/s bedraagt. De sensoren meten het passeren van de “naar beneden” en de “naar boven” lopende golf. De simulatie is uitgevoerd aan een paal zonder schacht- en voetweerstand. De golf verplaatst zich dan zonder te verzwakken naar de paalvoet. Hier aangekomen reflecteert de golf volledig en loopt terug naar de paalkop. De snelheidsensor op de paalvoet meet dan een snelheidverdubbeling. Door het ontbreken van voetweerstand meet de krachtsensor geen door de paalvoet uitgeoefende kracht.

Dezelfde simulatie is ook weergegeven in figuur 2.

Figuur 2. Berekende meetsignaal van de paalkop uit figuur 1 weergegeven als een integriteitsmeting.





Het snelheidssignaal gemeten met de sensor op de paalkop is daarin uitgezet tegen de diepte, door het meetsignaal te vermenigvuldigen met de halve voortplantingssnelheid c uit formule (1). Deze presentatie wordt gebruikt bij integriteitsmetingen. De straal van de paal is boven de figuur weergegeven als functie van de lengte. Het simulatie programma benadert eerst de paalvorm, waarna het signaal wordt berekend. Deze benadering wordt in alle figuren weergegeven met de gestreepte lijn 'matched radius'. Bij deze cilindrische paalvorm is de benadering ideaal en vallen de beide lijnen samen.

De eerste snelheidspiek in de figuur wordt veroorzaakt door de slag van de hamer; de tweede piek is de gereflecteerde golf van de paalvoet. Omdat de golf bij de paalkop opnieuw reflecteert, ontstaat wederom de verdubbeling van de snelheid.

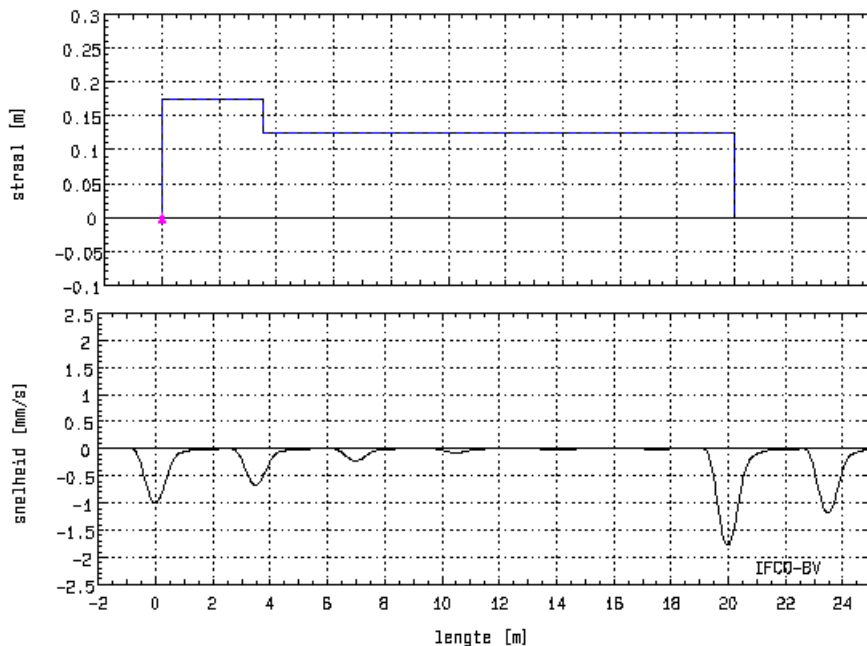
De randvoorwaarden in de golfvergelijking voor snelheid en kracht geven de relaties voor de reflectie en transmissie van de golven. De impedantieverandering in het medium bepaalt dit gedrag. De impedantie wordt gegeven door:

$$Z = A\sqrt{Er} \quad (2)$$

waarin: E de elasticiteitsmodulus, r de soortelijke massa en A het oppervlak.

Zoals uit formule (2) blijkt, wordt de impedantie ook bepaald door het oppervlak van de paal. Hierdoor is het mogelijk, hoewel de theoretische beschrijving 1-dimensionaal is, doorsnedeverandering in de paal te registreren. Aangenomen wordt dan dat de elasticiteitsmodulus en de soortelijke massa van de paal constant zijn. Strikt genomen meet een integriteitsmeting impedantieveranderingen, maar in de praktijk worden deze toegekend aan veranderingen in paaldiameter. Figuur 3 geeft een gesimuleerd meetsignaal van een paal met een enkele reductie in diameter.

Figuur 3 Berekend integriteitssignaal van een paal met een reductie in diameter.



Het integriteitssignaal geeft een duidelijke reflex ter plekke van deze doorsnede-varianting. De overige extra reflecties (t.o.v. figuur 2) worden veroorzaakt door het opnieuw reflecteren van de golf aan het defect.

De grootte van de gereflecteerde snelheidsgolf bij een impedantie-varianting wordt gegeven door:

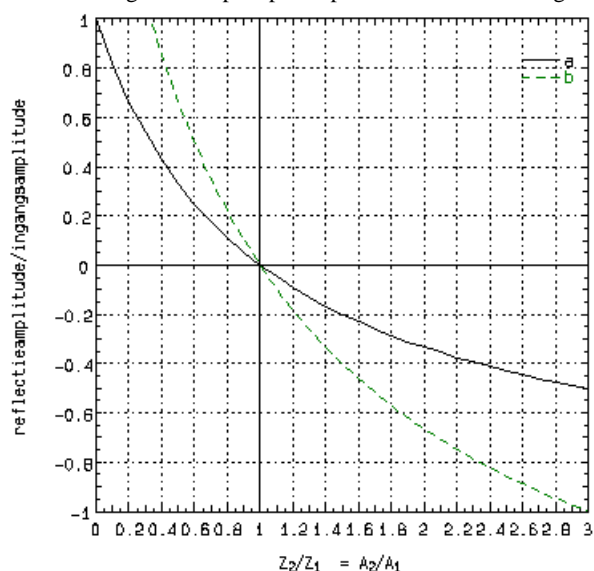
$$V_{reflex} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_{inkomend} \quad (3)$$

waarin: Z_1 en Z_2 impedanties en v_{reflex} de amplitude van de gereflecteerde golf en $v_{inkomend}$ de amplitude van de inkomende golf.

Formule 3 is weergegeven in figuur 4 als functie van de impedantie-varianting. De amplitude van de reflex is tweemaal zo groot wanneer de meting aan de paalkop plaatsvindt. Deze verdubbeling is met een gestreepte lijn in de figuur weergegeven. De limietgevallen, een vrije en vaste paalvoet, geven respectievelijk een volledige reflectie van +1 en van -1 maal de inkomende golf. De uitspraak dat impedantie-variantingen, dus ook oppervlakte-variantingen, van 10 à 20 % met integriteitsmetingen kunnen worden waargenomen is gebaseerd op deze relatie [2]. Deze uitspraak is voor normale defecten echter niet correct.

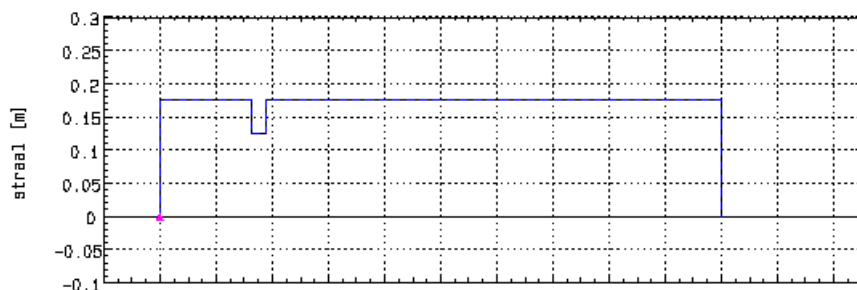
Figuur 4. Amplitude-varianting als functie van de impedantie-varianting volgens formule 3.

