

## Precisie en nauwkeurigheid van akoestische metingen op prefab palen

Toepassing ASTM-standaard voor precisie



**Precisie en nauwkeurigheid van akoestische metingen op prefab palen**  
Toepassing ASTM-standaard voor precisie

**Auteur(s)**

Yaro Linnemann

Paul Holscher

## Precisie en nauwkeurigheid van akoestische metingen op prefab palen

Toepassing ASTM-standaard voor precisie

<b>Opdrachtgever</b>	TKI Deltatechnologie p/a Vereniging van Waterbouwers
<b>Contactpersoon</b>	-
<b>Referenties</b>	TKI Deltatechnologie DEL 161
<b>Trefwoorden</b>	Prefab palen, akoestische metingen, kwaliteitscontrole, veldonderzoek, precisie ,nauwkeurigheid

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	22-01-2026
<b>Projectnummer</b>	11209349-000
<b>Document ID</b>	11209349-000-GEO-0004
<b>Pagina's</b>	31
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

### Auteur(s)

	Yaro Linnemann Paul Holscher	

# Samenvatting

Bij de demonstratiedag tijdens de 11<sup>de</sup> Stress Wave conferentie (2022) is onderzoek gedaan naar de kwaliteit van het akoestisch doormeten van palen. Deze techniek wordt veel gebruikt om de kwaliteit van funderingspalen na installatie te controleren. Bij geconstateerde afwijkingen ontstaat er echter vaak discussie over de meetmethode en de interpretatie van de resultaten. Reden voor de SW22-organisatie om nader onderzoek naar de kwaliteit en betrouwbaarheid van deze methode te faciliteren.

Het proefveld op de demonstratiedag heeft bestaan uit twee palenvelden met elk tien palen: tien geprefabriceerde palen die heidend zijn geïnstalleerd, en tien in de grond gevormde palen. Van elk palenveld zijn negen palen gebruikt voor akoestische metingen en is één paal gebruikt voor een proefbelasting voor draagvermogen.

In dit rapport worden de resultaten van de akoestische metingen op de negen prefab palen beschouwd. De palen hadden verschillende lengtes en doorsnedes, met voor Nederland gangbare afmetingen. De palen zijn akoestisch beproefd door acht verschillende participanten. De resultaten van de akoestische metingen op de negen in de grond gevormde palen worden in een volgend rapport beschouwd.

Het doel van de proef op de prefab palen was inzicht te verkrijgen in de precisie en nauwkeurigheid van de bepaling van de paallengte in de grond met akoestische metingen. Het idee hierachter is dat een correcte bepaling van de paallengte een minimale noodzakelijke voorwaarde is voor de betrouwbaarheid van de methode.

De meetresultaten zijn op twee wijzen geanalyseerd:

- Ten eerste is gekeken naar de precisie van de lengte-bepaling. Het gaat hierbij om de herhaalbaarheid en consistentie van de resultaten. De precisie is beoordeeld aan de hand van de ASTM-standaard E691 – 22. Er waren echter te weinig partijen die hebben deelgenomen aan de meetcampagne om aan de formele eisen van deze ASTM-standaard te voldoen. Toch zijn de resultaten uitgewerkt volgens de norm. Hierbij zijn tussen de partijen significante verschillen gevonden. Op basis daarvan is geconcludeerd dat er reden is tot nader onderzoek naar de oorzaken van de verschillen bij enkele partijen.
- Na de analyse van de precisie is een meer traditionele analyse naar de nauwkeurigheid van de methode uitgevoerd. Het gaat hierbij om hoe goed de methode de werkelijkheid benadert. Deze analyse is mogelijk omdat de lengte van en golfsnelheid in de palen vooraf is bepaald. Uit deze analyse volgt dat er verschillen van meer dan een meter in de bepaalde lengte kunnen ontstaan tussen metingen door verschillende partijen. De methode heeft geen systematische fout, zodat de methode statistisch gezien geen afwijking van het juiste resultaat oplevert.

De resultaten van dit onderzoek kunnen niet 1-op-1 worden toegepast op in de grond gevormde palen, omdat de eigenschappen van de palen bij akoestisch doormeten aanzienlijk kunnen verschillen. De resultaten van de testen op in de grond gevormde palen worden in een ander rapport binnen dit TKI-project besproken.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Algemene opzet proefveld Stress Wave '22 conferentie	7
1.2	Achtergrond van de proef op de prefab palen	7
<b>2</b>	<b>Opzet veldonderzoek</b>	<b>9</b>
2.1	Vorbereiding	9
2.2	Verloop van de beproeving	9
2.3	Trekken van de palen	9
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>10</b>
3.1	Dataverwerking	10
<b>4</b>	<b>Bepaling precisie volgens ASTM-standaard</b>	<b>11</b>
4.1	Consistentie-indicatoren	11
4.1.1	Consistentie tussen de partijen	11
4.1.2	Consistentie per partij	11
4.2	Conclusie conform de ASTM-standaard	12
4.3	Discussie	13
<b>5</b>	<b>Vervolganalyse: Nauwkeurigheid</b>	<b>14</b>
5.1	Analyse per paal	14
5.2	Analyse per participant	17
5.2.1	Vergelijking akoestisch gemeten lengte met werkelijke lengte	17
5.2.2	Basale foutenanalyse	19
5.3	Discussie	19
<b>6</b>	<b>Samenvatting resultaten en veralgemenisering</b>	<b>21</b>
6.1	Samenvatting resultaten	21
6.1.1	Interpretatie conform de ASTM-standaard	21
6.1.2	Interpretatie nauwkeurigheid	21
6.2	Veralgemenisering	21
<b>7</b>	<b>Conclusie en aanbeveling</b>	<b>23</b>
7.1	Conclusie	23
7.2	Aanbeveling	23
	<b>Referenties</b>	<b>24</b>
<b>A</b>	<b>Definities</b>	<b>25</b>

<b>B</b>	<b>Eigenschappen grond en palen</b>	<b>26</b>
B.1	Grondeigenschappen	26
B.2	Paaleigenschappen	26
<b>C</b>	<b>Invul formulier prefab palen</b>	<b>28</b>
<b>D</b>	<b>Overzicht ingeleverde resultaten</b>	<b>29</b>
<b>E</b>	<b>Terugrekenen naar lengte bepaling</b>	<b>30</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Algemene opzet proefveld Stress Wave '22 conferentie

In de grond gevormde palen worden in bebouwde omgeving steeds vaker toegepast. De kwaliteit van deze palen kan sterk worden beïnvloed door de lokale grondomstandigheden. Het maken van deze palen vereist veel vakmanschap, waarbij verschillende parameters tijdens het productieproces worden gemonitord. Toch blijft er vaak behoefte aan een controle achteraf, waarvoor momenteel het akoestisch doormeten van de palen de meest aantrekkelijke techniek blijkt.

Hoewel deze techniek vaak wordt toegepast en er veel ervaring mee is, leidt het resultaat van de meting regelmatig tot discussies over de kwaliteit van akoestische metingen. Om dergelijke discussie te beperken is een beter inzicht in de werkelijke kwaliteit van de meting wenselijk.

Tijdens de demonstratiedag van de Stress Wave 2022 conferentie in Rotterdam heeft het consortium van Van 't Hek, Allnamics en Deltares op de Maasvlakte een proefveld ontwikkeld dat tot doel heeft bij te dragen aan het inzicht van de kwaliteit van akoestische metingen.

Het proefveld bestond uit twee delen: tien prefab palen met verschillende dikte en lengte en tien in de grond gevormde palen met verschillende mogelijke defecten. Dit rapport gaat in op de achtergrond en verwerking van de resultaten van het deel met de prefab palen. Het onderzoek naar de resultaten van de in de grond gevormde palen wordt beschreven in rapport 11209349-000-GEO-0005. De algemene opzet van de demonstratiedag wordt verder beschreven in rapport 11209349-000-GEO-0003.

Het proefveld bestond uit twee delen: tien prefab palen met verschillende dikte en lengte en tien in de grond gevormde palen met verschillende mogelijke defecten. Dit rapport gaat in op de achtergrond en verwerking van de resultaten van het deel met de prefab palen. Het onderzoek naar de resultaten van de in de grond gevormde palen wordt beschreven in rapport [6]. Deze activiteit is mede gefinancierd door TKI Deltatechnologie uit de PPS-innovatie programmasubsidie van het Ministerie van Economische Zaken.

