

VERTROUWELIJK

Funderingspalen doormeten met behulp van akoestiek

ONDERZOEK NAAR SEISMISCHE GOLF-INTERPRETATIE IN IN-
SITU FUNDERINGSPALEN

CASPER WOLF

Hogeschool Utrecht
Studentnummer: 1647326
Email: casper.wolf@student.hu.nl
Telefoon: 06 222 641 33

In opdracht van Leiderdorp Instruments
Bedrijfsbegeleider: Hans Liefing
Email: hansliefing@leiderdorpinstruments.nl
Telefoon: 071-5415514

Abstract

Bij het plaatsen van gebouwen is de fundering een cruciaal onderdeel. Deze fundering bestaat uit een aantal palen in de grond. Deze palen worden vaak geplaatst door te heien. De trillingen die hierbij vrijkomen maken deze methode echter niet geschikt voor elke omgeving. Om hier omheen te werken is een alternatieve methode ontwikkeld; in-situ funderingspalen. Deze palen worden gevormd in een gat in de grond. Door beton in dit gat te storten kan de paal verder in de grond uitharden. Het probleem bij deze methode is dat er geen zicht is op de resulterende paal en daarmee de bouwkundige integriteit.

Om het doormeten van deze in de grond gevormde palen mogelijk te maken, zijn er verscheidene technieken ontwikkeld. Omdat deze bestaande technieken niet voldoende zijn voor Nederlandse bodemsoorten en palen, heeft Deltares de Seismic Tube ontwikkeld. Dit apparaat meet met behulp van akoestische reflecties de tijd tussen het zenden van een signaal en het weerkaatsen van dit signaal tegen de overgang van de paal naar de bodem. Deze bepaling is echter vooralsnog alleen gedaan door geofysici, hetgeen de methode niet inzetbaar maakt voor werk in het veld.

Om de methode van het akoestisch doormeten inzetbaar te maken, heeft dit onderzoek zich gericht op het interpreteren van de signalen van de Seismic Tube, dan wel op het anderszijds inzetten van de akoestische methode.

Als eerste methode is geprobeerd om de signalen van de Seismic Tube te interpreteren aan de hand van de simulatie en de kennis die over Seismische signalen beschikbaar is. Omdat de signalen echter niet goed te duiden zijn en de simulatie niet accuraat genoeg is om werkelijke meetsignalen na te bootsen, is deze aanpak niet in staat om tot een diktebepaling te komen.

Een tweede methode is het nabootsen van de 'Pile Integrity Test', ook wel 'Hamertje Tik' genoemd. Door deze methode horizontaal toe te passen in de kern van de paal is theoretisch de tijd tot tussen het zenden en ontvangen gerelateerd aan de paaldikte. Deze methode bleek echter niet op deze manier inzetbaar met de gebruikte hardware; het uitzenden van de golf duurde dusdanig lang dat de reflectie tijdens het zenden binnen kwam.

De laatste methode die onderzocht is tijdens dit project is het verbeteren van het akoestische signaal. Hierbij is een ballon gebruikt om de directe golf tussen de zender en ontvanger te elimineren. De theorie hierbij is dat dit het signaal beter te interpreteren maakt doordat de eerst aankomende golf de reflectie of refractie van de paal betreft. Bij het bepalen van de eerst aankomende golf tegen de betondikte, horend bij het signaal, is echter geen correlatie vastgesteld. Hierdoor is ook bij deze methode niet aangetoond dat deze ingezet kan worden om een diktebepaling van de paal te doen.

Inhoud

1	Inleiding.....	3
2	Probleemstelling	4
2.1	Meetmethoden	4
2.2	Seismic Tube	5
3	Context.....	6
3.1	Leiderdorp Instruments BV	6
3.2	Stichting Deltares	7
4	Doelstelling.....	8
5	Onderzoek.....	9
5.1	Hoofdvraag.....	9
5.2	Deelvragen.....	9
6	Onderzoek naar de Seismic Tube	11
6.1	Beschikbare data.....	12
6.2	Analyse.....	12
6.3	Tekortkomingen.....	14
6.4	Verwerking metingen	17
6.5	Analyse Frequenties	20
6.6	Betrouwbaarheid van hardware	20
6.7	Correctie met nulmetingen	22
7	Verwerking meetsignalen	23
7.1	Forward simulatie.....	24
7.2	Frequentie-afwijkingen voor foutdetectie.....	26
7.3	Machine learning en automatisering.....	27
7.4	Overfitting	27
7.5	Simulatie ten behoeve van Machine Learning.....	28
7.6	Deep Learning	28
8	Nieuwe methoden.....	31
8.1	Hamertje tik.....	32
8.2	Vernieuwde akoestische analyse	33
8.3	Verwerking resultaten.....	34
9	Opgeleverde producten.....	36
9.1	Matlab Signaal Analyse.....	36
9.2	Prototype meetapparaat	44
10	Conclusie	45
11	Aanbeveling.....	45
12	Verantwoording	46
13	Evaluatie	47
14	Bibliografie.....	48
15	Bijlage.....	49
15.1	Code.....	49

1 Inleiding

Deze scriptie beschrijft de uitvoering van een onderzoek voor het gebruik van Seismische golven bij het doormeten van in de grond gevormde (in-situ) funderingspalen.

Bij het plaatsen van gebouwen is een solide basis vereist. Omdat de ondergrond niet altijd in voldoende mate hierin kan voorzien, worden heipalen aangebracht om als fundering te dienen. Bij deze palen is het van belang dat de bouwkundige integriteit, en daarmee de draagkracht, gewaarborgd is. De traditionele wijze om palen te plaatsen, is de paal elders fabriceren en na transport de grond in te slaan. Deze methode heeft als nadeel dat er veel trillingen veroorzaakt worden. Omdat deze trillingen niet altijd toelaatbaar zijn vanwege omgevingsfactoren, is er een nieuwe methode ontwikkeld; in-situ funderingspalen.

Een in-situ paal wordt gevormd in een van tevoren gegraven gat in de grond. Het beton waarmee de paal gemaakt wordt, wordt in dit gat gestort, waarna het in de grond uithardt. (Van 't Hek, 2019) Deze methode brengt echter ook nadelen met zich mee. Omdat de paal in de grond gevormd wordt, is er geen zicht op de vorm van de paal en het uithardingsproces. Omdat de structuur en integriteit van de paal juist belangrijk zijn, is het noodzakelijk om te bepalen of de paal de vereiste vorm en stevigheid heeft na het uitharden. De bestaande methodes om dit te controleren zijn duur of vereisen veel preparatie aan zowel de paal als de omliggende grond. Ook bestaan er beperkingen in de lengte en breedte van de paal bij de, op dit moment gangbare, meetmethoden. (Veltmeijer, Seismic Properties of Foundation Piles, 2019)

Om deze problemen op te lossen heeft de stichting Deltares de Seismic Tube bedacht. Dit apparaat gebruikt seismische golfinterpretatie om, met behulp van twee zenders en acht ontvangers, een bepaling te doen van de dikte van de paal op een bepaalde diepte. Het apparaat wordt in het midden van een paal naar beneden gelaten door een, in de paal mee gestorte, pvc-buis. In intervallen wordt een meting verricht, waardoor op ieder interval een bepaling van de dikte op die diepte ontstaat. (Hopman, 2016) De resultaten van dit apparaat, acht meetsignalen van de ontvangers, zijn echter lastig te interpreteren voor iemand zonder geofysische kennis.

Leiderdorp Instruments is hierop benaderd om dit apparaat door te ontwikkelen dan wel een nieuw apparaat te ontwikkelen. Hierbij is het van belang dat dit apparaat de metingen kan uitvoeren met een hoge mate van autonomie en zonder dat de gebruiker geofysische kennis nodig heeft. Deze afstudeeropdracht beschrijft het onderzoek naar de bestaande methode en, afhankelijk van de resultaten, de doorontwikkeling of de alternatieve aanpak voor een nieuw apparaat. Hierbij wordt het onderzoek gebaseerd op de akoestische methode van de Seismic Tube en reeds gedaan onderzoek naar seismische golven.

2 Probleemstelling

Het in de grond slaan van heipalen veroorzaakt veel trillingen. In een stedelijke omgeving met oudere gebouwen of in omgevingen waar om andere redenen geen trillingen toelaatbaar zijn is dit een probleem. De in-situ funderingspalen lossen dit probleem op doordat deze in de grond gevormd worden in een van tevoren gegraven gat. Hierbij wordt beton direct in de grond gestort.

Omdat deze methode van palen in de grond vormen geen zicht biedt op het uithardingsproces en de vorm van de paal, is het cruciaal dat de bouwkundige integriteit van de paal gecontroleerd wordt. Bij het storten kan de grond verplaatst worden door het beton, waardoor de paal een verdikking krijgt op dat punt en een verdunning elders. Met name deze verdunningen, in vaktermen ‘neckings’, vormen een probleem voor de draagkracht van de resulterende paal. (Veltmeijer, Seismic Properties of Foundation Piles, 2019)

2.1 Meetmethoden

Om toch een beeld te krijgen van de stevigheid van de paal na het storten bestaan verschillende methoden. Een veelgebruikte methode, Pile Integrity Testing (PIT, ook wel ‘Hamertje Tik’) werkt met een hamer en een ontvanger. De ontvanger wordt bovenaan de paal geplaatst en er wordt een harde tik op de paal gegeven. Door de tijd tussen de tik en de weerkaatsing te meten kan een bepaling van de lengte van de paal gedaan worden. Hierbij wordt een constante gebruikt voor de voorplantingssnelheid van de golf door het beton. Deze methode geeft echter beperkte informatie over de structuur van de paal en is beter geschikt voor onderbrekingen of holtes.

Andere methodes die ook op akoestische golven berusten zijn Single-Hole Sonic Logging (SSL) en Cross-Hole Sonic Logging (CHSL). Bij deze methoden wordt een akoestisch signaal geïnterpreteerd met een ontvanger. Bij SSL bevindt de ontvanger zich boven de zender in dezelfde buis, bij CHSL is er een extra buis geplaatst voor de ontvanger. (Palm, 2012) Een methode die niet op akoestiek berust is Thermal Integrity Profiling (TIP). Deze methode gebruikt het verloop van de temperatuur in de paal tijdens het uitharden om een indruk te krijgen van de betonkwaliteit. (Pile Dynamics Inc., 2017) De bestaande technieken om deze methoden toe te passen zijn duur in aanschaf en gebruik en komen tekort in de resulterende analyse. Ook duurt interpretatie van de signalen veelal lang. (Hoogenboom, 2019)

2.2 Seismic Tube

De Seismic Tube van Deltares bouwt voort op het principe van Single-Hole Sonic Logging. Het apparaat bestaat uit een kunststofbuis gevuld met olie, waarin twee piëzo-elektrische zenders en acht hydrofoons (ontvangers) zitten. Om een meting uit te voeren worden de zenders aangestuurd om een Ricker wavelet uit te zenden, waarna op de acht ontvangers dit signaal via verschillende seismische golven ontvangen wordt. Het binnenkomende signaal is een samenstelling van deze golven, die onderling ook interfereren met elkaar.

Het apparaat wordt, net als bij SSL, in een buis in het midden van de paal naar beneden gelaten. Vervolgens voert het apparaat een meting uit, en wordt het omhooggehaald met een vastgesteld interval. Door op deze vastgestelde hoogtes metingen uit te voeren kan, na interpretatie van de signalen, een beeld gevormd worden van de breedte van de paal. (Veltmeijer, Seismic Properties of Foundation Piles, 2019)

Deze methode heeft echter significante nadelen. Het resultaat van de ontvangers is een combinatie van signalen die onderling interfereren. Ook is dit signaal lastig te interpreteren voor een gebruiker zonder geofysische kennis. Verder berust de accuraatheid van de methode op verscheidene aannames. Zo gaan de bestaande testen van de methode ervan uit dat de paal op een bepaalde hoogte rondom de buis even dik is, en de pvc-buis precies in het midden (en rechtop) in de paal staat. Ook zijn de reflecties die binnenkomen bij de acht sensoren niet reflecterend op hetzelfde punt (hoogte) van de paal. Hierdoor is het mogelijk dat tussen de acht signalen een verschil bestaat tussen de werkelijke dikte van de paal op de gemeten punten.

Voor de Seismic Tube bestaat een forward simulatie van de golven in de paal en de resulterende ontvangen signalen. Indien deze simulatie dicht bij de werkelijke meetdata van de Seismic Tube kan komen, kan dit een houvast bieden om de interpretatie te vergemakkelijken. Het is echter niet bekend of deze simulatie accuraat genoeg is om de werkelijke meetdata na te bootsen.



Figuur 1 Meetopstelling met de Seismic Tube; rechts boven de aansturing.

3 Context

3.1 Leiderdorp Instruments BV

Leiderdorp Instruments BV is in 1987 opgericht als ingenieursbureau voor productontwikkeling door de broers Hans en Jaap Liefing. Door de jaren is het bedrijf uitgebreid en omvat ook ontwikkeling, productie, verkoop en onderhoud van zowel eigen producten als OEM-producten. De focus bij de beschikbare diensten en producten ligt op het meten en bijhouden van data door middel van verscheidene sensoren. Ook is er een online omgeving beschikbaar die via verscheidene draadloze protocollen toegang verschaft tot de gedane metingen. (Leiderdorp Instruments B.V., 2019) Het bedrijf bestaat vandaag de dag uit een productieafdeling en een R&D-afdeling.

3.1.1 Testfaciliteiten

Op locatie bestaat de mogelijkheid om testopstellingen te vervaardigen. De huidige testopstelling op deze locatie bestaat uit een segment van een funderingspaal vervaardigd uit beton. In het midden is een pvc-buis aangebracht om metingen vanuit het midden van de paal uit te kunnen voeren. Leiderdorp Instruments voorziet in de benodigde materialen voor deze testopstelling en om eventueel andere testopstellingen te vervaardigen (bijvoorbeeld om wapening binnen de paal te testen). Om data te vergaren is er een systeem beschikbaar dat op dit moment voor het doormeten van palen wordt gebruikt, het zogeheten Hamertje Tik. Ook is er een betonnen biels beschikbaar om testen mee uit te voeren.

Door de testpaal in een specie-kuip te plaatsen is het mogelijk om metingen uit te voeren met de Seismic Tube. Het is hiervoor namelijk vereist dat zowel de Tube als het midden van de buis onder water staan.



Figuur 2 Segment van funderingspaal voor testdoeleinden

3.2 Stichting Deltares

De stichting Deltares is een onafhankelijk instituut voor toegepast onderzoek in het gebied van water en bodemverwerking. Over de hele wereld actief, werkt Deltares aan innovaties en applicaties voor de bevolking, het milieu en de gemeenschap. Hierbij is er een sterke samenwerking met de lokale autoriteiten, bedrijven en andere onderzoekscentra zoals universiteiten. De stichting focust op het leveren van een kennisbijdrage bij alle projecten, en stelt haar software en modellen publiek toegankelijk. (Deltares, 2019)

3.2.1 Testfaciliteiten

Op het terrein van Deltares is een test veld aanwezig met twintig funderingspalen. Bij een aantal van deze palen zijn defecten aangebracht. Doordat het bekend is waar de defecten aangebracht zijn, kan er gekeken worden of een meetmethode de defecten correct kan identificeren. Ook zijn enkele palen uit de grond gehaald om nauwkeurig doormeten mogelijk te maken.

Naarmate het project vordert is er ook behoefte aan palen waar de defecten volledig bekend zijn. Om hierin te voorzien is er een zestal octogonale palen ontworpen die volgens de heimethode in de grond geslagen zijn. Deze palen zijn voor dit project meerdere malen doormeten.



Figuur 3 Octogonale palen voor plaatsing in het testveld van Deltares (Hölscher)

4 Doelstelling

Het doel van het beschreven project is de realisatie van een apparaat, dat de diameter van een funderingspaal op bekende hoogte kan vaststellen. De Seismic Tube kan hierbij worden verbeterd of er wordt een nieuw apparaat ontwikkeld op basis van de principes van de Tube.

Het is niet noodzakelijk om, op de millimeter accuraat, een bepaling te doen van de werkelijke dikte van de paal rondom. Omdat de uiteindelijke bepaling iets moet zeggen over de draagkracht en de reductie daarvan in het geval van defecten, volstaat het om een bepaling te doen van procentuele afname of toename van beton per hoogte van de paal.

(Hoogenboom, 2019)

5 Onderzoek

Om het onderzoek naar de Seismic Tube en het akoestisch doormeten te structureren zijn er een aantal vragen die beantwoord moeten worden. Aan de hand van de voortschrijdende inzichten is verder onderzoek gedaan naar alternatieven en verbeteringen aan de Tube.

5.1 Hoofdvraag

De hoofdvraag die in de loop van dit onderzoek en het verslag beantwoord wordt, is als volgt geformuleerd;

“Hoe kan de structuur en integriteit van een in-situ funderingspaal op locatie bepaald worden door verwerking van akoestische golven met minimale kosten en tijdsduur en zonder dat de gebruiker geofysische kennis nodig heeft om de resultaten te interpreteren?”

5.2 Deelvragen

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden moeten er eerst verscheidene aspecten onderzocht worden. Deze aspecten leiden tot de volgende deelvragen;

- Waarom voldoen bestaande methoden niet om de palen door te meten?

Voor het doormeten van funderingspalen zijn verscheidene methoden ontwikkeld wereldwijd. Met name Cross-Hole Sonic Logging en Single-Hole Sonic Logging zijn veel voorkomend. Door middel van interviews met de opdrachtgevers, onderzoekers en gebruikers moet duidelijk worden waarom deze methoden niet voldoen voor Nederlandse funderingspalen. Deze vraag verschaft inzicht in waarom akoestiek de meest waarschijnlijke oplossing is op een probleem waar meerdere alternatieve methoden denkbaar zijn.