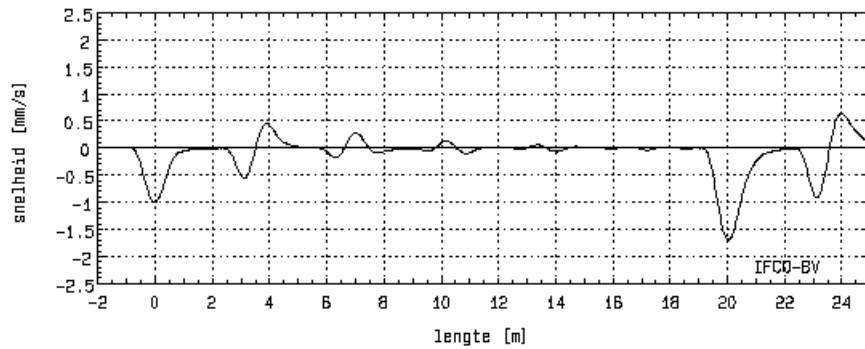
- a. reflectie aan het paaldefect.
- b. reflectie gemeten op de paalkop. Deze is tweemaal zo groot door het vrije einde van de paalkop.



De relatie tussen de amplitude van de gereflecteerde spanningsgolf en de diameter van de paal suggereert dat met het integriteitssignaal de vorm van de schacht te bepalen is. Dit vindt plaats door met behulp van een computersimulatie het integriteitssignaal van een geschatte paalvorm te berekenen. Indien het gemeten en het berekende signaal een goede gelijkenis tonen, wordt de paalvorm bekend verondersteld. Hoewel het heel plausibel lijkt, is de beschreven procedure niet altijd correct, zoals onderstaand nader wordt toegelicht.

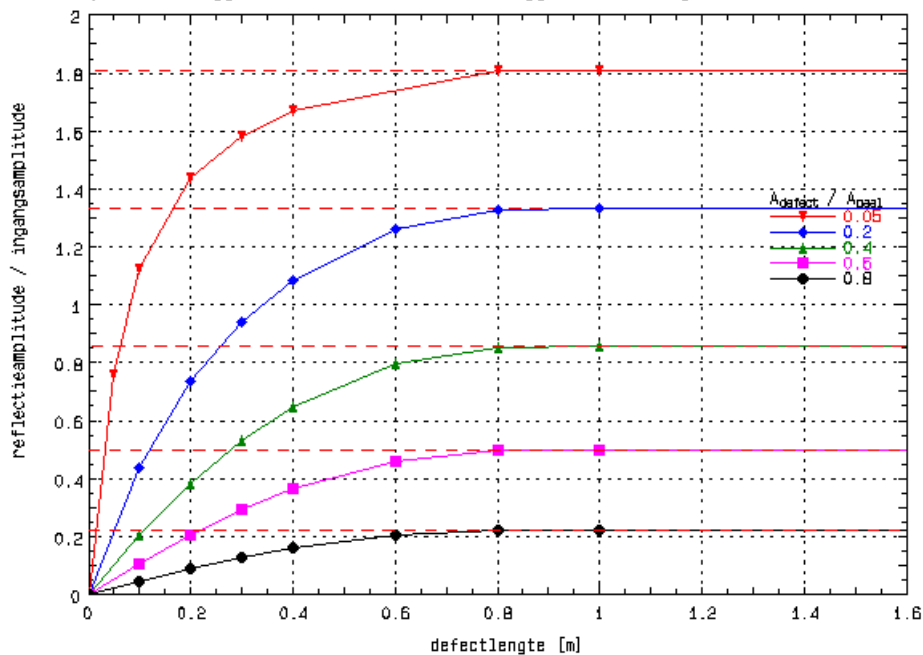
Figuur 5. Berekende integriteitssignaal van een paal met een abrupte diameterreductie over een lengte van 0.5 meter. Hoewel de paal een groot defect heeft, is de voetreflex nauwelijks verzwakt.





In figuur 5 is een simulatie weergegeven van een paal met een defect, dat bestaat uit een abrupte insnoering van 50 % over een afstand van 0.5 m. Defecten waarbij het paaloppervlak vóór en na het defect gelijk is, hebben de eigenschap dat het signaaloppervlak van de reflectie gelijk is aan nul en dat de transmissie hetzelfde signaaloppervlak heeft als de inkomende golf. De reflectie aan het defect, zoals weergegeven in figuur 5, heeft daarom een gelijk oppervlak boven en onder de nullijn. Ook heeft het signaal in de figuur een reflectie van de paalvoet. Deze is weliswaar zwakker dan normaal, maar hij heeft wel een identiek oppervlak als bij een paal zonder defect. De amplitude van de gereflecteerde golf is kleiner dan voorspeld in formule 3. Het gedrag van de golf is dus anders dan bij een paal met een enkele teruggang in paaldiameter.

Figuur 6. Verhouding reflectieamplitude - ingangsamplitude als functie van de defectlengte. Vorm van het defect is weergegeven in figuur 5 waarbij de afstand van 0.5 meter is gevarieerd. De verhouding van de amplitudes is berekend voor 5 verschillende verhoudingen van het oppervlak van het defect met het oppervlak van de paal.



In figuur 6 is de gereflecteerde amplitude als functie van de lengte van het defect getekend. De defecten bestaan uit een abrupte verkleining en vergroting van het paaloppervlak zoals is weergegeven in figuur 5. Deze berekening is uitgevoerd voor vijf verschillende oppervlakteverhoudingen. De figuur toont een aantal belangrijke eigenschappen. Ten eerste, dat alleen bij een grote lengte van het defect de reflectie amplitude volgens formule 3 wordt gemeten. Deze amplitude wordt in de figuur weergegeven met een gestreepte lijn. Ten tweede, dat bij een bepaalde reflectie amplitude een groot aantal verschillende lengten van het defect mogelijk is met bijpassend insnoeringspercentage. Ten derde geldt, dat de amplitude van de reflectie voor een kleine defectlengte altijd naar nul gaat.

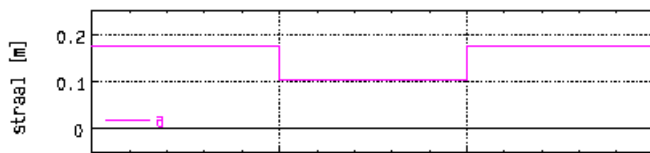
Uit figuur 6 blijkt dat de amplitude van de reflectie geen unieke relatie heeft met de diameterreductie. Ook de vorm van de reflex blijkt geen mogelijkheid te bieden om het defect te berekenen. In figuur 7 zijn vijf defecten gegeven met de daarbij behorende reflecties. Hoewel de vorm van de defecten volledig verschillend is, blijkt de reflectie van de golf identiek.

Hieruit volgt dat het met behulp van integriteitsmetingen onmogelijk is om defecten met afmetingen beneden een bepaalde lengte uniek te karakteriseren. Uit figuur 6 volgt dat, indien de lengte van het defect ruim onder de 1 meter blijft, de defectvorm niet meer uniek te bepalen is. De genoemde afstand van een meter wordt bepaald door de in de simulaties gebruikte lengte van de inkomende golf. Een kortere duur van de golf (dus een kleinere golflengte) verhoogt namelijk de *resolutie* van de meettechniek.