## 1.2 Achtergrond van de proef op de prefab palen

De proef op de prefab palen richt zich op de precisie van de akoestische meetmethode. De opzet van deze proef is oorspronkelijk gesuggereerd door J. Amir van pilettest.com [2]

Precisie van een meetmethode geeft aan in hoeverre resultaten van een beproeving met dezelfde methode overeenkomende uitkomsten geeft [3], zie ook Bijlage A. In ASTM-standaard E691-22 [3] wordt een methode uitgewerkt om via een ILS (inter-laboratory study) de precisie van een methode te bepalen als de methode één enkel getal als uitkomst geeft. De uitkomst van een methode is niet altijd identiek. Er kunnen toevallige fouten optreden. Maar ook kunnen er verschillen ontstaan door verschillende meetapparaten, (langzaam) verlopende kalibraties van apparatuur, verschillende (of mogelijk onjuiste) instellingen van apparatuur en ook verschillen tussen de werkwijze en procedures van laboratoria en/of laboranten. In de ASTM-standaard wordt dit onder andere uitgewerkt door onderscheid te maken tussen de verschillen tussen laboratoria (between-laboratory) en binnen een laboratorium (within-laboratory).

In de methodiek van de ASTM wordt de werkelijke waarde niet gebruikt. Vergelijking met de werkelijke waarde gaat immers over nauwkeurigheid en niet over precisie, zie ook Bijlage A voor specificatie van de begrippen nauwkeurigheid, precisie en betrouwbaarheid.

## 2 Opzet veldonderzoek

### 2.1 Voorbereiding

In het hier uitgewerkte onderzoek is getracht de precisie van de akoestische methode te bepalen volgens de ASTM-standaard [3]. Omdat deze standaard een methode beschouwt die één getal als uitkomst heeft, stelde de heer J. Amir voor de lengte van de palen te beoordelen.

Om dit te bereiken is een proefveld opgezet met prefab palen met verschillende dikte en lengte, zie Bijlage B en rapport 11209349-000-GEO-0003 voor meer informatie. Het gebruik van prefab palen heeft tot voordeel dat de lengte goed bekend is. Het gebruik van prefab palen heeft tot nadeel dat in het algemeen de schacht gladder en de samenstelling homogener zijn dan in de grond gevormde palen, waardoor de resultaten gunstiger zullen zijn dan in de praktijk bij in de grond gevormde palen waarop deze methode typisch toegepast wordt.

Het doel was om deze palen door verschillende participanten met hun eigen apparatuur te laten doormeten. Conform de ASTM-standaard moet een beproeving per participant minimaal éénmaal worden herhaald, zodat per paal twee metingen beschikbaar zijn.

Voor deze beproeving was een spreadsheet/formulier ontwikkeld waarop de deelnemers hun resultaten konden invullen, zie Bijlage C. Op dit formulier is de gebruikte golfsnelheid ingevuld en per paal de vastgestelde lengte. Tevens was duidelijk dat de palen tweemaal doorgemeten moesten worden, waarbij de tweede run pas uitgevoerd moest worden nadat de eerste run voor alle palen was gedaan. Uit nieuwsgierigheid is ook gevraagd naar het aantal klappen dat is gebruikt voor de bepaling, maar deze informatie is voor de toepassing van de ASTM-standaard niet nodig.

Deze aanpak met een voorgeschreven spreadsheet maakt een automatische verwerking van de resultaten mogelijk.

### 2.2 Verloop van de beproeving

Het voorafgaand aan de testdag werven van participanten was niet goed verlopen. Daardoor zijn er niet alleen zeer weinig deelnemers geweest, maar hebben de meesten ook dezelfde apparatuur (beschikbaar gesteld door de organisatie) gebruikt. Het door de ASTM gesuggereerde aantal participanten van 30 is niet gehaald.

In totaal zijn er acht participanten geweest. Vijf participanten hebben de test tweemaal uitgevoerd, drie participanten hebben de test slechts eenmaal uitgevoerd.

### 2.3 Trekken van de palen

Na afloop van de demonstratiedag zijn alle palen uit de grond verwijderd. Op één na zijn alle palen ongebroken uit de grond gekomen, en is het dus zeker dat deze in de grond geen breuk hadden. Alleen paal S13 bleek op ongeveer 8 m vanaf de kop te zijn gescheurd. Het is onbekend of deze scheur tijdens het heien of tijdens het trekken is ontstaan.

## 3 Resultaten

### 3.1 Dataverwerking

Er hebben 8 participanten deelgenomen aan de akoestische metingen op de negen prefab palen. De meetresultaten zijn aangeleverd in de vorm van de lengte in meters. Deze zijn vermeld in Bijlage D.

Voor de analyse zijn deze afstanden omgerekend (op basis van de opgegeven golfsnelheid) naar de looptijden in Tabel 3.1. Participanten A tot en met E hebben elk twee verschillende metingen uitgevoerd, de overige participanten hebben er slechts één uitgevoerd. Normaliter gaat de ASTM E691 standaard uit van gebalanceerde data waar elke participant even veel metingen uitgevoerd heeft. Omdat dit hier niet het geval is, is de aangepaste verwerking voor ongebalanceerde data toegepast.

Tabel 3.1 Gemiddelde meettijden in ms per participant en paal.

Participant/paal	S13	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22
A	3,89	2,72	2,11	4,33	3,83	2,00	3,33	2,67	4,00
B	3,91	2,75	2,21	2,23	2,30	1,89	2,62	2,54	3,86
C	3,98	2,77	2,19	3,95	3,90	2,04	3,85	2,69	3,90
D	4,21	2,90	2,34	4,05	3,93	2,00	3,58	2,67	4,10
E	4,04	2,85	2,28	4,20	3,99	1,96	3,50	2,61	3,98
F*	4,02	2,86	2,31	3,57	3,98	1,90	3,50	2,62	4,00
G*	4,02	2,81	2,29	4,76	4,00	1,93	3,52	2,60	3,98
H*	4,02	2,86	2,30	0,32	4,00	1,95	3,50	2,57	3,98

\*) Deze deelnemers hebben één meting per paal uitgevoerd.

De lage waarde van participant H bij paal S17 valt direct op. Nagegaan is of dit geen verschrijving is geweest. Omdat op het ingevulde formulier staat dat de paal mogelijk gebroken is, wordt verondersteld dat deze waarde door de participant als realistisch werd beschouwd en geen vergissing is geweest.

## 4 Bepaling precisie volgens ASTM-standaard

### 4.1 Consistentie-indicatoren

De berekeningen zijn volgens de methode in appendix A2 van ASTM E691-22 uitgevoerd, met als uiteindelijk doel het bepalen van de consistentie-indicatoren tussen de participanten de “*between-laboratory consistency statistic*” (de *h*-waarde) en binnen de participanten de “*within-laboratory consistency statistic*” (de *k*-waarde). Op basis van de resultaten van het experiment wordt voor beide consistentie-indicatoren een kritieke waarde afgeleid die aangeeft of een waarde consistent is met de andere resultaten.

#### 4.1.1 Consistentie tussen de partijen

De *h*-waarde is de *between-laboratory consistency statistic*; deze waarde geeft aan hoe consistent het resultaat van een gegeven paal voor een gegeven participant is met de resultaten voor de zelfde paal bij andere participanten. Het scheidt dus een beeld van in hoeverre een participant dezelfde resultaten geeft als andere participanten. Een positieve *h*-waarde betekent dat die participant voor die paal hoger uitvalt dan het gemiddelde, een negatieve *h* betekent dat die participant voor die paal lager uitvalt.

In Tabel 4.1 zijn de afgeleide *h*-waarden gepresenteerd. Een absolute *h*-waarde boven de kritieke waarde geeft aan dat er een kans van meer dan 99,5% is dat de betreffende participant een waarde heeft gevonden die afwijkt van de waarde die de methode oplevert. De kritieke waarden zijn ontleend aan Tabel 5 in [3]. Voor acht participanten is de kritieke *h*-waarde 2,15. Bij de vijf participanten die herhalingen hebben gedaan is de kritieke *k* waarde 2,11, uitgaande van twee herhalingen per participant. De absolute waarden boven de kritieke waarden zijn in geel gemarkeerd. De twee betreffende gevallen horen beide bij partij B.

