

**SBPMonitor
Validatie**

Hoofdrapport



SBPMonitor Validatie

Hoofdrapport

ir. R. Stoevelaar

1230372-000

Titel
SBPMonitor
Validatie




Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
TKI Deltatechnologie	1230372-000	1230372-000-GEO-0006- jjjm	64

Samenvatting

GeoConsult heeft een prototype van een monitoring systeem ontwikkeld, waarmee installatiedata van grondverdringende schroefpalen (zonder en met groutinjectie) “*in real time*” verwerkt kunnen worden. Deltares is gevraagd een validatie van het systeem uit te voeren, e.e.a. op basis van aangeleverde informatie van GeoConsult.

Het prototype van SBPMonitor bestaat in deze fase van ontwikkeling uit een aantal modules die nu nog niet interactief kunnen werken. Alvorens het systeem verder te ontwikkelen tot een operatief werkend prototype is door Deltares een validatie uitgevoerd op het prototype in de “werkbank” omgeving. De installatiedata worden voor de validatie nog gedeeltelijk handmatig op de computer via de beschikbare modules door GeoConsult behandeld. De fundamentele werking van SBPMonitor kan op deze wijze beoordeeld worden, als ware het een operationeel werkend systeem. Deltares heeft met een door GeoConsult vrijgegeven prototype van het systeem zelfstandig berekeningen uitgevoerd, waarbij zowel aangenomen invoerparameters zijn toegepast, naast door GeoConsult beschikbaar gestelde parameterwaarden.

Tevens heeft GeoConsult eigen analyses toegevoegd en aanvullende projecten gepresenteerd.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	juni 2018	ir. R. Stoevelaar		ir. D. Pereboom		ing. A.T. Aantjes	
<hr/>							
<hr/>							

Status
definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Leeswijzer	4
3	Algemene systeemeigenschappen volgens beschrijving GeoConsult	5
3.1	<i>Bronvermelding</i>	5
3.2	<i>Voorgesteld gebruik van het systeem (toekomstbeeld)</i>	5
3.3	<i>Kwaliteitscontrole met SBPMonitor</i>	5
3.4	<i>Kwantitatieve beoordeling: berekening van het paal draagvermogen</i>	6
4	Systeemopzet SBPMonitor volgens beschrijving GeoConsult	7
4.1	<i>Bronvermelding</i>	7
4.2	<i>Modules van SBPMonitor</i>	7
4.3	<i>Monitoringdata invoer</i>	7
4.3.1	<i>Registratiesystemen</i>	7
4.3.2	<i>Grondonderzoekdata invoer</i>	8
4.3.3	<i>Manuele data invoer</i>	8
4.3.4	<i>Manuele data verwerking</i>	9
4.4	<i>Dataopslag</i>	10
4.5	<i>Laagidentificatie</i>	10
4.6	<i>IJking vóór en berekening geotechnische eigenschappen tijdens de paalinstallatie</i>	11
4.7	<i>Berekening draagvermogen</i>	11
4.8	<i>Visualisatie</i>	12
5	Beschrijving van de rekenroutine aan hand van patent EP 2348159 A1	13
6	Parameters voor modelleren van virtuele sonderingen in zand	16
6.1	Empirische correlatiefactor ($A_{p;n}$)	16
6.2	Empirische procesfactor ($F_{dyn;n}$)	16
6.3	Empirische procesfactor ($R_{(\tan(\varphi)';n)}$)	16
6.4	Parameter $\tan\varphi'_{voor;n}$	16
6.5	Empirische procesfactor $R_{k;n}$ voor de bepaling van ($K_{h;na;n}$)	16
7	Beoordeling van het systeem - Resultaten validatie werkbankversie SBPMonitor	18
7.1	Inleiding	18
7.2	Analyse en resultaten voor Paal 3	20
7.2.1	Algemeen	20
7.2.2	Analyse Paal 3	20
7.2.3	Resultaten Paal 3 na iteratie	21
7.2.4	Conclusie ijkproces Paal 3	22
7.3	Voorspelling voor Paal 1 en 2	23
7.4	Voorspelling voor Paal 4	23
7.4.1	Analyse Paal 4	23
7.4.2	Conclusie voorspelling Paal 4	25
7.5	Analyse en resultaten voor Paal 5	26
7.5.1	Analyse Paal 5	26
7.5.2	Conclusie voorspelling Paal 5	28

7.6	Analyse en resultaten voor Paal 6	29
7.6.1	Analyse Paal 6	29
7.6.2	Conclusie voorspelling Paal 6	30
7.7	Bruikbaarheid van de voorspelling	31
7.7.1	Invloed van de keuze $K_{h,na}$	31
7.7.2	Statistische vergelijking sondeerwaarden	33
7.8	Testen uitgevoerd door GeoConsult (tekst GeoConsult)	36
7.9	Berekening van de schachtweerstand voor de door Deltares en GeoConsult uitgevoerde testen (tekst GeoConsult)	42
8	Fase 2: Testen van SBPMonitor op uitgevoerde projecten (rapportage door GeoConsult)	43
8.1	Testen Wijdewormer	43
8.1.1	Geologische en geotechnische situatie	43
8.1.2	Beschrijving paalsysteem	43
8.1.3	Bijzonderheden paalinstallatie	44
8.1.4	Resultaten simulatie met SBPMonitor	44
8.1.5	Evaluatie door GeoConsult	46
8.2	Testen Rotterdam	47
8.2.1	Geologische en geotechnische situatie	47
8.2.2	Beschrijving paalsysteem	48
8.2.3	Bijzonderheden paalinstallatie	49
8.2.4	Resultaten simulatie met SBPMonitor	50
8.2.5	Evaluatie door GeoConsult	51
8.3	Testen Amsterdam	52
8.3.1	Geologische en geotechnische situatie	52
8.3.2	Beschrijving paalsysteem	53
8.3.3	Bijzonderheden paalinstallatie	54
8.3.4	Resultaten simulatie met SBPMonitor	55
8.3.5	Evaluatie door GeoConsult	58
8.4	Conclusie door GeoConsult met betrekking tot de procesfactor F_{dyn} en geotechnische parameter $K_{h,na}$	58
9	Evaluatie en conclusie	59
9.1	Evaluatie	59
9.2	Conclusie	63
9.2.1	Kan met het systeem de geotechnische kwaliteit van een grondverdringende schroefpaal beoordeeld worden?	63
9.2.2	Kan de draagkrachtberekening "in real time" worden uitgevoerd?	63
10	Literatuur	64
	Bijlage(n)	
A	Steemopzet SBPMonitor	A-1

1 Inleiding

GeoConsult heeft een prototype van een monitoring systeem ontwikkeld, waarmee installatiedata van grondverdringende schroefpalen (zonder en met groutinjectie) “*in real time*” verwerkt kunnen worden. Deltares is gevraagd een validatie van het systeem uit te voeren, e.e.a. op basis van aangeleverde informatie van GeoConsult.

Het prototype van SBPMonitor bestaat in deze fase van ontwikkeling uit een aantal modules die nu nog niet interactief kunnen werken. Alvorens het systeem verder te ontwikkelen tot een operatief werkend prototype is door Deltares een validatie uitgevoerd op het prototype in de “werkbank” omgeving. De installatiedata worden voor de validatie nog gedeeltelijk handmatig op de computer via de beschikbare modules door GeoConsult behandeld. De fundamentele werking van SBPMonitor kan op deze wijze beoordeeld worden, als ware het een operationeel werkend systeem. Deltares heeft met een door GeoConsult vrijgegeven prototype van het systeem zelfstandig berekeningen uitgevoerd, waarbij zowel aangenomen invoerparameters zijn toegepast, naast door GeoConsult beschikbaar gestelde parameterwaarden. Tevens heeft GeoConsult eigen analyses toegevoegd en aanvullende projecten gepresenteerd.

Het doel/vraagstelling bij de validatie is als volgt:

- Kan met het systeem de geotechnische kwaliteit van een grondverdringende schroefpaal beoordeeld worden?
- Kunnen geotechnische parameters (gerepresenteerd door de virtuele sondering) ter plaatse van de paal tijdens het inbrengen worden bepaald?
- Kan de draagkrachtberekening “*in real time*” worden uitgevoerd?

In het project zijn 2 fasen onderscheiden, waarbij in het project de volgende werkwijze is gevolgd:

Fase 1 Beoordeling van het werkingsprincipe SBPMonitor

- a. Aanleveren informatie en documentatie over het systeem door GeoConsult:
 - GeoConsult heeft een heldere omschrijving van het bedoelde toepassingsgebied van het systeem en gereedschap beschikbaar gesteld.
 - GeoConsult heeft een gedetailleerde beschrijving (rapport) van het systeem beschikbaar gesteld, inclusief hoofdstructuur van de analyses.
 - GeoConsult heeft een overzicht gegeven en de achtergrond van factoren, parameters en toegepaste correlaties.

- b. Beoordeling van het systeem op basis van de doel-/vraagstelling door Deltares via kwantitatieve beoordeling van het project Almere Poort (Schokking en IJnsen, 2014):
 - Berekening van virtuele voor-sonderingen met door GeoConsult vrijgegeven prototype van het systeem.
 - Berekening van een virtuele voor-sondering uit installatie parameters. Terugrekenen van de vóór-sondering bij de referentiepaal en voorspellen van een 3-tal voor-sonderingen op andere plaatsen op het bouwterrein waar echte, originele voor-sonderingen zijn uitgevoerd.
 - Statistische vergelijking van de virtuele voor-sondering met de originele voor-sondering.
 - Vergelijking van uitkomst van een (trek)paalberekening op basis van (vergelijking per diepte-niveau) voor de: originele voor-sondering, de virtuele voor-sondering en uit de in-situ geotechnische data na installatie.

Fase 2 Werking van SBPMonitor voor uitgevoerde projecten

- a. Aanlevering door de aannemingsbedrijven van registratiedata, grondonderzoekdata, ontwerpgegevens, informatie over installatiematerieel en installatieprocedures van 3 uitgevoerde projecten.
- b. Toepassing van SBPMonitor door GeoConsult op de 3 projecten, zodat een beoordeling gemaakt kan worden.
- c. Beoordeling van de resultaten van de 3 uitgevoerde projecten op basis van de doel-/vraagstelling (palen met en zonder grout).

Eindrapportage

Deze eindrapportage is in concept door alle deelnemers beoordeeld en na bespreking door Deltares definitief gemaakt. De eindrapportage omvat:

- Een beschrijving van het monitoringsysteem.
- Validatie van de geotechnische grondslag.
- Validatie van de werking van het systeem.
- Kwantitatieve vergelijking tussen de resultaten van het systeem en vooraf uitgevoerd grondonderzoek.

Ten aanzien van de werkzaamheden en de rapportage kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

(1)

De beschrijving van het systeem in de hoofdstukken 3 en 4 is gebaseerd op door GeoConsult aangeleverde documenten en een openbaar beschikbare patentbeschrijving van het systeem.

(2)

Het artikel van het project Almere-Poort is beschikbaar gesteld als achtergrondinformatie voor het project. De sonderingen zijn digitaal beschikbaar gesteld tezamen met een uitwerking volgens de werkversie V2.5 van de SBPMonitor (“werkbank” prototype).

(3)

Voor achtergrond van de uitgevoerde analyses wordt verwezen naar het volgende document: 1230372-000-GEO-0003-vv7-r-Memo SBPMonitor IJkingen en voorspellingen Almere.

(4)

De hoofdstukken 7.8., 7.9 en 8 zijn aangeleverd door GeoConsult.

2 Leeswijzer

H1	Inleiding.
H3 Fase 1a	Algemene systeemeigenschappen (volgens beschrijving GeoConsult).
H4 Fase 1a	Systeembeschrijving (volgens beschrijving GeoConsult).
H5 Fase 1b	Nadere detaillering aan hand van Patentbeschrijving.
H6 Fase 1b	Parameters van belang.
H7 Fase 1b	Beoordeling van he systeem - Resultaten analyse werkbank versie SBPMonitor (7.8. en 7.9 tekst GeoConsult).
H8 Fase 2	Testen van SBPMonitor op uitgevoerde projecten (tekst GeoConsult).
H9	Evaluatie en Conclusie.

3 Algemene systeemeigenschappen volgens beschrijving GeoConsult

3.1 Bronvermelding

*De navolgende tekst (cursief) in dit hoofdstuk is aangeleverd door GeoConsult. Opmerkingen van Deltares zijn in de tekst **regulier**, **vet** aangegeven.*

3.2 Voorgesteld gebruik van het systeem (toekomstbeeld)

Bij het in de grond schroeven van grondverdringende schroefboorpalen worden installatieparameters, zoals aandrukkkracht, boormoment en indringsnelheid geregistreerd. Met het systeem SBPMonitor worden uit deze installatieparameters in "real time" geotechnische parameters afgeleid, mede op basis van vooraf voor het funderingsontwerp uitgevoerd grondonderzoek (sondering). Het is de bedoeling dat met de zo bepaalde in-situ geotechnische condities van iedere ingeschroefde paal een kwaliteitscontrole van de geïnstalleerde palen kan worden uitgevoerd. Tevens zal op ieder bereikt paalpuntniveau een kwantitatieve beoordeling van het schachtwrijvingsdraagvermogen uitgevoerd kunnen worden.