- Welke onnauwkeurigheden bestaan er bij het meten met de Seismic Tube?

De Seismic Tube is een apparaat gebouwd om te testen of er mogelijkheden bestaan om geofysische interpretatie uit te voeren op de golven binnen een funderingspaal. Hierbij is er in mindere mate gekeken of dit principe en de hierop gebaseerde theorie in de praktijk bruikbaar is om metingen te verrichten. Hierom is het belangrijk om in kaart te brengen welke aannames de Seismic Tube doet ten opzichte van de omgeving, en in hoeverre deze aannames een praktijkoplossing hinderen in accuraatheid.

- Hoe goed kan de Seismic Tube bepaling geautomatiseerd worden?

Het onderzoek naar de Seismic Tube bij Deltares is hoofdzakelijk uitgevoerd door een Master studente in Geofysica. De bepalingen die bij dit onderzoek gedaan zijn, zijn in sterke mate mogelijk door de kennis van seismische golven en de interferentie die op kan treden. Om een apparaat te maken wat in de praktijk bij bouwplaatsen ingezet kan worden is het echter belangrijk dat deze kennis niet vereist is voor het gebruik. Daarom is het noodzakelijk om te onderzoeken in hoeverre de Seismische data-interpretatie autonoom kan gebeuren. Een mogelijke invalshoek hiervoor is kijken in hoeverre de opgeleverde simulatie geschikt is om meetdata te genereren die overeenkomt met de praktijk.

- Hoe goed werkt het principe van Hamertje Tik horizontaal van binnen in een pijp?

Het principe van Hamertje Tik is een veelvuldig ingezette methode om verticaal een snelle meting uit te kunnen voeren. Het is echter niet bekend of deze methode geschikt is om horizontaal te gebruiken binnenin een pvc-buis in een funderingspaal. Om deze meting uit te kunnen voeren is een akoestisch signaal nodig van binnen in de pijp en moet de reflectie van dit signaal opgevangen worden. Vervolgens dient dit signaal bestudeerd te worden en bekeken of het zenden en ontvangen er duidelijk uit op te maken zijn.

- Is een bepaling van de duur tussen zenden en ontvangen van een golf voldoende accuraat zonder variabele betonsnelheid?

De methode gebruikt bij Hamertje Tik berust met name op de aankomst van de weerkaatste golf van een uitgezonden signaal. Deze bepaling is eenvoudiger te automatiseren dan de bepaling van de Seismic Tube omdat hier minder variabelen gelden. Het is echter niet bekend of een dergelijke bepaling van golfaankomst in combinatie met een aanname voor de betonsnelheid een voldoende accurate bepaling geven. Hierom moet onderzocht worden hoe accuraat een dergelijke bepaling is, en eventueel of deze bepaling beter geschikt is als de betonsnelheid gemeten wordt.

- Welke eisen gelden er voor een golf die in de gewenste paaldikte bij de ontvanger duidelijk gemeten kan worden?

Om de tijd tussen het zenden en ontvangen van een golf te meten in een medium is het noodzakelijk dat het signaal een voldoende hoge frequentie heeft. Ook mag het signaal niet te lang duren omdat anders de reflectie verstoord wordt. Omdat het mogelijk is dat het akoestische signaal van Hamertje Tik hier niet voldoet moet gekeken worden naar alternatieven. Het is hier wenselijk te onderzoeken wat de benodigde frequentie is en welke eisen gelden aan de zender en ontvanger om een dergelijke golf te faciliteren dan wel te ontvangen.

- Hoe kan de interpretatie van een seismische golf geautomatiseerd worden?

Het interpreteren van de Seismische golf is grotendeels onafhankelijk van de gekozen meetmethode. Hierbij speelt met name de vraag hoe de resultaten van een geofysische interpretatie tot een bepaling van dikte omgezet worden. De gemeten golf geeft zeer beperkte informatie, met name als de gebruiker geen geofysische kennis heeft. Hierom moet deze golfinformatie omgezet worden in een diktebepaling van de paal zonder dat de gebruiker het achterliggende principe hoeft te begrijpen. Hierbij moet worden gekeken hoe de interpretatie van een golf automatisch kan leiden tot de diktebepaling, en hoe deze afzonderlijke diktebepalingen een beeld kunnen schetsen van de structuur van de paal.

Deel 1

6 Onderzoek naar de Seismic Tube

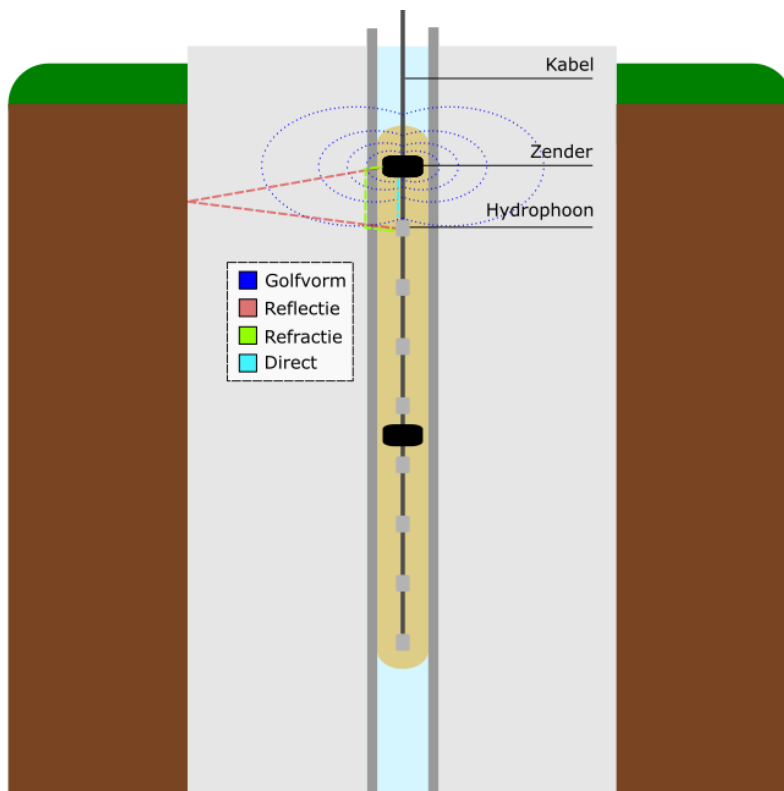
6.1 Beschikbare data

In voorafgaand onderzoek is bij de stichting Deltares een opzet bedacht om funderingspalen te creëren met een gewenst defect. Om verschillende methoden te testen voor het analyseren van deze defecten is een veld met twintig funderingspalen aangelegd. Bij een aantal van deze palen zijn defecten aangebracht tijdens de constructie. De overige palen dienen ter vergelijking. Als onderdeel van de analyse op deze palen is de Seismic Tube gebruikt. Bij het meten van deze palen met de Tube is deze met een ruim interval van zestig centimeter door de palen gehaald. (Hopman, 2016) De resulterende meetdata is beschikbaar gesteld voor analyse.

Omdat in later onderzoek het gebruikte interval te groot blijkt om nauwkeurig veranderingen in diameter te kunnen meten, zijn vanuit de stichting extra metingen verricht. Deze metingen zijn bij drie palen gedaan waar variërende defecten in zitten. Hierbij is een interval van gemiddeld zeven centimeter gehanteerd. Ook de data die uit deze nauwkeurigere metingen naar voren kwam is beschikbaar gesteld om mee te testen en te analyseren.

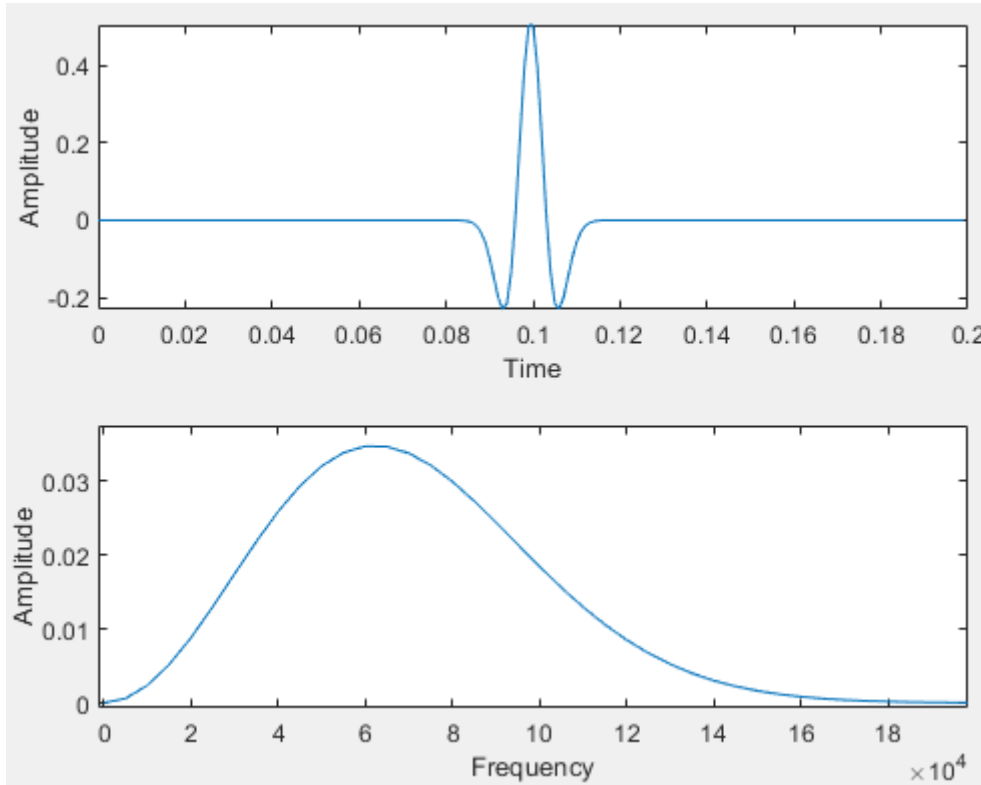
6.2 Analyse

De Seismic Tube is ontwikkeld door Deltares. Het is een hydrofoon array met bovenin en in het midden een zender. De aansturing gebeurt grotendeels door een Data Acquisitie Unit die verwerkt zit in een koffer met aansluitingen voor de sensoren en de zenders. Om een meting uit te voeren wordt de Tube naar beneden gelaten in een pvc-buis in het midden van een funderingspaal. Vervolgens wordt een puls uitgezonden door de bovenste zender. Deze puls wordt via verscheidene reflecties opgevangen door de hydrofoons in de Tube. Aan de hand van deze opgevangen signalen is het de bedoeling een bepaling te doen over de diameter van de paal op de betreffende hoogte. De verwerking van deze ontvangen golven gebeurt aan de hand van geofysische principes.



Figuur 4 Schematische weergave van de Seismic Tube met enkele golfreflecties

De gebruikte puls bij het uitzenden van het signaal is de Ricker wavelet, ook wel de ‘Mexican hat’ wavelet. Deze wavelet bestaat uit een grote verscheidenheid aan frequenties, en wordt vanuit een losse file ingelezen door het programma wat de Seismic Tube aanstuurt. Een voorbeeld van een Ricker wavelet en het frequentiebereik is te zien in onderstaand figuur.

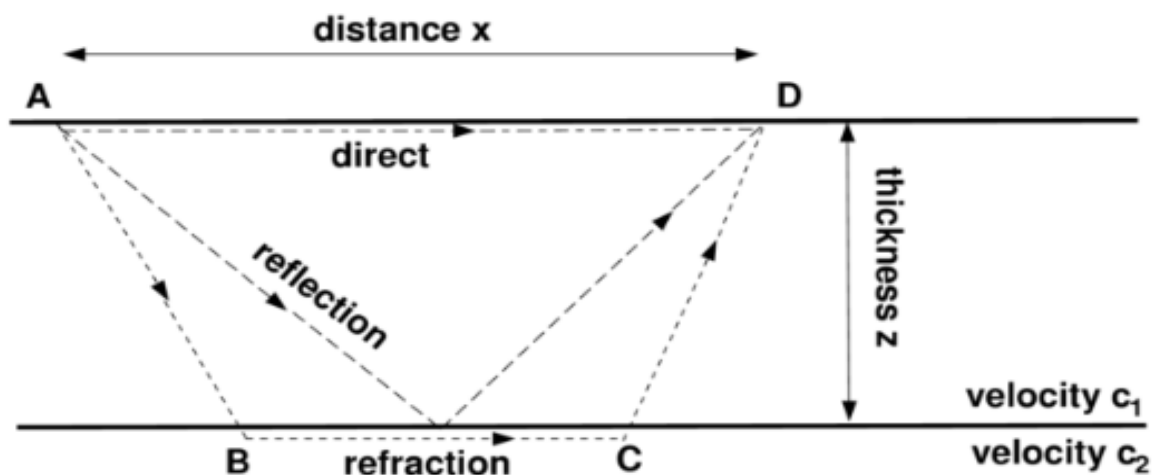


Figuur 5 Ricker wavelet met bijbehorende frequentie weergave

De golf die als eerste reflectie verwacht wordt is de directe golf. Deze directe golf propageert door de vloeistof in de Tube en komt in een relatief rechte lijn aan bij de ontvangers. De directe golf beweegt met de snelheid van het geluid in de betreffende vloeistof. Het is echter niet gegarandeerd dat dit de eerste golf is die aan komt bij de ontvangers.

De golf die, afhankelijk van de afstand tussen de zender en ontvanger, later of eerder aankomt dan de directe golf is de refractie. Doordat de refractie bij de overgang tussen pvc en beton de kritieke hoek bereikt, propageert deze vrijwel de volledige afstand door het beton van de paal. Omdat beton een relatief hoge loopsnelheid heeft, ongeveer drie tot viermaal hoger dan de vloeistof in de Tube, is de volgorde van aankomst gerelateerd aan de afstand tussen de sensor en ontvanger. Als de ontvanger verder van de sensor zit, zal de golf meer afstand afleggen door beton terwijl de directe golf meer afstand door de vloeistof moet afleggen. Door het grote verschil in snelheid is de refractiegolf, vanaf een bepaalde afstand, de eerste golf die aankomt.

De belangrijkste golf voor de bepaling van de diameter is de reflectie van de paal. Zowel van de Tube, pvc-buis en de paal valt er een reflectie te verwachten. De aankomst van de reflectie van de paal kan gebruikt worden om de afstand te bepalen die deze heeft afgelegd. Doordat de snelheid bij benadering bekend is, kan door deze te delen door de tijd de afstand bepaald worden. Deze afstand is vervolgens, omdat de hoogte bekend is, te herleiden tot de diameter van de paal. (Veltmeijer, Seismic Properties of Foundation Piles, 2019)



Figuur 6 De verschillende golven in de grond (Drijkoningen)

Omdat de reflectie op bovenstaande manier gebruikt kan worden om de paal diameter te bepalen, is het zaak vast te stellen waar de reflectie van de paal in de meting van de Tube terug te vinden is. Echter is dit niet te binden aan eenvoudige, numerieke regels. De geofysische bepalingen om de reflectie te vinden, baseren zich met name op de visuele weergave van de verschillende signalen uit de sensoren. Door een patroon te vinden in de meerdere sensorresultaten is het eenvoudiger om vast te stellen dat het daadwerkelijk om een reflectie gaat. Het is echter zonder geofysische achtergrond niet goed mogelijk om met dezelfde accuraatheid de reflectie visueel te bepalen.

6.3 Tekortkomingen

Bij het meten met de Seismic Tube zijn er verscheidene aannames gedaan. Omdat deze aannames in bepaalde mate invloed hebben op de betrouwbaarheid van de resultaten, is het noodzakelijk deze in kaart te brengen en waar nodig aanpassingen te maken. Ook worden gebreken in de hardware, mechaniek en het uitvoeren en verwerken van de metingen benoemd.

6.3.1 Plaatsing pvc-buis

Met het interpreteren van de signalen voortkomend uit de Tube is de aanname gedaan dat de pvc-buis zich volledig recht en in het midden van een funderingspaal bevindt. Dit is echter onzeker en lastig te verifiëren. Met name de buis in het midden van een funderingspaal krijgen is vanwege de structuur van dergelijke palen geen eenvoudige opgave. Indien de plaatsing afwijkt zal de diameter rondom de buis variëren; hieruit kunnen dus verkeerde resultaten voortkomen. Het is echter de verwachting dat de variatie die hieruit voortkomt binnen de gestelde marges voor accuraatheid valt, omdat het gewenste resultaat met name om een procentuele af- of toename van het beton gaat.

6.3.2 Diameter gelijk rondom

De Seismic Tube gaat uit van een diameter die rondom het midden van de pvc-buis volledig gelijk is. Behalve door de plaatsing van de pvc-buis kan ook het beton door de bodem op bepaalde plekken weglopen of verzakken. Door deze niet-symmetrische veranderingen is het waarschijnlijk dat de radius en dus de diameter niet rondom gelijk is. Omdat de uiteindelijke bepaling vooral een afname of toename van de totale hoeveelheid beton moet worden, is dit waarschijnlijk van minder invloed op de bruikbaarheid van de uiteindelijke meting.

6.3.3 Invloed wapening

Bij funderingspalen is het niet ongebruikelijk dat een vorm van metalen wapening in het beton aanwezig is. Deze wapening zorgt voor extra stevigheid, met name om de bovenkant van de paal, daar waar het meeste gewicht op rust, te versterken. Het is niet duidelijk of dergelijke metalen constructies invloed hebben op de signalen van de Seismic Tube.

6.3.4 Afwijkende amplitude

Door de constructie van de Seismic Tube kabel is er op bepaalde punten een verlaagde weerstand waar te nemen tussen de signaalkabels en de aarde. Dit lijkt niet een continu fenomeen te zijn; de buiging van de kabel heeft een sterke invloed op de mate van afname. Deze onzekerheid maakt dat de verschillen in amplitude tussen verschillende metingen niet met zekerheid door de omgeving komt. Omdat een dergelijk amplitude verschil een teken van een afwijking in de paal kan zijn, is het cruciaal dat deze variatie in amplitude weggewerkt wordt in een reparatie of nieuwere versie van de Tube.