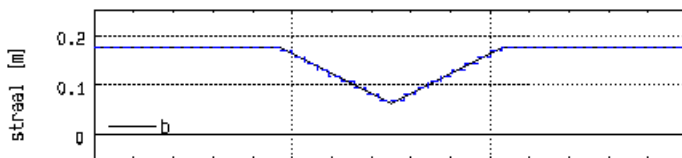
N.B. De *resolutie* (of the oplossend vermogen) van een meetsysteem is een maat voor de fijnheid van de instelbaarheid of de afleesbaarheid van dat meetsysteem. De resolutie wordt bepaald door de kleinste verandering Δx in de te meten grootte x die nog juist een verandering van het meetresultaat geeft. De grootte van de resolutie R is daarbij gegeven door $R = x/\Delta x$.

Figuur 7. Uitvergroete reflexen van vijf verschillende defectvormen. Drie defecten hebben een gelijke veerstijfheid. De overige twee defecten zijn in geringe mate gecorrigeerd vanwege de niet volledig verwaarloosbare massa. De benadering van de paalvorm voor de simulatie is goed zichtbaar bij het kegelvormige defect.

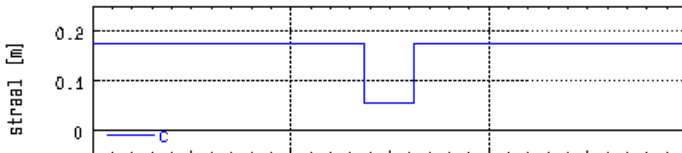
a. $A_{defect}/A_{paal} = 0,35$ $L_{defect} = 0,20$ m (met correctie)



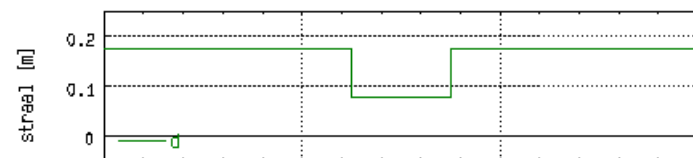
b. kegel (met correctie)



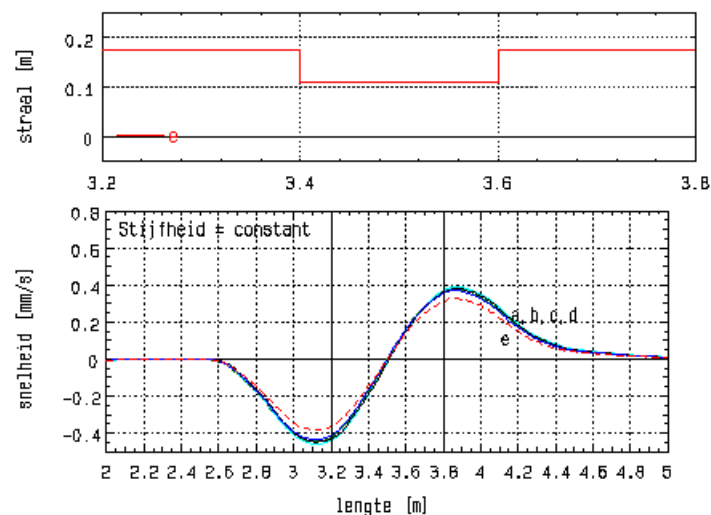
c. $A_{defect}/A_{paal} = 0,10$ $L_{defect} = 0,05$ m



d. $A_{defect}/A_{paal} = 0,20$ $L_{defect} = 0,10$ m



e. $A_{defect}/A_{paal} = 0,40$ $L_{defect} = 0,20$ m



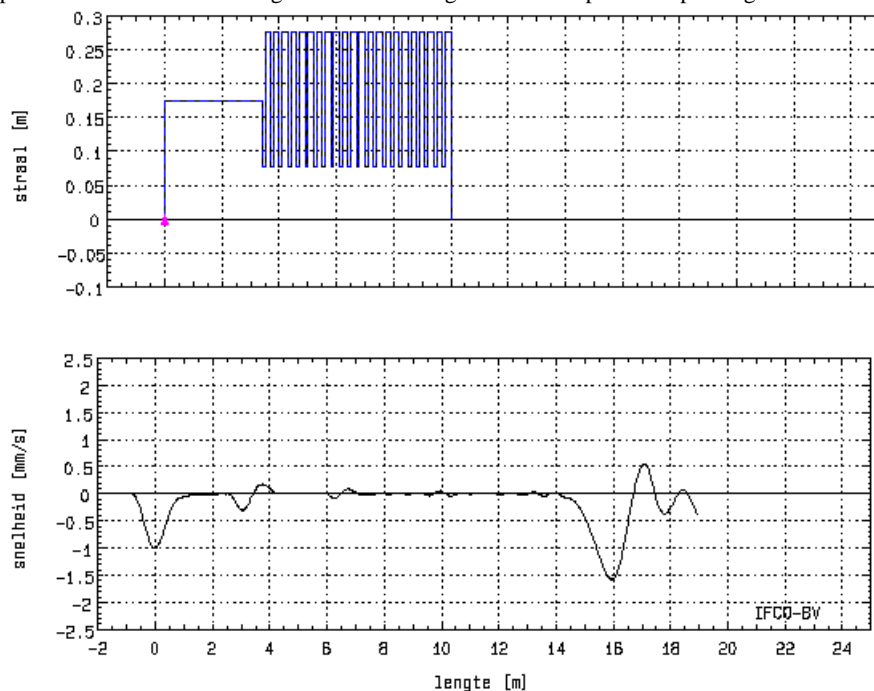
Figuur 7 geeft aan dat voor “korte” defecten de grootte van de reflectie geen relatie vormt met de impedantieverandering, doch wel met de veerstijfheid van het defect. De defecten in figuur 7, met een identieke reflectie, hebben alle ongeveer een gelijke veerstijfheid. In deze benadering wordt de massa van het defect verwaarloosd, wat leidt tot relatief grote fouten indien de diameterreductie gering is. Hoewel theoretisch niet exact, is de veerstijfheid bij een diameterreductie een aanzienlijk betere maatstaf dan de impedantie.

De voorafgaande discussie betrof defecten met een reductie in diameter. Wanneer de diameter over een beperkte lengte toeneemt, kan op gelijke wijze worden aangetoond dat niet de impedantie van het defect maar de massa de maatstaf wordt voor de reflectieamplitude. In dit geval wordt de veerstijfheid verwaarloosd.

Op grond van het voorafgaande wordt geconcludeerd dat met een integriteitsmeting de vorm van de paal niet uniek bepaald kan worden. Dit geldt alleen voor afmetingen beneden een door de schokgolf bepaalde lengte. Mathematisch is hier sprake van een niet unieke oplossing.

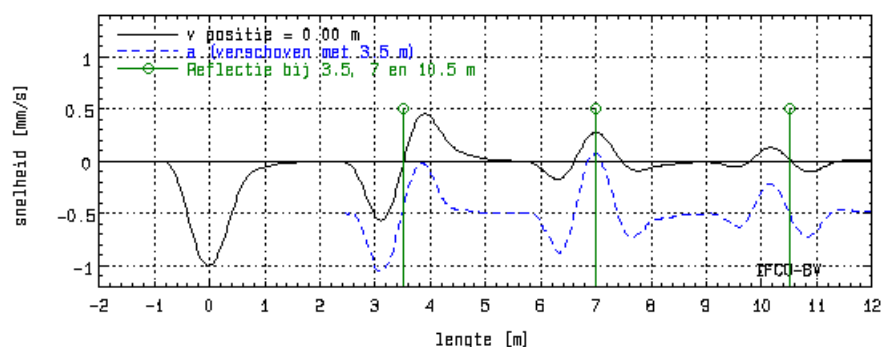
Figuur 8 geeft hiervan een extra voorbeeld waarbij de paalvorm beneden de 3.7 m sterk in diameter varieert. De integriteitsmeting aan deze paal geeft echter geen enkele onregelmatigheid. Alleen de reflectie van de overgang is waarneembaar. De begrenzing door de golflengte is een algemeen golfverschijnsel. Een bekend voorbeeld is de beperking van het oplossend vermogen bij een lichtmicroscop.