3.3 Kwaliteitscontrole met SBPMonitor

Uit de installatieparameters wordt met SBPMonitor tijdens het inschroeven een virtuele sondering worden afgeleid die vergeleken kan worden met de vooraf-sonderingen, zoals die uit het grondonderzoek voor het funderingsontwerp beschikbaar zijn. Hierbij kunnen ten aanzien van de geotechnische kwaliteit van de paal de volgende aspecten beoordeeld worden:

- De dikte en conusweerstand van lagen boven de voorziene laag waarin gefundeerd moet worden conform het funderingsontwerp.*
- De bovenkant en conusweerstand van de laag waarin conform het funderingsontwerp gefundeerd moet worden tot aan het bereikte paalpuntniveau.*

Op basis van deze gegevens wordt kwalitatief beoordeeld, door het maken van een vergelijking met de dichtst bij liggende sondering(en) uit het grondonderzoek, of de paal minimaal voldoet aan de geotechnische vereisten (conusweerstand), waarvan bij het ontwerp voor de schachtwrijving vanuit is gegaan. Een gereedschap voor het uitvoeren van deze beoordeling door de machinist op de boormachine kan bestaan uit een presentatie op LCD scherm van de ontwikkelde virtuele sondering samen met de naastliggende sondering(en) in één beeld. Bij afwijkingen, in positieve, dan wel in negatieve zin, kan er dan door de machinist gereageerd worden. Ofwel kan de paal op een hoger niveau dan het geplande funderingsniveau beëindigd worden, met inachtneming van het berekende paalschachtdraagvermogen (zie 4.6 en 4.7), dan wel dient het paalpuntniveau naar een dieper niveau gebracht te worden. Voor beide te nemen beslissingen door de machinist zal overleg met de verantwoordelijke geotechnische ingenieur plaats kunnen vinden. Het is de bedoeling, dat in de definitieve operationele versie van het systeem de uitwisseling van de voor dergelijke beslissingen noodzakelijke technische informatie tussen machine en uitvoering/ontwerp verantwoordelijken via een GSM verbinding mogelijk wordt gemaakt.

Andere parameters, die nog niet in het prototype van SBPMonitor geregistreerd worden, maar die wel invloed hebben op de paalkwaliteit zijn de druk van eventueel bij de paalinstallatie toegepaste groutinjectie en het volume grout per tijdseenheid. In een aantal van de bestaande registratiesystemen worden deze parameters al geregistreerd.

3.4 **Kwantitatieve beoordeling: berekening van het paal draagvermogen**

Na het maken van de eerste (technische) paal ter plaatse van één van de sonderingen uit het grondonderzoek kunnen de monitoringsgegevens worden geïjkt met de vooraf uitgevoerde sondering en de ijkwaarden kunnen worden gebruikt voor een voorspelling van een andere paal aan de hand van de inboorgegevens.

Een alternatieve optie kan zijn, om vóór de installatie van de palen, de ijking bij alle voor het grondonderzoek verrichte sonderingen uit te voeren en dan daaruit gemiddelde ijkingsfactoren vast te stellen. **(noot: dit na het maken en ijken van een eerste fase palen direct bij sonderingen)**. Bij het eerste gebruik van een operationele versie van SBPMonitor lijkt dit een realistische optie. Een beoordeling van de eventuele variatie van de ijkingsfactoren over de bouwplaats behoort dan tot de mogelijkheden.

Per diepteniveau wordt uit de ontwikkelde geotechnische parameters langs de paalschacht berekend.

De numerieke waarde van het resultaat van de berekening voor het toelaatbare paalschachtdraagvermogen, op het betreffende niveau waar de paalpunt zich dan bevindt, zal steeds zichtbaar zijn voor de machinist op het LCD scherm, samen met de virtuele sondering en de sondering(en) uit het grondonderzoek.

4 Systeemopzet SBPMonitor volgens beschrijving GeoConsult

4.1 **Bronvermelding**

De navolgende tekst (cursief) in dit hoofdstuk is aangeleverd door GeoConsult. De tekst beschrijft de beoogde opzet van SBPMonitor als operationeel prototype.

Voor het huidige, "werkbank" prototype en opmerkingen van Deltares is de tekst **regulier, vet** aangegeven

4.2 **Modules van SBPMonitor**

De systeemopzet is weergegeven in het stroomschema in Bijlage 0.

De modules waar SBPMonitor uit bestaat hebben de functies:

- *Monitoringdata invoer.*
- *Grondonderzoekdata invoer.*
- *Manuele data invoer.*
- *Manuele data verwerking.*
- *Dataopslag.*
- *Laagidentificatie.*
- *IJking vóór en berekening tijdens paalinstallatie.*
- *Berekening schachtdraagvermogen.*
- *Visualisatie.*

4.3 **Monitoringdata invoer**

4.3.1 **Registratiesystemen**

Voor de werking van het systeem zijn de geregistreerde aandrukkracht (pull-down), fase van de validatie, wordt alleen de aandrukkracht in de analyse gebruikt.

Deze parameters worden door de drie belangrijkste bij diverse aannemersbedrijven in gebruik zijnde systemen geregistreerd. Deze systemen zijn: Woltman, Tomer en Gampert & Hatlapa (G & H). Naast de direct in SBPMonitor te gebruiken parameters wordt een reeks andere parameters vastgelegd, zoals weergegeven in Tabel 4.1.

Procesparameter	Woltman	Tomer	G & H
Datum	x	x	x
Tijd	x	x	x basis in s
Diepte	x basis in m	x basis in m	x
Aandrukkkracht (pull down)	x	x	x
Boormoment	x	x	x
Toerental	x	x	x
Optrekkkracht (pull up)	x	x	
Groutdruk	x		
Groutvolume	x		
Scheefstand standbuis			x
..... ?			

Tabel 4.1 Registratie van parameters van de machine bij drie verschillende systemen (Woltman, Tome, G & H)

De sensoren op de boormachines (ICP's) leveren een analoog elektrisch signaal van 4-20 mA. Dit signaal wordt middels een PCL (Programmable Local Computer) omgezet naar een digitaal signaal. Alle genoemde registratiesystemen hebben intern een dergelijke PLC voor deze omzetting.

Voor de invoer van digitale data in SBPMonitor zijn twee opties:

1. Het digitale signaal uit de diverse systemen overnemen en invoeren in SBPMonitor. Dit vereist het bouwen van een uitvoer voorziening hiervoor in de bestaande systemen en een programmering in de PLC's. Het is de vraag of dat praktisch mogelijk zal zijn.
2. Het directe gebruik van de ICP signalen en de verwerking daarvan in een aan de SBPMonitor toe te voegen PLC. Dit zal extra kosten voor het complete systeem betekenen.

4.3.2 Grondonderzoekdata invoer

Digitaal beschikbare data uit het grondonderzoek, boringen en sonderingen, zullen in deze module ingelezen kunnen worden.

De sonderingen en boringen worden ingelezen in GEF-formaat.

NB 1. In het huidige prototype wordt, gebruikmakend van de relatie tussen Q_c en wrijvingsgetal f_s de grondsoort bepaald. De grondsoort wordt op basis van NEN 6740, Tabel 1 verbonden met een droog en verzadigd volume gewicht (γ_d en γ_s). In het huidige prototype wordt het grondwaterniveau handmatig ingevoerd.

4.3.3 Manuele data invoer

Data betreffende de paal: paal- en puntdiameter, wanddikte buis, totale lengte buis en eigengewicht buis worden in de toekomst handmatig per project ingevoerd. Tevens worden de randvoorwaarden voor de draagkracht van de paalschacht conform de toe te passen norm hier ingevoerd.

NB 2. In het werkbank prototype wordt nog geen berekening van de draagkracht van de paalschacht uitgevoerd.

Geotechnische parameters als horizontale gronddrukcoëfficiënt (K_h), indien bekend, bijvoorbeeld voor overgeconsolideerde lagen, en procesparameters als de correctiefactor voor de schachtwrijving (F_{dyn}) en de verandering van de $tg\phi$ van het zand ($R_{tg\phi}$), indien bekend van andere locaties, kunnen hier manueel ingevoerd worden.

NB 3. In het beoordeelde prototype wordt $R_{tg\phi}$ in het programma berekend (met een voor project Almere vastgestelde relatie aan de hand van de conusweerstand). Dergelijke relaties met het boorproces van grondverdringende schroefboren zijn naar kennis van Deltares niet eerder gepubliceerd. De hoek van inwendige wrijving van zand is in principe een functie van de dilatatiehoek en deze is spanningsafhankelijk. Een theoretische achtergrond voor een dergelijke relatie zou nog moeten worden ontwikkeld.

4.3.4 Manuele data verwerking

Interpretatie van sonderingen ten behoeve van een indeling in lagen, die noodzakelijk is voor de laagherkenning binnen de ijking- en berekeningsmodule, kan in deze module uitgevoerd worden. Een laagovergang wordt gevonden door binnen een opgegeven zoektraject te zoeken naar verschillen in conuswaarden.

In de werkbankversie is deze zoekmodule reeds opgenomen.

Modules uit 4.2.2 t/m 4.2.4 zullen voor het operationele systeem in één samengestelde module geplaatst worden, waarin de “voorbereidingsfase” van de uitvoering van een project plaats kan vinden. Functies als het genereren van verticale doorsneden door boringen en sonderingen, om een adequate laagindeling vast te stellen, en van een beeld van de bouwplaats met sonderingen en locaties van de te installeren palen zullen hierin ontwikkeld worden. Er wordt overwogen om hier een functie in te bouwen die een 3D-beeld van het verloop van de laagindeling kan geven, om deze met de posities van de palen te kunnen vergelijken ten behoeve van 3.2.

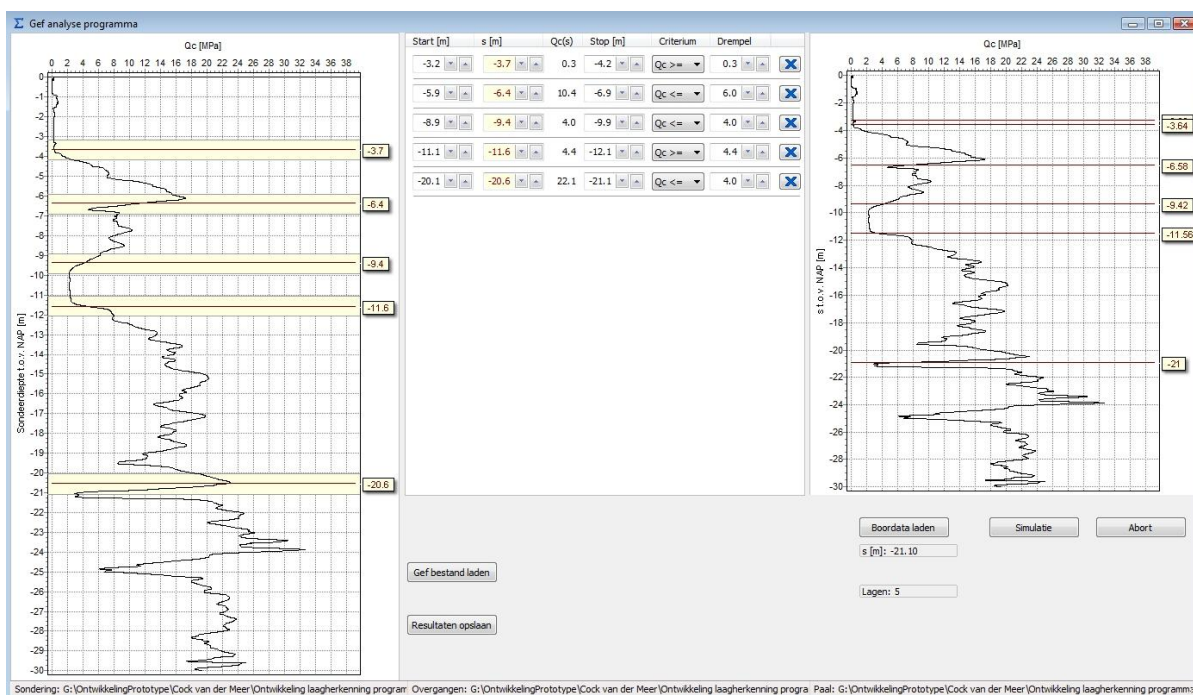
Deze “voorbereidingsfase” zal typisch in de kantooromgeving voor projectvoorbereiding en/of ontwerp uitgevoerd worden. De resultaten kunnen via vaste datadragers, dan wel via een GSM verbinding naar het SBPMonitor systeem op de boormachine overgebracht worden.

4.4 Dataopslag

In de centrale opslag module worden alle invoerdata en data die het resultaat zijn van berekeningen opgeslagen.

4.5 Laagidentificatie

De virtuele sondering ($q_{c,virt,i}$) geeft een beeld te zien dat vergelijkbaar is met de vooraf in het grondonderzoek gemaakte sonderingen. Gebaseerd op deze sonderingen wordt tijdens de voorbereidingsfase voorafgaand aan een analyse met de berekeningsmodule een indeling gemaakt in lagen op basis van overeenkomsten in sondeerpatroon en op grond van bekende geologische en geotechnische eigenschappen. De dieptevariatie van de overgangen en de kenmerken van de laagovergangen worden hierbij tevens aangegeven (zie Bijlage 1 en Figuur 4.1). Deze functie is nu in een aparte module geprogrammeerd.



Figuur 4.1 Schermafdruc Laagidentificatie

In de links getoonde sondering in Figuur 4.1 worden de laagovergangen en de eigenschappen van de laag overgangen aangegeven, zoals dat in de voorbereidingsfase plaats zal kunnen vinden. De rechterfiguur geeft de simulatie van het zoeken van de laagovergangen in de maagdelijke sondering. Vooraf moeten de betreffende geologische grondlagen door een deskundige worden gedefinieerd. De exacte diepten van de laagovergangen worden door de module vastgesteld op grond van een zoekgebied met criteria voor de conusweerstand.

NB 4. Vooraf moet met geologische kennis worden vastgesteld of de betreffende grondlagen wel op de specifieke locatie van de voorspelling voorkomen.

4.6 **IJking vóór en berekening geotechnische eigenschappen tijdens de paalinstallatie**

De berekeningsmodule wordt toegepast bij de eerste paal van het project, en tevens bij de palen die het dichtst bij de volgende sonderingen staan. De module wordt gebruikt voor de ijking en de vaststelling van de correlatiefactor A_p (zie hoofdstuk 5 voor nadere uitleg).