6.3.5 Lastig te verifiëren

Hoewel het niet een directe tekortkoming van de constructie van de Tube betreft, is het niet eenvoudig om de gedane metingen en interpretaties te vergelijken met de werkelijke afmetingen. Omdat de palen zich bij het uitvoeren van de metingen ondergronds bevinden, is het niet mogelijk visueel deze verificatie uit te voeren. Ook is het geenszins zeker dat de palen volgens de gemaakte bouwplannen gevormd worden; dit door de grote invloed van de verschillende bodemlagen op het uitharden en vormen van het gestorte beton.

6.3.6 Constante betonsnelheid

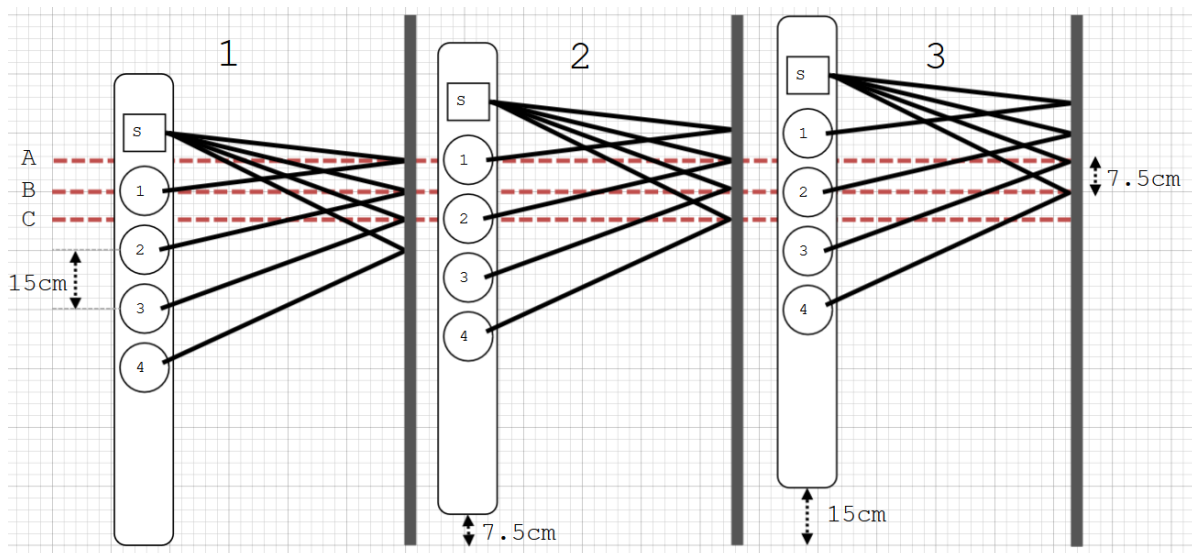
Bij de metingen met de Tube is de aanname dat de betonsnelheid niet veel varieert. De verschillende bodemlagen en verscheidene andere omgevingsfactoren kunnen echter sterk van invloed zijn op de mate van uitharding en daarmee de doorloopsnelheid van het beton. Zonder een betrouwbare en lokale bepaling van deze snelheid is het daarom niet eenvoudig vast te stellen wat de snelheid van de golf op een zekere hoogte is, en hierom de verwachte aankomst van de reflectie.

6.3.7 Afstand tussen metingen

De metingen van de Seismic Tube zijn in eerste instantie met een relatief groot (zestig centimeter) interval uitgevoerd. Hierbij is het lastig om een defect te lokaliseren gezien deze vaak kleiner zijn dan dit interval. In de hierop volgende metingen is een kleiner interval gehanteerd. Bij deze metingen met een zeven centimeter interval bleken defecten gemeten die in de eerdere metingen over het hoofd gezien waren (Veltmeijer, Seismic Properties of Foundation Piles, 2019)

6.3.8 Common Mid Point

Hoewel de verkleinde intervallen een verbetering van de accuraatheid teweegbrengen, blijft het probleem bestaan dat de verscheidene metingen bepalingen zijn, die elk een andere hoogte van de paal beschrijven. Om dit effect te voorkomen wordt de zogeheten Common Mid Point (CMP) methode toegepast. Hierbij is het zaak om het interval zo te kiezen dat de verschillende sensoren met elkaar overlappen. Door na de metingen de signalen van iedere sensor zo te kiezen dat elk dezelfde hoogte beschrijft, is er garantie dat de uitkomst van de signalen elk dezelfde dikte van de paal betreffen.



Figuur 7 Een voorbeeld van drie metingen met de Tube waar het CMP-principe gebruikt wordt

In bovenstaande figuur zijn drie voorbeeldmetingen geïllustreerd waar een interval van 7.5 centimeter gebruikt wordt (de helft van de afstand tussen twee sensoren). In meting twee is te zien dat de reflectie van sensor twee nu valt op het punt (stippellijn A) waar de reflectie van sensor één in de eerste meting viel. Doordat zo na acht metingen iedere sensor een reflectie heeft van hetzelfde punt (A) in de paal, is de uiteindelijke bepaling accurater en maakt het minder uit of de paal sterk van vorm verschilt over een geringe afstand.

6.4 Verwerking metingen

Voor het verwerken van de meetdata van de Tube heeft Deltares in voorgaande projecten voor Matlab gekozen. Vanwege de sterke matrix-georiënteerde aard en de goede voorzieningen in zowel signaalanalyse als Deep Learning, is dit een dusdanig goede keuze dat er voor dit project ook voor Matlab is gekozen. Matlab biedt de mogelijkheid om op low-level bewerkingen uit te voeren door een dichte integratie met C, evenals een uitgebreide hoeveelheid functies en operaties om wiskundige algoritmen en formules uit te voeren.

De Seismic Tube is geleverd inclusief een dataverwerkingsunit en een programma voor gebruik op de PC. Van het aansturingsprogramma is de broncode niet beschikbaar, maar in principe is de configuratie modulair genoeg om alle benodigde testen uit te kunnen voeren. Het programma, geschreven in LabView, stuurt de Tube aan en slaat de uitkomsten samen met een header met informatie op in een meetfile. Deze meetfile heeft de extensie “.dat”. De meetfile is opgebouwd uit een header met zowel single als double precision floating points, en een datasetie.

Header

Naam	Data Type
Aantal metingen	64 bit float
Bitmask met sensor aan/uit (8 sensoren)	64 bit float
Sample aantal	64 bit float
Sample frequentie (in Hz)	64 bit float
Vertraging voor opname	64 bit float
Vertraging voor signaal generatie	64 bit float

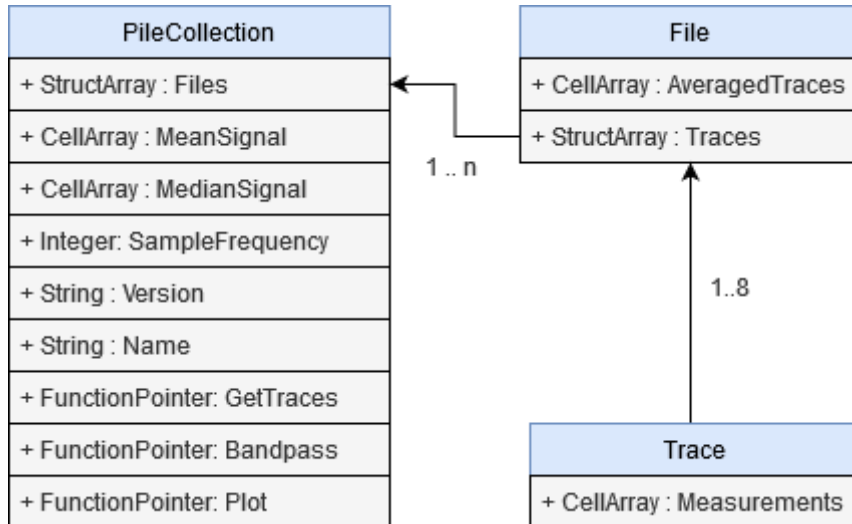
Data

Naam	Data Type
Timestamp	32 bit float
Channel nummer	32 bit float
Meting	Array van N * 64 bit float

Om deze metingen eenvoudig te kunnen interpreteren is gekozen om deze meetfiles te verwerken als Matlab struct. Hiertoe is voor dit onderzoek een programma gemaakt dat de meetfile inleest, en vervolgens verwerkt. De resulterende struct bevat zowel de meetwaarden in het originele formaat, de gestapelde metingen per sensor per hoogte en de mediaan en gemiddelden van alle signalen bij elkaar. Ook is er door middel van enkele functiepointers een aantal wrappers toegevoegd om de verwerking eenvoudiger te maken door enkele functieargumenten af te leiden uit de betreffende struct.

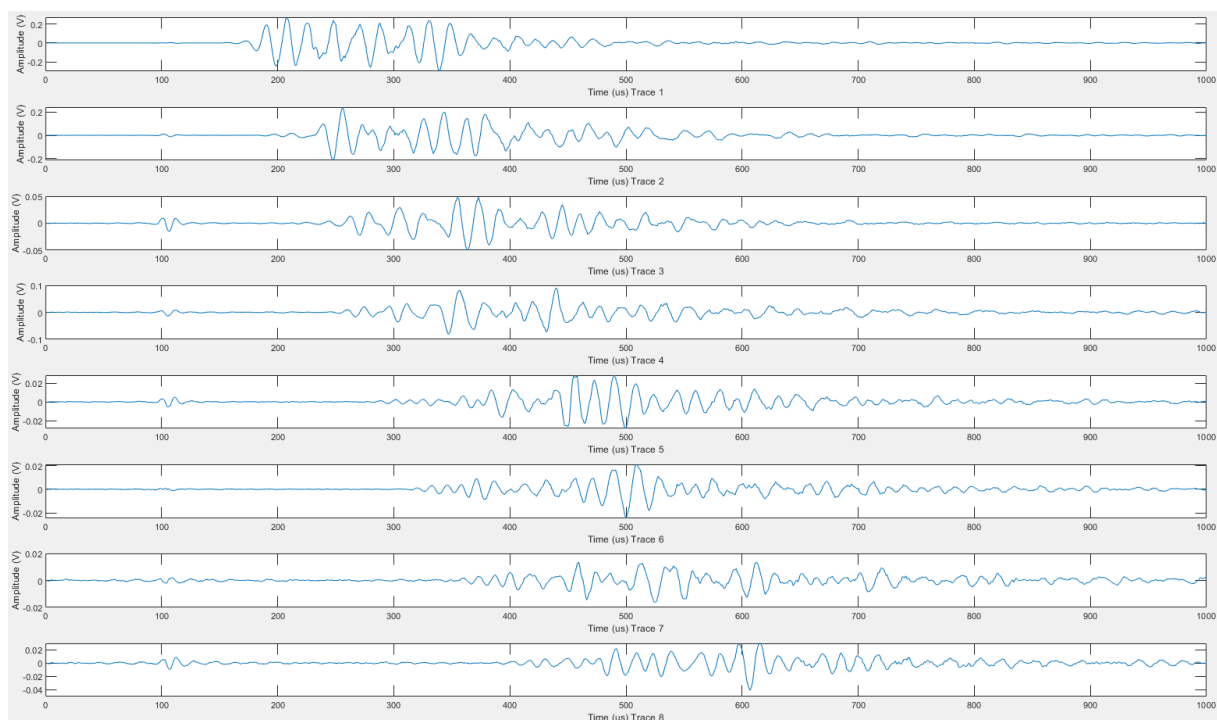
Om tijd te besparen bij het meten worden de metingen voorzien van een timestamp in de “.dat”-file. Hiermee wordt bij het verwerken de conversie gemaakt naar de bijbehorende hoogte. Doordat de volgorde van de metingen, het afstandsinterval en de starthoogte bekend zijn, kan hiermee per file de hoogte waarop de meting gedaan is worden afgeleid.

Nadat de metingen in een Matlab klasse verwerkt zijn, kunnen de resultaten inzichtelijk gemaakt worden door deze te plotten of te vergelijken met andere resultaten. In onderstaande diagram is een ‘Trace’ de benaming voor alle metingen van één sensor op een bepaalde hoogte. ‘File’ refereert naar de file met “.dat” extensie; hiervan is er één per hoogte.



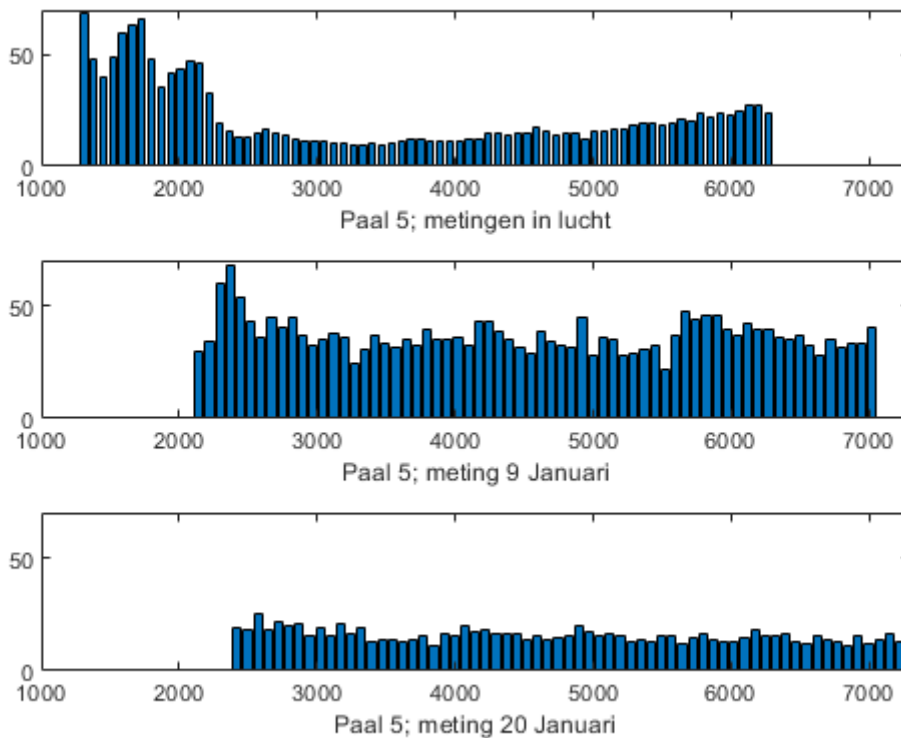
Figuur 8 Een meting collectie als Matlab struct

Om een idee te krijgen van de variatie tussen verscheidene metingen is er gekeken naar het verschil van afzonderlijke metingen met de mediaan. De metingen zijn per hoogte en sensor bij elkaar opgeteld. Dit houdt in dat, wanneer er vijf metingen per hoogte per sensor gedaan zijn, deze signalen per sensor bij elkaar opgeteld worden om zo de ruis te verlagen ten opzichte van het meetsignaal. Vervolgens wordt van de opgetelde meetsignalen per sensor een mediaanwaarde genomen voor ieder tijdstip.



Figuur 9 De acht mediaansignalen voor Octogon paal 5, meting van 9 Januari

Hieruit kan per meetopstelling worden bekeken of de omgevingsfactoren sterk veranderen (het signaal wijkt regelmatig veel af van de mediaan/het gemiddelde) of dat de omgeving juist weinig invloed lijkt te hebben.



Figuur 10 Drie meetsessies in paal 5; de eerste voor het aanbrengen in de grond

In bovenstaande figuur is het verschil te zien in omgevingsinvloed van drie meetsessies. Hierbij dient men wel in acht te nemen dat omgevingsinvloed in de meest ruime zin van het woord is; zowel de grondlagen als de eventuele meetfouten en gehanteerde intervallen worden hieronder gerekend.

De afwijking wordt berekend aan de hand van het mediaansignaal. Hiertoe wordt per hoogte het meetsignaal van een sensor genomen, en vergeleken met het mediaansignaal van de betreffende sensor. Door per tijdsample het verschil van de mediaan en het meetsignaal te bepalen wordt de afwijking per tijdstip bepaald. Vervolgens worden deze afwijkingen per tijdstip bij elkaar opgeteld om de totale afwijking van een sensor op de betreffende hoogte te berekenen. Van de afwijkingen per hoogte is in bovenstaande figuur een staafdiagram te zien, waarbij gekeken is naar de eerste sensor. Dit omdat deze sensor het dichtste bij de zender zit, en hier het signaal dus het sterkst is.

Bij de meting van twintig Januari is de sterke invloed te zien van de verminderde amplitude door het defect in de kabels. De x-as is de diepte van de meting in de paal in millimeters.

6.5 Analyse Frequenties

Een bandpass filter wordt gebruikt om bepaalde frequenties uit een signaal te versterken terwijl de rest verzwakt of weg gefilterd wordt. Hiermee kan inzichtelijk gemaakt worden wanneer bepaalde frequenties uit het signaal binnenkomen. Bij onderzoek met de Seismic Tube is eerder geanalyseerd welke frequenties van belang zijn voor welke informatie uit het signaal. Hieruit kwam naar voren dat de verschillende reflecties op verschillende bandbreedten gefilterd kunnen worden om zo alleen de gewenste informatie te behouden. Bij dit onderzoek was de conclusie dat een bandpass filter een mogelijke aanpak kan zijn om een gewenste reflectie te vinden. De gewenste golven zijn duidelijker op te maken uit de resulterende signalen, met name de interferentie die duidt op de reflectie is beter te zien bij de eerste twee sensoren. (Veltmeijer, Seismic Properties of Foundation Piles, 2019)

Om verdere analyse naar de meetresultaten op specifieke frequenties mogelijk te maken, is een bandpass filter toegevoegd aan de verwerking van de signaaldata. Hiermee is het mogelijk om snel een gegeven frequentiebereik te isoleren om hier verdere analyse op toe te passen. Uit deze analyse is echter geen overduidelijk aanwezige signatuur gevonden voor de reflectie, ook wanneer de eerder succesvol gebruikte frequenties bekeken worden.

