

# Hei- en trilbaarheid palen en damwanden SBRCURnet Commissie 1694

Roel Brouwer



Mark Peter Rooduijn



## Inleiding

“Heierij is Loterij”, in het verleden was een veelgehoorde kreet wanneer het ging om het voorspellen van het gedrag van palen en damwanden. Schade aan de in te brengen elementen en het niet op diepte kunnen krijgen daarvan zijn bekende voorbeelden, zie Figuur 1.

Daarnaast is er altijd een bepaald risico op hinder en schade in de omgeving van hei- en trilwerk (zie Figuur 2). De problemen en onzekerheden omtrent het gedrag tijdens het inheien en intrillen hebben de afgelopen jaren bij velen deskundigen de nodige hoofdbrekens gekost. De vraag, hoeveel klappen per tocht (de kalenderwaarde) of welke indringsnelheid kan worden verwacht bij een bepaalde grondgesteldheid, is tot op de dag van vandaag nog zeer actueel.

Jarenlang heeft men diverse heiformules ontwikkeld die een verband beschrijven tussen draagvermogen en de heiweerstand. Met een heiformule leek het in principe mogelijk om, op basis van gegevens over de paal, het bezwijkdraagvermogen en het heiblok, de kalenderwaarde te voorspellen. Een verzameling van deze heiformules is grafisch weergegeven in Figuur 3.

Figuur 3 illustreert dat er een enorme spreiding aanwezig is bij de schatting van de heiweerstand op basis van heiformules. De heiformules die

nen dan ook met zeer veel terughoudendheid te worden toegepast voor de beoordeling van de hei- en trilbaarheid en zijn overigens ongeschikt gebleken voor het bepalen van het statische draagvermogen.

Voor het uitvoeren van een hei- of / trilbaarheidspredictie bestaat vandaag de dag een scala van methoden ter beschikking en is enorm veel kennis en ervaring opgebouwd in de afgelopen decennia. Deze kennis en ervaring is echter slechts beschikbaar binnen een kleine groep van deskundigen. De ‘gemiddelde’ ontwerper / adviseur heeft die kennis vaak niet of weet er niet goed mee om te gaan. Het gevolg is dat de risico’s bij het installeren van palen en damwanden onnodig toenemen.

Als gevolg van de toenemende behoefte aan een risicogestuurde aanpak neemt de vraag naar hei- en intrilpredicties de afgelopen jaren toe. Dat is de reden dat de sector heeft gevraagd om alle kennis en ervaring te bundelen in een goed toegankelijk handboek voor de Nederlandse bouwpraktijk op land en offshore.

## Onderzoek en beoordeling van hei- en trilbaarheid

Het ontwerp van paalfunderingen en damwandconstructies houdt, behalve het vaststellen van

het funderingsniveau en het bepalen van de dwarsdoorsnede, ook in dat het werk probleemloos uitgevoerd moet kunnen worden. Zonder van alle uitvoeringsdetails op de hoogte te zijn, moet de ontwerper een redelijk gevoel hebben of zijn ontwerp kan worden uitgevoerd en wat de risico’s hiervan zijn.

Het kunnen voorspellen van het gedrag tijdens heien en trillen is om die reden zinvol, maar vergt echter wel de nodige kennis en ervaring van de ontwerper. Als leidraad voor het uitvoeren van een hei- of trilpredictie is door de commissie een stappenplan opgesteld, waarmee een optimale en eenduidige aanpak mogelijk is. Met deze aanpak kan tevens worden gewerkt aan bevordering van het leerproces.

Voor een goed onderbouwd en uitvoerbaar hei- en trilwerk met een zo laag mogelijk risicoprofiel, zal gedegen onderzoek moeten worden gedaan naar de eigenschappen en het gedrag van de ondergrond, het installatieproces en de keuze van materiaal, materieel en personeel. De omvang en intensiteit van de analyses en het onderzoek naar hei- en trilbaarheid dient primair te worden bepaald op basis van het risicoprofiel dat bij het onderhavige project hoort. Voor vrijwel elk werk zal op een globale of uitgebreide manier een risicoanalyse moeten worden

Figuur 1 - Resultaat van een slecht hei- of trilbare damwand.



Figuur 2 - Resultaat van schade in de omgeving van trilwerkzaamheden.