Figuur 8. Berekende integriteitssignaal van een paal met een periodieke verandering in straal, die kleiner is dan de resolutie van de inkomende golf. De reflectie aan het periodieke segment is zichtbaar. Ook deze paal heeft een duidelijke reflex van de paalvoet. De straalverandering heeft vooral een grote invloed op de voortplantingssnelheid van de golf.



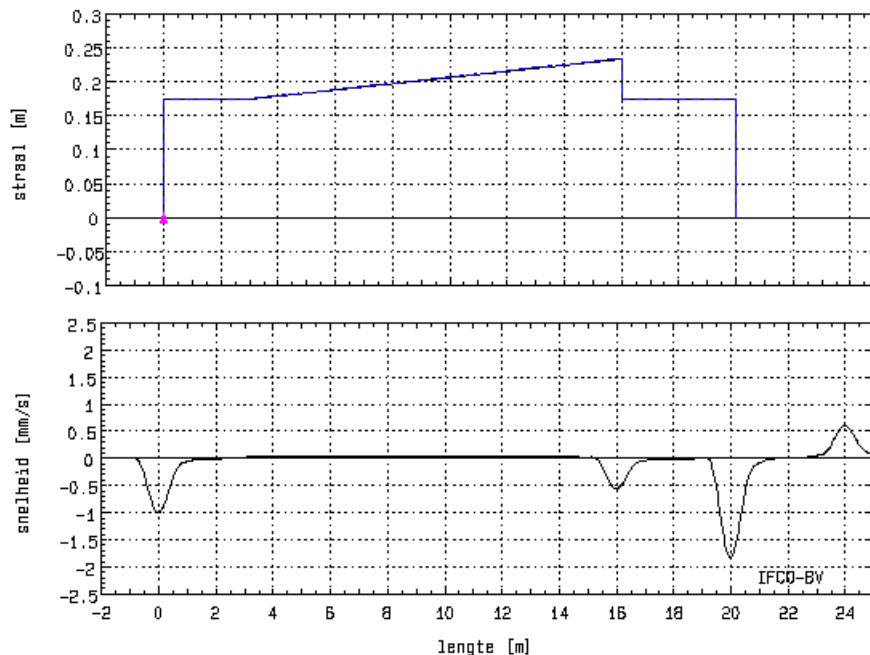
Korte defecten hebben nog een interessante eigenschap, namelijk dat het gereflecteerde signaal de gedifferentieerde is van de inkomende golf. In figuur 9 is een simulatie gegeven van een defect waarbij tevens het gedifferentieerde signaal (het versnellings signaal), verschoven over de diepte van het defect, is gegeven. Het gereflecteerde signaal is daarom een opeenvolging van de eerste afgeleide, de tweede afgeleide, etc van het inkomende signaal. De herhalingsafstand is nu niet de afstand tussen de minima van de reflecties maar tussen het minimum van de inkomende golf en het nulpunt van de eerste reflectie. Voor de dubbele afstand moet het maximum en niet het minimum van de tweede reflectie worden genomen.

Figuur 9. 'Kort' defect differentieert inkomende golf. De reflecties zijn daarom opeenvolgende afgeleiden van de inkomende golf. Het meetsignaal is een uitvergroting van figuur 5. De gestreepte lijn is de afgeleide van het snelheidssignaal (de versnelling van de paalkop). Deze lijn is met de defect afstand van 3.5 meter verschoven. De beide lijnen zijn dan gelijk in vorm. De herhalingsafstand is van minimum naar nulpunt en van nulpunt naar maximum, welke ook in de figuur is weergegeven.



Ook bij langzame veranderingen in paalvorm zijn er problemen om de globale vorm van de paalschacht uit de integriteitsmeting af te leiden. Deze zijn vooral van meettechnische en niet, zoals in het voorafgaande, van theoretische oorsprong. Figuur 10 geeft de simulatie van een langzame toename in straal gevolgd door een abrupte teruggang naar de oorspronkelijke diameter. Voor dit defect geldt, zoals besproken, dat het totale gereflecteerde oppervlak gelijk is aan nul. De grote lengte waarover de straal toeneemt, zorgt voor een geringe reflectie amplitude over een grote afstand. In de meting is deze geringe toename over een lange tijdsduur lastig waar te nemen, vooral omdat een echte meting een aantal verstoringen heeft van de basislijn.

Figuur 10. Het berekende integriteitssignaal van een kegelvormige paal met een abrupte teruggang in paaldiameter. De toename in diameter is in het signaal nauwelijks waarneembaar. Het extra volume ten opzichte van een ronde paal met de voetdiameter bedraagt 25 %.



De invloed van de grond op het integriteitssignaal is in de simulaties niet meegenomen. De grondweerstand veroorzaakt een verzwakking van de golf en veroorzaakt hierdoor reflecties in het meetsignaal. De analyse van het meetsignaal wordt nog complexer indien de grond ook de paalvorm gaat beïnvloeden, hetgeen mogelijk is bij bepaalde paaltypen. De besproken theorie, waarin de grondinvloed niet is meegenomen, toont aan dat de meettechniek een aantal beperkingen kent in het bepalen van de paalvorm. Deze fundamentele beperkingen blijven ook aanwezig indien de computersimulatie wordt uitgevoerd met grondweerstand.

Praktijkervaringen

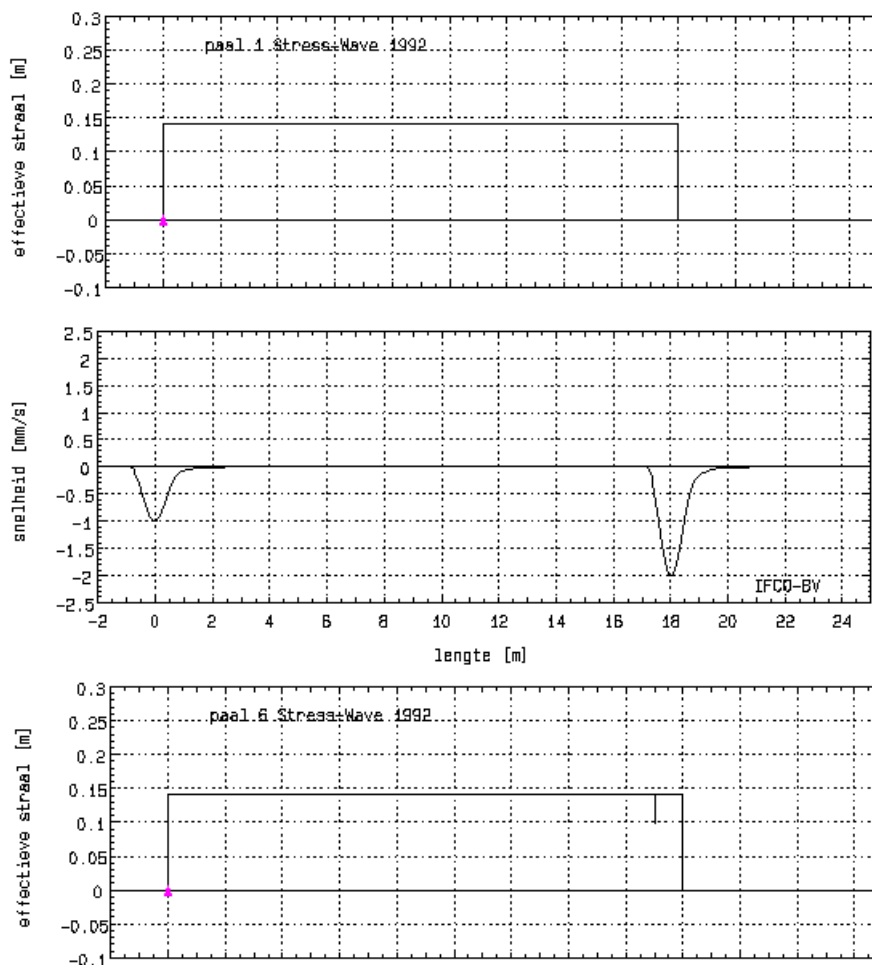
Onderzoek tijdens conferentie in Den Haag