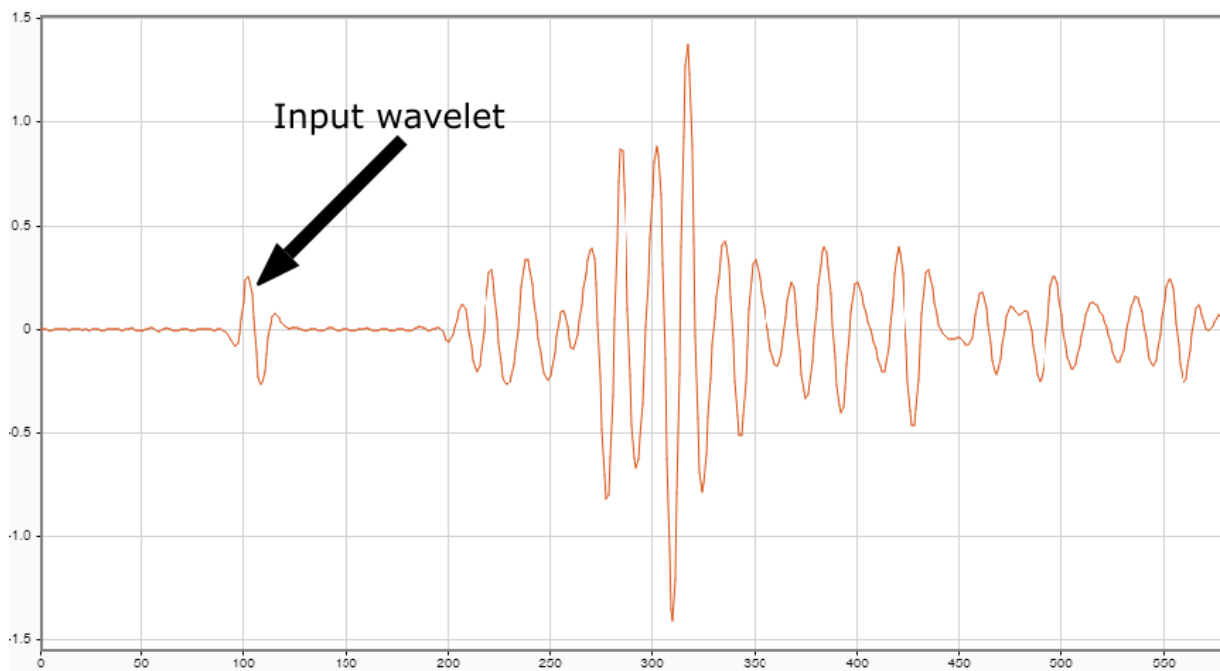
6.6 Betrouwbaarheid van hardware

De Seismic Tube brengt veel onzekerheid met zich mee over de resulterende signalen. Metingen voorafgaand aan het project vertonen een sinus op de laatste vier ontvangstlijnen boven op de meetsignalen. Om deze reden is de koffer met elektronica die verantwoordelijk is voor de aansturing van de zender en het ontvangen van de signalen nader onderzocht. Bij vier van de acht ontvanger aansluitingen is de waargenomen sinus op de signaallijn van dusdanige amplitude, dat het meetsignaal er grotendeels in wegvalt. Deze sinus blijft aanwezig zonder andere aangesloten sensoren en zenders. Hieruit valt op te maken dat de koffer de oorzaak van deze sinus is. Hier valt echter omheen te werken doordat de laatste ontvangers in dit onderzoek vrijwel niet gebruikt worden.

In metingen waar de omgeving niet of nauwelijks veranderd is een sterke verandering in amplitude waar te nemen. Deze verandering is niet bij alle ontvangers aanwezig. Om te onderzoeken waar deze verandering door veroorzaakt wordt, is de kabel naar de Seismic Tube doorgemeten. Hierbij is vastgesteld dat de mankementen in de kabel mogelijk van invloed zijn op de amplitude van het waargenomen signaal. Een verschil in impedantie tussen een signaallijn en de aarde is waarneembaar afhankelijk van de hoek van de kabel. Het vermoeden hierbij is dat de vloeistof die gebruikt wordt in de Tube, de kabel in gelekt is.

De Tube zelf, die uit een siliconen omhulsel, gevuld met akoestisch geleidende vloeistof bestaat, is een interface waar een reflectie verwacht wordt. Dit wordt bevestigd door metingen uit te voeren waar de Tube in de lucht hangt. Op de resulterende meetsignalen is visueel een directe golf en een reflectie waarneembaar. Deze reflectie is naar verwachting eerder zichtbaar dan de gewenste reflectie van het beton.

Als laatste is er een signaal zichtbaar op de ontvangstlijn tegelijk met het zenden. Omdat dit signaal de vorm heeft van het ingaande signaal naar de voorversterker is dit waarschijnlijk het gevolg van overspraak tussen de kabels die langs elkaar lopen. Dit wordt verder bevestigd doordat het signaal op alle acht de ontvangstlijnen op hetzelfde moment zichtbaar is, terwijl de ontvangers na elkaar binnenkomen.



Figuur 11 Weergave van het ingaande signaal zichtbaar op de ontvangstlijn, tijdstip komt overeen met ingestelde vertraging van het uitgangssignaal

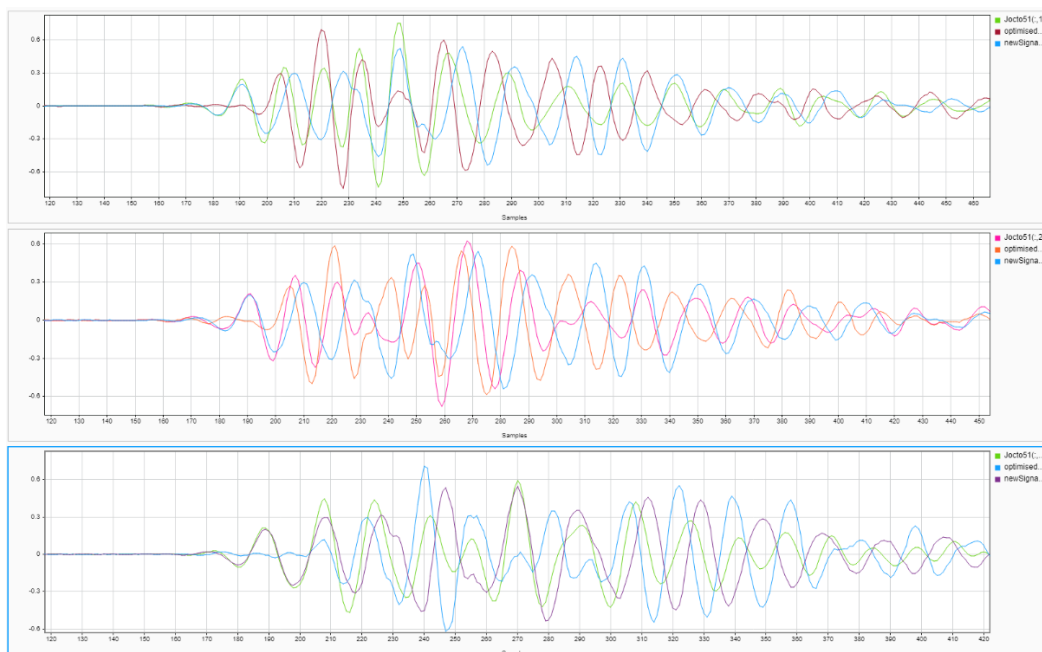
Bovenstaande factoren samengenomen maken dat het signaal, zoals gemeten door de Data Acquisitie Unit in de koffer, niet noodzakelijk alleen de werkelijk gemeten waarde bevat. Deze onzekerheid moet sterk verminderd worden voordat de metingen met de Tube bruikbaar kunnen zijn om conclusies aan te verbinden over de dikte en kwaliteit van een betonpaal.

6.7 Correctie met nulmetingen

Om de grote onzekerheid, die voortkomt uit de hardware van de Seismic Tube, zo veel mogelijk weg te nemen, zijn er metingen uitgevoerd met de Seismic Tube in de lucht. In deze opstelling zijn er enkele mogelijke signalen die binnenkomen bij de ontvanger. Naar verwachting is het eerste signaal de directe golf die zich door de vloeistof in de Tube verplaatst. Als tweede is er de reflectie van de Tube zelf, die naar verwachting iets later dan de directe golf arriveert. De signalen die hierna binnenkomen zijn naar verwachting de reflecties die meerdere malen de Tube wand raken voordat ze bij de ontvangers binnenkomen. Bij deze metingen is geconcludeerd dat de resulterende signalen consistent zijn, zowel met isolatiemateriaal om de Tube heen als wanneer de Tube volledig los in de lucht hangt. Dit maakt dat het resulterende signaal een accurate weergave is van de golven die in de Tube zelf voorkomen. Ook is geprobeerd of grote objecten een waarneembaar verschil maken in deze metingen. Dit is echter niet het geval; de geluidssnelheid door de lucht verzwakt het signaal dusdanig dat er geen reflectie te zien is.

De signalen van de metingen met de Seismic Tube zijn vergeleken met signalen van de Tube in de lucht. Bij de vergelijking is met name een verschil in amplitude aanwezig, en is er na, wat waarschijnlijk de directe golf is, een grote hoeveelheid variatie. De metingen in een paal zijn onderling sterk verschillend, terwijl de metingen in de lucht vrijwel dezelfde volgorde van frequenties en dezelfde amplitude vertonen.

De signalen, verkregen door de Tube metingen in de lucht uit te laten voeren, zijn geprobeerd te fitten op de signalen van de metingen. Door zowel variaties in amplitude als in de begintijd te vergelijken met het resulterende verschil van het signaal, is er geprobeerd om de signalen van elkaar af te trekken en zodoende alleen het signaal van de paal over te houden. Deze methode is echter niet succesvol gebleken. Dit komt door de onzekerheden die het signaal van de Tube beïnvloeden en doordat de resulterende signalen geen duidelijk nieuwe kenmerken vertoonden.



Figuur 12 Drie meetsignalen met per hoogte; Het originele meetsignaal (groen, roze, groen), Het correctie-signaal uit de lucht (blauw, blauw, paars) en de resulterende signalen na correctie (paars, oranje, blauw)

Deel 2

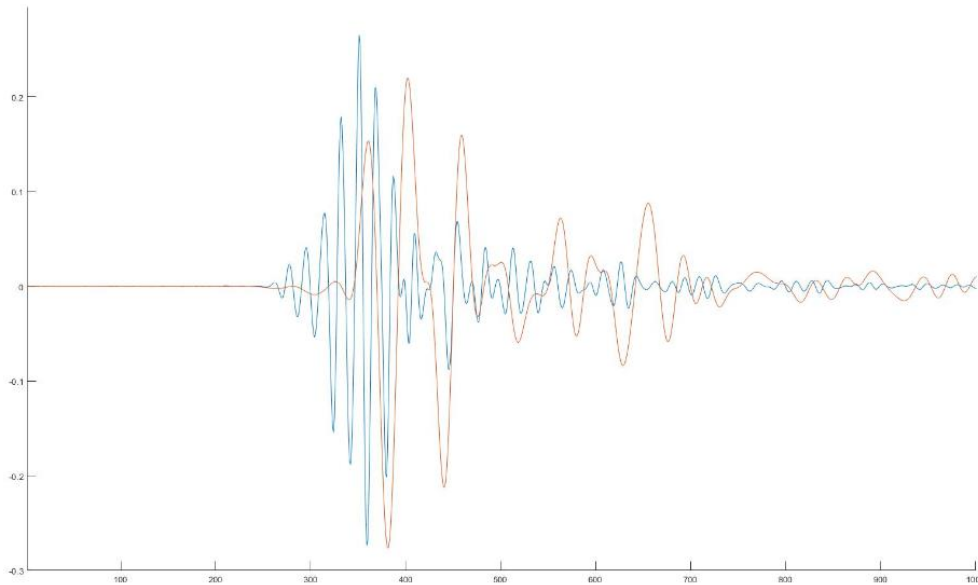
7 Verwerking meetsignalen

7.1 Forward simulatie

Vanuit de stichting Deltares is ook een forward simulatie van de Seismic Tube in een betonnen paal beschikbaar gesteld. Bij deze simulatie is gepoogd om de golven die door de bron in de Seismic Tube worden gegenereerd, na te bootsen. Indien deze simulatie signalen genereert die sterk overeenkomen met de data zoals gemeten in een daadwerkelijke betonnen paal, kan dit inzicht verschaffen in de onbekende variabelen.

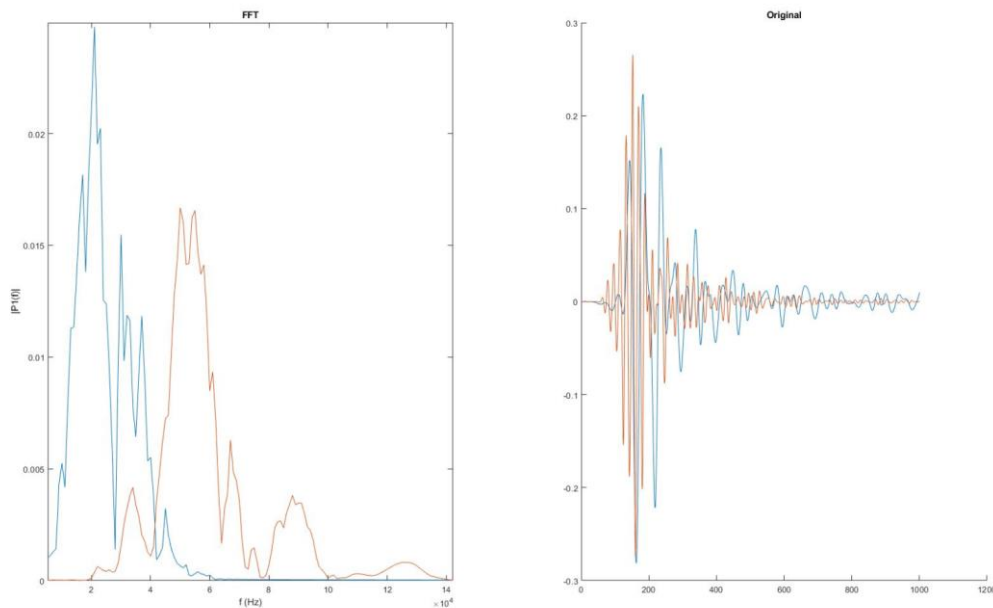
Om dit te testen is de simulatie van Deltares met een grote hoeveelheid aan verschillende parameters uitgevoerd, waarna de resulterende signalen vergeleken worden met de beschikbaar gestelde meetdata van de drie extra metingen. De simulatie poogt per tijdsframe de veranderingen van parameters te berekenen en op deze manier stapsgewijs de situatie na te bootsen. Omdat er veel parameters bestaan en de formules rekenkracht kosten, duurt een enkele simulatie-run lang. Na enkele optimalisaties met behulp van de Matlab analyse tool blijft deze simulatie verscheidene minuten duren om een volledige berekening af te ronden. Dit maakt dat de simulatie niet eenvoudig gebruikt kan worden om snellere testen te doen. In plaats daarvan is deze met enige voorbereiding langdurig bezig geweest om een grote verscheidenheid aan parameteropties te berekenen. Hierbij is gekozen voor de parameters die naar verwachting de meeste invloed hebben. Het is niet goed haalbaar om iedere afzonderlijke parameter hierbij te testen.

De vergelijking tussen de simulatie- en meetsignalen is gedaan aan de hand van afwijking in amplitude en frequentie. Door het verschil te nemen van de simulatie met het echte meetsignaal en door de maximale en minimale waarden te vergelijken, is een kleinere selectie gecreëerd aan signalen die het dichtste bij liggen. Deze zijn vergeleken door verdere handmatige inspectie. Hier bleek echter geen duidelijke overeenkomst te zitten, zelfs wanneer de simulatie de meest waarschijnlijk correcte waarden gebruikte.



Figuur 13 Voorbeeld van een gesimuleerde golf (rood) met een werkelijke meting (blauw)

Een mogelijke manier van het signaleren van defecten in een signaal is het vinden van afwijkende frequenties tussen meetsignalen. Om dit mogelijk te maken wordt het signaal omgezet van het tijdsdomein naar het frequentiedomein. Het omzetten gebeurt met de discrete Fourier Transform. Dit is een algoritme dat een signaal van de tijdsbasis omzet naar frequentiebasis. Op deze manier kunnen de frequenties in het signaal geanalyseerd worden om verdere conclusies uit te trekken. (Lenssen & Needell, 2014) Het omzetten van de signalen van het tijdsdomein naar het frequentiedomein bevestigt dat de frequenties niet overeenkomen tussen de werkelijke meting en de simulatie. Om met behulp van de simulatie werkelijke meetdata na te bootsen is het echter wel van belang dat het eenzelfde soort signaal betreft. De conclusie is daarom dat de simulatie niet voldoende accuraat is om verdere analyse van de meetwaarden te faciliteren.



Figuur 14 Een vergelijking van het originele (rode) signaal en een simulatie (blauw)

7.2 Frequentie-afwijkingen voor foutdetectie

Het analyseren van Seismische signalen wordt veel gebruikt voor het interpreteren en voorspellen van aardbevingen. Dit is in theorie hetzelfde principe als waar de Seismic Tube op berust.