## Samenvatting

Vanaf het najaar van 2013 is door SBRCURnet Commissie 1694 gewerkt aan het handboek heil- en trilbaarheid van palen en damwanden. Het handboek bevat de huidige beschikbare kennis, praktische aanbevelingen en een stappenplan om te komen tot een zo optimaal mogelijk en eenduidig proces voor

de heil- en trilbaarheid van palen en damwanden.

Naast de theorie is ruim aandacht besteedt aan de rol van de ondergrond en de uitvoeringsaspecten. Met het ontwikkelde handboek is de basis gelegd voor een doordachte risicobeoordeling en een realistische werkwijze.

gedaan. Uit deze analyse zal moeten blijken of het betreffende element goed heil- of trilbaar is en de risico's voor de omgeving acceptabel zijn.

Belangrijke aspecten die in het onderzoek moeten worden meegenomen en beoordeeld zijn:

- **Beheersing van risico's gerelateerd aan heien en trillen.**

De risico's op schade en hinder dienen voor elk project in de ontwerpfase systematisch te worden geïnventariseerd en onderkend [3]. Een juiste inschatting van het benodigde materiaal, materieel en de eigenschappen van de ondergrond is nodig om schade en hinder te voorkomen. Denk aan fysieke schade (paal-

breuk, grote damwandvervormingen, scheuren in en verzakkingen van belendingen) en omgevingshinder (trillingen en geluid). De betrouwbaarheid van de schadeverwachting is direct gerelateerd aan de kwaliteit van de voorspelling die mede door de materieelkeuze en de kennis van de ondergrond wordt bepaald.

- **Beoordeling van de maakbaarheid van het ontwerp.**

Onrealistische funderingsontwerpen kunnen grote financiële risico's met zich mee brengen. Een voorbeeld hiervan is de keuze van te diepe inheiveaus met een grote kans op (zeer) hoge kalenderwaarden met als gevolg

schade aan palen, materieel en omgeving. Ook te pessimistische ontwerpen komen voor, waarbij het ontwerp ten onrechte op voorhand wordt afgekeurd omdat de effecten van het heien of trillen onhaalbaar of ontoelaatbaar werden geacht. Een belangrijke oorzaak van een onrealistisch ontwerp ligt vaak in slechte prognoses, het gebrek aan kennis over de ondergrond en beperkte affiniteit/communicatie met de praktijk [4].

- **Beoordeling van de uitvoerbaarheid van het werk.**

Grondgegevens zijn meestal beperkt en slechts op bepaalde locaties voorhanden. Bij het funderingsontwerp is altijd sprake van een mate van onzekerheid over de ondergrond, waardoor interpolatie of extrapolatie nodig is. Wanneer een betrouwbare en representatieve prognose van het heil- of trilwerk beschikbaar is, kunnen afwijkingen in grondgesteldheid tijdens de uitvoering beter worden geschat en beoordeeld. Bijvoorbeeld lokale variaties in diepteligging van draagkrachtige grondlagen. Op basis van deskundig inzicht kunnen vervolgens tijdig correctieve maatregelen worden getroffen. Dit principe kan ook worden toegepast als 'Observational Method' [5].

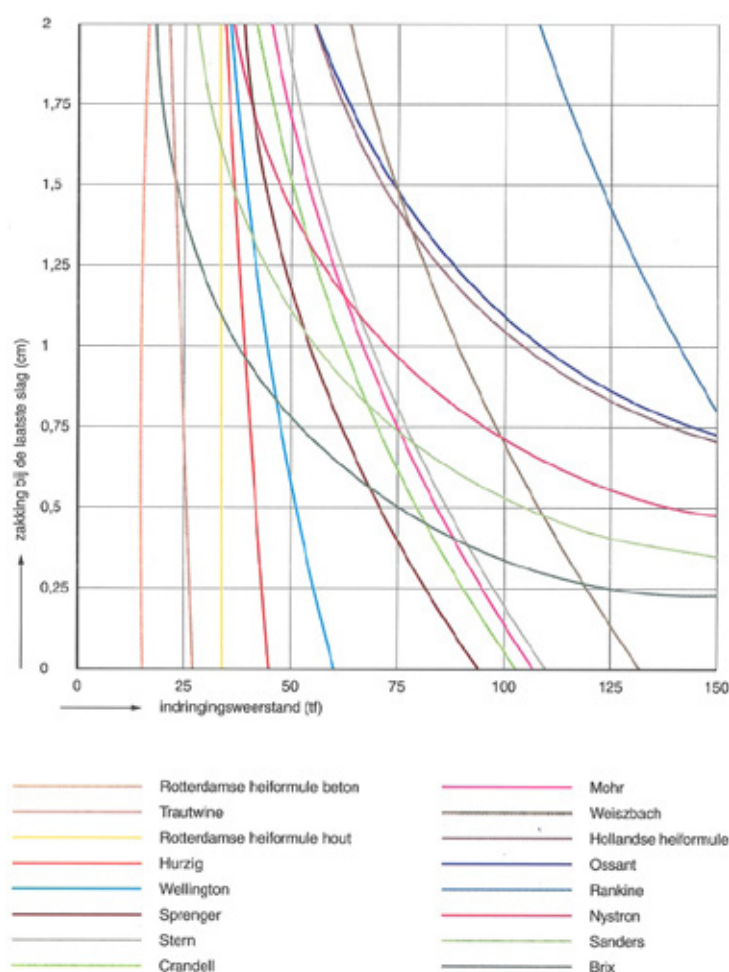
- **Beschikbaarheid van het benodigde materieel**