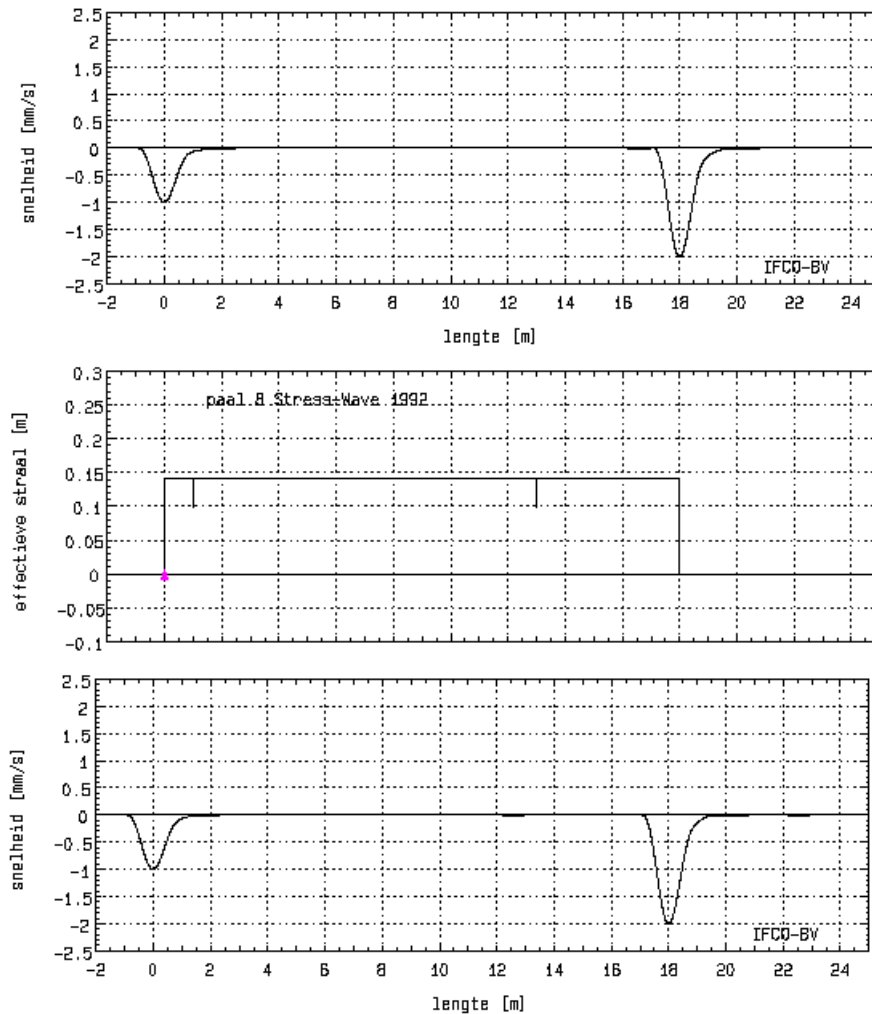
In 1992 is in Den Haag de “4th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles” gehouden. Onderdeel van deze internationale conferentie was een onderzoek naar de mogelijkheden en beperkingen van integriteitsmetingen. De organisatie heeft, om alle deelnemers gelijke kansen te geven, het onderzoek als volgt uitgevoerd: 10 palen met verschillende vormen werden in een bentoniet-cement mengsel geplaatst. Alle deelnemers kregen de volledige informatie betreffende de vorm van de paal. De deelnemer moest de volgende vraag beantwoorden: Welk integriteitssignaal, gemeten met eigen apparatuur, hoort bij welke paalvorm?

Het bijzondere van deze proef was niet dat de opzet leek op een praktijksituatie, maar dat de deelnemers alleen op basis van het integriteitssignaal een uitspraak moesten doen over welk gemeten signaal bij welke paal hoorde. De organisatie was zelfs zover gegaan om de proef onder begeleiding van een notaris uit te voeren [3]. De resultaten waren op zijn minst verrassend. De enige paal zonder visuele defecten werd door geen van de deelnemende bedrijven correct toegekend. Het hoogste aantal correct toegekende palen was 7 stuks en het gemiddelde aantal bedroeg 44 %. Drie bedrijven kwamen tot een score van drie stuks.

Deze tegenvallende resultaten zijn voor een groot gedeelte te verklaren uit het feit dat een bepaald defect een groot aantal maal in de palen voorkwam. Figuur 11 geeft de vorm van drie van de tien palen en het daarbij gesimuleerde integriteitssignaal.

Figuur 11. Berekende integriteitssignalen van drie palen van het onderzoek tijdens de stress wave conferentie in 1992. Het oppervlak van de vierkante geprefabriceerde voorgespannen palen is omgerekend naar een effectieve paalstraal. De defecten zijn nauwelijks waarneembaar in de gesimuleerde signalen.





Het bedoelde defect betrof een insnoering van 50 % in oppervlak van de vierkante betonnen geprefabriceerde paal over een afstand van 0.01 m. De figuur toont de uiterst geringe verschillen tussen de drie gesimuleerde signalen. Hoewel de paalvormen uiterlijk totaal verschillend zijn, geven de integriteitssignalen een volledig identiek beeld. Hierdoor werd het toekennen van de meetsignalen aan de correcte paalvorm praktisch onmogelijk. Hetzelfde probleem deed zich voor bij het onderscheiden van twee andere palen. Het onderzoek werd daarom gekenmerkt door een groot kans element. Een ongelukkige deelnemer zou zonder fouten te maken maximaal vijf palen goed kunnen toekennen.

De belangrijkste vraag is: waarom heeft de organisatie dit defect toegevoegd? De reden kan niet zijn het duidelijk maken dat impedantie reducties van 50 % over een kleine afstand slecht meetbaar zijn. De veelvuldige aanwezigheid, waardoor een soort loterij ontstond, maakt dit erg onwaarschijnlijk. De evaluatie door de organisatie geeft ook geen enkele verklaring [4]. De werkelijke reden zal daarom onbekend blijven, maar het lijkt niet waarschijnlijk dat de besproken theorie bij de keuze van de testpalen een rol heeft gespeeld.