In een onderzoek naar het onderscheiden van aardbevingen en explosies is er gekeken naar de resulterende signalen van beiden. Er is onderzocht of een aardbeving onderscheiden kan worden van andere bronnen van golven, zoals explosies bij mijnbouwwerkzaamheden. Bij deze signalen is gekozen voor explosies die plaatsvonden dicht bij waar de aardbevingen gemeten zijn. De analyse is gedaan op de meetresultaten van een meetstation 160 km verder. Het is hierbij lastig gebleken om op basis van de amplitude van de primaire en secundaire golven dit onderscheid te maken. Om toch een duidelijk verschil te kunnen zien richt men zich daarom op het frequentiedomein. Dit gebeurt met behulp van de Dynamische Fourier Transform. Hieruit blijkt dat bepaalde frequenties binnen secundaire golven karakteristiek lijken voor aardbevingen, met name de frequenties tussen 6-8 Hz. (Mariani, Gonzalez-Huizar, Bhuiyan, & Tweneboah, 2017)

Deze lage frequenties zijn echter voor het interpreteren van de signalen uit funderingspalen niet bruikbaar, de golflengte is vele malen te groot om de benodigde resolutie te halen. Wel is een mogelijke aanpak op basis van de aanwezige frequenties mogelijk. Hierbij moet worden vergeleken of de frequenties in de signalen van een paal zonder defecten, karakteristiek verschillen met de frequenties in een paal waar defecten aanwezig zijn, op een bekende hoogte. In de uitgevoerde metingen is dit echter niet het geval gebleken. Hoewel er variatie bestaat tussen de aanwezige frequenties tussen metingen, is er geen duidelijk verschil tussen metingen met en metingen zonder aanwezige defecten.

7.3 Machine learning en automatisering

Bij het interpreteren van data met veel variabelen is Machine Learning veelal een goede optie. Machine Learning is een gespecificeerde vorm van Artificiële Intelligentie. Bij Machine Learning is er een dataset en een gewenste verwerking van de data. Deze verwerking, het model, wordt uit de data afgeleid. Hiertoe wordt een deel van de data gebruikt om het model te trainen. Het getrainde model is het uiteindelijk gewenste resultaat van Machine Learning. Dit soort oplossing wordt vaak toegepast bij classificatieproblemen waar numerieke of anderzijds directere methoden geen of weinig perspectief bieden. Hierbij valt te denken aan het herkennen van spraak of handschrift, of het filteren van ongewenste email op basis van de aard van de inhoud (spamfilter). (Kim, 2017)

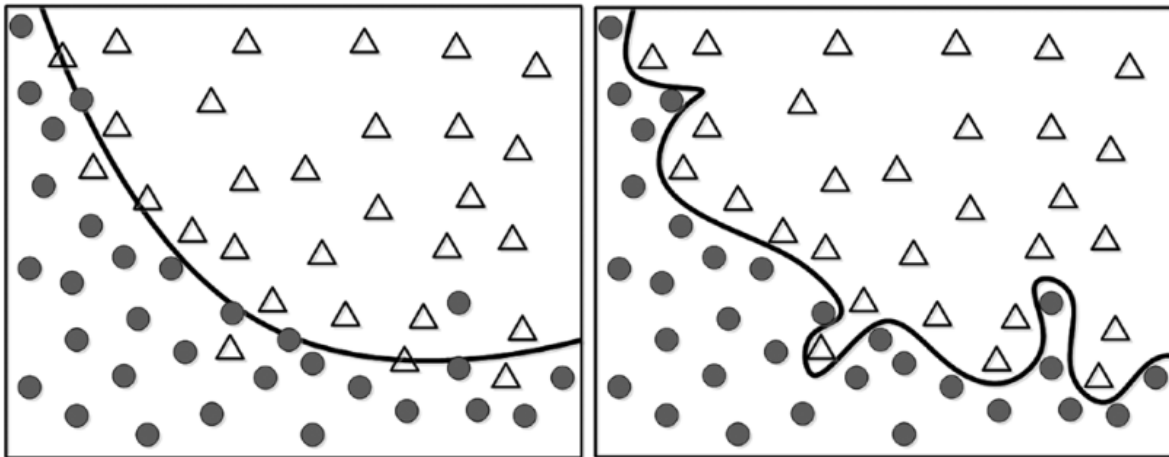
Machine Learning kan onderverdeeld worden in drie categorieën: Supervised, Unsupervised en Reinforcement. In Supervised Learning wordt het model getraind met als input de data en de gewenste uitkomst. Aan de hand hiervan kan het model steeds dichter uit zichzelf de gewenste uitkomst beredeneren. Dit is de meest voorkomende methode en ook het wijdst inzetbaar.

Unsupervised Learning is abstracter dan Supervised Learning. In tegenstelling tot laatstgenoemde is de input bij Unsupervised Learning slechts de data die verwerkt moet worden. Het doel is hierbij dat het model fungeert om de data onder te verdelen in categorieën in plaats van naar een duidelijke conclusie toe te werken. Deze methode wordt met name gebruikt om inzicht te krijgen in grote hoeveelheden data voor verdere verwerking.

Als derde variant is er Reinforcement Learning. Deze variant baseert zich, net als Supervised Learning, niet alleen op een input maar ook op een arbitraire output. In tegenstelling tot Supervised Learning is de output niet zo zeer de perfecte output, maar krijgt de output een rating mee als input die het model vertelt in hoeverre dit een wenselijke uitkomst is. Deze vorm van Machine Learning wordt met name toegepast als optimale interactie wordt verlangd, zoals bij controlemechanismen of games. (Kim, 2017)

7.4 Overfitting

Een lastig aspect aan Machine Learning is het fenomeen ‘overfitting’. Zoals de naam doet vermoeden, betreft het hier een model dat te specifiek ‘past’ op de gebruikte data. Wanneer de data niet genoeg varieert of niet goed overeenkomt met de meetwaarden waar deze op toegepast wordt, is de kans groot dat het model na training niet goed presteert. De trainingsdata heeft namelijk een sterke invloed op het resulterende model. Met name als de trainingsdata ruis bevat die sterk varieert van de werkelijkheid, is dit effect merkbaar. Machine Learning heeft namelijk niet de mogelijkheid om het onderscheid te maken tussen de betrouwbare data en ruis. Het is hierom belangrijk te zorgen dat de trainingsdata goed gevarieerd is en dat zoveel mogelijk variaties, die in de echte data zitten, ook in de trainingsdata voorkomen. Het nadeel is wel dat een model dat op veel soorten data past, over het algemeen globaler is en dus minder precies past dan een model wat sterk gebaseerd is op bepaalde data. (Kim, 2017)



Figuur 15 Illustratie van een globaler model links en overfitting rechts (Kim, 2017)

Om het effect van overfitting te voorkomen kan een ander deel van de dataset ingezet worden voor verificatie. Hierbij valideert deze dataset de prestaties van het model. Indien de prestaties op de trainingsdata goed lijken maar ditzelfde model slecht presteert bij de verificatie set, is er een sterke kans dat overfitting optreedt. Als dit het geval is dient het model aangepast te worden totdat de prestaties voor zowel de trainingsdata als de verificatiedata ongeveer gelijk zijn. Deze manier van verificatie helpt ook als de data niet makkelijk handmatig te interpreteren en te valideren is, bijvoorbeeld als er veel dimensies aan data bij komen kijken. (Kim, 2017)

7.5 Simulatie ten behoeve van Machine Learning

Een denkbare mogelijkheid voor het inzetten van de forward simulatie is om data te genereren voor het trainen met Machine Learning. Dit is echter een probleem omdat de data niet goed genoeg overeenkomt met de werkelijke meetdata. Dit zou betekenen dat het model getraind wordt op data, die slecht overeenkomt met de werkelijkheid. Een dergelijk model is overgevoelig voor de bovenstaande effecten van overfitting. Het resultaat hiervan is naar grote waarschijnlijkheid zeer slecht inzetbaar voor werkelijke meetdata.

7.6 Deep Learning

Machine Learning heeft verschillende mogelijkheden om tot een getraind model te komen. Een veelgebruikte optie bij classificatie problemen is het zogeheten ‘Deep Learning’. Deze manier van een model opstellen heeft dezelfde problemen als Machine Learning in het algemeen. De algemene gedachte achter Deep Learning is het nabootsen van de werking van de neuronen in de neocortex in het menselijk brein. Hierbij leert het model hiërarchische structuren en verschillende abstracte patronen in data van verscheidene bronnen. Voorbeelden van veelgebruikte bronnen zijn afbeeldingen, video’s, geluidsfragmenten en tekst. Hogere abstractieniveaus komen voort uit een samenstelling van lagere niveaus. Dit is waar de benaming ‘Deep’ vandaan komt; meerdere non-lineaire transformaties (di, Bhardwaj, & Wei, 2018)

Een specificatie van Deep Learning, het neurale netwerk, is gebaseerd op bovenstaand principe van het menselijk brein. Het menselijk brein is in staat om vele variabelen te combineren en hiermee tot conclusies te komen. Hierbij is de uitkomst van deze combinaties afhankelijk van de waarde die een variabele heeft. Deze waarden worden toegekend en gewijzigd naarmate het brein nieuwe dingen leert. Door een computer dit principe na te laten bootsen kan een computer tot vergelijkbare conclusies komen en zo, data, die numeriek niet eenvoudig te duiden is, toch verwerken. Om deze verwerking te doen heeft een neuraal netwerk zogeheten training nodig. Dit houdt in dat een deel van de te verwerken dataset gebruikt wordt om, in combinatie met de gewenste conclusie voor de betreffende data, het gebruikte model van feedback voorzien wordt en de weging van variabelen desgewenst aanpast. (di, Bhardwaj, & Wei, 2018)

7.6.1 Foutdetectie met behulp van Machine Learning

Een toepassing van Deep Learning waarbij men zoekt naar de interpretatie en vergelijking van signalen, is het karakteriseren van defecte componenten in mechanische opstellingen. Bij een studie die zich richt op het vinden van defecten in tandwielen is gekeken of de verschillende defecten een karakteristieke afwijking hebben die vervolgens gebruikt kan worden om een model mee te trainen. Bij dit onderzoek was het goed mogelijk voorspellingen en simulaties te maken van de afwijkingen en de verwachte correcte signalen. Nadat deze methode getest is op verscheidene toepassingen blijkt het inderdaad mogelijk om deze fouten te duiden. Echter wordt de betrouwbaarheid van de methode in twijfel getrokken voor complexere patronen en afwijkingen.

(Cui, Yao, Zhang, Gong, & Kang, 2016)

Ook is het in dit onderzoek essentieel dat de verschillende ‘foute’ en ‘goede’ patronen te duiden zijn. Dit is echter niet het geval met de Seismische golven bij de Seismic Tube. Omdat de signalen die voortkomen uit deze metingen lastig te vergelijken zijn met de daadwerkelijke afmetingen van de funderingspalen, (deze bevinden zich ondergronds) is het niet goed mogelijk om een model met dergelijke data te trainen.

7.6.2 Seismische toepassingen

In Seismische toepassingen draait het vaak om het interpreteren van Seismische signalen. Omdat deze signalen voortkomen uit een samenstelling van vele variabelen, is Deep Learning een veelbelovende methode om deze signalen te duiden. Wel betreft het hier veelal signalen waar grote hoeveelheden interpretaties beschikbaar zijn. Dit is een belangrijk onderscheid met de Seismische Tube waar deze hoeveelheid en duidelijkheid van de data niet vanzelfsprekend zijn.

7.6.2.1 Geofysische parameters

Bij onderzoek naar het bepalen van geofysische parameters zijn oplossingen onderzocht die gebruik maken van Deep Learning. Hierbij wordt het netwerk ingezet om specifieke parameters over de omgeving en verschillende lagen vast te stellen. Hierbij worden signalen, waar de parameters bekend bij zijn, gebruikt om de modellen te trainen.

(Calderón-Macías, Sen, & Stoffa, 2000)

Hier gelden echter dezelfde hindernissen als eerder genoemd; er is geen ‘correct’ signaal bekend voor de paal en de reflectie, en er is geen mogelijkheid om aan genoeg trainingsdata te komen.

7.6.2.2 Aardbevingen

De grote hoeveelheid data om te interpreteren en de relatief kleine hoeveelheid geologen vormen een probleem bij het meten en voorspellen van aardbevingen. Met behulp van Machine Learning is het echter mogelijk dezelfde voorspellingen te doen met een kleinere foutmarge. Bij deze voorspellingen wordt veelal gekeken naar de zogeheten ‘first arrival’ van de golven.

(Rojas, Otero, Alvarado, Mus, & Tous, 2019).

Deze ‘first arrival’ golven zijn voor de interpretatie van de dikte van de paal alleen bruikbaar indien de eerst aankomende golf de reflectie van de paal is. Dit is echter niet het geval met de Seismic Tube opstelling. Hierom is de verwachting dat de bepalingen die eruit voortkomen niet toepasbaar zijn op de funderingspalen.

(Veltmeijer, 2019)

In de vernieuwde methode is geprobeerd om dit wel te bewerkstelligen door de directe golf te dempen met een ballon. Dit wordt uitgebreider besproken in het deel gewijd aan de vernieuwde akoestische analyse.

7.6.3 Deep Learning voor Seismische Interpretatie

Bij het akoestisch doormeten van een heipaal met de Seismic Tube bestaan er vele variabelen. In theorie is Deep Learning, en in het bijzonder een neuraal netwerk, geschikt om data te interpreteren waar veel variabelen een rol spelen. Om deze reden zou een neuraal netwerk ingezet kunnen worden om de Seismische Interpretatie te realiseren. Er kleven echter significante nadelen aan deze methode.

Om Deep Learning succesvol toe te passen is een relatief grote hoeveelheid data benodigd. Dit is noodzakelijk voor zowel het trainen van het netwerk als het verifiëren. Een dergelijke hoeveelheid data is echter niet beschikbaar. Metingen met de Seismic Tube duren lang en leveren relatief weinig data op. De gewenste ideale hoeveelheden trainingsdata en de binnen nominale tijd beschikbare hoeveelheid, liggen honderden malen uit elkaar. Dit maakt de geschiktheid van een neuraal netwerk gelimiteerd; het succes van een neuraal netwerk is sterk afhankelijk van de kwaliteit en kwantiteit van de trainingsdata.

Een ander problematisch aspect voor het inzetten van neurale netwerken is het duiden van de trainingsdata. Om Supervised Learning toe te passen is het noodzakelijk dat een neuraal netwerk leert wat de gewenste interpretatie is. Dit is echter ook handmatig nog niet volledig duidelijk. De beschikbare data omvat metingen van de diameter van palen die niet visueel geïnspecteerd kunnen worden. Het is dan ook niet duidelijk welke signalen precies overeenkomen met welke dikte van de paal. Dit gebrek is in de loop van het project in enige mate geadresseerd door nieuwe metingen uit te voeren op palen waar de afmeting volledig bekend is. Echter blijft het voorgaande probleem van de kwantiteit van de data een belangrijke beperking.

Deel 3

8 Nieuwe methoden

8.1 Hamertje tik

Pile Integrity Testing (PIT), ook wel ‘Hamertje Tik’, is een veelvuldig ingezette methode om met behulp van akoestiek een funderingspaal te doormeten. Bij deze methode wordt er een ontvanger geplaatst aan de bovenzijde van een funderingselement, waarna een harde tik gegeven wordt op of nabij het element. Deze tik zorgt voor een akoestische golf door het beton, waarvan de waargenomen reflectie informatie verschaft over de afgelegde weg.



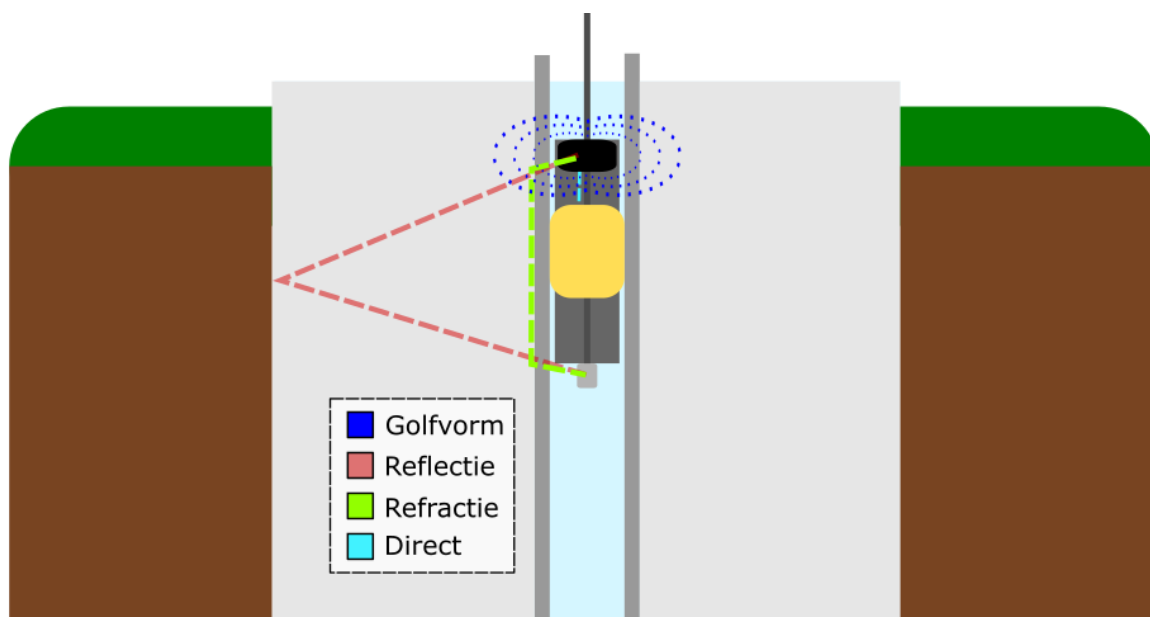
Figuur 16 Een PIT systeem met ontvanger en hamer bij een in-situ funderingspaal (Hektec, 2019)

Een belangrijk nadeel aan deze methode is dat de focus ligt op het aantonen van het bestaan van onregelmatigheden. Het lokaliseren van de betreffende onregelmatigheden is echter niet mogelijk met deze methode. (Hoogenboom, 2019) Wanneer dit het doel is, is er weinig anders mogelijk dan nadere inspectie, dan wel door het boren van een kern uit de paal ter inspectie in een laboratorium, het testen van de draagkracht van de paal (Hektec, 2019) of het uitgraven van (delen van) de paal.