*Een alternatieve optie kan zijn, om vóór de **grootschalige** installatie van de palen in maagdelijke grond plaatsvindt, de ijking eerst bij alle voor het grondonderzoek verrichte sonderingen uit te voeren en dan een gemiddelde A_p vast te stellen. Bij het eerste gebruik van een operationeel systeem van SBPMonitor lijkt dit volgens GeoConsult een realistische alternatieve optie. Een beoordeling van de eventuele variatie van A_p -waarden over de bouwplaats behoort dan tevens tot de mogelijkheden.*

Vervolgens worden in de berekeningsmodule de virtuele sondeerweerstand en de in-situ geotechnische eigenschappen berekend tijdens het inschroeven van de palen in maagdelijke grond.

Bij het inschroeven van de paal kan door de machinist de verkregen virtuele sondering worden vergeleken met de dichtst bijliggende sondering(en) uit het grondonderzoek. Afwijkingen, lagere of hogere waarden, kunnen door hem beoordeeld worden.

4.7 **Berekening draagvermogen**

Uit de ontwikkelde in-situ geotechnische gegevens en uit het uitgevoerde grondonderzoek kan in dit deel van de berekeningsmodule de paal draagkracht van het schachtaandeel berekend worden (zie 3.2).

Deze waarde kan dan steeds vergeleken worden met de voor het ontwerp als uitgangspunt vastgestelde minimaal aan te houden waarde.

In geval van afwijkende waarnemingen bij 4.5 en/of 4.6 kan door de machinist via een GSM verbinding door de verantwoordelijke geotechnisch ingenieur meegekeken worden en kunnen in “real time” beslissingen worden genomen over hoe de machinist dient te handelen in de gegeven situatie.

NB 5. De virtuele sondering wordt geproduceerd tot de actuele diepte van de paalpunt; over dit traject zijn inboorgegevens beschikbaar waarmee een virtuele sondering wordt geproduceerd. Voor het traject onder paalpuntniveau kunnen geen virtuele sondeerwaarden worden bepaald, omdat over dit traject geen inboorgegevens worden verkregen. Het is daarom niet mogelijk de punt draagkracht voor de individuele paal op basis van de virtuele sondering te berekenen.

4.8 Visualisatie

De visualisatie is vereist in alle stappen van het paalinstallatie proces: de "voorbereidingsfase", de ijking en het inschroeven van de paal zelf. Voor de hierboven beschreven acties zullen in een later stadium van de ontwikkeling van het prototype tot operationeel systeem verschillende modes gedefinieerd worden, waarin met tabellen en grafische presentaties de opgeslagen en geïnterpreteerde data zichtbaar gemaakt en beoordeeld kunnen worden.

5 Beschrijving van de rekenroutine aan hand van patent EP 2348159 A1

Opmerkingen van Deltares zijn in de tekst **regulier, vet** aangegeven.

(1)

De conusweerstand voor paal P ($q_{c;P;voor;n}$) op diepte n kan worden gesimuleerd uit de kracht die de paalpunt tijdens inboren op de grond uitgeoefend ($P_{net;n}$) en een empirische correlatiefactor ($A_{p;n}$). De kracht aan de paalpunt ($P_{net;n}$) is de kracht die nodig is om een zakking van de paalpunt te veroorzaken.

NB 6. Uitgangspunt van de SBP analyse is kracht gestuurd verdringingsproces; de benodigde kracht is bij grondverdringend schroefboren is mede een functie van het transportproces van het verdrongen materiaal

De invloed van het boorproces op de dynamische wrijving langs de paalschacht wordt in rekening gebracht met de horizontale gronddrukcoëfficiënt ($K_{h;na;n}$ -waarde) en de verandering van $\tan \varphi$ ($R_{tg\varphi}$) en de reductiefactor voor het dynamische proces F_{dyn} .

$$q_{c;P;voor;n} = A_{p;n} * (P_{netto;n}/A)$$

In de testfase van het "werkbank" prototype is ($A_{p;n}$) middels een bewerking in het EXCEL programma voor ieder gedefinieerde laageneheid vastgesteld en handmatig, met een daarvoor gemaakt scherm "window", ingevoerd. In het operationele prototype zal deze verwerking in "real time" binnen het systeem uitgevoerd worden. A is het oppervlak van de paalpunt.

(2)

De kracht op de paalpunt ($P_{net;n}$) is het verschil tussen neerwaartse kracht op de paal (P_{brut}), pull-down inclusief het netto (correctie voor grondwaterdruk) gewicht van de paal en boormotor, en de wrijving langs de paal tijdens inboren ($P_{dynfrictioncum}$). ($P_{dynfrictioncum}$) is gelijk aan 0 bij start boren aan het maaiveld. Het gewicht van de boormotor is niet opgenomen in de berekening, omdat deze niet onafhankelijk van het ophangmechanisme aan de boorstelling kan bewegen.

$$P_{netto;n} = P_{bruto} - P_{dynwrijvcum;(laag\ 1 + \dots + (n-1))}$$

(3)

De wrijving langs de paalschacht in de diverse grondlagen wordt berekend met de verticale effectieve spanning ($\sigma'_{v;n}$), de coëfficiënt voor horizontale gronddruk ($K_{h;na;n}$) en de wandwrijvingshoek ($tg(\varphi_{na;n})$).

Het subscript $_{na}$ geeft aan dat de waarde wordt toegepast inclusief het effect van de installatie van de paal. Het subscript $_{voor}$ geeft aan de waarde voorafgaand aan de installatie van de paal.

De cohesie (c'_n) is voor zand in het algemeen afwezig. Voor cohesieve lagen wordt gebruik gemaakt van de adhesie ($f_{adh;n}$) tussen de grond en de paal.

De dynamische component van de wrijving tussen grond en paal wordt ingevoerd door de empirische procesfactor $F_{dyn;n}$ in de formule voor $P_{dynwrijv;n}$.

$$P_{dynwrijv;n} = \alpha * L_{interval} * ((\delta'_{v;n} * K_{h;na;n} * \tan(\varphi'_{na;n}) + c'_n) * F_{dyn})$$

Voor cohesieve lagen geldt $\varphi=0$. Er wordt een standaard relatie tussen de conusweerstand $f_{ad;na}$ toegepast. De sterkte van deze lagen is over het algemeen zeer beperkt. δ'_v is de verticale korrelspanning. α is de oppervlakte van de buitenzijde van de casing per lengte-eenheid.

$K_{h;na;i}$ is de horizontale gronddruk coëfficiënt na de opspanning van de grond ten gevolge van de installatie van de paal en is specifiek voor de configuratie van de punt en de geologische en geotechnische eigenschappen en mogelijke overconsolidatie van de laag. Deze waarde moet ondermeer ingeschat worden aan de hand van bij eerdere projecten uitgevoerd grondonderzoek na het installeren van het specifieke type palen (na-sonderingen).

Het is nu nog niet duidelijk hoe de $K_{h;na;n}$ en de $R_{tg\varphi}$ vast gesteld kunnen worden na de ijking. Op dit moment is er in het programma een koppeling gemaakt tussen $R_{tg\varphi}$ en de conusweerstand. De $K_{h;na;n}$ wordt geschat en handmatig ingevoerd. Er zijn volgens GeoConsult aanwijzingen, dat er een relatie bestaat tussen $R_{tg\varphi}$ en $K_{h;na;n}$. Die relatie zal verder ontwikkeld dienen te worden aan de hand van project resultaten.

*$R_{(\tan(\varphi)';n)} * \tan(\varphi'_{voor;n}) = \tan(\varphi'_{na;n})$. $\tan(\varphi'_{voor;n})$ wordt berekend volgens de relatie zoals voorgesteld door Robertson&Campenella (1983) als functie van de conusweerstand. De procesfactor $R_{(\tan(\varphi)';n)}$ en de relatie met andere parameters (conusweerstand uit na-sonderingen) zijn voorlopig gebaseerd op resultaten van paalproeven bij Almere-Poort (Schokking en Jnsen, 2014)*

NB 7. De verwerking van de gegevens van dit project is niet beschikbaar gesteld. De achtergrond van de relatie is niet bekend.

(4)

$A_{p;n}$ en F_{dyn} worden bij eerste paal gekozen en gevarieerd naar boven en beneden, daarna eventueel manuele bijstelling van $K_{h;na;n}$. Dit geeft nieuwe waarde voor $A_{p;n}$. Met de nieuwe waarde voor $A_{p;n}$ wordt opnieuw een ijking uitgevoerd.

NB 8. Een visuele vergelijking van het sondeerbeeld is nodig om de beslissing tot aanpassing te kunnen maken.

(5)

Berekening van draagkracht voor het schachtaandeel kan worden uitgevoerd volgens NEN 9997-1:2016. Voor de bepaling van de waarde voor de wrijving langs de paalschacht zijn vooralsnog twee opties:

$$\text{Optie 1: } R_{s;cal;max;i} = O_{s;\Delta L;gem} * \int_{\Delta L} q_{s;max;z,i} * dz$$

Optie 2: Berekening volgens de Slip-formule

Hierbij kan direct gebruik worden gemaakt van:

$$R_{s;cal;max;i} = P_{dynwrijvcum;l} / F_{dynwrijv;i}$$

NB 9. De SBPMonitor is opgebouwd volgens de leer der mechanica, hetgeen overeenkomt met de gangbare geotechnische praktijk.

6 Parameters voor modelleren van virtuele sonderingen in zand

De volgende parameters spelen een rol in de voorspelling van een na-sondering volgens de rekenroutine in Hoofdstuk 5.

Opmerkingen van Deltares zijn in de tekst **regulier, vet** aangegeven.

6.1 Empirische correlatiefactor ($A_{p;n}$)

De factor ($A_{p;n}$) kan empirisch worden bepaald op basis van een ijking aan een sondering. De eerste paal (en palen in de nabijheid) worden gebruikt om met de vooraf-sondering de factor A_p middels een tussencorrelatiefactor $A_{pfactor}$ te bepalen.

$$A_p = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_{na} \cdot F_{diepte} / A_{pfactor}$$

F_{diepte} waarde groter dan 1 (voor graduele verandering van verdringings- en/of bezwijkmechanisme). $A_{pfactor}$ is een functie van P_{netto} .

NB 10. De dieptefactor F_{diepte} wordt wel gebruikt in de werkbankversie. Er zijn geen regels bekend voor het vaststellen van de waarde van deze parameter. De gehanteerde waarde is niet bekend.

A_p heeft geen theoretische achtergrond, maar moet worden gezien als zuiver empirische correlatiefactor tussen de puntspanning van de paal tijdens het boorproces en de conusweerstand.

6.2 Empirische procesfactor ($F_{dyn;n}$)

De factor wordt empirisch bepaald op basis van een sondering.

F_{diepte} en F_{dyn} worden bij eerste paal gekozen en gevarieerd van boven naar beneden, daarna eventueel manuele bijstelling van $K_{h;na}$.

NB 11. Een visuele beoordeling van de voorspelde sondering in relatie met de vooraf-sondering is nodig.

In de toekomst kan $F_{dyn;n}$ worden gebaseerd op empirische waarden voor bepaalde geologische/geotechnische lagen en boor- en boorpunt configuratie.

6.3 Empirische procesfactor ($R_{(\tan(\varphi')_n)}$)

De waarde is specifiek voor de configuratie van de boor- en boorpunt en de geologische en geotechnische eigenschappen van de laag. Deze waarde moet uit eerdere projecten bekend zijn (worden ingeschat) eventueel met na-sonderingen langs het specifieke paaltype.

6.4 Parameter $\tan \varphi'_{voor;n}$

Bepaald uit vooraf-sondering en correlatie Robertson & Campanella (1983) Part I, Figuur 6.

6.5 Empirische procesfactor $R_{k;n}$ voor de bepaling van ($K_{h;na;n}$)

Volgens patentbeschrijving wordt de verandering van de horizontale gronddrukcoëfficiënt vastgesteld via een empirische procesfactor $R_{k;n}$.

NB 12. Volgens de publicatie Almere is het in principe niet mogelijk om K_h uit de beschikbare voor- of nasonderingen af te leiden en daarom is $(K_{h,na;n})$ voor project Almere afgeleid uit de proefbelastingsresultaten.

De waarden zijn afhankelijk van de initiële waarden voor K_h en dichtheden van de verschillende geologische laageenheden. Daarnaast zijn de waarden afhankelijk van het paaltype, de configuratie van de paalpunten, het boormoment M en de aandrukkracht P . Dit betekent dat de uitvoeringsefficiëntie voor alle palen in het project gelijk moet zijn.

7 Beoordeling van het systeem - Resultaten validatie werkbankversie SBPMonitor

7.1 Inleiding

In het kader van de validatie van het systeem is door GeoConsult een werkbankversie van SBPMonitor beschikbaar gesteld om daarmee de werking van het systeem voor een concreet uitvoeringsproject te kunnen beoordelen. Voor het project Almere zijn sondeergegevens en boorgegevens voor 6 grondverdringende schroefpalen (Hekpalen) beschikbaar gesteld en er zijn door GeoConsult ijkfactoren voor het paalpuntgedrag afgeleid voor de diverse geologische lagen ter plaatse van het project. De verstrekte ijkfactoren zijn bedoeld toegepast te worden voor een range van dynamische wrijvingsfactoren d.w.z. een dynamische wrijving (F_{dyn}). Voor de testen van SBPMonitor door GeoConsult lagen deze waarden tussen 3% en 15 % van de lokale statische wrijving.

Het systeem maakt gebruik van de axiale aandrukkracht tijdens het inboren van de paal.

Voor de ijking is het nodig om aannamen te doen voor de reductie van de lokale schachtwrijving tijdens het boren (F_{dyn}) en voor de horizontale gronddrukcoëfficiënt inclusief het effect van het paalinstallatieproces ($K_{h,na}$).

De factor $K_{h,na}$ is voor het project Almere afgeleid uit proefbelastingen. Deze waarde varieert per geologische laag tussen 2 en 1. Als achtergrond document over het Almere project is alleen een publicatie uit Geotechniek beschikbaar. Deze publicatie is echter niet transparant in de uitgevoerde analyse en er zijn een aantal aanmerkingen te maken. De range van toegepaste $K_{h,na}$ -waarden lijkt echter niet onlogisch en wordt bevestigd door eerder onderzoek naar grondverdringende schroefpalen (Van Impe & Peiffer, 1997 en Huybrechts & Maertens, 2004). Gezien de onzekerheden over de juiste keuze voor $K_{h,na}$, is door Deltares een vaste $K_{h,na}$ -waarde van 1,2 gekozen bij de verdere analyse. In paragraaf 7.7.1 wordt ingegaan op deze keuze voor $K_{h,na}$.