te denken valt aan beperkt beschikbaar materieel voor zware en/of complexe heiverken of in drukke bouwperiodes. Onverwachte heil- of trilproblemen kunnen dan grote financiële consequenties hebben.

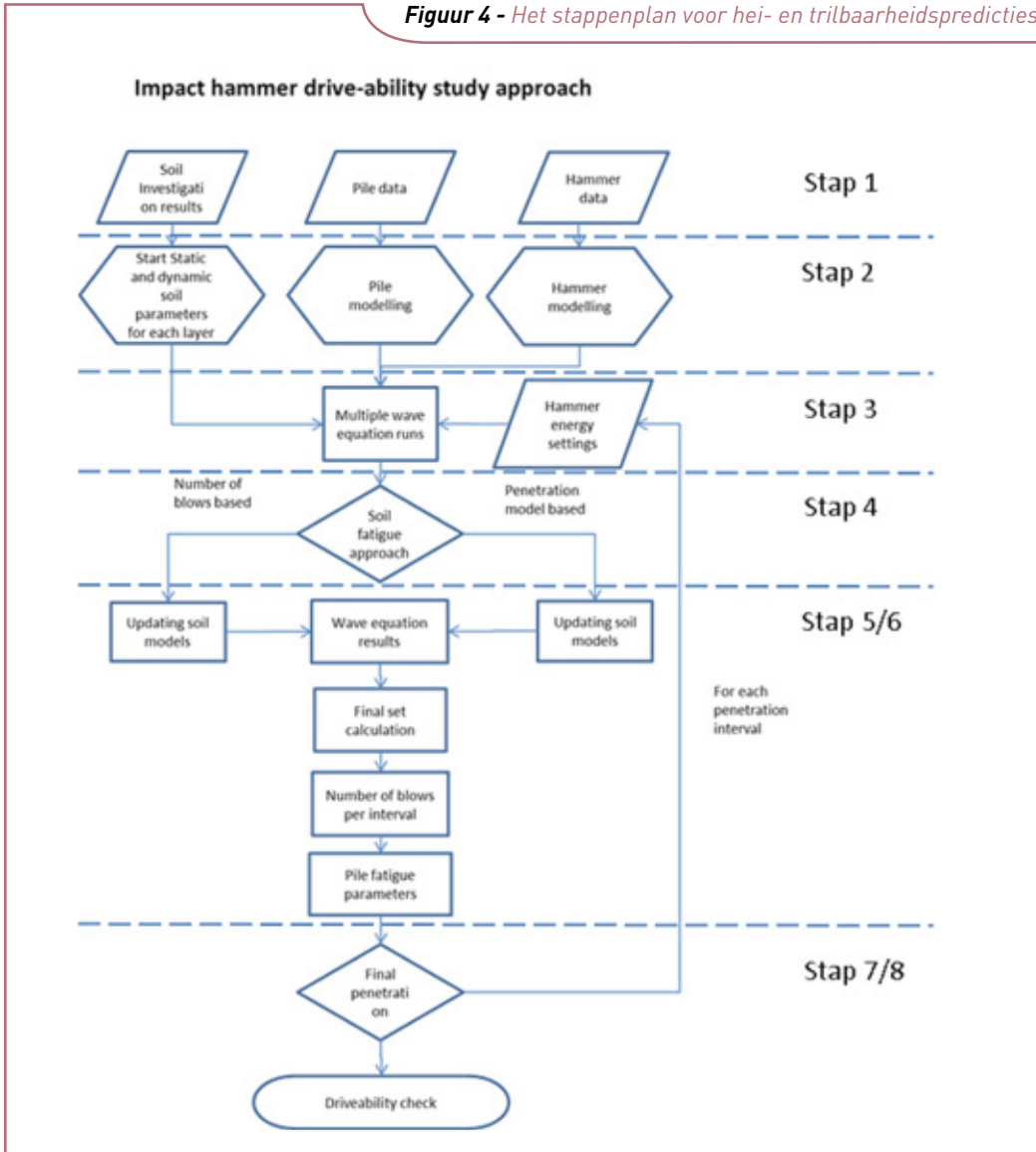
Het maken van een betrouwbare heil- of trilpredictie vereist deskundigheid en ervaring, die alleen kan worden verkregen door enerzijds veel heil- of trilbaarheidspredicties te doen en anderzijds door het inbrengen van de elementen systematisch te analyseren en te beoordelen. Hierbij dient steeds consequent de cyclus van:

- prognose;
- monitoring (van wat wordt werkelijk waargenomen);
- en (post)analyse te worden doorlopen, waardoor een doorlopend leerproces wordt bevorderd.

**Figuur 3 - Het berekende verband tussen paal draagvermogen en heilweerstand** (bron: [1 en 2]). Op de horizontale as de indringweerstand (in ton force) en op de verticale as de zakking bij de laatste slag (cm).



Figuur 4 - Het stappenplan voor hei- en trilbaarheidspredicties.



Indien de hei- of trilbaarheid volgens het handboek is onderzocht, kan men er vanuit gaan dat een realistische werkwijze is gekozen. Uiteraard blijven de onzekerheden, die het bouwen in grond met zich meebrengt, bestaan.

**Geologie en eigenschappen grond**

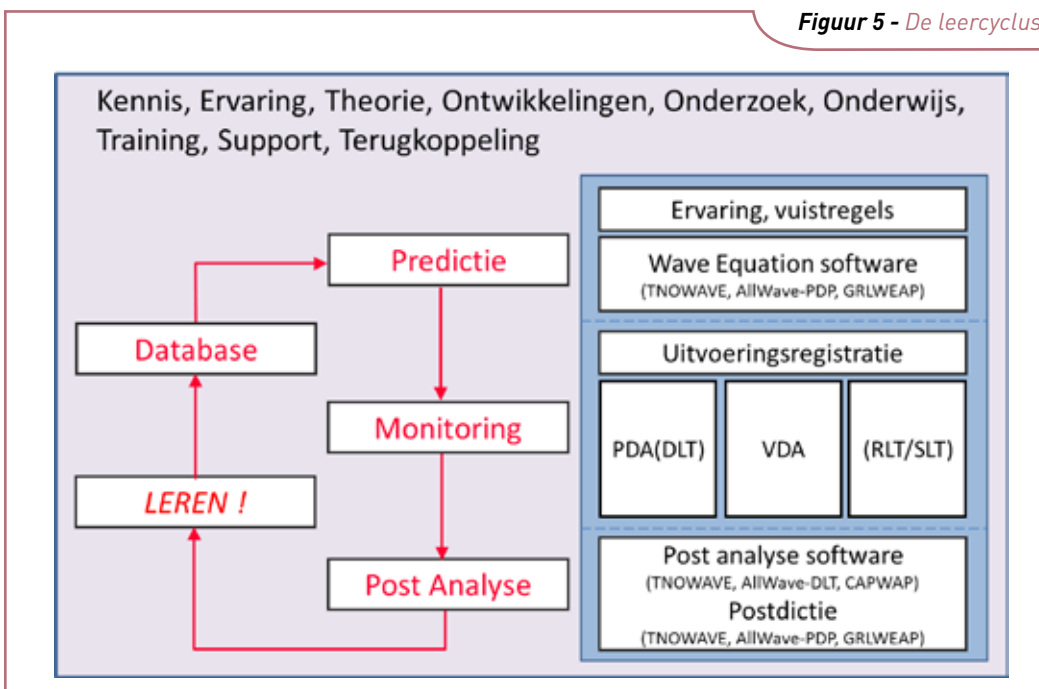
Het gaat bij heien en trillen van palen en damwanden vooral om de grondeigenschappen die de (dynamische) grondweerstand bepalen. Denk aan de dichtheid, consistentie, cohesie en onge-draineerde schuifsterkte, maar ook de korrelverdeling en korrelvorm zijn van belang.