PIT is vooralsnog alleen gebruikt om de palen verticaal door te meten. Een mogelijke invalshoek voor het meten van de diameter van de paal, is het inzetten van de methode horizontaal. Het is hierbij belangrijk dat de golf die gebruikt wordt van voldoende resolutie is maar ook niet te veel afzwakt naarmate deze door het beton trekt. Om hier testen mee uit te voeren is een betonnen biels doorgemeten met behulp van twee versnellingsopnemers. Door een opnemer te gebruiken als zender en de ander als ontvanger kan een signaal worden verstuurd en ontvangen. Hieruit blijkt echter dat deze methode om de signalen te genereren door problemen in de hardware niet geschikt is om de korte afstanden mee te meten. De gebruikte bron heeft een bepaalde tijd nodig om het signaal uit te zenden en tot stilstand te komen. Doordat de tijd die de reflectie erover doet zeer klein is, komt de reflectie binnen voordat de bron klaar is met zenden. Omdat hiermee de signalen door elkaar gaan lopen, wordt het onmogelijk om de binnenkomende golf goed te onderscheiden en dus een bepaling van de dikte of snelheid te doen.

8.2 Vernieuwde akoestische analyse

De bestaande toepassing van de Seismic Tube op basis van akoestiek kampt met veel onduidelijkheid. Zowel door de onbereikbaarheid van de hardware als de onbekende invloed van de behuizing, spelen lastig te duiden variabelen een rol, die het resultaat mogelijk beïnvloeden. Om deze redenen en om een andere theorie te testen is een nieuwe opzet gemaakt. Bij deze opzet is er een rubberen ballon geplaatst tussen de zender en de ontvanger. De verwachting hierbij is dat de ballon het propageren van de directe golf door de omliggende vloeistof sterk afzwakt. Dit omdat de ballon gevuld is met lucht, hetgeen een veel lagere loopsnelheid heeft. Als deze theorie in de praktijk klopt, zal in plaats van de directe golf de refractie of reflectie als eerste te zien zijn in het signaal. Dit maakt het interpreteren van de data eenvoudiger aangezien een 'First Arrival Time' algoritme gebruikt kan worden om het eerst binnenkomende signaal te vinden.



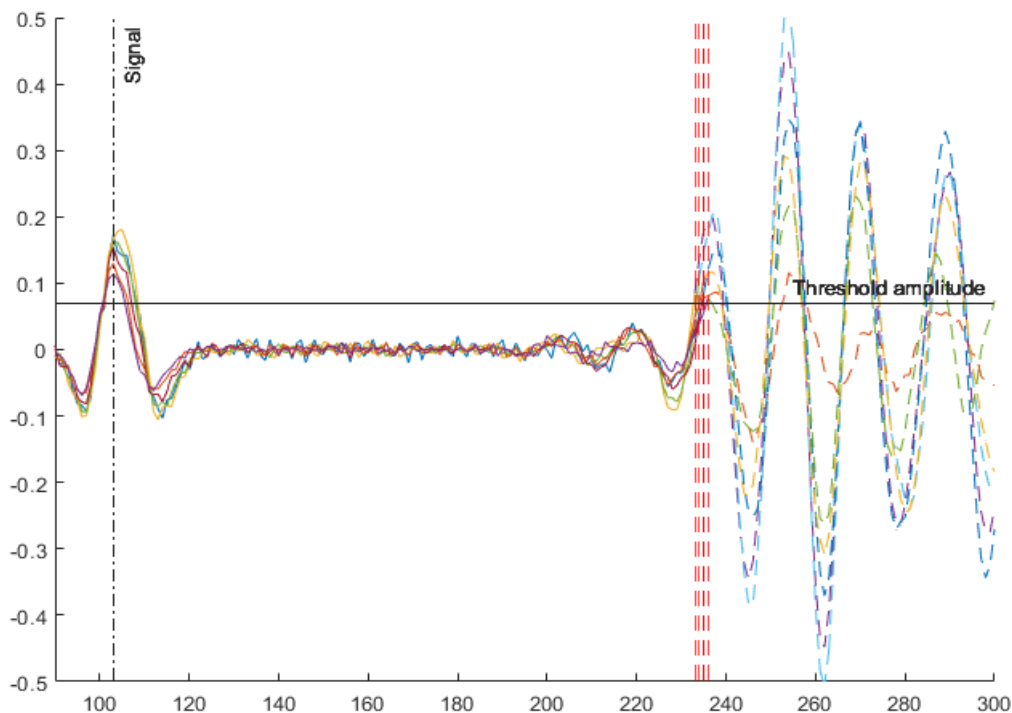
Figuur 17 Schematische weergave van de nieuwe opstelling met de golven; de directe golf wordt door de ballon gedempt en is in theorie niet of nauwelijks waarneembaar bij de ontvanger

Om metingen uit te voeren is het apparaat bevestigd aan een afrolbaar meetlint. De ballon is via een lange slang verbonden met een compressor. Door de lucht te laten ontsnappen uit de ballon kan het apparaat door de paal bewogen worden. Wanneer de ballon opgeblazen is, zet het apparaat zich klem in de buis en kan de meting uitgevoerd worden. Een metalen staaf aan de onderkant van de opstelling fungeert hierbij als gewicht. Bij de eerste testmeting kwam echter naar voren dat dit niet genoeg is om de opwaartse kracht van de ballon in het water tegen te gaan. Hierdoor is, bij de eerste serie metingen, het niet gelukt om het apparaat met ballon dieper dan twee meter in de paal te laten zakken.

8.3 Verwerking resultaten

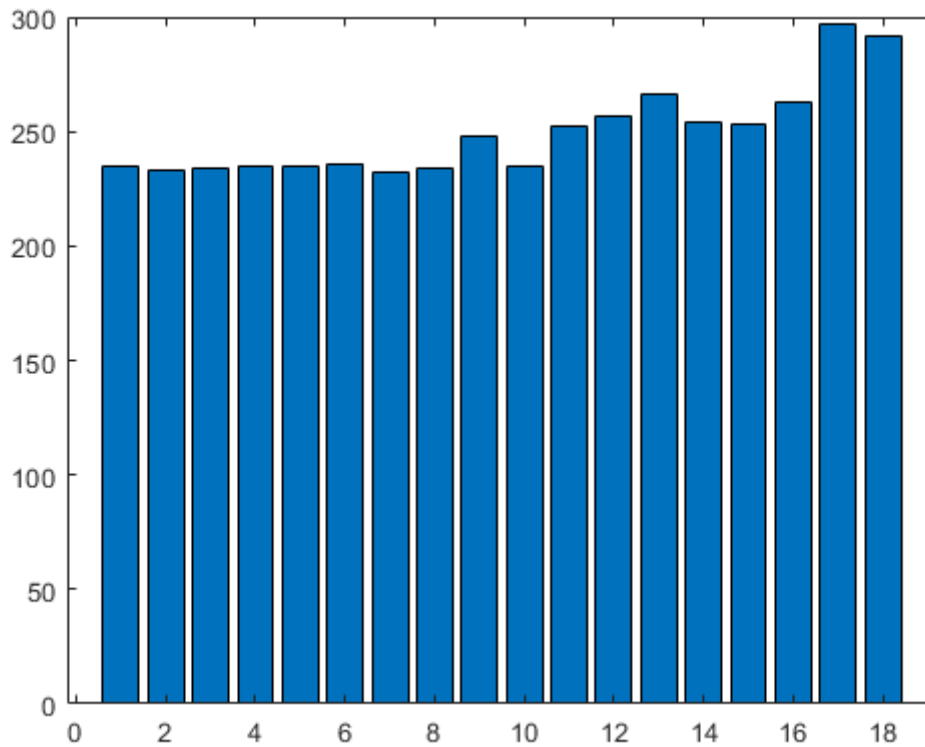
Zoals eerder besproken is de verwachting bij de metingen met het nieuwe apparaat dat de directe golf uit de meting gefilterd wordt door de ballon met lucht. Omdat de golf zich zeer traag beweegt door de lucht, zal deze naar verwachting volledig of bijna volledig uitgedoofd zijn voordat de ontvanger bereikt wordt. Indien deze theorie klopt, zal in de meetsignalen het eerste signaal, na zenden, de reflectie- of refractiegolf betreffen. Hierom is de analyse gebaseerd op het vinden van het punt in het signaal waar de amplitude merkbaar boven een bepaalde grenswaarde komt.

Door de tijd tussen het zenden en ontvangen van deze piek te nemen, moet een relatie blijken tussen de dikte van de paal en de resulterende tijd tot de reflectie. Deze manier van de reflectie bepalen wordt 'First Arrival Time (FAT) picking' genoemd. Omdat de methodes hiervoor sterk berusten op een verandering in het signaal, zijn deze gevoelig voor ruis op de meting. Dit kan namelijk leiden tot foute resultaten, omdat de plotse pieken kunnen worden geïnterpreteerd als de eerste aankomst van het signaal. (Wong, Han, Bancroft, & Stewart, 2009)



Figuur 18 Een zestal meetsignalen met in de rode stippellijn het punt waar de minimale amplitude bereikt wordt

In de meetsignalen, zoals verkregen uit het meten met de nieuwe opstelling, is echter geen uitsluitsel te vinden of de directe golf succesvol weg gefilterd is en, belangrijker, of de eerste aankomst van het signaal op basis van amplitude de reflectie kan opleveren. Hier speelt mee dat de metingen tot slechts twee meter diep uitgevoerd zijn; er zit een inkeping in de paal maar het is ook het punt waar de paal versterkt is met extra wapening voor het heien. Ook is er om onduidelijke reden een relatief grote hoeveelheid ruis aanwezig op de meetsignalen. In onderstaand overzicht staan de resulterende tijden met een handmatig vastgestelde reflectie grenswaarde van 0.07.



Figuur 19 Y-as: Tijd tot amplitude grenswaarde bereikt is per meting in microseconden, X-as: index van de meting

Uit bovenstaande afbeelding lijkt de tijd tussen het signaal en de meting relatief consistent tot aan het laatste stuk paal. Deze afwijking kan meerdere redenen hebben, maar de inkeping die halverwege (rond meting 6 – 9) te zien moet zijn, is niet overduidelijk aanwezig. Om meer zekerheid te krijgen zijn meer metingen noodzakelijk, waarbij de volledige paal gemeten wordt.

Ook is het goed zichtbaar dat de signalen dusdanig veel ruis bevatten, dat FAT-picking algoritmes de ruis niet goed kunnen onderscheiden van de werkelijke signaal-binnenkomst. De amplitude van de ruis is van vergelijkbare hoogte als de eerste golf, die essentieel is voor de bepaling. Doordat de amplitude geen houvast biedt om de pieken die niet van toepassing zijn weg te filteren, blijft enkel de tweede golf, met een hogere amplitude, over om de aankomst op te baseren. Aan de hand van deze bepaling kan, door de golf direct ervoor te nemen, een schatting gedaan worden van de eerste aankomst ondanks de ruis. Dit biedt echter weinig uitsluitsel dat het daadwerkelijk een accurate bepaling van de eerste golf betreft.

9 Opgeleverde producten

9.1 Matlab Signaal Analyse

Om de vele analyses in dit onderzoek te faciliteren is een suite aan testprogramma's opgezet in Matlab. In deze suite is een grote hoeveelheid aan testen mogelijk op het signaal, na verwerking van de ".dat" files tot een paalstruct. Alle functionaliteit binnen deze suite accepteert een dergelijk paalstruct als input, hetgeen het gebruik eenvoudig en eenduidig maakt. Als verdere handigheid is, waar mogelijk, een aantal functiewrappers aanwezig in de paalstruct die reeds bekende waarden uit de struct haalt en zo de gebruiker alleen om de meet-specifieke waarden vraagt.

In deze sectie worden de verschillende functies binnen de suite uitgelicht. In de bijlage is de sourcecode van de programma's te vinden.

9.1.1 Simulatie

Vanuit Deltares is een simulatie beschikbaar gesteld om het signaal van de Seismic Tube in een in-situ paal na te bootsen. Deze forward simulatie berekend per tijdsstap hoe de golven door de verschillende materialen en interfaces propageren. Aan de hand van deze simulatie, wordt aan het einde ook een signaal gegenereerd zoals dat bij een ontvanger binnen zou komen. Indien deze generatie overeenkomt met de werkelijke situatie wanneer de parameters juist ingevuld zijn, kan deze ook gebruikt worden om het omgekeerde te bewerkstelligen; de parameters bepalen aan de hand van de simulatie die overeenkomt met het gemeten signaal.

Om te kijken of de simulatie geschikt is om realistische meetsignalen te genereren is deze eerst geoptimaliseerd van ~6 minuten naar ~2 minuten (gemiddeld 110 seconden). De suite biedt de mogelijkheid om deze simulatie te runnen met stapsgewijs veranderende parameters, om vervolgens de resulterende signalen op te slaan. Vervolgens worden de verschillen tussen de gesimuleerde signalen en een gekozen meetsignaal berekend aan de hand van de amplitude en het frequentiedomein. Hieruit wordt een selectie van signalen met het kleinste verschil gepresenteerd aan de gebruiker, zodat de selectie van mogelijke signalen kleiner is om handmatig door te nemen. De resultaten hiervan worden besproken in hoofdstuk zeven, "Verwerking meetsignalen".

9.1.2 Weergave paaldikte

Om een beeld te krijgen van de afwijking van het signaal met de dikte van de paal, is er de mogelijkheid in de suite om de signalen weer te geven naast de bekende dikte van de paal. Hierbij is de mogelijkheid om dit met het originele signaal, de afwijking van de mediaan van het signaal als wel als met de frequenties in het signaal te doen. Deze weergave geeft snel overzicht welke eigenschappen van het signaal mogelijk bruikbaar zijn om een inkeping of anderszids verschil in dikte van de paal te vinden.



Figuur 20 Weergave van de signalen met de dikte van de betreffende hoogte van de paal; de grijze dikke lijn is de dikte-indicatie (niet naar schaal). In drie kleuren zijn drie verwachte reflectie-momenten aangegeven in de signalen

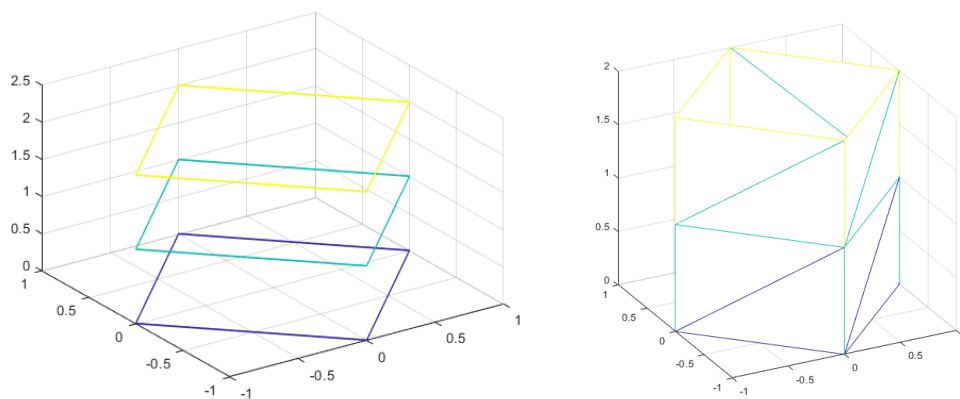
De aangegeven dikte van de paal is hierbij een middel om snel duidelijk te krijgen hoe de dikte verandert gedurende de metingen. De plaatsing van de grijze lijn is niet gebaseerd op het signaal of het tijdstip in het signaal. Ook is de verandering niet volledig naar schaal. Dit is in mindere mate van belang omdat het een paal betreft waarvan de afmetingen bekend zijn.

Om te voorzien in de behoefte om de meetresultaten inzichtelijk te maken voor gebruikers, zonder geofysische achtergrond, moeten de resultaten begrijpelijk weergegeven worden. Ook helpt dit met het interpreteren van nieuwe metingen en algoritmen om deze te verwerken. Dit in acht nemend, is de mogelijkheid toegevoegd om een 3D-model van de paal te genereren aan de hand van vermoedelijke diktes van de paal per hoogte.

Matlab kent ondersteuning voor het STL-bestandsformaat. Omdat dit een veelgebruikt bestandsformaat is met wijde ondersteuning in verscheidene besturingssystemen, is dit een geschikte keuze om het model in uit te voeren. Het STL-formaat wordt gebruikt voor het in ASCII-vorm opslaan van 3D informatie. STL gebruikt het concept van Tesselatie (Betegeling). Hierbij wordt met een collectie van vormen een vlak opgevuld zodat er geen gaten overblijven. De informatie in de files bestaat uit de driehoeken die het vlak opvullen; hierbij worden de coördinaten opgeslagen en de eenheidsvector (oppervlakte normaalvector). (all3dp, 2019) De concessies bij het gebruiken van het STL-bestandsformaat bestaan met name uit het ontbreken van informatie over de kleur en materiaal van een vlak. Dit is echter niet belangrijk om de meetresultaten van dit project goed weer te kunnen geven.

Om Matlab het resultaat in een STL-bestand om te laten zetten, is het noodzakelijk de gewenste vorm aan te leveren als collectie van driehoeken. De meetresultaten die uit de metingen voortkomen zijn numerieke bepalingen van de afstand tussen de sensor en de paal op een bepaalde hoogte. Om hier een 3D weergave van te maken, is gekozen voor een implementatie met opgeslagen afstanden tot de sensor onder een bekende hoek. Deze aanpak is ook geschikt indien de hoek niet bekend is of er slechts een enkele afstand beschikbaar is. In dit geval kan namelijk de gemeten afstand als omliggende radius genomen worden.