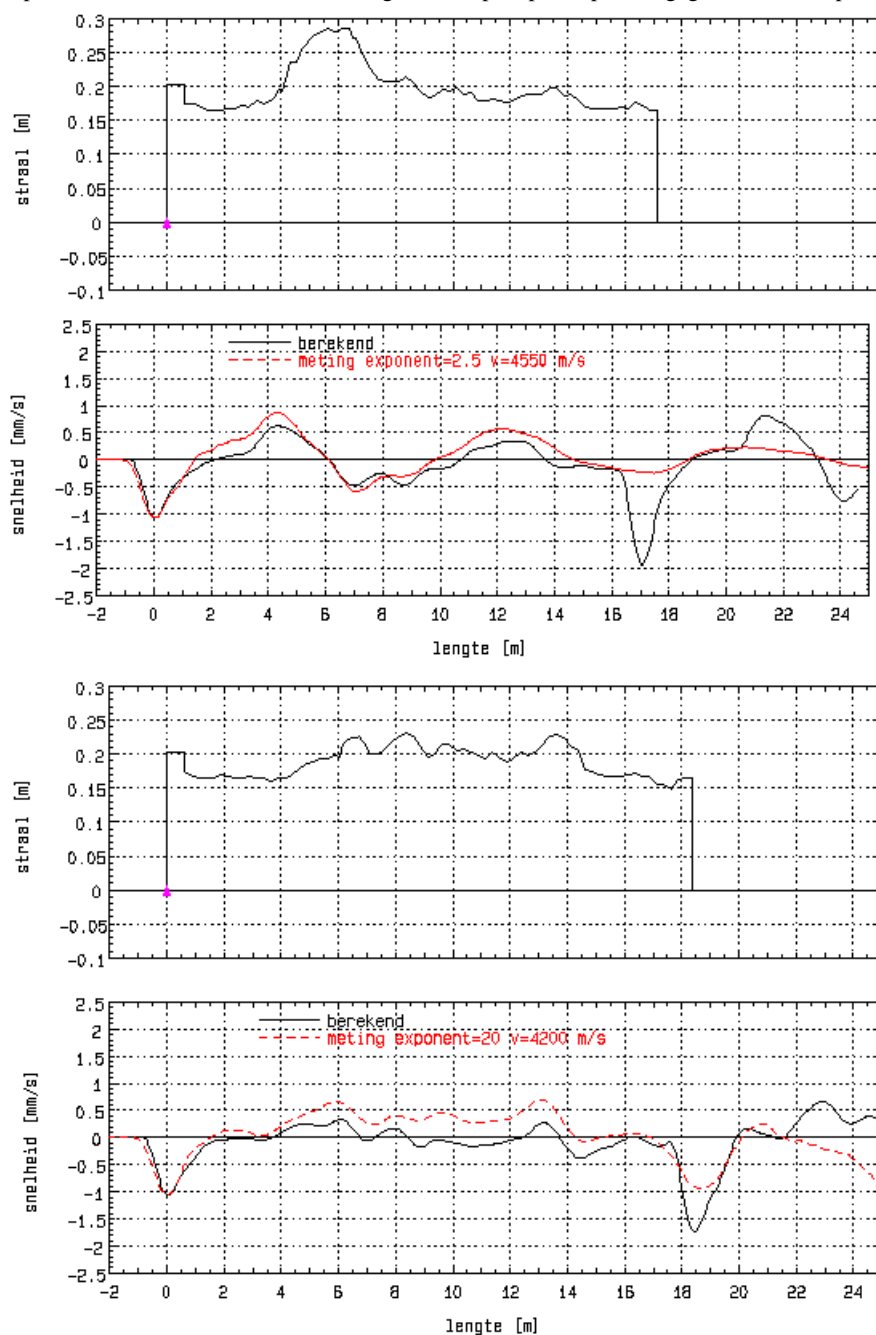
Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat de reflexamplitude gesimuleerd is met de 1-dimensionale golftheorie. Voor kleine defecten is een correctie voor 3-dimensionale effecten noodzakelijk [1]. Deze correctie vergroot de gereflecteerde amplitude. Echter, zelfs dan blijft het omschreven defect zeer moeilijk waarneembaar in een integriteitssignaal.

Vergelijking simulaties en metingen

Uit de beschreven theorie volgt dat het uniek bepalen van defectvormen onmogelijk is. Nu kan de kritische vraag gesteld worden of deze theorie toepasbaar is op integriteitsmetingen. Het antwoord op deze vraag is positief. De theorie is goed in staat om bij een bekende paalvorm het

integriteitssignaal te berekenen. Dit is vele malen aangetoond door de signalen van simulaties en metingen te vergelijken.

Figuur 12 Vergelijking van gemeten en gesimuleerde signalen van twee verschillende palen. De paalvormen werden veroorzaakt door het bodemprofiel. De simulatie is uitgevoerd zonder grondmodellen. De meetsignalen zijn op de gebruikelijke wijze versterkt met een exponentiële functie van de afstand. Bij de ene paal bedraagt deze 20 maal en bij de andere paal 2.5 maal. De exponentiële functie heeft een versterking van 1x op de paalkop en de gegeven waarde op de paalvoet.



Een voorbeeld wordt gegeven in figuur 12. Hierin staan de gesimuleerde en gemeten integriteitssignalen van twee vibropalen. De integriteitssignalen zijn gemeten op het moment dat beide palen in de grond stonden. Na de meting zijn de twee palen uit de grond gehaald, waarna de paalafmetingen zijn bepaald. De gemeten integriteitssignalen zijn op de gebruikelijke wijze met een exponentiële functie van de tijd vermenigvuldigd. Deze bewerking is standaard op alle meetsystemen en wordt toegepast om de verzwakking van de golf in de paal veroorzaakt door de grond te compenseren.

Verder is geen enkele correctie op het meetsignaal toegepast. De simulatie van het signaal is uitgevoerd zoals alle simulaties in deze publikatie, zonder invloed van de grond. Zoals uit de figuur blijkt is de overeenkomst treffend. Alleen de grootte van de paalvoetreflex is duidelijk verschillend, hetgeen te verwachten is doordat er een verschil is tussen de verzwakking door de

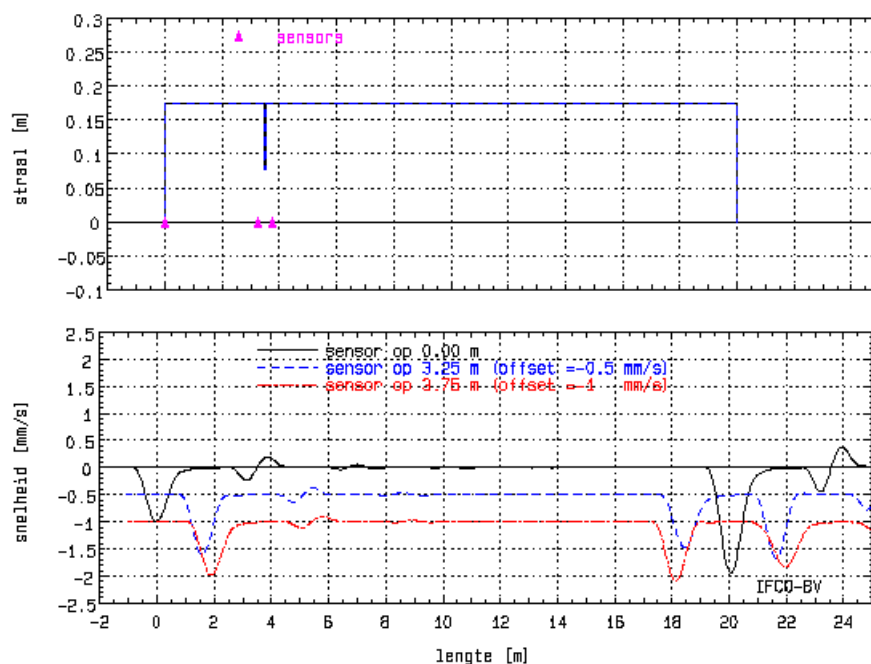
grondlagen en door de paalvoet, terwijl de meting slechts met een enkele parameter is gecompenseerd.