Het gebied in Almere wordt gekenmerkt door matig gepakte zanden met daarin lenzen van zeer los gepakt zand. In het sondeerbeeld van Paal 3 komt een dergelijke lens voor. Voor de overige paallocaties lijkt het niet waarschijnlijk dat de lens zich daar ook voordoet. Daarom is in de uitwerking voor deze palen door Deltares ook rekening gehouden met afwezigheid van dergelijke lenzen.

De volgende analyses zijn uitgevoerd:

(1)

De gevoeligheid voor de waarde van de dynamische wrijvingsfactor (F_{dyn}) is onderzocht; vooral de vraag of binnen de genoemde range een unieke oplossing wordt verkregen, dit voor een aangenomen $K_{h;na}$ -factor van 1,2 voor alle grondlagen.

Ter referentie zijn analyses uitgevoerd met de door GeoConsult aangeleverde waarden voor $K_{h;na}$ en A_p (analyse 1 en 2). De rekentechnische basis voor de $K_{h;na}$ -waarden van de verschillende lagen is niet door GeoConsult beschikbaar gesteld. Deltares heeft ervoor gekozen om de gevoeligheid voor de waarde van F_{dyn} nader te onderzoeken voor de genoemde $K_{h;na}$ -waarde van 1,2. Dit omdat uit een eerste analyse bleek dat de kwaliteit van de voorspelling (beperkt) afhankelijk is van de ingevoerde $K_{h;na}$ -waarden.

(2)

De gevoeligheid voor de horizontale gronddrukcoëfficiënt $K_{h;na}$ kan worden vastgesteld door voor Paal 3 uitgaande van de Deltares-ijkwaarden (3^e update, F_{dyn} 0,15), simulaties te genereren voor een serie van gekozen $K_{h;na}$ -waarden (voor alle grondlagen worden dezelfde waarden toegepast), zie paragraaf 7.7.1.

(3)

De consistentie van het model is vastgesteld door voor Paal 3 de ingevoerde sondering te reconstrueren uit de eigen boorgegevens en de ijkwaarden bepaald voor Paal 3. Het principe van de SBPMonitor is dat 2 maal van het rekenmodel in de SBPMonitor gebruik wordt gemaakt; de eerste keer om de ijkwaarden vast te stellen en daarna via toepassen van deze ijkwaarden wordt met hetzelfde rekenmodel het uitgangspunt (de vooraf-sondering) bepaald. Reconstructie van de vooraf-sondering bij Paal 3 is dus een test voor de consistentie van de aanpak en geen test voor de kwaliteit van het rekenmodel.

(4)

De voorspellingskracht van het model is getest door het voorspellen van het sondeerbeeld (vooraf-sondering) van de overige palen uitgaande van de ijkfactoren zoals vastgesteld voor Paal 3.

(5)

De uitkomsten in de vorm van conusweerstand op basis van (3) zijn statistisch vergeleken met de originele vooraf-sondering ter plaatse van de paallocatie. Voor Paal 3 bestaat de evaluatie uit een vergelijking van de voorspelling na de ijkprocedure volgens (2).

7.2 Analyse en resultaten voor Paal 3

7.2.1 Algemeen

Het gebied in Almere wordt gekenmerkt door matig gepakte zanden met daarin lenzen van zeer los gepakt zand. In het sondeerbeeld van Paal 3 komt een dergelijke lens voor. Voor de overige paallocaties lijkt het niet waarschijnlijk dat de lens zich daar ook voordoet. Daarom is in de uitwerking voor deze palen door Deltares rekening gehouden met het ontbreken van dergelijke lenzen.

7.2.2 Analyse Paal 3

Met de SBPMonitor wordt tijdens de ijkfase de verhouding tussen de conusweerstand en de actuele paalpuntspanning voor elke diepte vastgesteld (A_p). Met de aangenomen waarden voor F_{dyn} en $K_{h,na}$ en de bepaalde A_p kan een simulatie van de sondering worden uitgevoerd.

Met behulp van de werkbankversie van het systeem is door Deltares onderzocht of de gegenereerde sondeergrafiek vanuit de inboorgegevens tot een unieke oplossing leidt. Daartoe zijn voor een aangenomen vaste waarde van $K_{h,na} = 1,2$ voor alle grondlagen, ijkanalyses uitgevoerd voor twee van de door GeoConsult opgegeven waarden voor de F_{dyn} , namelijk 0,15 en 0,03. Voor deze combinaties zijn met de voor Paal 3 vastgestelde ijkwaarden voorafsonderingen voor Paal 3 gesimuleerd. Met het uitvoeren van berekeningen voor de beide waarden van F_{dyn} wordt inzicht verkregen in de gevoeligheid voor de keuze van F_{dyn} . Tevens wordt inzicht verkregen over de haalbare kwaliteit van de SBPMonitor door vergelijking van de originele vooraf-sondering en de simulatie.

Bij de werkwijze is het belangrijk dat de ijking en de simulatie met dezelfde waarden voor F_{dyn} en $K_{h,na}$ worden uitgevoerd.

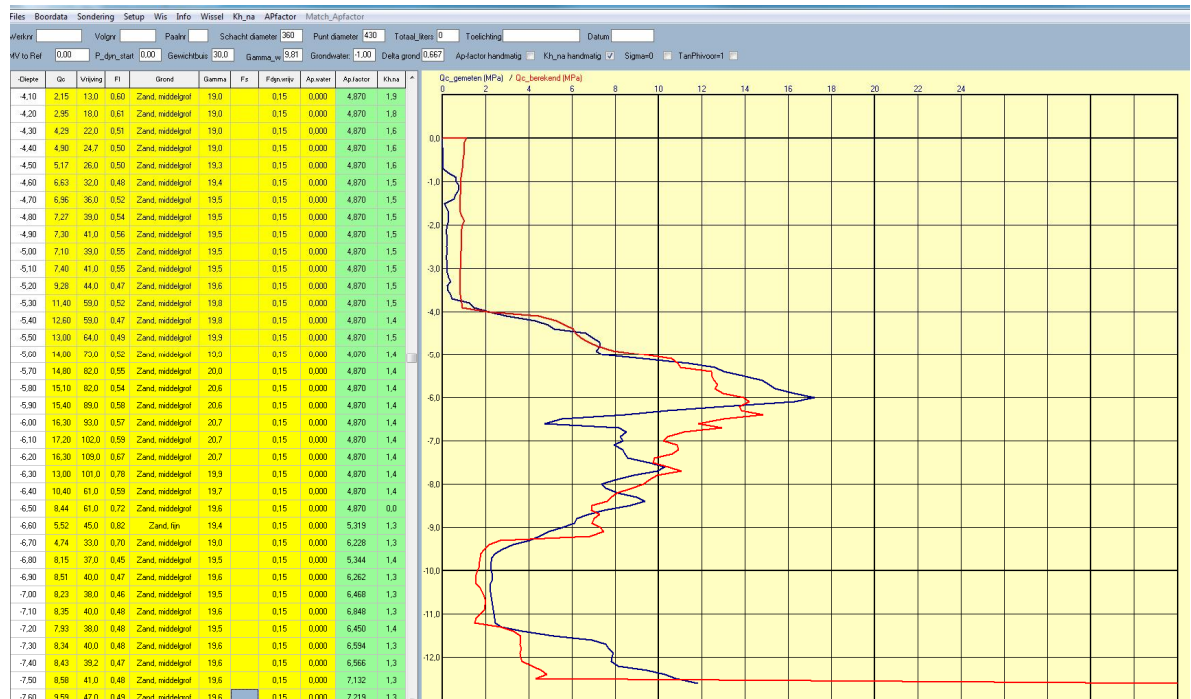
Bij toepassen van het systeem is door Deltares vastgesteld dat bij herhaalde uitvoering van het ijkproces voor een paal de ijkwaarden steeds (licht) variëren en dit leidt tot de vraag of dit proces convergeert naar eindwaarden. Bij de analyse voor Paal 3 zijn een drietal iteratieslagen uitgevoerd, met als startpunt de aangeleverde GeoConsult ijkwaarden. Met de getalsmatige uitvoerwaarden van elke voorgaande simulatie worden daarbij nieuwe ijkwaarden vastgesteld voor A_p . Dit levert aangepaste ijkfactoren en bij de beoordeling van de gesimuleerde voorafsondering voor Paal 3 blijkt dat de oorspronkelijke sondering steeds beter kan worden benaderd (het systeem convergeert).

Het blijkt echter dat als er geen duidelijke "lijn" in de ijkwaarden wordt aangetroffen (grote spreiding in ijkwaarden, geen continu stijgend of continu dalend verloop voor A_p), zoals in de diepste zandlaag voor Paal 3, er geen eenduidige ijkrelatie voor A_p wordt gevonden. Kleine variaties in de ingevoerde ijkfactoren geven grote verschillen in de A_p en daarmee zeer grote afwijkingen in de simulatie van de conusweerstand in de laag. Het ontbreken van een duidelijke lijn in de ijkwaarden is toe te schrijven aan een niet-uniform boorproces (variëaties de boorprocesparameters, zoals bijvoorbeeld toerental of voortgangssnelheid). Het SBPMonitor kan hiermee niet overweg.

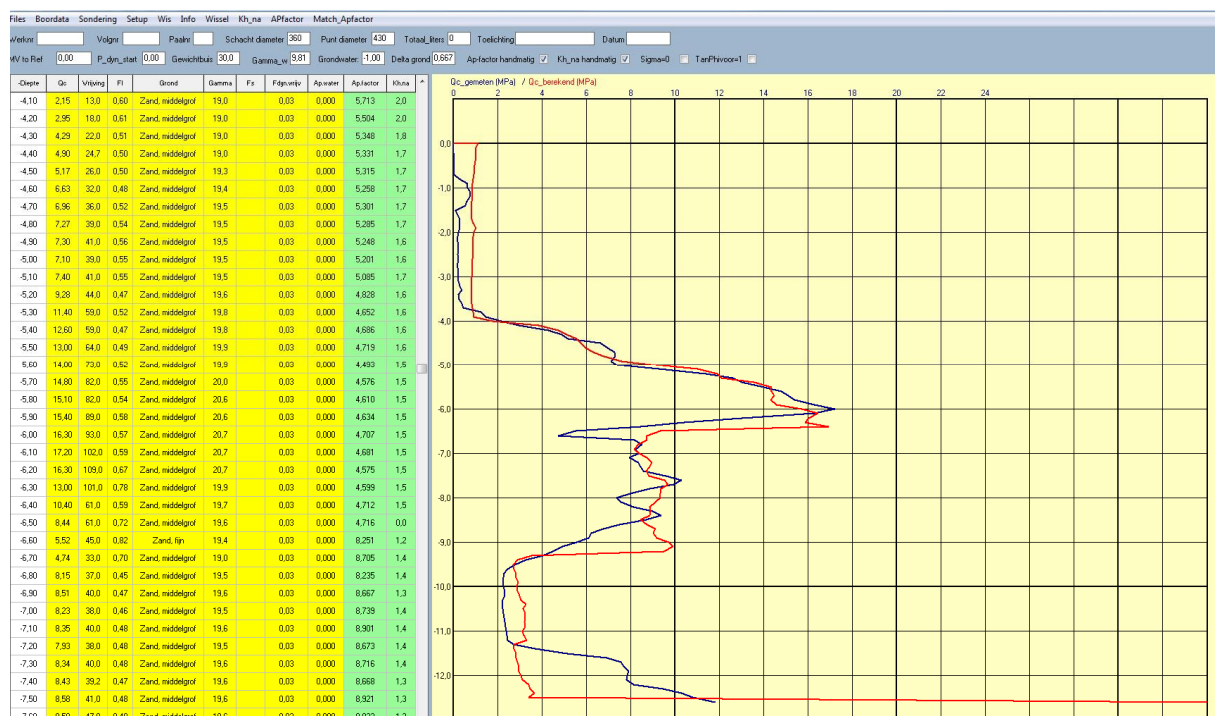
Er moet vanuit worden gegaan dat een uniform inboorproces een voorwaarde is voor een goede reconstructie van de vooraf-sondering en voor voorspellingen van vooraf-sonderingen op andere boorlocaties op het terrein.

7.2.3 Resultaten Paal 3 na iteratie

De resultaten van de gegenereerde vooraf-sondering zijn in de volgende figuren in rood aangegeven.



Figuur 7.1 Paal 3 Met ijking Ap. (3^e update) en $K_{h,na} = 1,2$. Fdyn r = 0,15



Figuur 7.2 Paal 3 Met ijking Ap. (3^e update) en $K_{h,na} = 1,2$. Fdyn = 0,03

7.2.4 Conclusie ijkproces Paal 3

(1)

Met de uiteindelijke ijkfactoren uit de 3^e iteratieslag kan de oorspronkelijke vooraf sondering worden gesimuleerd; zie Figuur 7.1 en 7.2. Als de conusweerstand op een bepaald diepteniveau wordt vergeleken blijkt een maximale afwijking tot 30% en 50% mogelijk.

(2)

Opgemerkt moet worden dat de vooraf-sondering in de diepste grondlaag niet goed kan worden gesimuleerd. Voor deze laag blijkt er geen duidelijke "lijn" in de ijkwaarden te worden gevonden (geen continu stijgend of continu dalend verloop voor A_p).

(3)

Er kan worden vanuit gegaan dat een uniform inboorproces een voorwaarde is voor een goede benadering van de vooraf-sondering, d.w.z. geringe variaties de boorprocesparameters, zoals bijvoorbeeld toerental of voortgangssnelheid.