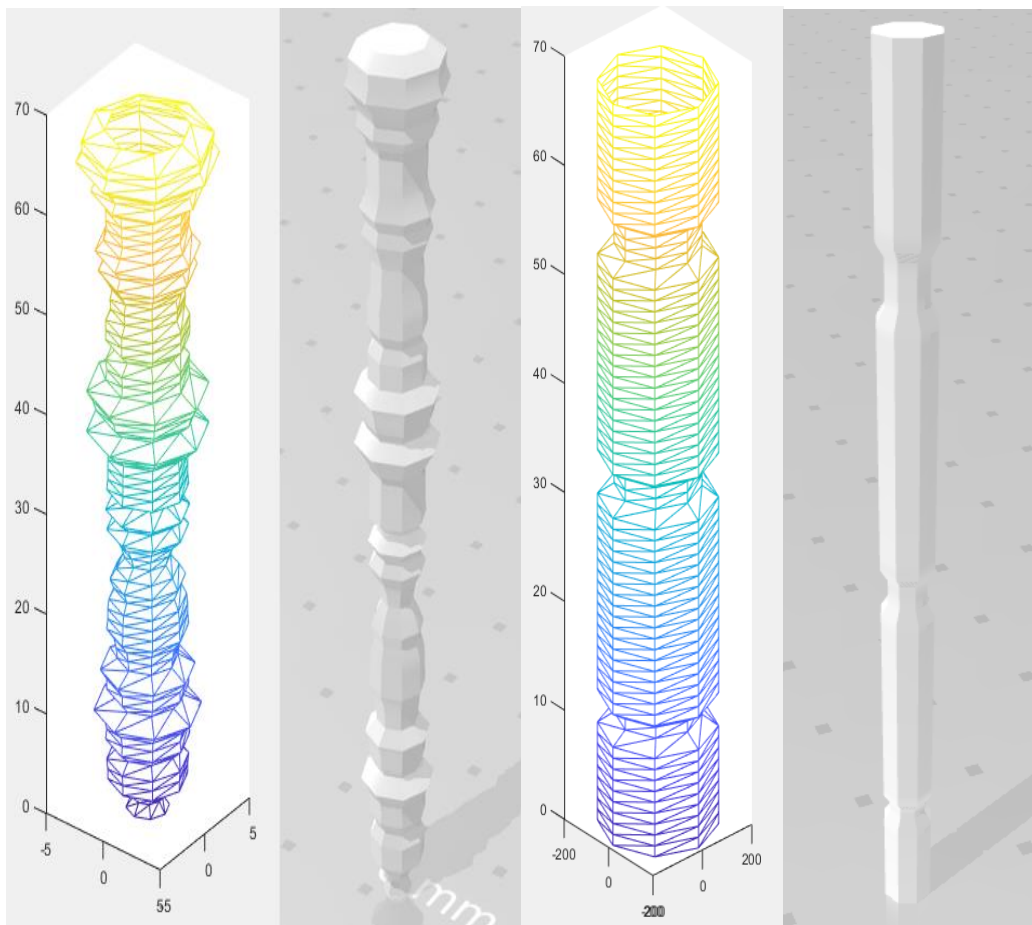
De verzameling aan diktemetingen wordt omgezet in een verzameling van vlakken in Cartesische coördinaten met het midden door de oorsprong in de X- en Y-as. Door dit op meerdere hoogtes te doen, ontstaat een collectie ruitvormen die de secties van de paal representeren. Vervolgens worden de secties doorlopen. Door steeds twee opeenvolgende secties te nemen en deze te verbinden met driehoeken, ontstaat een weergave van de paal tussen twee hoogtes.



Figuur 21 Render van een gesimuleerde paal met 4 gelijke diktebepalingen. Links de vlakken los, rechts de vlakken verbonden met driehoeken

Het resulterende Matlab model kan omgezet worden in het STL-bestandsformaat. Op deze manier ontstaat een goed inzichtelijke schatting van de vorm van de paal, aan de hand van het gebruikte algoritme om tot de diameter van betreffende hoogte te komen. Door de resultaten te vergelijken met de bekende realiteit kan eenvoudig worden bekeken of de gebruikte methode een gewenst resultaat heeft. Door verder te interpoleren kan de achthoekige vorm van de bekende palen nog dichter benaderd worden.

Het STL-bestandsformaat wordt ook veelal ondersteund door de gangbare 3D-printers. Dit biedt eventueel de mogelijkheid om de paal te printen, waardoor zelfs proeven met drukbelasting een optie kunnen zijn. Dit is echter nog niet realistisch haalbaar met de huidige metingen, omdat het beoogde nauwkeurigheidinterval een grote variatie aan draagkracht geeft.



Figuur 22 Links: Geschatte weergave van Octogon paal 3 in Matlab met behulp van het 'First Arrival' algoritme; Links midden: Weergave van het resulterende STL-model in de Windows 3D file viewer; Rechts midden: Matlab weergave van bekende afmetingen van paal 3; Rechts: Bekende afmetingen in Windows 3D file viewer

9.1.3 Frequentie Analyse

Om de aanwezige frequenties in een signaal te kunnen analyseren, wordt gebruik gemaakt van de Discrete Fourier Transform. Een implementatie van deze transformatie is aanwezig in Matlab en is toegevoegd aan de testsuite om de frequenties van de meetsignalen inzichtelijk te maken. Uit deze weergave kan vervolgens worden bekeken welke frequenties interessant zijn om eruit te filteren.

Eerder onderzoek beschrijft een mogelijke verduidelijking van de reflectie van de paal binnen een frequentiebereik van veertig tot zeventig kilohertz. Om dit en andere frequenties te onderzoeken, is een functie om een variabel bandpassfilter toe te passen op de signalen toegevoegd. Hiermee kan eenvoudig inzichtelijk gemaakt worden welke informatie in welke frequenties van het signaal zit, en of bepaalde golven beter te onderscheiden zijn als andere frequenties niet meegenomen worden.

9.1.4 Amplitude Analyse

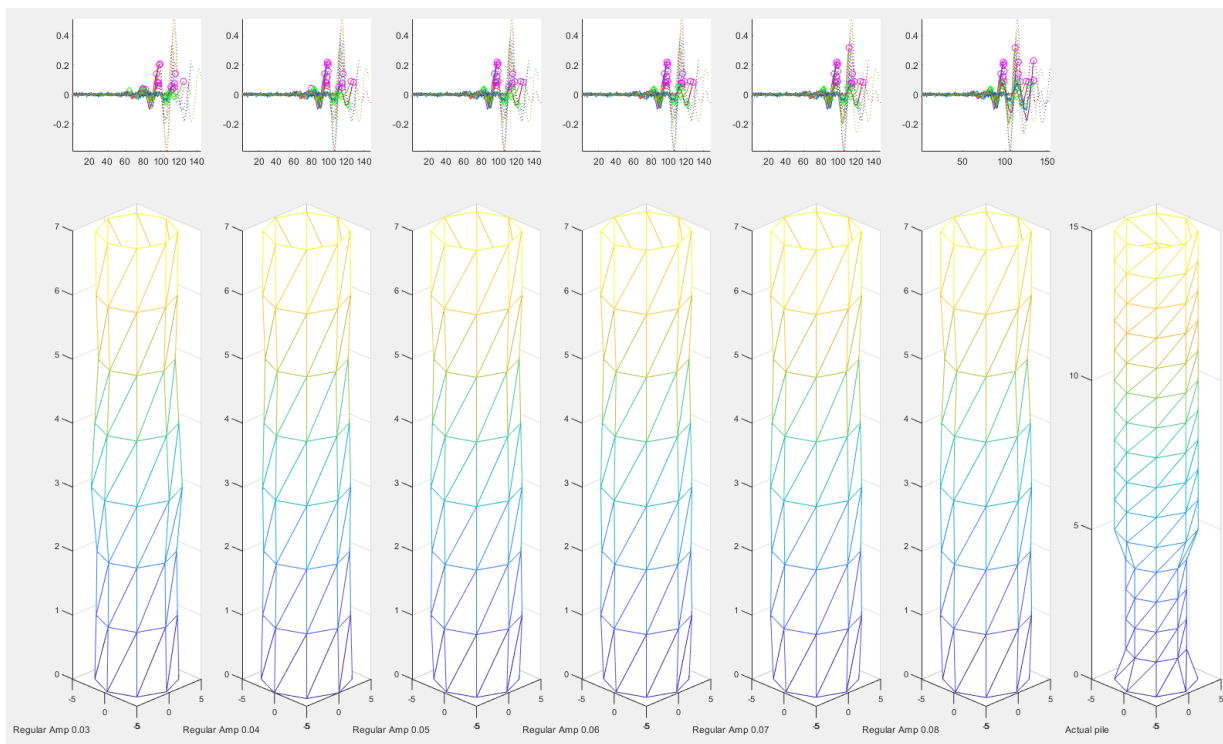
De amplitude van een signaal op een bepaald tijdstip kan gebruikt worden om informatie te verkrijgen over de volgorde van verschillende soorten golven. Ook kan de amplitude gebruikt worden om te bepalen wanneer het signaal voor het eerst bij de ontvanger aankomt na het uitzenden.

Om te bepalen wanneer het signaal voor het eerst binnenkomt bij de ontvanger zijn verschillende methoden geïmplementeerd. De meest directe methode bestaat uit het vinden van het punt in de tijd, waar het signaal voor het eerst boven een bepaald tijdstip uit komt.

Als tweede methode in de suite is er de mogelijkheid om niet een absolute amplitude-waarde op te geven maar een percentage. Dit percentage wordt genomen als deel van het verschil tussen de minimum en maximum amplitude van het signaal, opgeteld bij de minimum amplitude. De tijd wordt genomen op het punt waar het signaal voor het eerst boven deze vastgestelde waarde komt.

Een derde methode om de eerst-binnenkomende golf vast te stellen is aan de hand van de Short Term Average versus Long Term Average-methode. Hierbij wordt een selectie aan meetwaarden genomen in de tijd (window) van een langere periode, en een periode die daarop volgt die korter is. Door vervolgens van beide het gemiddelde te bepalen en de ratio hiervan te nemen kan, bij overschrijding van een bepaalde ratio, de binnenkomende golf gevonden worden. Het is echter in de praktijk lastig om een goed geschikte ratio te vinden. De amplitude analyse is zo opgezet dat het eenvoudig is meerdere ratio's te proberen door het resultaat handmatig te verifiëren met de verwachte uitkomst.

De laatste mogelijkheid om pieken in het signaal te vinden komt vanuit een functie van Matlab zelf, "findpeaks". Deze functie is in staat om in een kort tijdsinterval pieken aan te duiden in het signaal, hierbij rekening houdend met eventuele minimum verschillen en de duur van een piek voordat iets als piek bestempeld wordt. Met deze methode kunnen de eerste golven met hoge amplitude eenvoudig gevonden worden; echter is dit lastiger voor de lagere amplitude van de eerst-aankomende golf. Om hier omheen te werken wordt de piek genomen vóór de eerste hoge amplitude-golf.



Figuur 23 Verschillende amplitude-waarden om de first arrival en uiteindelijk bijbehorende afwijking in paaldikte te bepalen. Data van Octogon paal 3. Meest rechte figuur de sectie van de paal uit bekende afmetingen.

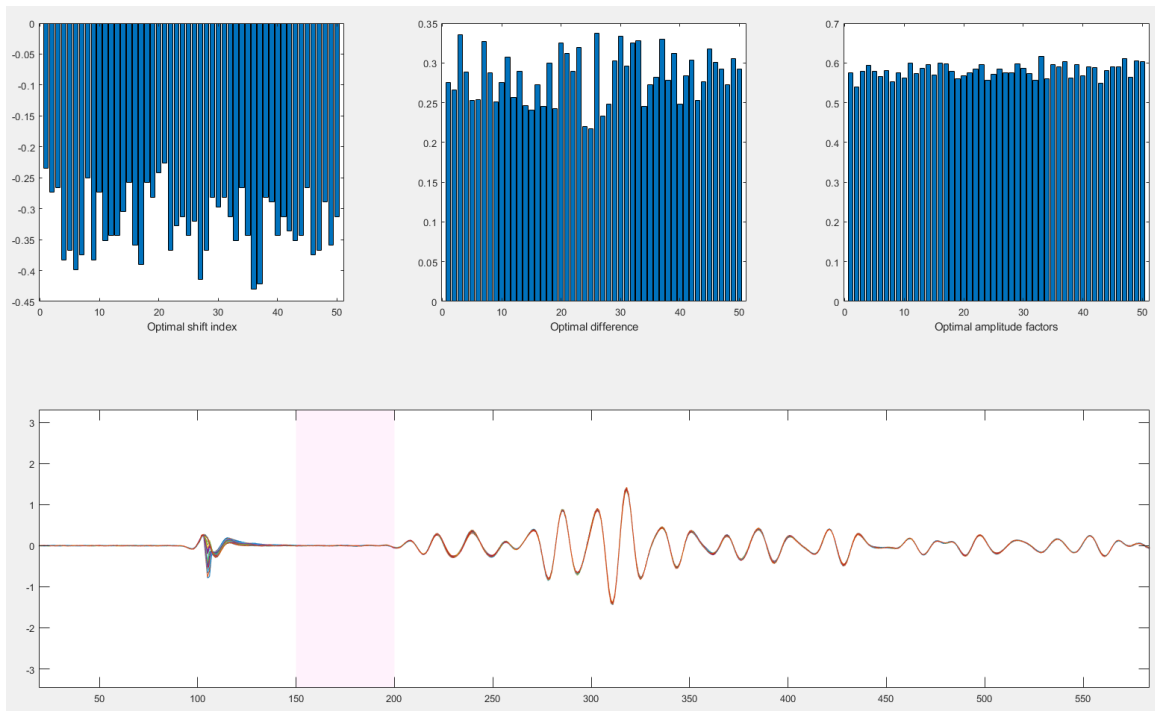
In bovenstaande afbeelding is de First Arrival-bepaling omgezet in 3D figuren door de tijd te schalen naar de verwachte dikteverschillen. Hieruit kan eenvoudig worden bekeken of de variaties kloppen met de punten waar de werkelijke paal varieert.

Doordat deze vier amplitude-gebaseerde analyses in de suite zitten, is het vergelijken van de verschillende methodes, ten opzichte van handmatig de eerste aankomst duiden, eenvoudig. Ook kunnen de verschillende methodes als controle van elkaar ingezet worden.

9.1.5 Signaal fitten

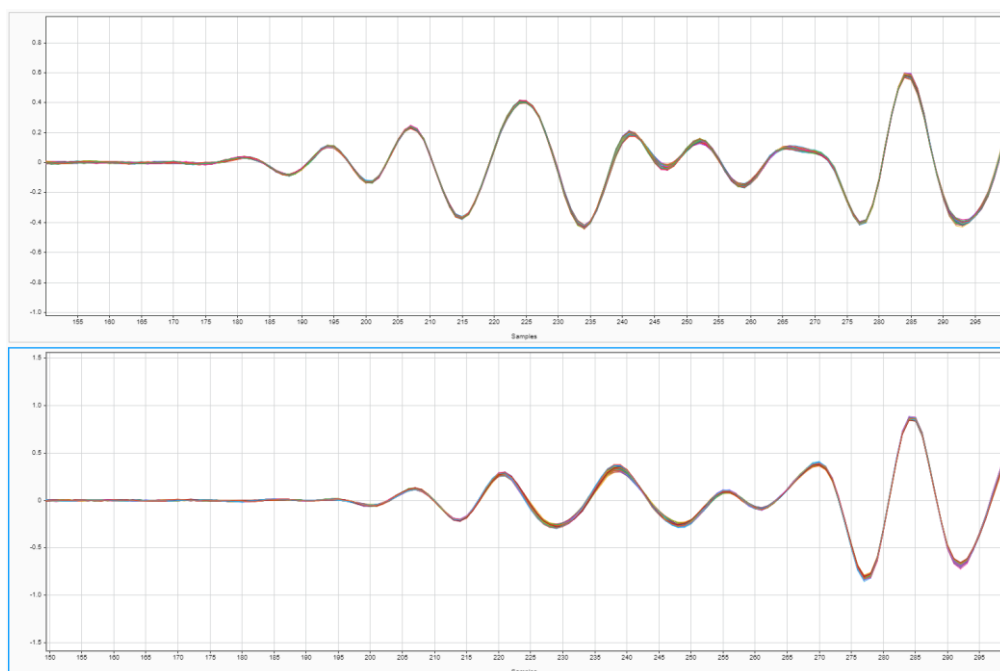
Om signalen van elkaar af te trekken is het noodzakelijk om de amplitude van dezelfde soort golven gelijk te hebben. Ook moeten de overeenkomstige golven op dezelfde tijd in het signaal plaats vinden. Om hiermee te kunnen experimenteren is er in de suite de mogelijkheid om een correctiesignaal te passen op de metingen in een paalstruct. Omdat het signaal grotendeels andere golven en informatie bevat, is hierbij een kleinere sectie van het signaal geselecteerd om het correctiesignaal op te passen. Deze selectie is handmatig, omdat het belangrijk is om een of meerdere golven te kiezen die naar verwachting in beide signalen aanwezig zijn.

Eerst wordt er gekeken wat het totale verschil is tussen de signalen. Vervolgens worden eerst de amplitude en vervolgens de fase van het correctiesignaal verschoven en wordt de afwijking vergeleken met eerdere afwijkingen. Afhankelijk van het aantal ingestelde iteraties, wordt vanuit de kleinste afwijking het nieuwe startpunt gekozen en wordt het proces herhaalt met kleinere stappen in de amplitude en fase. Hiermee is het mogelijk om in enkele iteraties een dichte match te vinden tussen een correctiesignaal en een gunstig meetsignaal. Naar verwachting is het op deze manier mogelijk om de eerst binnenkomende golf van de correctiemeting te gebruiken om deze in een werkelijk meetsignaal te reduceren, ook als de amplitude niet constant is.