Tabel 4.1 *h*-waardes voor de verscheidene participanten en palen. Geel gemarkeerd is boven de kritieke waarde.

Participant\Paal	S13	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22
A	-1,27	-1,55	-1,95	0,60	0,16	0,88	-0,27	0,90	0,35
B	-1,07	-1,14	-0,62	-0,93	-2,51	-1,53	-2,32	-1,56	-1,58
C	-0,36	-0,68	-0,91	0,41	0,28	1,63	1,22	1,39	-1,05
D	2,03	1,36	1,18	0,48	0,33	0,88	0,45	1,05	1,82
E	0,32	0,56	0,43	0,60	0,43	-0,03	0,21	-0,23	0,05
F	0,10	0,59	0,58	0,10	0,35	-0,76	0,14	-0,02	0,30
G	0,10	-0,07	0,34	0,88	0,38	-0,42	0,19	-0,39	0,02
H	0,09	0,67	0,44	-2,04	0,38	-0,05	0,14	-0,81	0,03

#### 4.1.2 Consistentie per partij

De *k*-waarde is de *within-laboratory consistency statistic*, dit betekent dat deze waarde aangeeft hoe consistent de deviaties van de resultaten van de gegeven participant zijn met die van de andere participanten. Het scheidt dus een beeld van in hoeverre een bepaalde participant verwacht kan worden om bij het opnieuw meten van hetzelfde object ook dezelfde waarde te geven. Hierbij geeft een *k*-waarde van 1 aan dat de deviatie van die participant gelijk is aan de gemiddelde deviatie van alle participanten. Een zeer kleine *k* kan aangeven dat de schaal waarop gemeten is door die participant niet gevoelig genoeg is of dat resultaten te veel afgerond zijn.

De  $k$ -waarde kent geen kritieke ondergrens, omdat een lage  $k$ -waarde enerzijds kan ontstaan door een extreem nauwkeurige meetmethode (wat positief is), maar ook juist door gebruik van ongevoelige apparatuur (afstellingen) (wat negatief is). Een zeer grote  $k$  geeft aan dat die participant significant grotere deviaties heeft dan gemiddeld en wellicht minder precies meet dan de andere participanten. Om een betekenisvolle  $k$ -waarde te bepalen zijn er tenminste twee metingen nodig omdat de formule gebruik maakt van de standaarddeviatie. De kritieke  $k$ -waarde is dus ook niet gedefinieerd met maar één meting omdat er dan door 0 gedeeld zou worden.

Tabel 4.2 toont de afgeleide  $k$ -waarden. Daar waar maar een enkele meting was uitgevoerd, zijn de  $k$ -waardes weergegeven met een – (liggend streepje). De  $k$ -waardes op plekken met twee identieke metingen, dus met een standaarddeviatie van 0, staan zijn in de tabel weergegeven met een 0. De kritieke waarde is 2,15. De absolute waardes boven de kritieke waardes zijn in geel gemarkeerd. Van de vijf partijen, vertonen vier partijen boven-kritieke  $k$ -waarden. Voor drie van de partijen geldt dat het om één paal gaat en per partij is dit een andere paal.

Tabel 4.2  $k$  waardes voor de verscheidene participanten en palen. Geel gemarkeerd is boven de kritieke waarde.

Participant\Paal	S13	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22
A	2,19	2,01	1,76	-	1,35	0	0,31	0	0
B	0	0,42	0	0	1,67	0	2,18	0,36	0
C	0,09	0	1,37	1,82	0	2,24	0,40	2,21	0
D	0,46	0,42	0,18	0,83	0,56	0	0	0	2,24
E	0	0,79	0	0	0,26	0	0	0	0
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 4.2 Conclusie conform de ASTM-standaard

In deze paragraaf wordt aan de hand van de  $h$ - en  $k$ -waardes conform de ASTM-standaard een conclusie getrokken over de meetcampagne, onder de aanname dat er voldoende meetresultaten waren.

Bij het interpreteren van de  $h$ -waardes zijn twee aspecten van belang: de verdeling van  $h$ -waardes en het bestaan van boven-kritieke  $h$ -waardes. Voor de verdeling is het van belang om te bepalen of er een participant is waarvoor de  $h$ -waardes consistent niet in het patroon van de overige  $h$ -waardes passen. Dat is hier bij participanten B en D het geval: de  $h$ -waardes voor participant B zijn consistent laag terwijl die voor participant D consistent hoog zijn. Ook is er voor participant B bij palen S18 en S20 een boven kritieke  $h$ -waarde gevonden, dit betekent dat die resultaten niet consistent zijn met de andere laboratoria. Dit is terug te zien in de onverwerkte resultaten in Tabel 3.1, bij deze palen geeft participant B namelijk een veel kleinere waarde aan dan de andere participanten. Volgens de ASTM-standaard zou er verder gekeken moeten worden naar deze participant om de resultaten te verklaren.

In Tabel 4.2 is te zien dat veel  $k$ -waardes gelijk aan 0 zijn. Dit komt doordat de metingen dusdanig veel afgerond zijn dat de twee metingen een identieke waarde geven. Ook zijn er een paar  $k$ -waardes die hoger zijn dan de kritieke waarde bij participanten A tot en met D.

Deze geven aan dat er relatief grote verschillen tussen de twee metingen waren voor die specifieke participant bij die specifieke paal. Aan de hand van deze resultaten kan worden geconstateerd dat de precisie tussen partijen matig is.

### 4.3 Discussie

In de vorige paragraaf is de ASTM ILS standaard toegepast op de resultaten van de akoestische metingen met de aanname dat de meetdata hier geschikt voor is, in deze paragraaf wordt gekeken naar de daadwerkelijke geschiktheid aan de hand van de eisen die in het ASTM document staan.

Het eerste probleem dat opvalt is het aantal missende waardes, door drie van de acht participanten is er maar een enkele meting uitgevoerd voor elke paal. Het gevolg hiervan is dat de data erg ongebalanceerd is, volgens de ASTM-standaard is er al sprake van een erg ongebalanceerde dataset bij een 10% verschil tussen het bedoelde aantal metingen en het ontvangen aantal metingen. Onbalans zorgt ervoor dat de participanten allemaal in verschillende mate meetellen voor de statistieken. Naast het effect op balans zorgt dit er ook voor dat het voor deze participanten onmogelijk is om een analyse van de  $k$ -waarde uit te voeren omdat dit een standaarddeviatie en dus ten minste twee metingen vereist.

Ook voor de participanten die geen waardes missen is vaak een standaarddeviatie van 0 te zien. Dit gebeurt als beide opgegeven waardes gelijk zijn. Dit kan zijn veroorzaakt door de combinatie van overmatig afgeronde resultaten, waardoor meetresultaten eerder identiek aan elkaar zijn. Daarnaast kan ook het lage aantal metingen een rol spelen. De ASTM-standaard noemt een minimum van 4 tests per combinatie van participant en materiaal (paal) bij fysische experimenten. De aanwezigheid van relatief veel  $k$ -waarden die gelijk zijn aan nul heeft ook invloed op het aantal boven-kritieke  $k$ -waardes. Het hoeft dus niet te betekenen dat de metingen met boven-kritieke  $k$ -waardes een grote standaarddeviatie hebben, het zijn juist de standaarddeviaties van 0 die het gemiddelde omlaaghalen.

Tot slot was het aantal participanten aan de lage kant, de ASTM-standaard noemt dat er in principe meer dan 30 participanten aan een ILS mee moeten doen, maar met een harde eis van ten minste zes participanten. Aangezien de participanten met slechts één meting niet bijdragen aan de  $k$ -waardes is er voor de check op "*within-laboratory consistency*" niet aan deze eis voldaan.