(4)

Voor de beide keuzen voor F_{dyn} geeft de gesimuleerde sondering in het algemeen een redelijke benadering van het sondeerbeeld, maar de kwaliteit is afhankelijk van de gekozen waarde. De oplossing is niet 1:1 vergelijkbaar met de vooraf uitgevoerde sondering.

(5)

De waarde voor F_{dyn} moet bekend zijn uit eerdere projecten met palen in dezelfde geologische grondlaag. Deze factor zal equipment specifiek zijn. De toegepaste waarden voor de dynamische schachtwrijving zijn overigens laag; dergelijke lage waarden worden ook gevonden bij diepe rotary drilling processen waarbij de lage waarden zijn gekoppeld met een grote voortgangssnelheid/zakkingssnelheid.

(6)

Opgemerkt moet worden dat de werkbankversie van het programma een zekere onnauwkeurigheid zal hebben omdat bij het invoeren van de A_p waarden wordt gewerkt met 2 cijfers achter de komma. De invoer moet worden aangepast tot 4 cijfers gezien de gevoeligheid van de ijkprocedure en doorwerken van de effecten in de voorspelling.

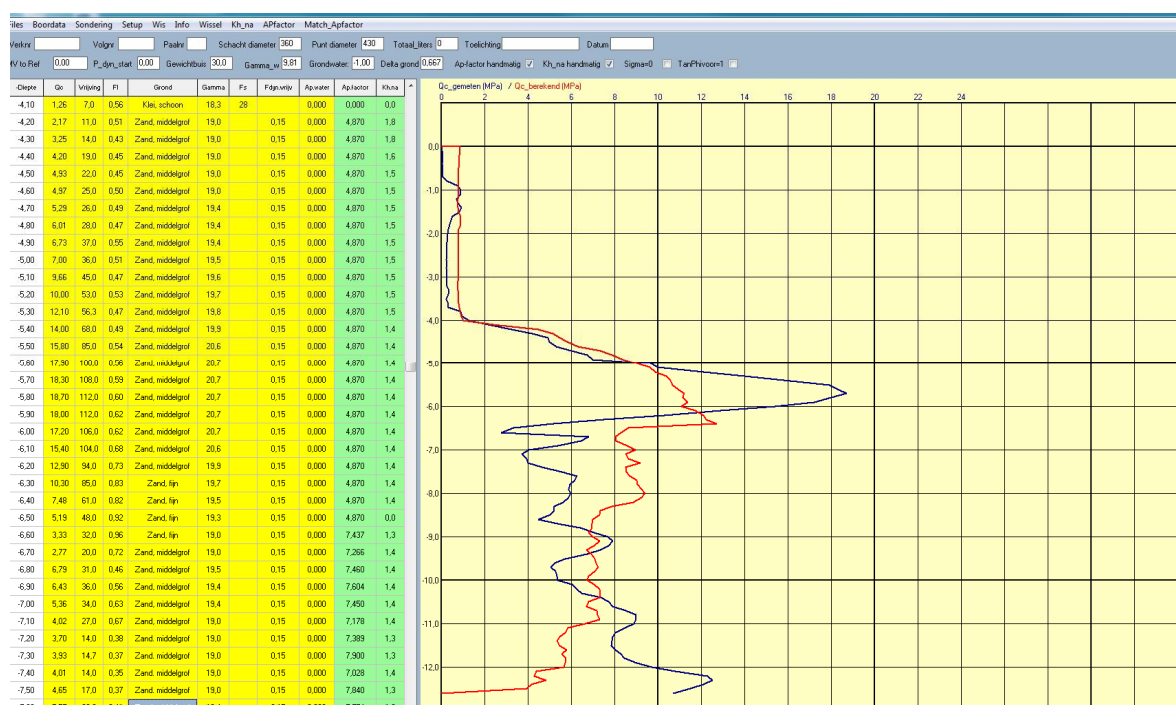
7.3 Voorspelling voor Paal 1 en 2

Het blijkt dat voor paal 1 en paal 2 een foutmelding door het systeem wordt gegenereerd. Er lijkt een probleem te zijn met de aangeleverde datasets van deze palen.

7.4 Voorspelling voor Paal 4

7.4.1 Analyse Paal 4

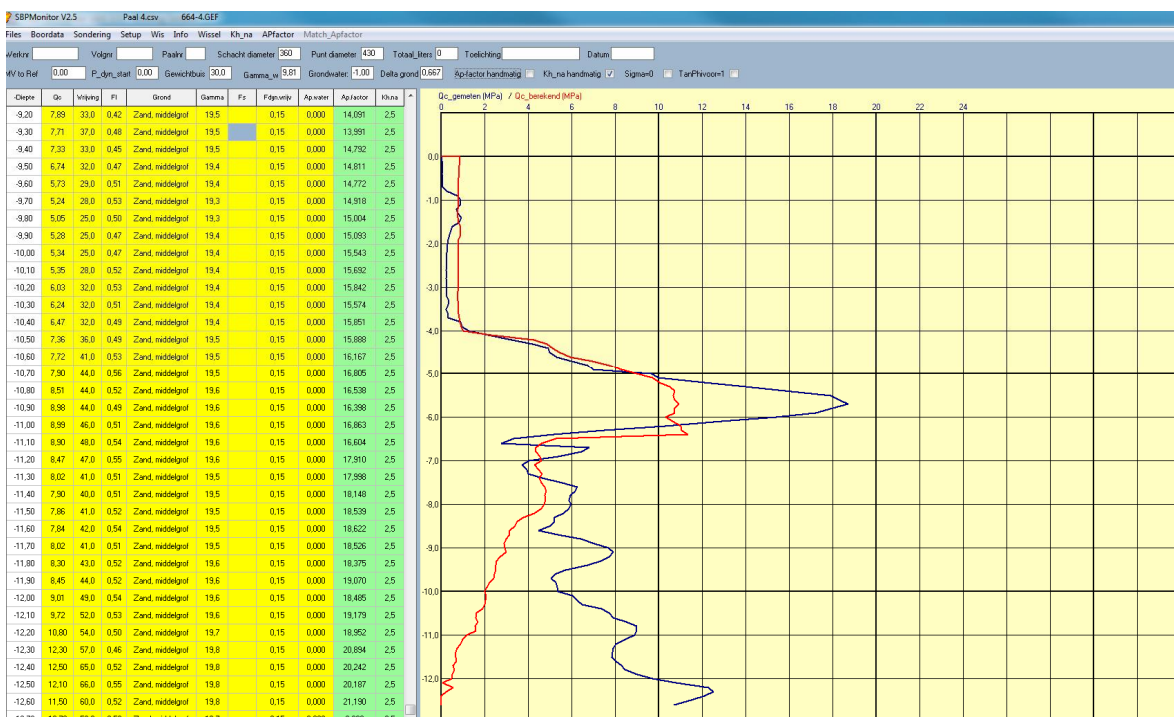
De resultaten van de gegenereerde vooraf-sondering zijn in de volgende figuren in rood aangegeven. De losse tussenlaag is hier buiten beschouwing gelaten en de parameters van laag 2 zijn in de diepte doorgezet. Zie Figuur 7.3 en 7.4. Ter referentie zijn ook voorspellingen toegevoegd met de originele aangeleverde GeoConsult-factoren. Daarbij zijn de eigenschappen van laag 2, de laag vanaf -6,6 m, voor alle diepere lagen toegepast. Zie Figuur 7.5 en 7.6.



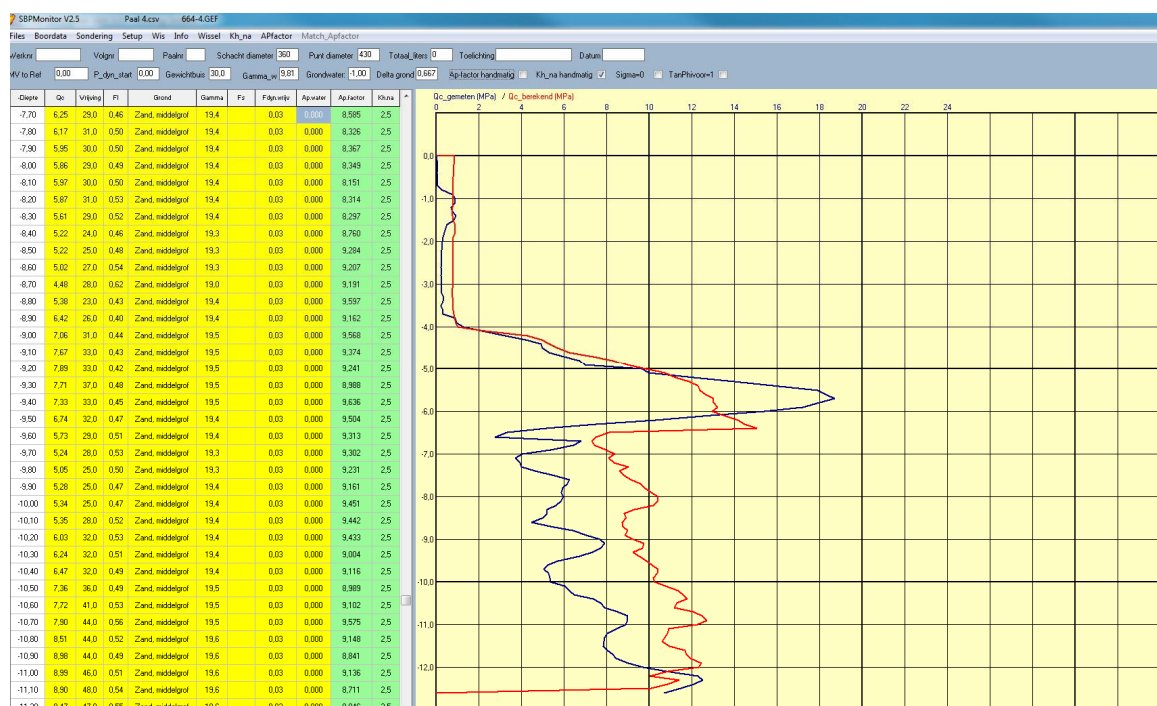
Figuur 7.3 Paal 4 $F_{dyn} = 0,15$ en $K_{h,na} = 1,2$ (laag 2 doorgezet in de diepte tot einddiepte)



Figuur 7.4 Paal 4 Fdyn 0,03 en $K_{h,na} = 1,2$ (laag 2 doorgezet in de diepte)



Figuur 7.5 Paal 4 met Ap origineel GC van Paal 3 $K_{h,na}$ variabel Fdyn = 0,15- laag 2 doorgezet tot einddiepte



Figuur 7.6 Paal 4 met A_p origineel GC van Paal 3 $K_{h,na}$ variabel $F_{dyn} = 0,03$ - laag 2 doorgezet tot einddiepte

7.4.2 Conclusie voorspelling Paal 4

(1)

Voor paal 4 blijkt dat er voor $F_{dyn} = 0,15$ slechts een beperkte voorspelling van het sondeerbeeld van de vooraf-sondering mogelijk is, uitgaande van de ijkfactoren van de 3^e update van Paal 3 en waarbij de laag 2 verder wordt doorgezet tot de diepte van de paalpunt.

(2)

Voor paal 4 blijkt dat er voor $F_{dyn} = 0,03$ geen bruikbare voorspelling wordt gevonden, de conusweerstand dieper dan 6,5 m liggen systematisch te hoog, uitgaande van de ijkfactoren van de 3^e update van Paal 3 en waarbij de laag 2 verder wordt doorgezet tot de diepte van de paalpunt.

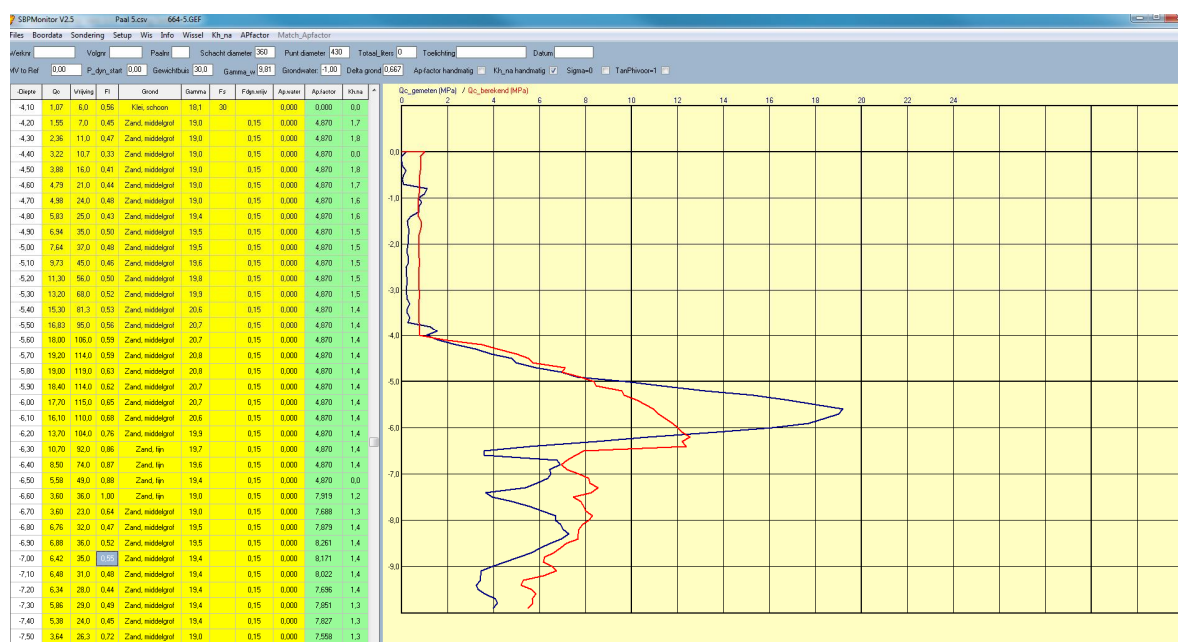
(3)

Voor de analyse met aangeleverde GeoConsult parameterwaarden geldt dat er voor $F_{dyn} = 0,03$ geen bruikbare voorspelling wordt gevonden, de conusweerstand liggen dieper dan 6,5 m systematisch te hoog. De analyse met $F_{dyn} = 0,15$ geeft voor de diepere zandlagen een afwijkend sondeerbeeld.