Relatie reflex-paalvorm en reflex-defect

Het grootste probleem bij integriteitsmetingen is: welke paalvorm hoort bij een gemeten reflectie? De theorie toont aan dat dit probleem niet oplosbaar is met de huidige integriteitsmetingen. Daardoor kan bij aanwezigheid van reflecties in het meetsignaal, zonder te ontgraven, niet altijd een uitspraak worden gedaan over de vorm van de paal. Alleen in combinatie met ervaring omtrent paalproductiemethoden en grondgesteldheid kan een betere analyse gemaakt worden. Helaas moet worden vastgesteld dat bij een ontgraving niet altijd een verklaring kan worden gevonden voor de waargenomen reflex.

Het visueel vinden van het defect die de reflex in het integriteitssignaal veroorzaakt, is lastig. Het lokaliseren wordt extra bemoeilijkt door de onzekerheid in de voortplantingssnelheid, waardoor de exacte diepte niet bekend is. Tevens moet men rekening houden met het feit dat het defect altijd dieper zit dan het minimum van de reflex. De nul doorgang is daarvoor een veel beter criterium. Het probleem van het lokaliseren kan evenmin worden opgelost door de sensor aan de schacht te bevestigen, hetgeen is toegelicht in figuur 13. Deze figuur geeft de meetsignalen op de paalkop en boven en onder het defect. De verschillen in de meetsignalen zijn zeer gering zodat deze omslachtige methode nauwelijks voordelen biedt.

Figuur 13. Berekende integriteitssignalen van een defecte paal met drie meetsensoren. Eén sensor bevindt zich op de paalkop, één sensor is boven het defect geplaatst en één sensor is onder het defect geplaatst. Afgezien van de vertraging in de tijd vertonen de signalen slechts beperkte verschillen.



Paalbreuk

Paalbreuk is een type defect dat uitermate goed met integriteitsmetingen kan worden opgespoord. Indien de schacht gebroken is, wordt de inkomende golf volledig gereflecteerd waardoor een duidelijke reflex in het meetsignaal optreedt. Paalbreuk kan bij sommige paaltypen optreden door opheien en/of zwellen van de grond. Een waarschijnlijke plaats voor breuk is dan direct onder het einde van de wapening.

Discussie

Integriteitsmetingen worden tegenwoordig veelvuldig toegepast als methode voor het controleren van de paalschacht. De toepassing van de meettechniek heeft de afgelopen decennia een grote vlucht genomen. De beperkingen van de techniek, die aanwezig zijn sinds de eerste

toepassing, hebben die ontwikkeling nooit afgeremd. De funderingsmarkt heeft duidelijk behoefte aan een meettechniek waarmee de paalschacht wordt gecontroleerd.

De integriteitsmeting is eenvoudig en economisch en is daarom de meest voorkomende meettechniek geworden. De beperkingen van de techniek worden door zowel de opdrachtgever als de aannemer geaccepteerd, zeker zolang het oordeel over de paalschacht positief uitvalt.

De beperkingen van de techniek blijken ook uit de praktische toepassing. Nooit wordt bij de interpretatie van een meting uitgegaan van het signaal van een enkele paal. Extra meetsignalen van “referentie” palen zijn noodzakelijk. De praktische uitvoering van de meettechniek is vooral gebaseerd op het vergelijken van de signalen. De afwijkende signalen worden dan eventueel nader onderzocht. Bij de interpretatie wordt ook gebruikt gemaakt van de produktiewijze van het paalsysteem en de daarbij behorende problemen. Informatie betreffende de grondopbouw is ook gewenst voor de interpretatie, bijvoorbeeld in de vorm van een sondering. Al deze extra informatie is beslist noodzakelijk voor een correcte interpretatie van de meetsignalen, maar hierdoor wordt tevens aangetoond dat enkel een meetsignaal niet voldoende informatie bevat om de paalschacht te beoordelen.

Het oplossend vermogen van een integriteitsmeting en daarmee het opsporen van defecten wordt beperkt door de relatief grote lengte van de opgewekte spanningsgolf. Het verkleinen van de golf levert daarom een hogere resolutie op. Dit inzicht is al bekend sinds de eerste integriteitsmeting. Waarom is er dan zo weinig vooruitgang geboekt? De reden is dat de meettechniek is gebaseerd op een vlakke longitudinale golf. Deze golf wordt opgewekt door te slaan op een enkel punt op de paalkop. Indien de opgewekte golflengte groot is ten opzichte van de paaldiameter kan alleen deze vlakke golf ontstaan. Dit probleem is wiskundig opgelost voor een 1-dimensionale ronde staaf die gemaakt is van een gas of een vloeistof. Om alleen een vlakke golf op te wekken moet aan de volgende relatie worden voldaan:

$$l > 1.71D \quad (4)$$

waarin: D de diameter van de staaf en λ de golflengte.

Formule 4 geeft een beperking aan de kleinste golflengte indien alleen een vlakke golf opgewekt mag worden. Hierdoor wordt de maximaal haalbare resolutie van de meettechniek begrensd. Numerieke 3-dimensionale simulaties van integriteitsmetingen geven soortgelijke problemen. In deze simulaties treden verstoringen op na het beëindigen van de hamerslag [5]. Deze verstoringen kunnen worden verminderd door de golflengte te vergroten. Dit wijst op een identieke situatie als de relatie beschreven in formule 4. De beperking van de golflengte bij integriteitsmetingen is daarom veel fundamenteeler van aard. Dit heeft tevens tot gevolg dat grote verbeteringen in resolutie onwaarschijnlijk zijn.

De onderlinge verschillen in resolutie tussen de huidige generatie integriteits-meetapparatuur is zeer gering. De keuze van de apparatuur is daarom vooral gebaseerd op persoonlijke voorkeur, betrouwbaarheid, prijs en gebruiksvriendelijkheid en niet op fundamentele verschillen in meetkwaliteit. Ontwikkelingen op het gebied van apparatuur zijn vooral gericht op het verlagen van de kostprijs per meting. Nieuwe verbeterde meettechnieken zijn niet beschikbaar. Wel zijn enkele uitbreidingen op de “standaard” meting ontwikkeld, namelijk de geïnstrumenteerde hamer waarbij ook de kracht van de slag op de paal geregistreerd wordt en de stereo meting waarbij met twee sensoren langs de paalschacht wordt gewerkt. Beide technieken bieden echter geen verbetering in resolutie.

De besproken theorie van integriteitsmetingen levert als verrassend resultaat op, dat het zichtbaar zijn van de reflex van de paalvoet geen garantie biedt voor een paalschacht zonder defecten. De spanningsgolf gaat altijd door het defect heen en geeft dus altijd een voet reflex. Alleen bij een volledig gebroken of gescheurde paal is geen voetreflex aanwezig. Ook kan worden vastgesteld dat een vormanalyse van de paalschacht geen zinvolle bijdrage levert bij de interpretatie van integriteitsmetingen. Doordat het probleem niet uniek oplosbaar is, geeft een

vormanalyse slechts een mogelijke paalvorm. Daarbij is altijd een paalvorm te bedenken die ieder tevreden stelt.

In de praktijk worden integriteitsmetingen veelvuldig ingezet voor toepassingen waarvoor geen theoretische onderbouwing aanwezig is. Ook bestaan er vele praktische technieken en verklaringen voor het verbeteren van de meettechniek. Zonder objectief onderzoek kan echter niet vastgesteld worden of deze methoden echt werken. Voorzichtigheid is bij al deze toepassingen zeker op zijn plaats.