Figuur 24 De resultaten van het 'fitten' van een correctiesignaal op 50 metingen uit de testpaal

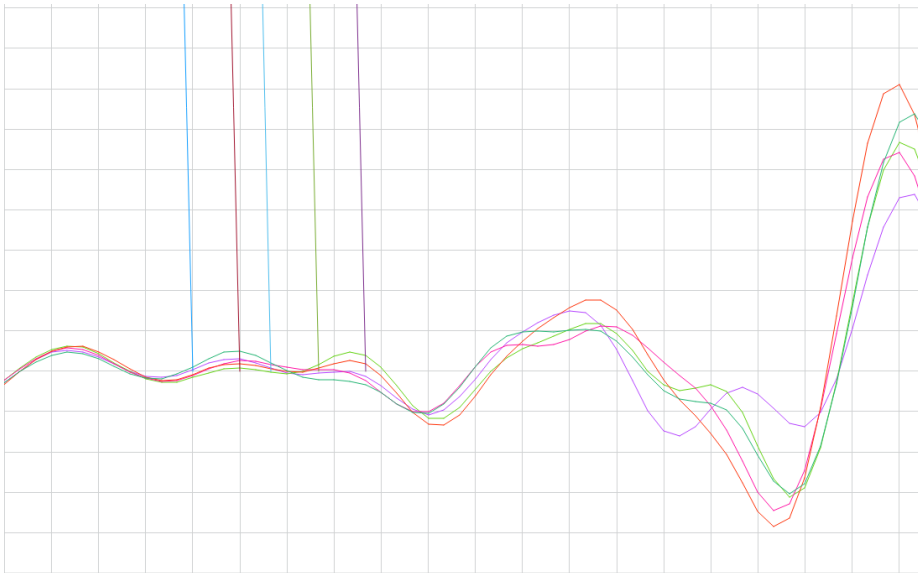
In bovenstaande afbeelding is het resultaat te zien van het passen van een correctiesignaal op de meetsignalen. De afwijking in tijd en amplitude van het correctiesignaal is relatief consistent, hetgeen te verwachten valt wanneer het vergelijkbare signalen betreft. Het eerste staafdiagram is het faseverschil in microseconden, het tweede staafdiagram geeft het optimale (kleinst mogelijke) totale verschil aan tussen de betreffende meting en het correctiesignaal en het laatste staafdiagram geeft de factor, waarmee het signaal vermenigvuldigd wordt, weer (amplitude correctie). De effectiviteit van de correctie is weergegeven in onderstaande afbeelding.



Figuur 25 Boven: Het originele signaal uit 50 metingen in de testpaal; Onder: De 50 signalen na aftrekken van een correctiesignaal uit metingen in het water

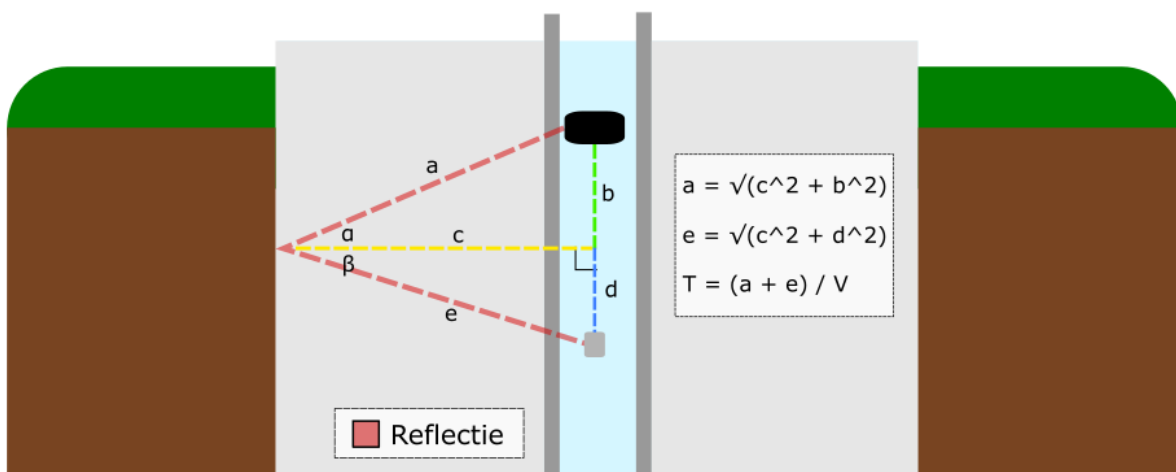
9.1.6 Voorspelling reflectie

De verwachte reflectie in een betonpaal is, indien een aantal parameters bekend zijn, relatief eenvoudig te beredeneren. De golf wordt benaderd als een lijn die vanuit de ontvanger naar de sensor de paalwand raakt. Hieruit ontstaan twee rechthoekige driehoeken, waardoor met behulp van de stelling van Pythagoras de afgelegde weg berekend kan worden. Aan de hand van deze berekening kan de suite een voorspelling doen van het tijdstip van de reflectie. Het resulterende tijdstip wordt door een lijn in het signaal gemarkeerd voor visuele inspectie.



Figuur 26 Vijf meetsignalen van Octogon paal 1 met de berekende reflectie-punten

Hierbij is het echter wel noodzakelijk dat een snelheid voor het beton wordt gemeten of aangenomen, en gelden er marges voor de afstand tussen de zender, ontvanger en paalwand. In de praktijk is het hierdoor lastig om een concreet tijdstip te bepalen, en resulteert deze berekening in een ruim interval aan mogelijke punten in het signaal.



Figuur 27 Illustratie van de tijdsberekening voor de reflectie; snelheid als variabele; b en d zijn elk de helft van de afstand tussen zender en ontvanger, c is bekend omdat het de Octogon palen betreft met bekende afmetingen. T is de resulterende tijd die de reflectie erover doet bij snelheid V .

9.1.7 Signaal generatie

Het besturingsprogramma van de Seismic Tube heeft als input verscheidene parameters, waaronder het pad naar een “.dat” file met de te gebruiken puls. Deze puls is vanuit Deltares gedefinieerd als een Ricker (Mexican Hat) wavelet, maar doordat de structuur van deze file bekend is, is deze te vervangen door elke gewenste golf. De suite is in staat om een Matlab golf om te zetten in dit formaat, zodat de gebruiker eenvoudig kan testen wat de invloed van de gebruikte golf is op het resulterende signaal. Ook kan de suite met behulp van de Matlab implementatie voor Ricker wavelets het frequentiebereik en de duur van de bestaande golf variëren, zodat de gebruiker kan testen wat het effect is op de meetsignalen.

9.2 Prototype meetapparaat

Het opgeleverde apparaat aan het einde van dit project is een andere opstelling van de hardware uit de Seismic Tube. Hierbij is gelet op een kleinere afstand tussen de zender en ontvanger en is het aantal ontvangers gereduceerd tot een. Ook is er een rubberen ballon geplaatst tussen de zender en ontvanger in een poging om de directe golf uit het signaal te reduceren.



Figuur 28 Foto van de nieuwe opstelling

10 Conclusie

Gedurende het onderzoek zijn er meerdere mogelijkheden bekeken om een diktebepaling van een funderingspaal te doen.

Allereerst is er gekeken of de huidige opstelling van de Seismic Tube voldoende basis biedt om een reflectiegolf uit op te maken en vervolgens een diktebepaling te doen. Dit is echter niet mogelijk gebleken. De golf bevindt zich naar verwachting na het eerste stuk van het binnengekomen signaal. Hier veroorzaakt deze een verstoring in het signaal, die niet goed waarneembaar is. Deze verstoring is verder niet duidelijk verschoven in de tijd wanneer de dikte van het beton, waar het signaal vandaan komt, verandert. Ook is onzeker of de waargenomen verstoring de reflectie van de paal betreft, of dat dit de reflectie van het pvc kan zijn.

Vervolgens is er bekeken of de beschikbare simulatie de parameters, behorend bij de meting, kan vaststellen. Dit is echter niet haalbaar, omdat de simulatie, wanneer de parameters wel bekend zijn, niet het signaal zoals gemeten kan herproduceren. Ook liggen de frequenties in de simulatie ver van de werkelijke metingen.

Er is een opzet gemaakt om te testen of het principe van Hamertje Tik horizontaal toepasbaar is binnen in de pvc-buis. Dit is echter niet mogelijk gebleken als methode om de paal door te meten. De hardware die hierbij gebruikt wordt om de golf uit te zenden en te ontvangen vormt een limiet door de duur van het zenden. Omdat dit te lang duurt komt de reflectie aan tijdens het zenden en gaat verloren in dit signaal.

De laatste methode is gebaseerd op het verduidelijken van het signaal. Door de directe golf weg te nemen is het resulterende signaal eenvoudiger te interpreteren. Omdat logischerwijs alleen de reflectie en de refractie overblijven, is dit signaal beter geschikt om de diktebepaling mee te doen. In de praktijk is dit echter niet het geval gebleken. Het is niet goed te bevestigen dat de ballon werkt om de directe golf te dempen. Doordat er geen waarneembare verschuiving is in de tijd, is het effect van de ballon grotendeels onduidelijk. Ook betekent dit dat de eerst binnekomende golf geen relatie heeft met de dikte van de paal. Uit het analyseren van de metingen blijkt dit inderdaad het geval te zijn.

11 Aanbeveling

De signalen zoals onderzocht in dit project bieden niet voldoende houvast om een diktebepaling van een paal mee te doen. Dit is echter grotendeels gerelateerd aan de gebrekkige staat van de hardware bij enkele meetsessies. Het is aan te bevelen om meer metingen uit te voeren, hierbij goed in de gaten houdend dat er geen stoorsignalen of ruis op de metingen aanwezig zijn. Ook is het van belang veel data te vergaren van de signalen bij wisselende betondiktes.

Een andere mogelijke invalshoek is het interpreteren van de signalen met Deep Learning algoritmen. Omdat er een gebrek aan de hoeveelheid data is bij de uitvoering van het project, is deze optie niet volledig onderzocht. Waarschijnlijk is het mogelijk om, met een grote hoeveelheid metingen, een Unsupervised Deep Learning aanpak in te zetten om de signalen te groeperen en interpretaties te doen, die anderzijds niet goed mogelijk zijn.

12 Verantwoording

Het project is gebonden aan enkele eisen vanuit de opdrachtgevers en de gebruikers. Deze eisen hebben met name betrekking op de gewenste inzet. Om het apparaat in de praktijk goed te laten functioneren moet dit namelijk in het veld werken, eenvoudig zijn voor gebruikers, die geen diepgaande geofysische kennis hebben, en moet het apparaat niet al te duur zijn in de inzet.

Het opgeleverde prototype voldoet aan deze eisen. Om de meting uit te voeren is het zaak het apparaat op vastgestelde intervallen door de paal te bewegen. Bij ieder interval dient de gebruiker met een laptop aangesloten op de koffer een meting uit te voeren, door op een knop in het programma te drukken, en dit te herhalen totdat de volledige paal doorlopen is. Hierbij kan het interval verder geautomatiseerd worden met behulp van een automatisch afrolbare kabel.

De metingen worden door de suite in Matlab volledig geïnterpreteerd. Hiervoor hoeft een gebruiker slechts het pad te geven naar de folder met de metingen en een naam te kiezen voor het resultaat. Dit maakt dat het programma snel en eenvoudig de metingen kan duiden, en een schatting kan maken van de eerst aankomende golven. Dit resultaat wordt weergegeven als een 3D render van de paal, indien gewenst. Dit is een goed inzichtelijke schets van hoe de paal eruitziet zonder dat een gebruiker de geofysische kant hoeft te beheersen.

Het apparaat zelf is relatief klein omdat het in een pvc-buis moet kunnen werken. Dit heeft als voordeel dat het voor de installatie van in-situ palen geen grote extra kostenpost is. Het installeren van een enkele pvc-buis in het midden van de paal is goedkoper dan de meerdere buizen bij crosshole sonic logging.

13 Evaluatie

Het project is grotendeels spoedig verlopen. Alle metingen zijn geanalyseerd met de methodes die hiervoor in aanmerking komen. De resulterende suite aan testprogramma's biedt de mogelijkheid om huidige signalen te analyseren en om toekomstige signalen snel te kunnen duiden.

Het is echter niet gelukt om een voldoende hoeveelheid en verscheidenheid metingen te vergaren. Als grootste drempel hierbij speelt de hardware. Door onduidelijke mankementen zijn de meetsignalen veelal voorzien van ruis of andere signalen die niet op de ontvangstlijn wenselijk zijn. Door deze storingen is het niet volledig zeker of de toegepaste methodes geen resultaat op kunnen leveren. Met name First Arrival Time evaluatie is gevoelig voor ruis en is hierom niet uit te sluiten als mogelijke optie op basis van de resultaten in dit project.

Omdat de metingen logistiek een redelijke hoeveelheid tijd en werk omvatten, is het belangrijk om veel metingen in te plannen in een relatief korte tijd. Dit is niet in voldoende mate gelukt, en hierdoor zijn niet genoeg metingen beschikbaar van goede signalen bij variërende beton diktes. Deze onzekerheid maakt het lastig om te stellen dat de signalen geen kenmerkende verschillen vertonen naarmate de dikte varieert. Dit is wel de bevinding aan de hand van de huidige metingen, maar zeker als de signalen van betere kwaliteit (minder ruis) en van hogere kwantiteit (meer palen meerdere malen gemeten van onder naar boven) zijn, is de kans op uitsluitel groter.

Als middel om de suite in op te stellen is Matlab goed geslaagd. Door de grote hoeveelheid aan beschikbare functionaliteit die het signaal-analyseren vergemakkelijken, is het een goede keuze om mee te werken. De verscheidene signalen zijn snel inzichtelijk te maken en door de ingebouwde functionaliteit is er garantie dat de kernfunctionaliteit goed werkt.

14 Bibliografie

- all3dp. (2019, 02 13). *STL File Format (3D Printing) – Simply Explained*. Opgehaald van Website van all3dp: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- Calderón-Macías, C., Sen, M. K., & Stoffa, P. L. (2000). Artificial neural networks for parameter estimation in geophysics. *Geophysical Prospecting*, 21-47.
- Cui, L., Yao, T., Zhang, Y., Gong, X., & Kang, C. (2016). Application of pattern recognition in gear faults based on the matching pursuit of a characteristic waveform. *Measurement*, 212-222.
- Deltares. (2019, 02 03). *about-us*. Opgehaald van website van Deltares: <https://www.deltares.nl/en/about-us/>
- di, W., Bhardwaj, A., & Wei, J. (2018). *Deep Learning Essentials: Your Hands-on Guide to the Fundamentals of Deep Learning and Neural Network Modeling*. Birmingham, Mumbai: Packt Publishing.
- Drijkoningen, G. (sd). *Lecture notes of introduction to reflection seismology AESB2140 (B.Sc. Applied Earth Sciences)*. TU Delft.
- Hektec. (2019, 02 03). *akoestisch doormeten palen*. Opgehaald van Website van Hektec: <https://www.hektec.nl/media-resize/474cff2a6eb4b7207ab7661bf27fbb40/co-rob-bp-doormeten-alleen-handen-zichtbaar.jpg.jpg>
- Hektec. (2019, 02 03). *akoestisch doormeten palen*. Opgehaald van website van Hektec: <https://www.hektec.nl/controle/akoestisch-doormeten-palen>
- Hölscher, P. (sd). *Foto van Octicon palen voor plaatsing*. Deltares, Delft.
- Hoogenboom, J. (. (2019, 12). (C. Wolf, Interviewer)
- Hopman, V. (2016). *Opzet testlocatie voor in de grond gevormde palen*. Delft.
- Kim, P. (2017). *MATLAB Deep Learning: With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence*. Seoul: Springer Science+Business Media New York.
- Leiderdorp Instruments B.V. (2019, 02 03). *over ons*. Opgehaald van website van Leiderdorp Instruments B.V.: <http://www.leiderdorpinstrumenten.nl/wie-wij-zijn/>
- Lenssen, N., & Needell, D. (2014). An Introduction to Fourier Analysis with Applications to Music. *Journal of Humanistic Mathematics*, 72-89.
- Mariani, M. C., Gonzalez-Huizar, H., Bhuiyan, M. A., & Tweneboah, O. K. (2017). Using Dynamic Fourier Analysis to Discriminate Between Seismic Signals from Natural Earthquakes and Mining Explosions. *AIMS Geosciences*, 438-449.
- Palm, M. (2012). *Single-hole sonic logging*. Stockholm, Sweden: TRITA-BKN.
- Pile Dynamics Inc. (2017). *Thermal Integrity Profiler (TIP) Wire Cable Testing of Drilled Shafts*.
- Rojas, O., Otero, B., Alvarado, L., Mus, S., & Tous, R. (2019). Artificial Neural Networks as Emerging Tools for Earthquake Detection. *Computación y Sistemas*, 335-350.
- Van 't Hek. (2019, 02 03). *hekpaal*. Opgehaald van website van Van 't Hek: <https://www.vantheek.nl/technieken/hekpaal>
- Veltmeijer, A. (2019, 11 13). (C. Wolf, Interviewer)
- Veltmeijer, A. (2019). *Seismic Properties of Foundation Piles*. Delft.
- Wong, J., Han, L., Bancroft, J. C., & Stewart, R. R. (2009). *Automatic time-picking of first arrivals on noisy microseismic data*. Opgehaald van Website van CREWES: https://www.crewes.org/ForOurSponsors/ConferenceAbstracts/2009/CSEG/Wong_CS_EG_2009.pdf

15 Bijlage

15.1 Code

De source code voor een aantal besproken functies in de Matlab testsuite is bij dit document gevoegd. Dit omdat de totale hoeveelheid van de code anderszijds de bijlage onoverzichtelijk groot maakt.