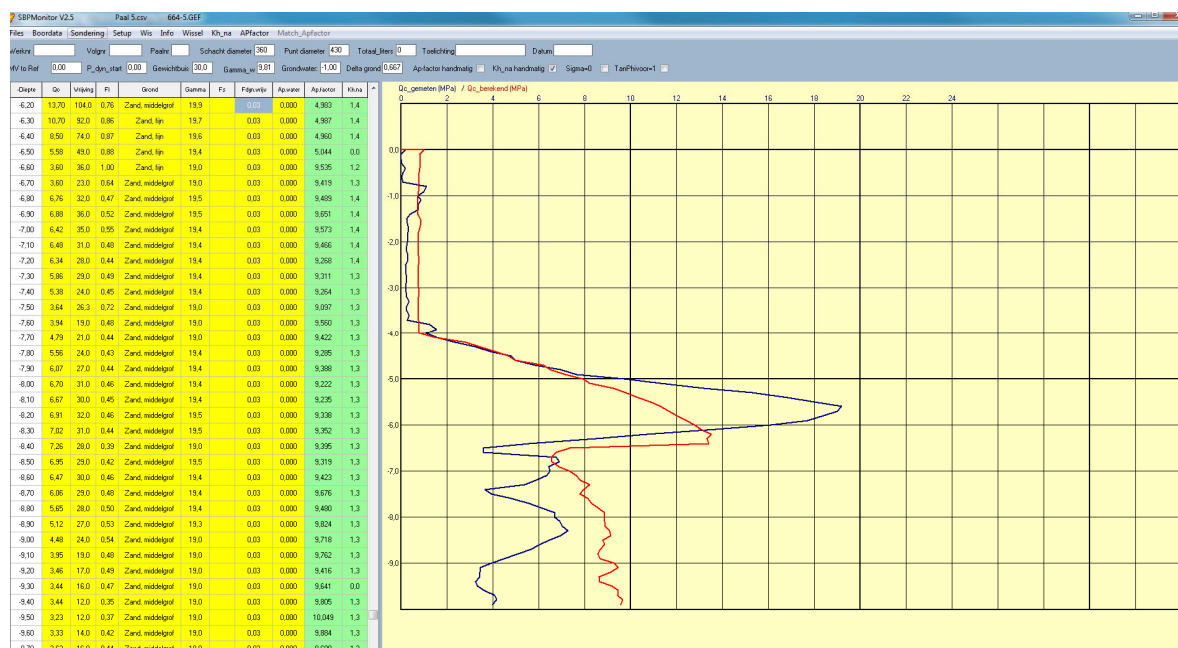
7.5 Analyse en resultaten voor Paal 5

7.5.1 Analyse Paal 5

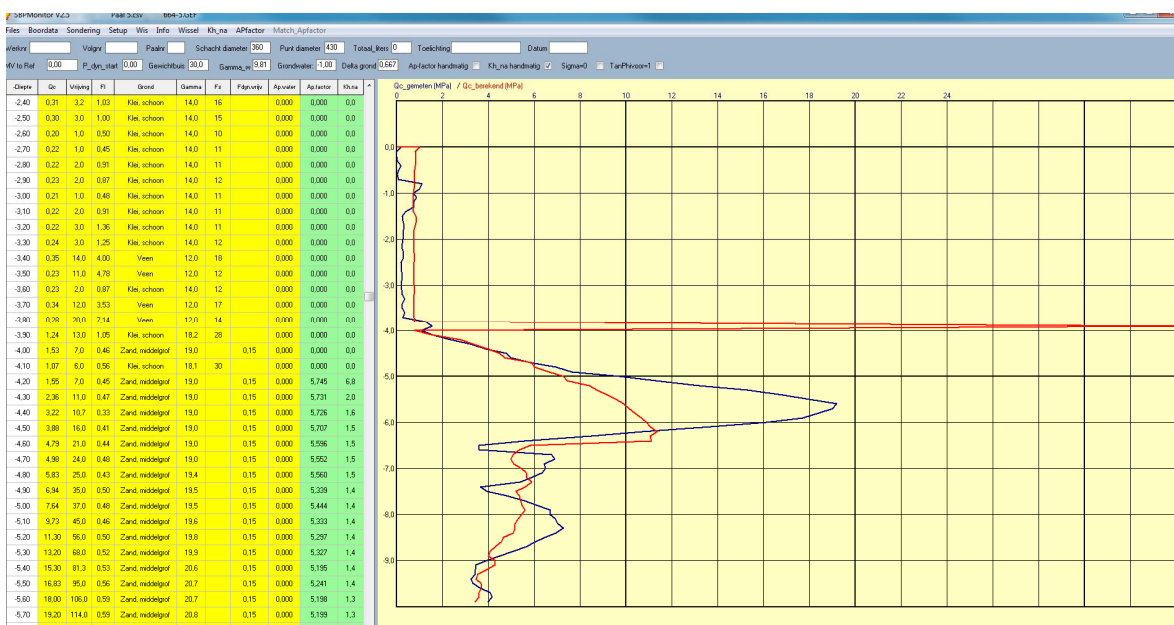
De resultaten van de gegenereerde vooraf-sondering zijn in de volgende figuren in rood aangegeven. De losse tussenlaag is hier buiten beschouwing gelaten en de parameters van laag 2 zijn in de diepte doorgezet. Ter referentie zijn ook voorspellingen toegevoegd de originele aangeleverde GeoConsult-factoren. Daarbij zijn de eigenschappen van laag 2, de laag vanaf -6,6 m voor alle diepere lagen toegepast.



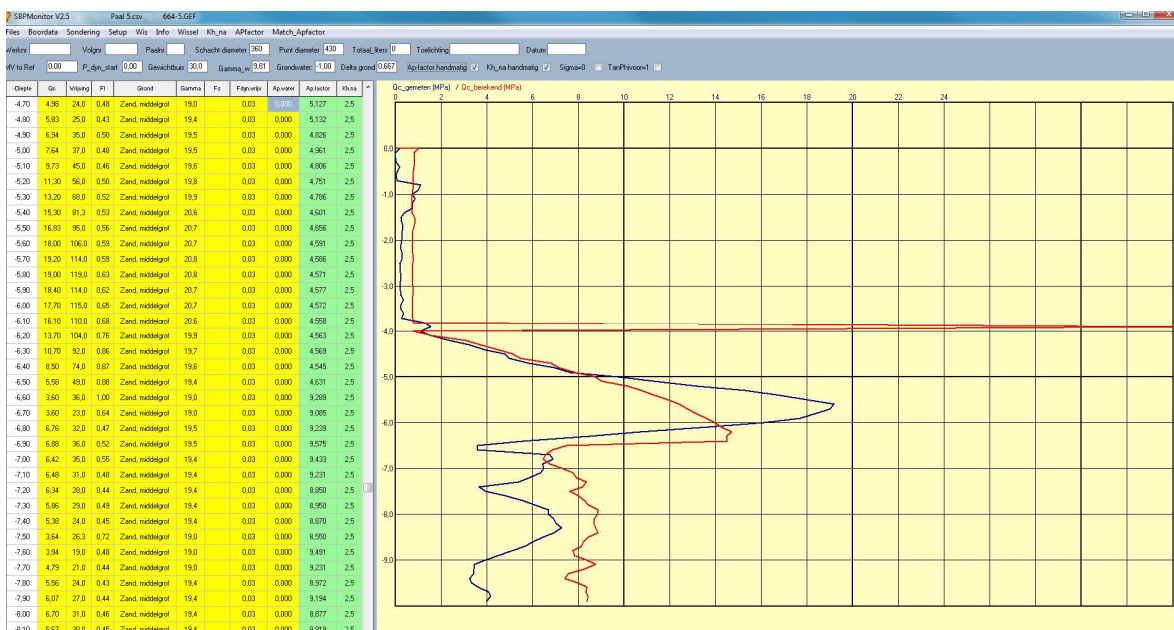
Figuur 7.7 Paal 5 F_{dyn} 0,15 en K_{h,na} =1,2 (laag 2 doorgezet tot einddiepte)



Figuur 7.8 Paal 5 F_{dyn} 0,03 en K_{h,na} =1,2 (laag 2 doorgezet tot einddiepte)



Figuur 7.9 Paal 5 met Ap origineel GC van Paal 3 $K_{h,na}$ variabel $F_{dyn} = 0,15$ - laag 2 doorgezet tot einddiepte



Figuur 7.10 Paal 5 met Ap origineel GC van Paal 3 $K_{h,na}$ variabel $F_{dyn} = 0,03$ - laag 2 doorgezet tot einddiepte

7.5.2 Conclusie voorspelling Paal 5

(1)

Voor paal 5 blijkt dat er voor $F_{dyn} = 0,15$ een redelijke voorspelling van het sondeerbeeld van de vooraf-sondering mogelijk is hoewel de piekwaarden niet worden gehaald, uitgaande van de ijkfactoren van de 3^e update van Paal 3 en waarbij de laag 2 verder wordt doorgezet tot de diepte van de paalpunt.

(2)

Voor paal 5 blijkt dat er voor $F_{dyn} = 0,03$ geen correcte voorspelling van de diepere zandlagen wordt gevonden, uitgaande van de ijkfactoren van de 3^e update van Paal 3 en waarbij de laag 2 verder wordt doorgezet tot de diepte van de paalpunt.

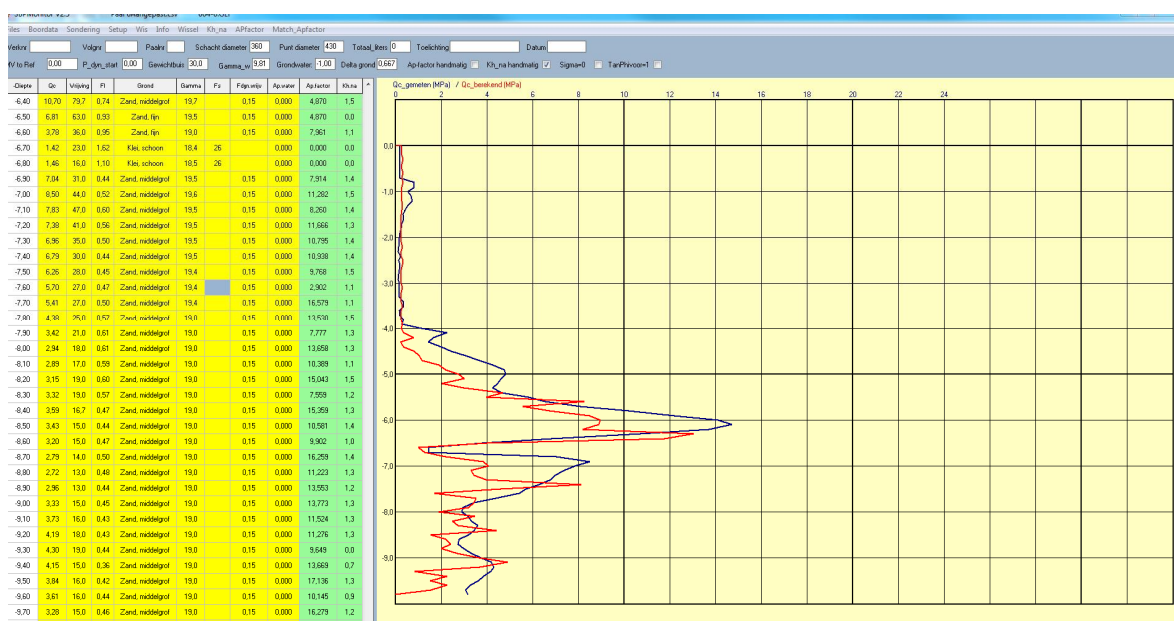
(3)

Voor de analyse met aangeleverde GeoConsult parameterwaarden zijn de bovenstaande conclusies (1) en (2) van toepassing: $F_{dyn} = 0,15$ geeft een redelijke voorspelling en voor $F_{dyn} = 0,03$ geen correcte voorspelling. Ook hiervoor geldt dat de piekwaarden niet worden gehaald.