De omvang van de beschikbare data is te klein om verder uit te werken volgens de ASTM. Wel kan worden geconstateerd dat de resultaten met een te lage nauwkeurigheid worden opgegeven aan de hand van de vele  $k$  waardes gelijk aan 0. Mogelijk geeft de apparatuur de locaties van een defect standaard in 0,1 m of 0,05 m, of ronden de uitvoerende partijen de resultaten te veel af.

Er is aanleiding om de resultaten van participant B verder buiten de beschouwing te houden. De opgegeven resultaten wijken dusdanig af dat hier sprake lijkt van een vergissing of onbegrip. Volgens de ASTM-standaard moet dit nader worden onderzocht in overleg met de participant, maar door de anonimiteit is dit niet mogelijk.

## 5 Vervolganalyse: Nauwkeurigheid

In de testen zijn de werkelijke lengte van de prefab-palen gemeten op basis van de aangenomen golfsnelheid in de palen. Het is interessant om de akoestisch gebruikte / gemeten waarden te vergelijken met de vooraf bepaalde waarden van de lengte en de golfsnelheid [5]. Omdat hier vergeleken wordt met de vooraf opgegeven lengte, gaat dit hoofdstuk over nauwkeurigheid en mogelijk betrouwbaarheid, maar niet over precisie.

Hierbij wordt eerst de situatie per paal beschouwd, en daarna worden de verschillen tussen de participanten bekeken. Hierbij worden de gegevens weergegeven in meters.

### 5.1 Analyse per paal

Er is aan de hand van de “reproducibility standard deviation”  $sR$  een 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald met behulp van de student-t tabel. Dit houdt in dat bij het laten uitvoeren van deze test door een willekeurige participant er een 95% kans is dat de resultaten binnen het bereik vallen. In Figuur 5.1 is dit betrouwbaarheidsinterval weergegeven. De blauwe balken geven de gemiddelde waarde die in de ILS bepaald is, en in zwart is de 95% betrouwbaarheidsinterval aangegeven, dat wil zeggen dat 95% van de resultaten in het aangegeven interval ligt.

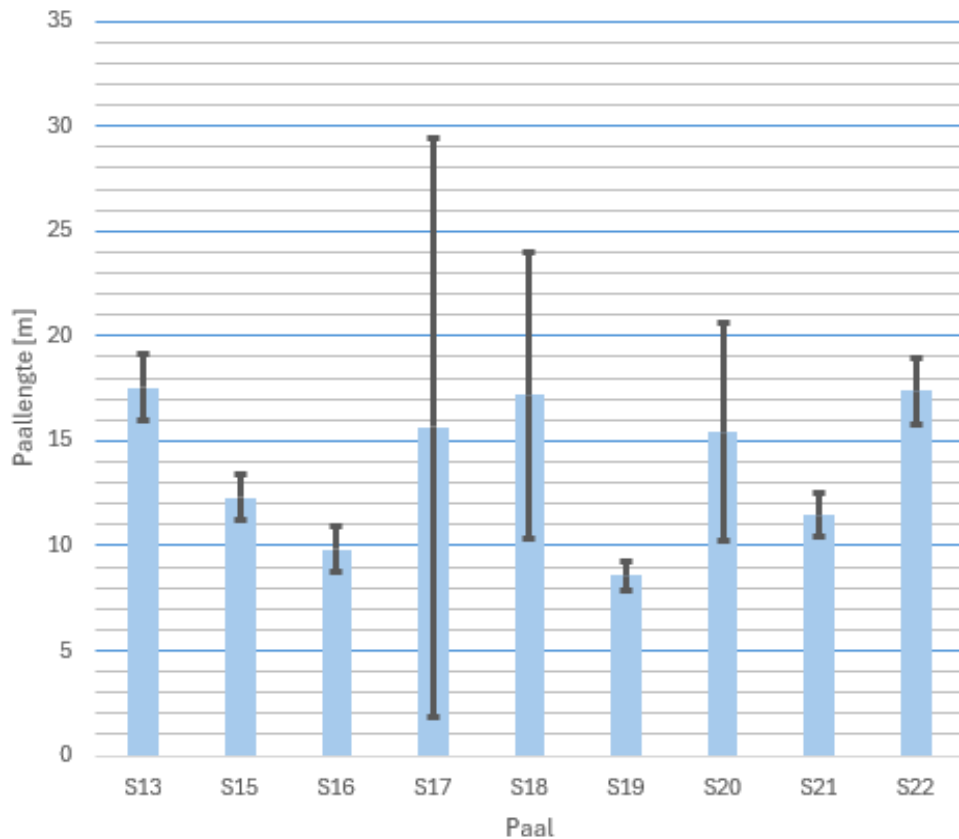
In deze figuur is te zien dat er voor de meeste palen een betrouwbaarheidsinterval is van een paar meter. Voor paal S18, S20 en vooral paal S17 is het betrouwbaarheidsinterval echter een stuk breder. Bij palen S18 en S20 was er een boven-kritieke  $h$ -waarde gevonden bij participant B, dit betekent dat de resultaten niet consistent zijn met de andere participanten.

Volgens de ASTM-standaard hoort naar aanleiding van deze boven-kritieke  $h$ -waarde onderzocht te worden of de participant fouten gemaakt heeft tijdens de analyse. Als er inderdaad fouten gemaakt zijn of als er veel gegevens zijn en de andere participanten goede overeenkomst tonen kan de meetdata van die participant verwijderd worden. Echter is het in dit geval niet meer mogelijk om te controleren of er fouten gemaakt zijn in de meting, en zijn er ook niet genoeg gegevens om alsnog gegevens te verwijderen.

Opmerkelijk is dat er voor paal S17 geen boven-kritieke  $h$ - of  $k$ -waarden zijn, terwijl er sterk afwijkende metingen tussen zaten. Wellicht komt dit door het feit dat er deze paal ook zonder de uitschieters al relatief grote verschillen tussen de meetresultaten zitten. In zo'n geval wijken de uitschieters niet voldoende af van het te verwachten betrouwbaarheidsinterval om een boven-kritieke  $h$ - of  $k$ -waarde te tonen.

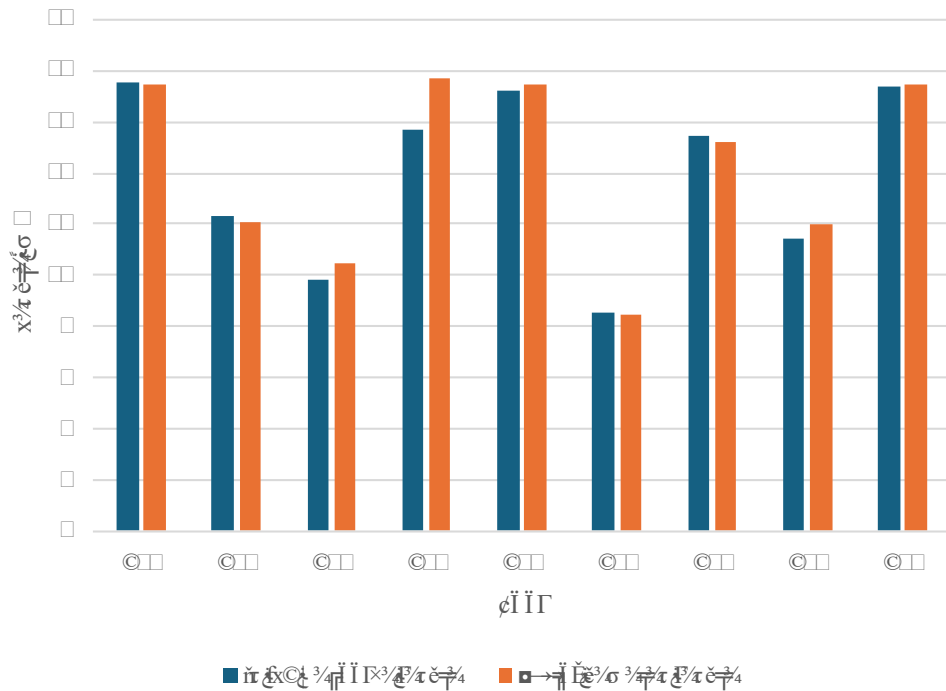
Voor korte palen is de dieptebevestiging dus ongeveer plus of min één meter, voor langere palen loopt dit snel op. Er kan worden verwacht dat de dieptebevestiging op grotere diepte minder nauwkeurig wordt. De resultaten suggereren dat dit geen eenduidig verband is, maar dat bij ongeveer 12 m diepte de onnauwkeurigheid sterk toeneemt.