De eigenschappen van grond worden bepaald door het materiaal waaruit ze zijn opgebouwd, de aanwezigheid van grondwater en de wijze waarop ze zijn afgezet. Duinzand is bijvoorbeeld afgezet door de wind en relatief los gepakt terwijl glaciële zanden (eerder belast door landijs) zeer vast gepakt en overgeconsolideerd zijn.

De geotechnische eigenschappen van grond bepalen het grondgedrag (spanning-rek relaties) en spelen daarmee een belangrijke rol bij het begrijpen van de mechanismen die optreden bij heidend of trillend installeren van de palen en damwanden.

In het handboek wordt ruim aandacht besteed aan de eigenschappen van de belangrijkste grondsoorten zand, grind klei, leem en glauconiet (houdend zand), de ontstaansgeschiedenis en het gedrag van deze grondsoorten bij heien en trillen.

Figuur 5 - De leercyclus.



**Aandachtspunten bij damwanden**

De in het handboek beschreven predictiemethoden voor heien en trillen zijn in principe toepasbaar voor palen en damwanden. De benadering voor damwanden is grotendeels identiek aan die voor palen. Specifieke randvoorwaarden die gelden voor damwanden, zoals de wrijvingskracht die als gevolg van slotwrijving optreedt, moeten in de modellering worden meegenomen. Dit kan bijvoorbeeld als toeslag op de grondeigenschappen. Deze kracht is echter van een groot aantal factoren afhankelijk. Daarnaast is de flexibiliteit van de plank (vergeleken met een relatief stijve paal) een extra aandachtspunt.

Naast de uitgebreide hei- en tril predictiemethoden beschreven in het handboek is in CUR-publicatie 166 voor damwanden de ruwe maar eenvoudig toepasbare methode met de z.g. NVAF-PSD grafieken beschikbaar.

Aan de hand van een relatie tussen planklengte

Tabel 1 - Overzicht uitvoeringsrisico's bij paalinstallatie met oorzaak en remedie.

Risico / Incident	Oorzaak	Beheersmaatregel / Remedie
Te verwachten kalender te laag	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grondopbouw anders</li> <li>- Energie blok te hoog</li> <li>- Prognose fout</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nasonderen, herberekenen draagkracht</li> <li>- Met minder energie heien</li> <li>- Check hei analyses / PDA meting</li> <li>- Naheien (na verificatie dat paalpunt daadwerkelijk op stuit staat)</li> </ul>
Te verwachten kalender te hoog	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grondopbouw anders</li> <li>- Energie blok te laag</li> <li>- Prognose fout</li> <li>- Verdichting</li> <li>- Nieuwe mutsvulling</li> <li>- Wateronderspanning (bemaling)</li> <li>- Grondslag droog zand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nasonderen, herberekenen draagkracht</li> <li>- Check werking hamer, zwaardere hamer</li> <li>- Check hei analyses / PDA meting</li> <li>- Check palenplan en volgorde</li> <li>- Verversen op ander moment</li> <li>- Voorboren en fluïderen</li> <li>- Zwaardere hamer (indien beschikbaar en toelaatbaar)</li> <li>- Inwateren, voorboren en/of fluïderen</li> </ul>
Casing niet kunnen trekken (Vibro)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grondopbouw anders, stijve klei</li> <li>- Te veel kleef, inheidiepte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trillend trekken</li> <li>- Toepassen snelslagmodule in blok</li> <li>- Leffer toepassen</li> <li>- Ratio voetplaat/buisschacht vergroten</li> </ul>
Plotseling aflopende kalender	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Paalbreuk</li> <li>- Andere grondslag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Akoestisch doormeten</li> <li>- Nasonderen</li> <li>- Ander inheinniveau kiezen</li> </ul>
Plotseling oplopende kalender	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstakel</li> <li>- Andere grondslag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oorzaak verifiëren.</li> <li>- Nasonderen</li> <li>- Nagaan of de paal kan functioneren</li> <li>- Gebruik Crusher overwegen</li> <li>- Andere paallocatie / inheinniveau kiezen</li> </ul>
Paal(kop)schade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trekspanningen</li> <li>- Te zware hamer</li> <li>- Obstakel</li> <li>- Verkeerde, slechte mutsvulling</li> <li>- Te jonge palen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laagopbouw beschouwen en met minder slappe lagen doorheien</li> <li>- Lichtere hamer kiezen</li> <li>- Gebruik Crusher overwegen</li> <li>- Mutsvulling aanpassen</li> <li>- &gt; 2 weken</li> </ul>
Scheurvorming (trekspanningen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transport -hijzen (prefab)</li> <li>- Doorheien van vast gepakte lagen - tot in slappe laag (reigen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie niveau verlagen</li> <li>- Toepassen van "dode klappen"</li> </ul>
Verlopen van de paal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verdichting door naburige palen</li> <li>- Verkeert stellen van de paal</li> <li>- Obstakels</li> <li>- Verlopende laagopbouw</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Palenplan verifiëren / aanpassen</li> <li>- Werkproces aanpassen, makelaar goed uitlijnen</li> </ul>
Opheien	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Te veel grondverdringing bij grond (paalgroepen) in cohesieve</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Paalstramien aanpassen</li> </ul>
Schade aan de omgeving	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trillingen en/of zettingen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trillingsrisicoanalyse</li> <li>- Monitoring van trillingen en zetting</li> <li>- Bouwkundige opname van de belendingen</li> <li>- Funderingsonderzoek</li> </ul>