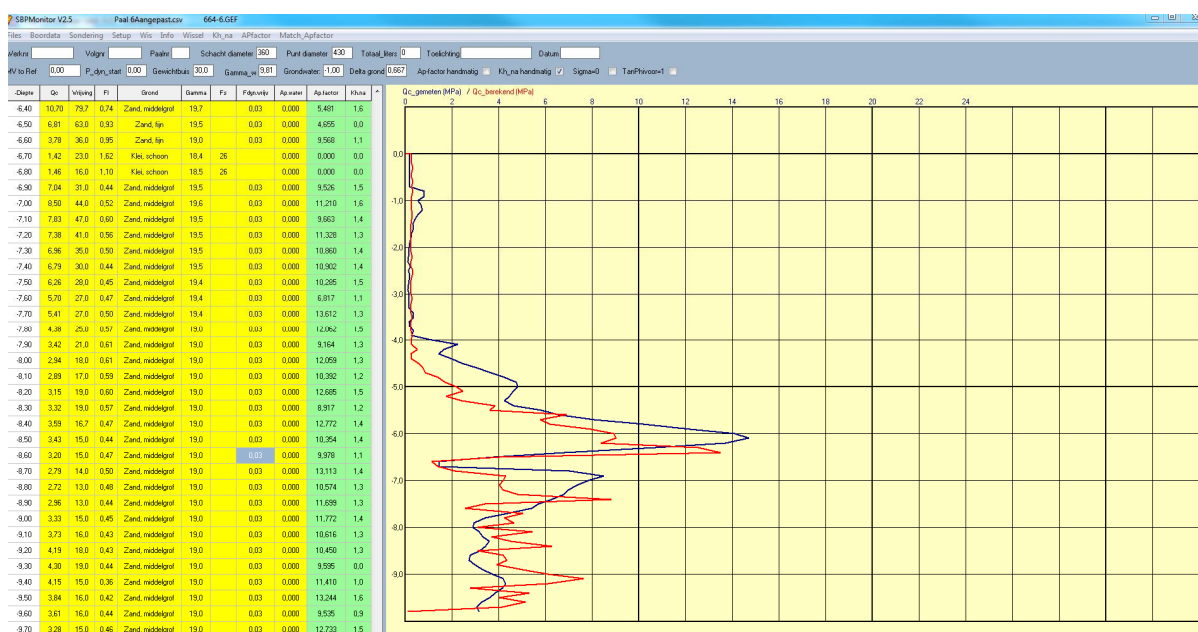
7.6 Analyse en resultaten voor Paal 6

7.6.1 Analyse Paal 6

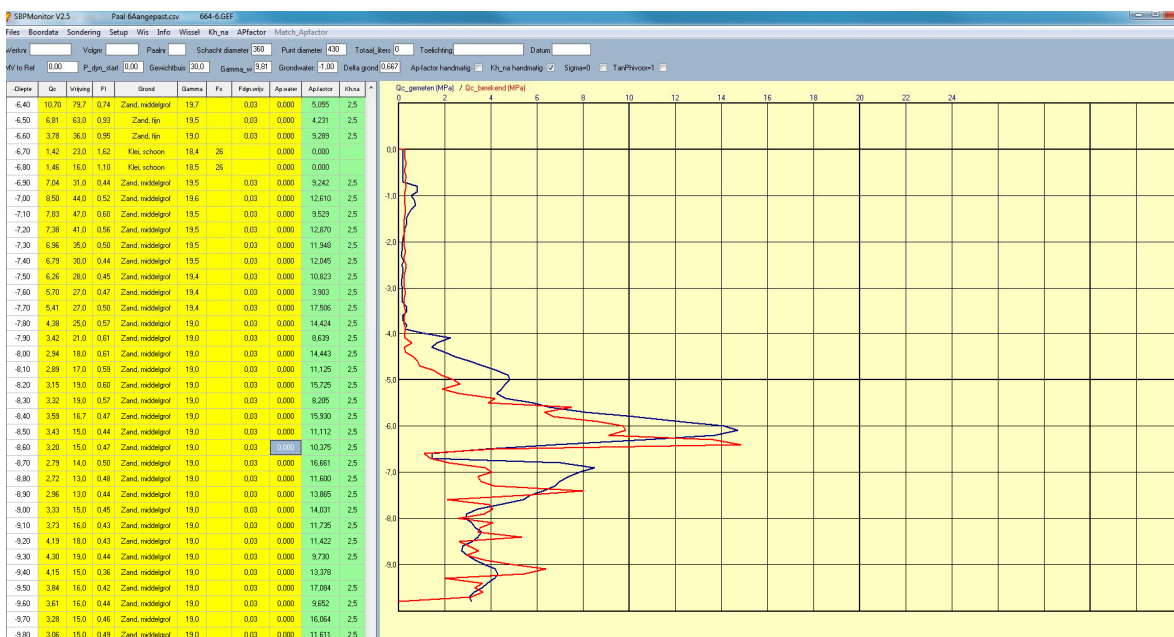
De resultaten van de gegenereerde vooraf-sondering zijn in de volgende figuren in rood aangegeven. De losse tussenlaag is hier buiten beschouwing gelaten en de parameters van laag 2 zijn in de diepte doorgezet. Ter referentie zijn ook voorspellingen toegevoegd de originele aangeleverde GeoConsult-factoren. Daarbij zijn de eigenschappen van laag 2, de laag vanaf -6,6 m voor alle diepere lagen toegepast.



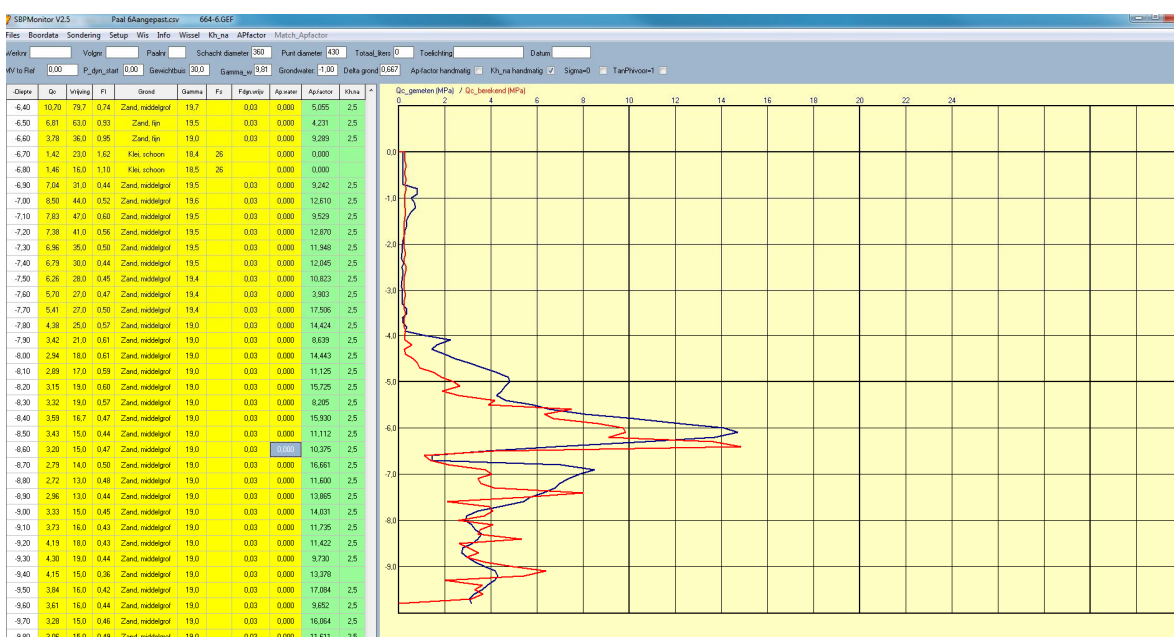
Figuur 7.11 Paal 6 F_{dyn} 0,15 en $K_{h,na} = 1,2$ (laag 2 doorgezet tot einddiepte)



Figuur 7.12 Paal 6 F_{dyn} 0,03 en $K_{h,na} = 1,2$ (laag 2 doorgezet tot einddiepte)



Figuur 7.13 Paal 6 met A_p origineel GC van Paal 3 $K_{h,na}$ variabel $F_{dyn} = 0,15$ - laag 2 doorgezet tot einddiepte



Figuur 7.14 Paal 6 met A_p origineel GC van Paal 3 $K_{h,na}$ variabel $F_{dyn} = 0,03$ laag 2 doorgezet tot einddiepte

7.6.2 Conclusie voorspelling Paal 6

(1)

Voor paal 6 geeft de simulatie met F_{dyn} van 0,03 een beter resultaat en op basis van het sondeerbeeld is de voorspelling voor zowel de F_{dyn} van 0,15 en 0,03 redelijk goed. Als echter wordt gekeken naar de verschillen op een specifiek diepteniveau worden verschillen tot 50% waargenomen; bijvoorbeeld op diepte van 7 m.

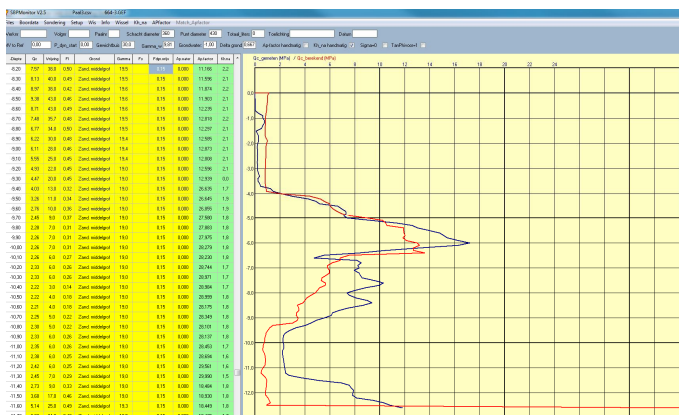
(2)

Voor de analyse met aangeleverde GeoConsult parameterwaarden is de bovenstaande conclusies (1) in gelijke mate van toepassing.

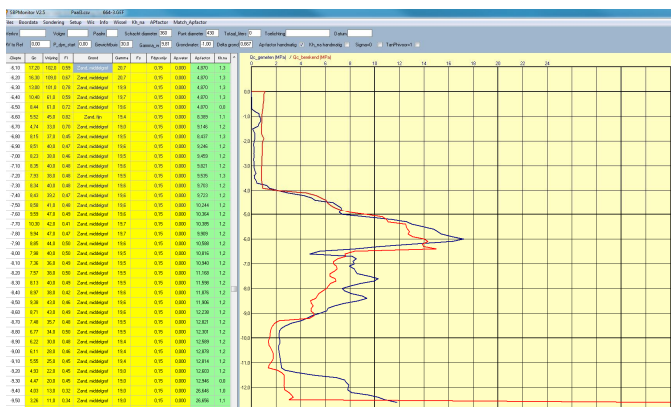
7.7 Bruikbaarheid van de voorspelling

7.7.1 Invloed van de keuze $K_{h,na}$

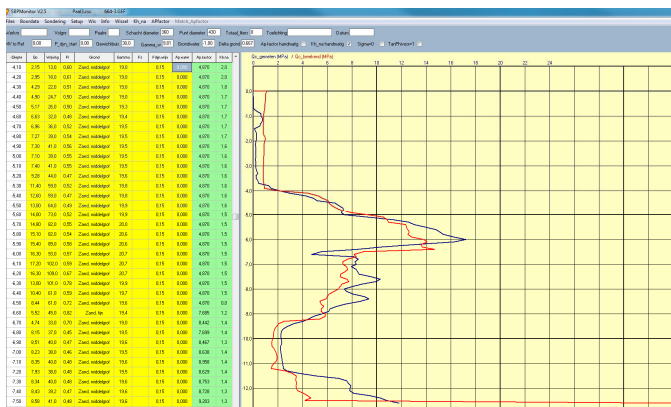
De volgende voorspellingen voor Paal 3 zijn uitgevoerd, uitgaande van de ijkwaarden van de 3^e iteratie en een F_{dyn} van 0,15. Diverse $K_{h,na}$ -waarden zijn toegepast. Er zijn geen iteraties toegepast bij de berekeningen.



Figuur 7.15 Paal 3. F_{dyn} 0,15 en $K_{h,na} = 0,7$

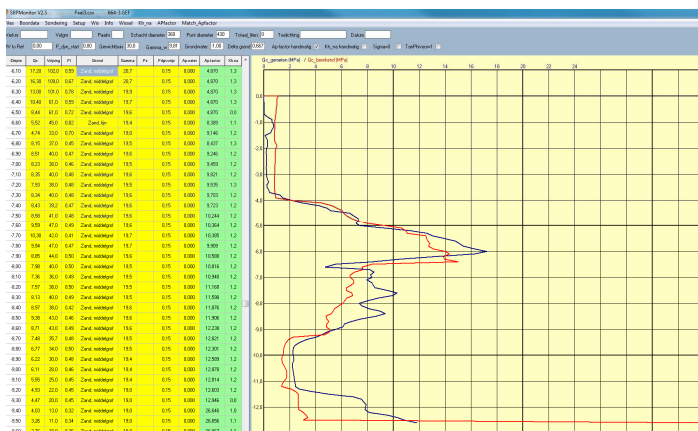


Figuur 7.16 Paal 3. F_{dyn} 0,15 en $K_{h,na} = 1,1$

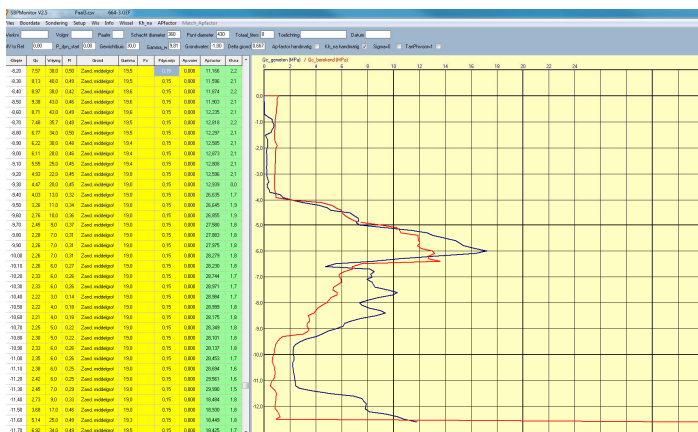


Figuur 7.17 Paal 3. F_{dyn} 0,15 en $K_{h,na} = 1,2$

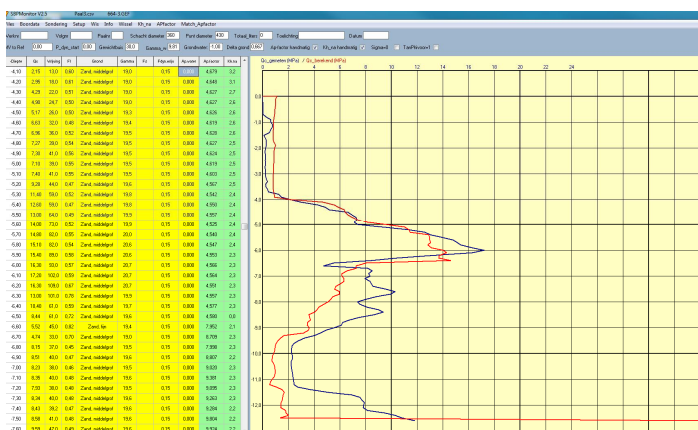
1230372-000-GEO-0006, 1 juni 2018, definitief



Figuur 7.18 Paal 3. Fdyn 0,15 en $K_{h,na} = 1,5$



Figuur 7.19 Paal 3. Fdyn 0,15 en $K_{h,na} = 2$



Figuur 7.20 Resultaat van Figuur 7.5 met extra iteratieslag = 2

De uitkomst van de voorspelling blijkt gevoelig voor de keuze van de $K_{h,na}$ -waarde. Een extra iteratie geeft geen verdere verbetering/verandering. De waarde van $K_{h,na}$ gelijk aan 1,2 geeft in dit geval de beste benadering van het sondeerbeeld.