## Betrouwbaarheid 95%



*Figuur 5.1 Betrouwbaarheidsinterval van de gemeten paallengte volgens reproducibility standard deviation.*

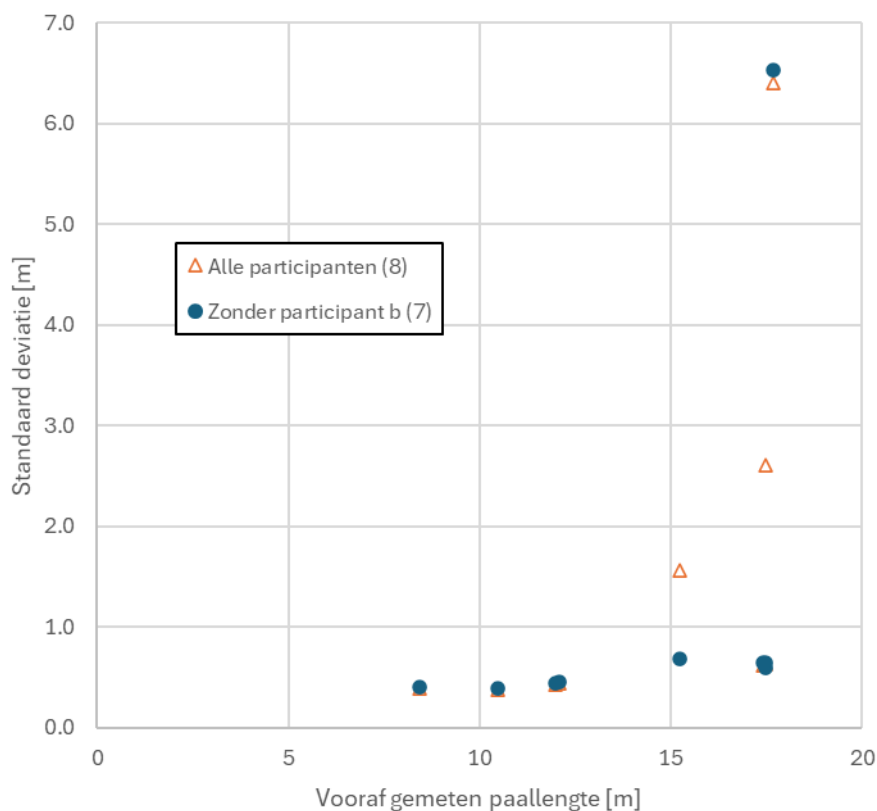
In Figuur 5.2 is voor elke paal de gemiddelde lengte volgens de meetresultaten van de ILS weergegeven naast de vooraf gemeten lengte. Hier is te zien dat er voor de meeste palen goede overeenkomst is tussen de ILS en de meting vooraf. Alleen bij paal S17 is er een verschil van meer dan een meter tussen de vooraf gemeten lengte en de in de ILS bepaalde lengte, dit komt doordat er bij deze paal één participant was die een lengte van minder dan 10% van de daadwerkelijke lengte gemeten heeft. Als deze meting niet meegenomen zou worden heeft ook paal S17 een verschil van minder dan een meter tussen ILS en vooraf gemeten lengte zijn gevonden.



Figuur 5.2 Vergelijking van gemiddelde van ILS resultaten met vooraf gemeten lengte.

In Figuur 5.3 is de standaarddeviatie weergegeven als functie van de vooraf gemeten paallengtes, met alle participanten en alle participanten exclusief participant B. Participant B is hier verwijderd uit de resultaten omdat de *h*-waardes daar duiden op inconsistentie. Opgemerkt wordt dat door het verwijderen van participant B het gemiddelde per paal ook wijzigt.

In Figuur 5.3 is te zien dat het verwijderen van de resultaten van participant B zorgt voor een sterke vermindering van de standaarddeviatie in twee van de palen die een standaarddeviatie van meer dan een meter hadden. De bij paal S17 horende standaarddeviatie neemt niet af na het verwijderen van participant B, dit komt doordat dit de paal is waar participant H een extreem lage waarde registreerde met de opmerking dat deze daar mogelijk was gebroken.



Figuur 5.3 Standaarddeviatie afhankelijk van vooraf gemeten paallengte.

Het is opvallend dat de palen met de lengte rond de 10 m de standaarddeviatie orde 0,5 m is, terwijl bij de langere palen er veel meer variatie is. Dit betekent dat bij palen die langer zijn dan 12 m, de akoestische metingen onbetrouwbaar lijken te worden. Dit geldt formeel alleen bij deze prefab palen in deze geotechnische situatie.

## 5.2 Analyse per participant

In deze paragraaf gaan we na of er opvallende afwijkingen tussen de participanten optreden.

### 5.2.1 Vergelijking akoestisch gemeten lengte met werkelijke lengte

Uitgangspunt is de gemeten lengte minus de werkelijke lengte van de paal per participant.

$$z_j = L_{mj} - L_{oj}$$

Met  $j$  het paalnummer, subscript  $m$  de opgemeten lengte in de ILS en subscript  $o$  de vooraf gemeten lengte. Uit het gemiddelde van de metingen (run 1) of alleen run 1 (als er maar één meting beschikbaar is, zie Bijlage D) kan het gemiddelde van  $z$  en de standaard afwijking worden bepaald. Het teken van het gemiddelde geeft aan of er sprake is van overschatting (positief) of onderschatting (negatief). De significantie kan worden getoetst met een Student-t test.

Tabel 5.1 toont de resultaten van de analyses per participant. In het vervolg van deze paragraaf wordt de betekenis van de kolommen toegelicht.

In de kolom snelheid staat de gebruikte golfsnelheid. Deze kan worden vergeleken met de vooraf gemeten golfsnelheid. Deze was gemiddeld 4356 m/s met een standaard afwijking

van 140 m/s. De gekozen waardes waren dus heel redelijk, waarbij alleen participant E een significant afwijkende waarde heeft gekozen. Op basis van de resultaten van de metingen aan de palen voorafgaand aan de installatie is voor de gemiddelde golfsnelheid over de 10 palen gevonden 4425 m/s met een standaard afwijking van 107 m/s. In gemiddelde zin is de golfsnelheid voor deze palen goed gekozen.

In de kolom “afwijking alle resultaten” is aangegeven of een participant alle lengtes heeft overschat (POS) of onderschat (NEG). Voor participant E is de overschatting duidelijk ontstaan door de hoge opgegeven waarde van de golfsnelheid, voor dezelfde gemeten tijd geeft dit een grotere gemeten lengte.

Tabel 5.1 Resultaten betrouwbaarheid per participant.

Participant	Snelheid [m/s]	Afwijking alle resultaten	Gemiddelde	Standaard afwijking	T-waarde	Kans gelijk aan nul	Test op kans 0,9
Part a	4500	x	0,19	0,77	0,082	0,937	passed
Part b	4350	NEG	-2,51	3,17	-0,264	0,798	failed
Part c	4300	x	-0,27	0,71	-0,127	0,902	passed
Part d	4300	x	-0,03	0,43	-0,021	0,983	passed
Part e	4600	POS	0,77	0,51	0,501	0,630	failed
Part f	4200	NEG	-0,83	0,74	-0,377	0,716	failed
Part g	4200	x	-0,30	1,02	-0,099	0,924	passed
Part h	4400	x	-1,79	5,45	-0,110	0,916	passed

De kolommen “gemiddelde” en “Standaard afwijking” geven het gemiddelde van de stochast  $z$  en de standaard afwijkingen van de stochast  $z$ , dit is dus de standaardafwijking van het verschil tussen de gemeten lengte en de vooraf bepaalde lengte.