en weerstandsmoment kan, op basis van een fictief uniform zandprofiel of 11 sondeerbeelden van verschillende karakteristieke locaties in Nederland, worden geschat of schadevrij installeren haalbaar is.

Men dient bij het hanteren van de grafieken echter de nodige terughoudendheid te betrachten. De moderne damwandplanken worden vanuit economisch oogpunt steeds sterker, stijver en lichter bij het zelfde weerstandsmoment. De hei- en trilbaarheid van een damwandprofiel wordt vooral bepaald door de vormvastheid en

robuustheid van het profiel. Het weerstandsmoment zegt echter niet alles over deze eigenschappen, zodat het weerstandsmoment als enige ingang voor heibaarheidsgrafieken in principe niet correct is. Materiaaldikte, plankbreedte en staaldoorsnede moeten worden meegewogen bij het bepalen van de hei- en trilbaarheid.

#### Het stappenplan

Als leidraad voor het uitvoeren van een hei- of trilpredictie is een stappenplan opgesteld. Het uitgangspunt is dat gebruik wordt gemaakt van

de eendimensionale golftheorie en de daarop geënte programmatuur (Wave equation software). Het stappenplan is schematisch weergegeven in Figuur 4.

Een belangrijk onderdeel van het stappenplan is de leercyclus. Omdat de voor handen zijnde methodieken veelal zijn gebaseerd op ervaring en empirie, is het van belang om de modellen en uitgevoerde predicties te toetsen aan de praktijk. Indien deze toetsing aanleiding geeft tot het bijstellen van de modellen, kan het resultaat worden ingezet voor het vervolg van het project

en voor toekomstige projecten. Dit is de essentie van de leercyclus. Het betreft een zogeheten "double loop" kwaliteitssysteem, dat zal leiden tot een hogere betrouwbaarheid van predicties. De leercyclus is schematisch weergegeven in Figuur 5.

Om tot kwaliteitsverbetering van de predicties te komen, dienen alle stadia van de leercyclus te worden doorlopen. De leercyclus is een wezenlijk onderdeel van het stappenplan.

#### **Uitvoeringsaspecten**

Hoe goed een hei- of trilprognose ook is uitgevoerd en hoe veel tijd er ook aan de voorbereiding is besteedt, de praktijk van het heien en trillen is weerbarstig.

In het handboek is een uitgebreid overzicht gegeven van de aspecten die mogelijk problemen kunnen veroorzaken in de praktijk van het heien en trillen. Tevens zijn oplossingen, aanbevelingen en richtlijnen gegeven om problemen en faalkosten te voorkomen. Om de problematiek kracht bij te zetten zijn praktijkervaringen verzameld.