Veruit het merendeel van de in Nederland doorgemeten palen wordt na een integriteitsmeting geschikt geacht voor gebruik in de fundering. Hoe moet echter gehandeld worden indien er een niet toelaatbare reflex in het signaal wordt waargenomen? Hiervoor is geen algemene procedure te geven vanwege de grote verscheidenheid van paaltypen. Mogelijke stappen voor nader onderzoek zijn:

- Het snellen van de paalkop en herhalen van de meting. De integriteitsmeting detecteert vooral het eerste grote defect. Indien de paalkop niet geschikt is voor een correcte meting ontstaan reflexen in het meetsignaal die onterecht worden toegekend aan een defect op een bepaalde diepte. De integriteitsmeting bepaalt de beweging van de paalkop als functie van de tijd. De diepteschaal ontstaat door de aanname dat zich een golf in de paal voortplant. Defecten in de eerste meter paal kunnen dit verstoren. De paalkop is ook kritisch omdat in dit gedeelte van de paal de 3-dimensionale golf van de hamerklap wordt omgezet in de vlakke golf die nodig is voor de meting.
- Een second opinion vragen over de interpretatie van het meetsignaal. Vaak wordt de paal dan opnieuw doorgemeten, hoewel dit bij een goede oorspronkelijke meting nauwelijks verschil zal opleveren. De interpretatie van de integriteitsmeting is echter veel minder objectief dan wordt aangenomen. De theorie geeft aan dat allerlei paalvormen mogelijk zijn voor dezelfde reflectie, hetgeen betekent dat een andere adviseur het signaal anders kan interpreteren.
- Problemen betreffende een bepaalde paal kunnen ook snel worden opgelost door het plaatsen van extra palen. De mogelijkheid hiertoe wordt vooral bepaald door het tijdstip van de meting. Als de produktiemachine nog op het werk is, kan dit tegen betrekkelijk geringe kosten.
- Indien het mogelijke defect op een geringe diepte zit, is het ontgraven van de paalschacht een alternatief. De schacht kan dan visueel geïnspecteerd worden om de oorzaak van de reflex te achterhalen.
- De laatste optie is het belasten van de paal. Voor defecten die ontstaan zijn door het zwellen van de bouwputbodem of door opheien, kan volstaan worden met een belasting die groot genoeg is om de schachtkleef tot het defect te mobiliseren. Indien gedurende deze belasting de zakking wordt gemeten, kan de ernst van het probleem worden vastgesteld. Een andere optie, die veel algemener inzetbaar is, bestaat uit het dynamisch proefbelasten van de paal. Dit kan met een valmassa of eventueel met een PSPLT [6]. Het voordeel van deze laatste twee methoden is dat de paal belast wordt met krachten die vergelijkbaar zijn met de gebruikssituatie van de paal.

Integriteitsmetingen worden al vele jaren ingezet als middel voor het controleren van paalschachten. Echter procedures, mogelijkheden en technische specificaties van de meetapparatuur zijn niet of nauwelijks vastgelegd. De beschikbare informatie bestaat voornamelijk uit bijdragen aan specialistische conferenties en de handleiding van de betreffende fabrikant van de meetapparatuur. Hier is duidelijk ruimte voor verbetering die mogelijk kan worden uitgevoerd door bijvoorbeeld de stichting bouwresearch (SBR) of het civieltechnisch centrum uitvoering research en regelgeving (CUR). Het onderzoek hoeft niet gericht te zijn op de vraag of integriteitsmetingen vormveranderingen in palen kan detecteren. De meettechniek is zo volwassen dat, binnen de beperkingen door de theorie, dit overtuigend is vastgesteld.

De probleemstelling is juist de inverse: Welke paalschachtafwijkingen komen voor bij een paalsysteem en in welke mate zijn deze afhankelijk van de grondslag en produktiemethode. Met deze informatie kunnen betere verklaringen gegeven worden voor reflecties in integriteitsmetingen. Echter, de ernstige defecten die de integriteitsmeting moet opsporen zijn een zeer gevoelig onderwerp waarvan het verzamelen van documentatie moeizaam is. Dit is een grote belemmering voor de verdere ontwikkeling van de meettechniek.

De integriteitsmeting heeft tegenwoordig een zeer belangrijke positie verworven op de funderingsmarkt. Een positief oordeel over de meetresultaten is bijna essentieel. Regelmatig komt het voor dat kort voor het storten van de funderingsbalken nog snel een integriteitsmeting wordt uitgevoerd om alsnog de palen te laten goedkeuren. Deze werkwijze moet op zijn minst als twijfelachtig worden beoordeeld. De meetmethode is niet nauwkeurig genoeg om zo te worden toegepast. Ook kunnen vraagtekens geplaatst worden bij het doormeten van een beperkt percentage palen, gezien de zeer geringe frequentie waarmee reflexen optreden die op paaldefecten duiden.

Om een zinvolle bijdrage te kunnen leveren aan de kwaliteit van de fundering moeten de palen zo snel als mogelijk is worden doorgemeten. Hierdoor kunnen eventuele fouten in het vervolg van het werk worden gecorrigeerd en is er tijd om eventuele problemen uit te zoeken, want een reflex in een meetsignaal betekent zeker nog niet dat de paal ongeschikt is voor toepassing in de fundering.

Een ander voordeel is dat de paal op redelijk goedkope wijze kan worden vervangen. De aversie van de markt tegen het doormeten door de aannemer van de palen is daarom op zijn minst vreemd. Juist deze partij kan de integriteitsmeting optimaal inzetten. Alle benodigde relevante informatie, zoals paalsysteem, problemen bij de uitvoering en grondopbouw zijn hier direct beschikbaar.

Ook kan de meting snel en goedkoop worden uitgevoerd met de nieuwe generatie meetapparatuur. Deze methode van toepassen van integriteitsmetingen past natuurlijk ook in de ontwikkeling van kwaliteitswaarborging door de aannemer. De huidige methode, die gebruik maakt van een derde partij voor het uitvoeren van de meting, kan natuurlijk ook op deze snelle manier worden ingezet. Echter, het doormeten van de palen nadat alle palen gereed zijn gekomen, is een methode die weinig geschikt wordt geacht. Grote problemen worden dan veroorzaakt indien niet alle palen worden geaccepteerd voor gebruik in de fundering.

Geconcludeerd kan worden dat integriteitsmetingen een belangrijke bijdrage leveren bij het controleren van paalschachten op gebreken. De meetmethode kan een groot aantal defecten constateren, maar kent ook een aantal beperkingen. Door een juiste manier van toepassen kan een zinvolle bijdrage geleverd worden aan de kwaliteit van een paalfundering.

Literatuur

1. Schellingerhout, A.J.G., Quantifying pile defects by integrity testing. Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Waves on Piles, the Hague, 1992, Balkema, 319-324.
2. Referenties zijn bijvoorbeeld:
M. Hartung, K. Meier & W. Rodatz Integrity testing on model Piles. Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Waves on Piles, the Hague, 1992, Balkema, 265-269.
J.M. Seitz, Pile integrity by low strain impacts-A state of the art. Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Waves on Piles, the Hague, 1992, Balkema, 627-637.
3. Resultaten internationale Hamertje Tik wedstrijd Cement 1992 nr 12 blz 42.43
4. Test Results of the Fourth International Conference on the Application of Stress Waves to be published
5. Fukuharu, T.,Kakurai, M.,Sugimoto M., Analytical evaluation of defective piles. Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Waves on Piles, the Hague, 1992, Balkema, 563-569.
6. Schellingerhout, A.J.G. en E. Revoort, De PSPLT-Het andere proefbelasten. Cement 1995 nr.9.