In de laatste kolommen (T-waarde, Kans gelijk aan nul en Test op kans 0,9) is de toets voor de hypothese dat het gemiddelde wel of niet significant afwijkt van de waarde nul. Dit bestaat uit drie stappen: eerst wordt op basis van het gemiddelde en de standaard afwijking de t-waarde berekend (kolom T-waarde), waarbij de Student-t verdeling wordt aangenomen. Dan wordt de kans dat deze t-waarde wordt bereikt uitgerekend (kolom Kans gelijk aan nul). En ten slotte wordt deze berekende kans vergeleken met de vooraf bepaalde kans voor het toelaatbare verschil (kolom Test op kans 0,9). Als de berekende kans groter is dan de toelaatbare kans voldoet de meting, omdat feitelijk gekeken moet worden naar de staart van de verdeling, dus steeds  $1 - P$  (één min de gegeven kans). De term “failed” geeft hierbij aan dat er minder dan een 90% kans is dat hetgeen dat gemeten wordt overeenkomt met de daadwerkelijke waarde.

Wij interpreteren de resultaten in Tabel 5.1 als volgt: De participanten B en H hebben in gemiddelde zin een ontoelaatbaar grote afwijking en een ontoelaatbaar grote standaard afwijking, dit betekent dat de gemeten lengtes veel afwijken van de daadwerkelijke lengtes, en dat het verschil tussen meting en de daadwerkelijke lengte niet consistent is. De standaard afwijking bij participant G is ook wel groot: een standaard afwijking van 1,02 m geeft aan dat het verschil tussen de gemeten en daadwerkelijke waarde in 95% van de gevallen tussen -2,7 m en +2,1 m verwacht wordt op basis van deze metingen. De overige participanten hebben afwijkingen die kunnen oplopen tot orde 0,8 m.

## 5.2.2 Basale foutenanalyse

Om de bijdrage van de gekozen golfsnelheid en de gemeten looptijd aan de afwijkingen te beoordelen is op basis van een basale foutenanalyse de relatieve fout in de lengtebepaling uitgerekend. Voor de afstand  $L$  berekend uit de golfsnelheid  $c$  en de looptijd  $T$ , geldt voor de relatieve fout dat deze de som is van de relatieve fout in beide factoren:

$$L = \frac{1}{2}cT \rightarrow \delta L = \delta c + \delta T$$

Waarbij de  $\delta$  de relatieve fout in de variabele geeft.

De relatieve fout in de golfsnelheid  $c$  is bepaald uit de gekozen waarde en het vooraf gemeten gemiddelde gedeeld door het gemiddelde. Voor de relatieve fout in de looptijd is uitgegaan van de gemeten waarde minus het gemiddelde gemeten door alle participanten. Voor de relatieve fout wordt deze waarde gedeeld door het gemiddelde gemeten door alle participanten.

Tabel 5.2 geeft de getalsmatige uitwerking van de analyse. De som van de absolute waarde deze twee getallen is weergegeven in de vierde kolom van Tabel 5.2. In de laatste twee kolommen van Tabel 5.2 is de relatieve bijdrage gegeven.

Een relatieve fout van bijvoorbeeld participant A van 0,053 geeft aan dat deze participant op een paal van 12 m ongeveer ( $12 \cdot 0,053 =$ ) 0,64 m afwijking heeft. 62% van deze afwijking komt uit de schatting van de golfsnelheid en 38% komt uit de gemeten looptijd. De conclusie is dat deze relatieve bijdragen in Tabel 5.2 niet zo veel zeggen, een 'juiste' keuze van de golfsnelheid heeft hierop veel invloed. De relatieve fout in de looptijd is interessanter. Als de twee uitbijters worden weggelaten, moet hierbij toch rekening worden gehouden met een relatieve fout van 1-5%. Deze beschouwing is te eenvoudig. Dit aspect moet nauwkeuriger worden uitgewerkt door voor elke paal de werkelijke golfsnelheid te gebruiken en vervolgens voor elke participant de verhouding te bepalen.

Tabel 5.2 Verdeling van de afwijkingen.

Participant	Relatieve fout in golfsnelheid [-]	Relatieve fout in looptijd [-]	Relatieve fout in lengte [1/m]	Relatieve bijdrage golfsnelheid [%]	Relatieve bijdrage looptijd [%]
Part a	0,033	0,020	0,053	62	38
Part b	-0,001	-0,126	0,128	1	99
Part c	-0,013	0,035	0,048	27	73
Part d	-0,013	0,052	0,065	20	80
Part e	0,056	0,038	0,094	60	40
Part f	-0,036	0,017	0,052	68	32
Part g	-0,036	0,053	0,089	40	60
Part h	0,010	-0,089	0,099	10	90

## 5.3 Discussie

Bij de interpretatie moet rekening worden gehouden met aantal aspecten.

- De prefab palen zijn door verschillende leveranciers uit de bestaande voorraad restpalen gehaald. Daardoor is de leeftijd en betonkwaliteit onbekend en kan dus erg variabel zijn. Dit heeft invloed op de werkelijke golfsnelheid. Dit aspect is per paal overigens voor elke participant identiek.

- Prefab palen hebben in vergelijking met in de grond gevormde palen in het algemeen een gladde schacht en hoge homogeniteit van het materiaal. Daardoor kunnen deze resultaten niet enkel aan de meetmethode worden toegeschreven, maar aan de toepassing van deze meetmethode op prefab palen. Formeel moeten we stellen dat in de grond gevormde palen geen onderdeel van deze beoordeling zijn.
- Bij een dergelijke uitwerking moet rekening gehouden worden dat een test geen werkelijke situatie is. Mogelijk zijn er participanten geweest die relatief onervaren zijn in het uitvoeren van deze testen. In een extreem geval kan een participant hebben gedacht dat hij het wel leuk vond eens akoestische testen te doen. Ook is het mogelijk dat een ervaren participant met hem onbekende apparatuur / materiaal heeft gewerkt. Of heeft juist de meest ervaren medewerker van een bedrijf de conferentie bezocht. Dit kan invloed hebben op de uitkomsten van de ILS.

In Paragraaf 2.3 is aangegeven dat paal S13 na het trekken een scheur vertoonde, waarbij het onbekend is of deze tijdens de test al in de paal aanwezig was. Een scheur op 8 m in een paal van 17 m kan ontstaan tijdens het handelen van de paal voor het heien of tijdens het trekken, het is minder aannemelijk dat deze ontstaat tijdens het heien. Geen enkele participant heeft in deze paal een lengte gemeten die samenhangt met de positie van de scheur. Er is daarom geen aanleiding te verwachten dat deze scheur (als deze al aanwezig was tijdens de test) invloed heeft gehad op de resultaten.

## 6 Samenvatting resultaten en veralgemenisering

### 6.1 Samenvatting resultaten

#### 6.1.1 Interpretatie conform de ASTM-standaard

Er is met de beschikbare meetgegevens een analyse uitgevoerd conform de ASTM-standaard. Uit de consistentieanalyse kwam dat de gemiddelde waarden van participant B bij twee palen niet consistent zijn met de andere participanten. Tevens hadden participanten A t/m D een boven-kritieke  $k$ -waarde voor ten minste één van de palen, dit geeft aan dat de standaarddeviaties voor die metingen niet consistent waren met de andere participanten.

De bruikbaarheid van deze waarden is beperkt aangezien de meetgegevens niet voldoen aan de eisen die in de ASTM-standaard gesteld worden. Het aantal participanten in de ILS lag vlak boven het minimum, er waren per participant te weinig metingen gedaan (een aantal participanten heeft slechts een enkele meting gedaan) en tot slot er is te veel afgerond in de resultaten. Ondanks deze problemen wezen de  $h$ -waarden wel naar de afwijkende resultaten van participant B, die consistent lager uitvallen dan de andere participanten.

Uit de “*within-laboratory consistency statistic*” (de  $k$ -waarden) kon niet veel informatie gehaald worden omdat het gebrek aan meetgegevens hier een groter effect heeft. Het berekenen van de  $k$ -waarde vereist namelijk een standaarddeviatie, wat gehinderd wordt door de waarden die uit een enkele meting bestaan, of waar te veel afgerond is en beide metingen identiek zijn. Aangezien de  $k$ -waarden relatief zijn aan de andere metingen zorgen deze standaarddeviaties van 0 er voor dat de  $k$ -waarden van metingen die wel een standaarddeviatie hebben automatisch hoger worden.