In veel gevallen is de heterogeniteit van de ondergrond de oorzaak van problemen. Soms zijn het obstakels in de ondergrond die voor afwijkingen van het verwachte werkproces zorgen. Ook een gebrekkige communicatie tussen de betrokken partijen kan uiteindelijk de oorzaak zijn van problemen [4]. De ontwerper en de uitvoerder spreken "elkaars taal" niet. Het komt ook regelmatig voor dat de uitvoerende partij niet vroegtijdig bekend is, waardoor er niet kan worden meegepraat over mogelijke risico's, of dat er geen tijd wordt genomen om een uitvoerende partij bij het ontwerp te betrekken.

In Tabel 1 en Tabel 2 is een overzicht gegeven van vaak voorkomende incidenten / risico's bij het installeren van palen en damwanden, waarbij tevens is aangegeven wat de oorzaken kunnen zijn en welke remedie of beheersmaatregelen wordt aanbevolen.

#### **Tot slot**

In het handboek is zo veel mogelijk bestaande kennis en ervaringen gebundeld. Heien en trillen blijft echter een specifiek vakgebied binnen de geotechniek, waarbij ervaring een zeer

belangrijk aspect is. Zoals in de leercyclus is aangegeven, is het continu verzamelen, goed documenteren en toepassen van die ervaringen van zeer groot belang. Alleen dan kan sprake zijn van een gecontroleerd ontwerp- en uitvoeringsproces.

#### **Literatuur**

1. Handboek paalfunderingen, geprefabriceerde betonnen heipalen in theorie en praktijk, deel 3, 1998, PREPAL, Woerden
2. Grondmechanica, Ir. T.K. Huizinga, Agon/Elsevier 1969
3. Staveren M. van, Geotechniek in beweging, Praktijkids voor risico gestuurd werken, 3de druk, 2011
4. Geo-Impuls, Ontwerp en uitvoering een kloof om te overbruggen, november 2012
5. SBRCURnet/Geo-Impuls publicatie "Handreiking Observational Method" Delft, april 2015, artikelnummer 679.15.

**Tabel 2 - Overzicht uitvoeringsrisico's bij damwandinstallatie met oorzaak en remedie.**

Risico / Incident	Oorzaak	Beheersmaatregel / Remedie
Te veel weerstand bij trillen	- Droog zand - Grondopbouw anders dan verwacht - Te licht trilblok - Te veel slotwrijving - Te dunne wand / deformatie profiel	- Inwateren, voorbereiden ev. i.c.m. cement bentoniet en/of fluïderen - Nasonderen - Zwaarder blok - Extra pull down force / ballast - Makelaar geleid trillen - Nieuwe planken - Wanddikte vergroten (min 6 mm) - Voorboren en fluïderen - (Na)heien i.p.v. trillen
Obstakels	- Funderingsresten, puin e.d.	- Geofysisch onderzoek vooraf - Gebruik van een crusher
Verlopen / uit het slot lopen	- Te veel slotweerstand - Te licht slot - Te brede dubbele planken - Vervorming bij lange profielen	- Robuust slot met de juiste sterkte en stijfheid - Plankbreedte maximaal 1,4 m - Profieldikte minimaal 6 mm - Toepassing slotverklidders
Sloten aan de primaire profielen zitten niet meer op de juiste positie voor de aansluiting met de damwanden	- Draaiing om de lengteas tijdens installeren	- Profiel / paal geleiden - Slotpositie continu - meten
Meeheien van damwandplanken	- Te veel slotwrijving, vervorming profiel	- Reeds geïnstalleerde plank vasthouden of vastlassen
Schade omgeving bij intrillen	- Voortplanting trilling naar gebouwen / apparatuur - Verdichting van zandlagen	- Voorboren, fluïderen - Damwand drukken
Schade omgeving bij uittrillen	- Voortplanting trilling naar gebouwen / apparatuur - Verdichting van zandlagen - Volumeverlies / meetrekken van kleilagen	- Fluïderen - Statisch trekken (indien mogelijk) - 'Reparerend' trekken - Damwand verloren beschouwen of meenemen in constructie
Schade aan de omgeving	- Trillingen en/of zettingen	- Trillingsrisicoanalyse - Bouwkundige opname van de belendingen - Funderingsonderzoek - Monitoring van trillingen en zetting