In conclusie was er te weinig meetdata om de ASTM-standaard goed toe te kunnen passen, maar zijn er wel informatieve resultaten uit gekomen. Er blijken *between-laboratory consistency statistic* ( $h$ -waarden) boven de kritieke waarden op te treden. Dit beschouwt de ASTM als reden om de methode bij de betrokken partijen aan een kritisch oordeel te onderwerpen.

#### 6.1.2 Interpretatie nauwkeurigheid

Bij de beschouwde palen is het verschil tussen de werkelijke lengte en de gemeten lengte in 95% van de gevallen minder dan 1,04 m. Dit geldt voor korte palen. Bij palen boven de 12 m neemt de onzekerheid snel toe en moet rekening worden gehouden met veel grotere afwijkingen. Deze waarden hebben geen absolute betekenis, ze gelden voor dit type palen in deze grondslag.

In gemiddelde zin (gemiddelde van alle metingen per paal) is de schatting beter. Dit betekent dat de methode geen systematische afwijkingen heeft.

De basale foutenanalyse geeft aan dat de schatting van de golfsnelheid en de bepaling van de looptijd een vergelijkbare bijdrage hebben aan de afwijkingen van de resultaten. Daarbij kunnen er wel duidelijk uitbijters optreden.

### 6.2 Veralgemenisering

In de grond gevormde palen zijn geen onderdeel van deze beoordeling. De resultaten kunnen daarom niet 1-op-1 worden toegepast op in de grond gevormde palen.

In deze paragraaf wordt nagegaan wat de mogelijke consequenties van de bevindingen kunnen zijn voor in de grond gevormde palen.

De belangrijkste verschillen tussen een afwijking in een realistische situatie met in de grond gevormde palen en de hier beschouwde palen en metingen:

- Prefab palen zullen in het algemeen een homogener opbouw hebben: Variaties in stijfheid, dichtheid en diameter leiden tot meer lokale reflecties in de palen en compliceren de interpretatie.
- Er is in de prefab palen gekeken naar de grootst mogelijke discontinuïteit in de impedantie: de overgang van een volledige doorsnede naar de grond. In de praktijk moet men variaties in de impedantie (door afwijkingen in de doorsnede of stijfheid) bepalen die een veel kleinere discontinuïteit geven. Realistische afwijkingen zullen daarom meestal minder betrouwbaar worden bepaald.
- Veel palen (met name drukpalen) staan in relatief slappere grond met alleen de punt in een stijve zandlaag. De slappere grond zal minder reflecties geven, waardoor de akoestische methode betrouwbaarder zal werken. Dit geldt mogelijk minder in situaties waarin de paal door tussenzandlagen wordt geïnstalleerd, omdat tussenlagen sterke reflecties geven.
- De participanten hadden beperkte informatie en enkele mogelijk beperkte ervaring met de ter beschikking gestelde apparatuur, waardoor de metingen minder goed zijn dan in een realistische situatie het geval is. Dat zou betekenen dat in een realistische situatie de resultaten betrouwbaarder zijn.

Momenteel kunnen de benoemde aspecten niet worden gekwantificeerd. Het gevoel is wel dat in een realistische situatie met in de grond gevormde palen de resultaten minder betrouwbaarder zijn dan hier is afgeleid. Dat betekent dat precisie van de methode met de diepte sneller afneemt dan hier is gevonden. Met andere woorden: er zullen sneller grotere verschillen tussen verschillende beoordelaars ontstaan. De discontinuïteiten op grotere dieptes zullen vaak verkeerd worden beoordeeld. Op basis van deze overwegingen is gesteld dat voldoende precisie en nauwkeurigheid van de resultaten op prefab palen een minimale noodzakelijke voorwaarde voor de toepassing van de methode op in de grond gevormde palen is.

In het rapport met de interpretatie van de in de grond gevormde palen [6] kan hierover mogelijk een betere indruk ontstaan. Overwogen kan worden dit aspect met numerieke analyses verder uit te werken, waarbij het model kan worden gekalibreerd op de bestaande metingen.

# 7 Conclusie en aanbeveling

## 7.1 Conclusie

In dit rapport zijn de precisie en de nauwkeurigheid van de akoestische meetmethode op een proefveld met negen prefab palen beoordeeld.

De precisie is beoordeeld aan de hand van ASTM standaard E691-22 [3]. Het aantal deelnemers voldeed echter niet aan de eisen die de ASTM standaard stelt. Uit de analyse kon toch wel worden geconcludeerd dat een aantal partijen te grote afwijkingen geeft, wat volgens de ASTM standaard nader moet worden onderzocht.

De nauwkeurigheid van de resultaten is onderzocht door vergelijking met de vooraf bepaalde lengte en golfsnelheid van de palen. De methode heeft geen systematisch fout. Afwijkingen met de werkelijke lengte kunnen echter oplopen tot orde 1 m. Deze afwijkingen ontstaan door onzekerheid in de te gebruiken golfsnelheid en onzekerheid in de bepaling van het tijdstip van de reflectie. Beide onzekerheden lijken een vergelijkbare bijdrage aan de onzekerheid te leveren.

## 7.2 Aanbeveling

De resultaten van dit deelonderzoek geven aan dat de voorbereiding en uitvoering van het onderzoek naar de precisie van de methode meer aandacht behoeft:

- 1 Besteed voldoende aandacht aan het werven van participanten, zodat de conclusies meer significant zijn
- 2 Stel kwaliteitseisen aan de participanten. Zij zouden bijvoorbeeld moeten werken conform de geldende richtlijnen (in Nederland CUR 109, maar dat kan per land verschillen)
- 3 We hebben gekozen voor anonieme deelname, maar ASTM gaat daar niet vanuit. Dit stelt dan wel hogere eisen aan de rapportage.

Onderzoek naar de precisie van de methode is dan een mogelijkheid om uiteindelijk de kwaliteit van de sector te verhogen. Dit is een algemeen belang, omdat gedegen inzicht in de precisie discussie over de meetresultaten kan beperken en daarmee de betrouwbaarheid en bruikbaarheid te verbeteren. Door niet anoniem te werken kunnen bedrijven aangeven dat zij aan de precisie voldoen en bedrijven die uit de boot vallen, kunnen zichzelf verbeteren.

Dit onderzoek kan worden gedaan op palen waarvan de werkelijke eigenschappen niet bekend zijn. Het is wel belangrijk dat elke paal door een (beperkt) aantal partijen wordt doorgemeten en er uiteindelijk voldoende palen en deelnemers zijn. Dit betekent dat het onderzoek op recent gebouwde palen kan worden uitgevoerd. Het budget wordt dan niet besteed aan het maken van de palen, maar aan het herhaald doormeten van bestaande recent geïnstalleerde palen met realistische paaleigenschappen en bij de grondslag passende defecten. Dit geeft een veel betere spreiding over grondeigenschappen en type installatie. Dit kan gespreid over een periode van bijvoorbeeld een half jaar plaats vinden. Er wordt aan bevolen om na te gaan of dit een basis kan zijn voor kwaliteitsverbetering. Van zowel de meetmethode als de installatietechniek.

# Referenties

- [1] Demonstratiedag Stress Wave conferentie.
- [2] Mondelinge communicatie met J. Amir.
- [3] ASTM Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method, **E691 – 22**.
- [4] [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl), geraadpleegd 2025-02-27.
- [5] Intern Deltares rapport “Pile integrity Test Event Stress Wave Conference 2022\_v01”, beschikbaar onder projectnummer 11208020-004.
- [6] Rapport Deltares “Analyse resultaten van metingen in-situ palen”, rapportnummer 11209349-000-GEO-0005, concept.

# A Definities

Van Microsoft Copilot:

- **Precisie:** Dit verwijst naar de mate van herhaalbaarheid of consistentie van metingen. Als je een experiment meerdere keren uitvoert en steeds dezelfde resultaten krijgt, dan zijn je metingen precies. Het gaat dus om de spreiding van de meetwaarden.
- **Nauwkeurigheid:** Dit heeft te maken met hoe dicht een meting bij de werkelijke of ware waarde ligt. Een nauwkeurige meting is er een die weinig systematische fouten bevat en dicht bij de echte waarde ligt.
- **Betrouwbaarheid:** Dit verwijst naar de mate waarin een meetinstrument consistente resultaten oplevert bij herhaalde metingen onder dezelfde omstandigheden. Het is een bredere term die zowel precisie als stabiliteit over tijd omvat.

## B Eigenschappen grond en palen

Deze bijlage beschrijft de belangrijkste eigenschappen van de veldproef. De informatie is mede ontleend aan een verzamelrapport van de informatie [5].

### B.1 Grondeigenschappen

Ter plaatse van elke voorziene paal is in beginsel een sondering uitgevoerd door ingenieursbureau Rotterdam. Deze sonderingen zijn beschikbaar in het dinoloket [4] door te zoeken op de paal coördinaten .

Tabel B.1 Overzicht locaties van de palen.

Paalnummer	x-coördinaat	y-coördinaat
S13	58595.07	438258.97
S14	58596.75	438254.26
S15	58590.36	438257.29
S16	58592.03	438252.58
S17	58585.65	438255.62
S18	58587.32	438250.91
S19	58580.94	438253.95
S20	58582.61	438249.24
S21	58576.23	438252.28
S22	58577.90	438247.56

### B.2 Paaleigenschappen

De palen zijn door verschillende leveranciers geleverd vanuit de beschikbare voorraad. Dit betreft veelal palen die al enige tijd opgeslagen liggen. Bij de selectie is vooral aandacht besteed aan de lengte en de doorsnede. De palen zijn dus niet specifiek voor deze situatie ontworpen en hebben ook verschillende type en lengte wapening. Op basis van de pile id kan mogelijk extra informatie worden ingewonnen.

Tabel B. 2 Data of the piles before driving (Piles 1-2 by Pit Beton Heipalenfabriek, Piles 3-10 by Voton)  
 (\*) data differs from the request to the producer (10.75 m), delivered was 10.50 m, see also 24.

Pile	ile id	Size	Ordered	Date	Tape	Optical	Average
1	000005230601	0,35	17,50	27-7-2022	17,42	17,43	17,43
2	000005230602	0,35	17,50	27-7-2022	17,47	17,57	17,52
3	1201281	0,38	15,25	25-08-2021	15,20	15,30	15,25
4	1200521	0,32	17,75	17-11-2020	17,67	17,70	17,68
5	1201281	0,38	17,50	26-08-2021	17,42	16,56	17,49
6	1201281	0,38	17,50	26-08-2021	17,43	17,50	17,47
7	1201216	0,35	12,00	15-10-2021	12,10	12,08	12,09
8	17058 ?	0,32	12,00	?	11,95	11,98	11,97
9	?	0,35 (*)	10,50 (*)	?	10,45	10,50	10,48
10	1201181	0,32	8,50	13-10-2020	8,43	8,45	8,44

# C Invul formulier prefab palen

11th Stress Wave Conference - Rotterdam

Low strain impact testing of foundation piles - Inter Laboratory Study

Prefabricated piles

version 0,4

Date	
Participant ID	

Assumed wave speed (m/s)	
--------------------------	--

(for the prefab piles)

Test Results (run 1)

Pile No.	Measured length in m	Number of blows (3 minimum)
S13		
S15		
S16		
S17		
S18		
S19		
S20		
S21		
S22		

Test Results (run 2)

Pile No.	Measured length in m	Number of blows (3 minimum)
S13		
S15		
S16		
S17		
S18		
S19		
S20		
S21		
S22		

## D Overzicht ingeleverde resultaten

In deze bijlage staan de ingeleverde resultaten per participant. De afronding van de waardes komen over een met de door de betreffende participant opgegeven afronding: Dit betekent als voorbeeld dat het verschil in notatie 8.10 en 8.1 aangeeft dat de eerste participant wel een nul heeft genoteerd en de tweede participant geen nul heeft genoteerd. Het is onbekend of deze nul daadwerkelijk een afgelezen nummer is, of een aanvulling om te voldoen aan de gestelde eis. Zou er daarentegen 8.11 en 8.1 staan, dan is wel duidelijk dat het laatste cijfer bij de eerste participant een aflezing is.

Tabel D.1 Opgegeven lengtes voor de eerste run van de meting.

Participant	S13A	S15A	S16A	S17A	S18A	S19A	S20A	S21A	S22A
Part a	17	12	9		17	9	14.5	12	18
Part b	17	12	9.6	9.7	9.7	8.2	8	11	16.8
Part c	17.08	11.93	9.027	16.77	16.77	9.24	15.94	11.88	16.77
Part d	18.2	12.4	10.1	17.3	16.8	8.6	15.4	11.5	17.7
Part e	18.6	13	10.5	19.3	18.4	9	16.1	12	18.3
Part f	16.9	12	9.7	15	16.7	8	14.7	11	16.8
Part g	16.9	11.8	9.6	20	16.8	8.1	14.8	10.9	16.7
Part h	17.7	12.6	10.1	1.4	17.6	8.6	15.4	11.3	17.5

Tabel D.2 Opgegeven lengtes voor de tweede run van de meting.

Participant	S13B	S15B	S16B	S17B	S18B	S19B	S20B	S21B	S22B
Part a	18	12.5	10	19.5	17.5	9	15.5	12	18
Part b	17	11.9	9.6	9.7	10.3	8.2	14.8	11.1	16.8
Part c	17.12	11.93	9.77	17.21	16.77	8.27	17.17	11.27	16.77
Part d	18	12.5	10	17.5	17	8.6	15.4	11.5	17.6
Part e	18.6	13.2	10.5	19.3	18.3	9	16.1	12	18.3
Part f									
Part g									
Part h									

# E Terugrekenen naar lengte bepaling

Tabel E.1 Gemiddelde looptijden.

Participant	S13	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22
Part a	3.89	2.72	2.11	4.33	3.83	2.00	3.33	2.67	4.00
Part b	3.91	2.75	2.21	2.23	2.30	1.89	2.62	2.54	3.86
Part c	3.98	2.77	2.19	3.95	3.90	2.04	3.85	2.69	3.90
Part d	4.21	2.90	2.34	4.05	3.93	2.00	3.58	2.67	4.10
Part e	4.04	2.85	2.28	4.20	3.99	1.96	3.50	2.61	3.98
Part f	4.02	2.86	2.31	3.57	3.98	1.90	3.50	2.62	4.00
Part g	4.02	2.81	2.29	4.76	4.00	1.93	3.52	2.60	3.98
Part h	4.02	2.86	2.30	0.32	4.00	1.95	3.50	2.57	3.98
<b>Gemiddeld</b>	4.01	2.81	2.25	3.43	3.74	1.96	3.43	2.62	3.97
<b>Stdev</b>	0.10	0.06	0.08	1.46	0.59	0.05	0.36	0.05	0.07
<b>Varcoef</b>	0.024	0.022	0.034	0.427	0.157	0.026	0.104	0.020	0.018

Tabel E.2 Uit gemiddelde looptijden terug gerekende lengte.

Participant	S13	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22
Part a	17.50	12.25	9.50	19.50	17.25	9.00	15.00	12.00	18.00
Part b	17.00	11.95	9.60	9.70	10.00	8.20	11.40	11.05	16.80
Part c	17.10	11.93	9.40	16.99	16.77	8.76	16.56	11.58	16.77
Part d	18.10	12.45	10.05	17.40	16.90	8.60	15.40	11.50	17.65
Part e	18.60	13.10	10.50	19.30	18.35	9.00	16.10	12.00	18.30
Part f	16.90	12.00	9.70	15.00	16.70	8.00	14.70	11.00	16.80
Part g	16.90	11.80	9.60	20.00	16.80	8.10	14.80	10.90	16.70
Part h	17.70	12.60	10.10	1.40	17.60	8.60	15.40	11.30	17.50
<b>Gemiddeld</b>	17.48	12.26	9.81	14.91	16.30	8.53	14.92	11.42	17.32
<b>Stdev</b>	0.63	0.44	0.37	6.40	2.60	0.39	1.56	0.43	0.63
<b>Varcoef</b>	0.036	0.036	0.038	0.429	0.160	0.046	0.104	0.038	0.036

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)