7.7.2 Statistische vergelijking sondeerwaarden

De waarden van de vooraf-sonderingen kunnen worden vergeleken met de gesimuleerde sonderingen. Voor de palen 4, 5, en 6 is uitgegaan voor de simulaties uitgaande van de 3^e update van de ijking Paal 3, waarbij laag 2 in de diepte is voortgezet en een vaste waarde voor $K_{h,na}$ van 1,2. De beide toegepaste waarden van F_{dyn} van 0,15 en 0,03 zijn bekeken. Voor Paal 3 zijn de waarden gegeven voor reconstructie van de sondering op basis van de eigen ijking 3^e update en de boorgegevens.

De vergelijking is uitgevoerd per laag waarbij de volgende laagindeling is aangehouden (zie Tabel 7.1):

Laag 1 van -4,1 m tot -6,6 m
Laag 2 van -6,6 m tot -9,4 m
Laag 3 van -9,4 m tot -11,4 m
Laag 4 van – 11,4 m tot – 12,7 m of inboordiepte

Als per diepteniveau wordt gekeken naar de verschillen tussen de vooraf-sondering van de palen 4, 5 en 6 en de simulatie op basis van de ijking van Paal 3 moet worden geconstateerd dat de variatiecoëfficiënten hoog zijn. Dit wordt geïllustreerd door de sondeergrafieken, waarbij verschillen van 30 % tot 50 % in de individuele sondeerwaarden voorkomen.

Het trekdraagvermogen van een paal wordt bepaald door de gemiddelde conusweerstand langs de paalschacht; de afwijkingen van de gemiddelde waarden liggen in dezelfde range (20% tot 50% en soms hoger). Zie Tabel 7.1 waarbij voor de verschillende keuzes voor F_{dyn} voor elke grondlaag de gemiddelde waarde is bepaald op basis van de verschillen op elk diepteniveau tussen de vooraf-sondering en de simulatie. Opgemerkt wordt dat als er wordt gekeken naar de gemiddelde waarde over de gehele lengte van de paalschacht er een verdere uitmiddeling plaatsvindt en dat de verschillen dan afnemen.

De grootte van variaties in conusweerstandens volgens de reconstructie van de sondering bij Paal 3 en de voorspellingen voor de palen 4,5 en 6 zijn van gelijke orde.

Het valt op dat bij overgang tussen lagen relatief grote verschillen optreden tussen de voorspelling en de vooraf-sondering. Het rekenmodel in de monitor kan wellicht worden verbeterd door de rekenroutine aan te vullen met een gewogen gemiddelde conusweerstand volgens Koppejan (4d-8d methode). Het is bekend dat de methode Koppejan een zeer goede voorspeller is voor de draagkracht van grondverdringende palen in het overgangsgedebied tussen twee lagen met verschillende vastheden (conusweerstandens). Deze gewogen conusweerstand kan dan worden gecorreleerd aan de boorgegevens om de ijking uit te voeren en om daarna de voorspelling te maken.

Laag 1	Type	Wdyn. factor	Gemiddelde waarde	Gem. verschil	Gemiddelde afwijking van de individuele waarden	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
			MPa	MPa	%	%	-
Paal 3	Vooraf		9,8				
	Simulatie	0,15	9,96	0,16	21,81	28,12	1,29
Paal 3	Vooraf		9,8				
	Simulatie	0,03	10,72	0,92	18,72	24,92	1,33
Paal 4	Vooraf		9,7				
	Simulatie	0,15	8,75	-0,94	34,50	37,11	1,08
Paal 4	Vooraf		9,7				
	Simulatie	0,03	8,88	-0,82	30,98	41,13	1,33
Paal 5	Vooraf		9,97				
	Simulatie	0,15	8,45	-1,51	33,79	28,71	0,85
Paal 5	Vooraf		9,97				
	Simulatie	0,03	8,43	-1,53	29,62	31,58	1,07
Paal 6	Vooraf		6				
	Simulatie	0,15	4,31	-1,69	47,13	23,42	0,5
Paal 6	Vooraf		6				
	Simulatie	0,03	4,1	-1,9	52,69	26,41	0,5

Laag 2	Type	Wdyn. factor	Gemiddelde waarde	Gem. verschil	Gemiddelde afwijking van de individuele waarden	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
			MPa	MPa	%	%	-
Paal 3	Vooraf		7,63				
	Simulatie	0,15	8,94	1,31	26,71	28,45	1,07
Paal 3	Vooraf		7,63				
	Simulatie	0,03	9,18	1,55	27,37	31,9	1,17
Paal 4	Vooraf		5,65				
	Simulatie	0,15	8,1	2,45	56,21	46,35	0,82
Paal 4	Vooraf		5,65				
	Simulatie	0,03	9,73	4,07	79,74	38,03	0,48
Paal 5	Vooraf		5,55				
	Simulatie	0,15	7,35	1,81	39,48	34,26	0,87
Paal 5	Vooraf		5,55				
	Simulatie	0,03	8,29	2,74	60,48	49,03	0,81
Paal 6	Vooraf		4,4				
	Simulatie	0,15	3,09	-1,31	31,46	21,12	0,67
Paal 6	Vooraf		4,4				
	Simulatie	0,03	4,35	-0,05	41,29	22,65	0,55

Laag 3	Type	Wdyn. factor	Gemiddelde waarde	Gem. verschil	Gemiddelde afwijking van de individuele waarden	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
			MPa	MPa	%	%	-
Paal 3	Vorafaf		2,4	-0,59			
	Simulatie	0,15	1,81		24,43	9,31	0,38
Paal 3	Vorafaf		2,4	0,61			
	Simulatie	0,03	3,02		28,38	18,92	0,67
Paal 4	Vorafaf		7,01	-0,19			
	Simulatie	0,15	6,82		21,72	10,64	0,49
Paal 4	Vorafaf		7,01	6,29			
	Simulatie	0,03	13,3		95,56	27,16	0,29
Paal 5	Vorafaf		3,74	5,58			
	Simulatie	0,15	5,59		50,73	14,65	0,29
Paal 5	Vorafaf		3,74	1,81			
	Simulatie	0,03	9,32		151,06	19,41	0,13
Paal 6	Vorafaf		3,45	-1,5			
	Simulatie	0,15	1,95		43,47	10,79	0,25
Paal 6	Vorafaf		3,45	1,52			
	Simulatie	0,03	4,97		44,61	17,31	0,39

Laag 4	Type	Wdyn. factor	Gemiddelde waarde	Gem. verschil	Gemiddelde afwijking van de individuele waarden	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
			MPa	MPa	%	%	-
Paal 3	Vorafaf		7,77	-3,90			
	Simulatie	0,15	3,87		47,45	15,53	0,29
Paal 3	Vorafaf		7,77	0,32			
	Simulatie	0,03	8,10		12,02	20,67	1,72
Paal 4	Vorafaf		9,87	-4,8			
	Simulatie	0,15	5,07		45,95	15,93	0,35
Paal 4	Vorafaf		9,87	5,16			
	Simulatie	0,03	15,03		57,23	29,51	0,52

Tabel 7.1 Vergelijking van de voraf-sondering en de simulatie van de sondering (voor Paal 5 en Paal 6 komt laag 4 niet voor i.v. m geringere inboordiepte)

7.8 Testen uitgevoerd door GeoConsult (tekst GeoConsult)

De navolgende tekst (*cursief*) is aangeleverd door GeoConsult. Opmerkingen van Deltares zijn in de tekst **regulier**, **vet** aangegeven.

GeoConsult heeft testen uitgevoerd op de registratiegegevens van de paalinstallaties bij Almere-Poort.

De gekozen waarden voor de verschillende lagen waren de volgende:

Eolische zanden: $F_{dyn} = 0,15$ en $K_{h,na} = 2,0$.

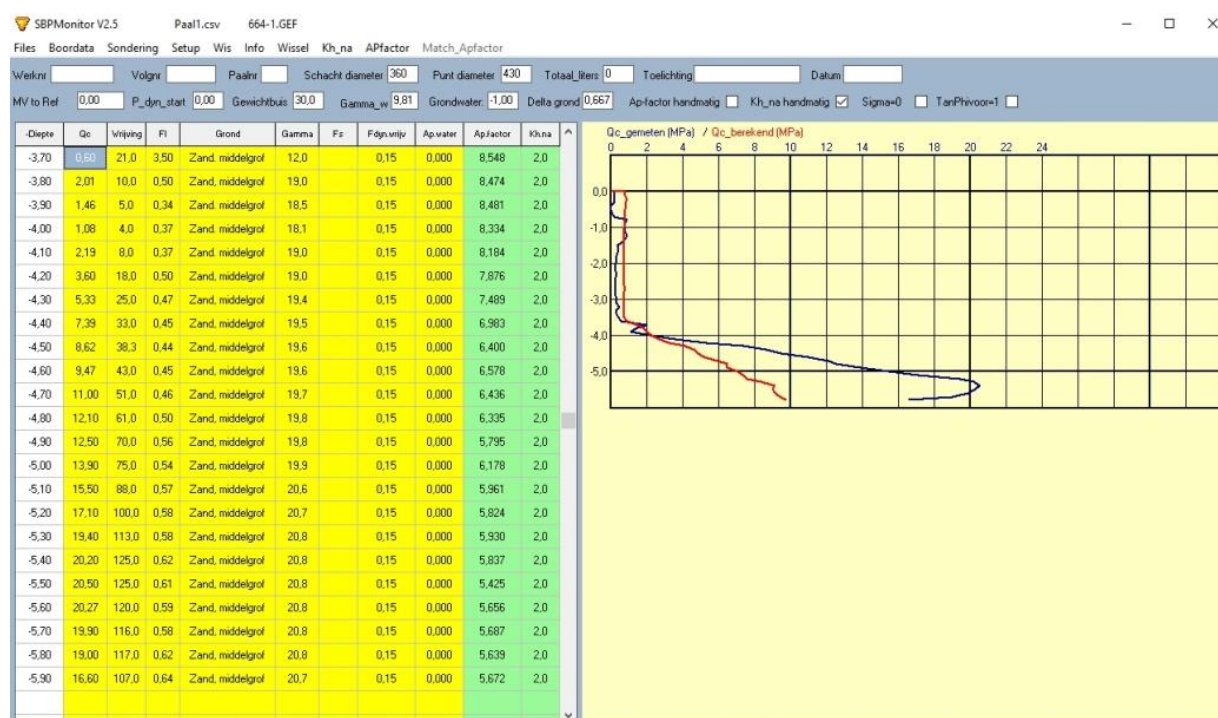
Fluvioglaciale zanden, matig dicht: $F_{dyn} = 0,03$ en $K_{h,na} = 1,5$.

Fluvioglaciale zanden, los gepakt: $F_{dyn} = 0,03$ en $K_{h,na} = 1,0$.

De $K_{h,na}$ waarden werden gekozen gebaseerd op geschatte initiële waarden voor K_h . De waarden voor F_{dyn} bleken de meest geschikte na een serie ijkingen.

De visuele vergelijking tussen de gecreëerde virtuele sondering en de oorspronkelijke voorsondering leverde de volgende beelden op:

Paal 1



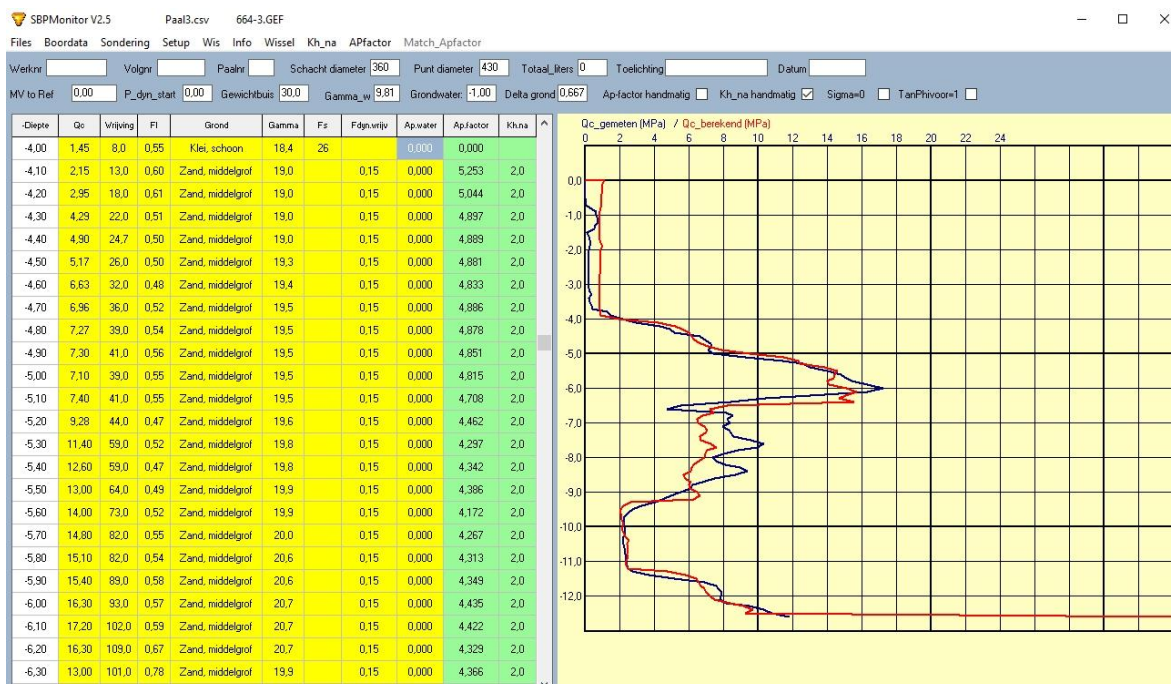
Figuur 7.21 Paal 1, vergelijking gecreëerde virtuele sondering (rode lijn) en oorspronkelijke voorsondering (blauwe lijn)

Paal 2



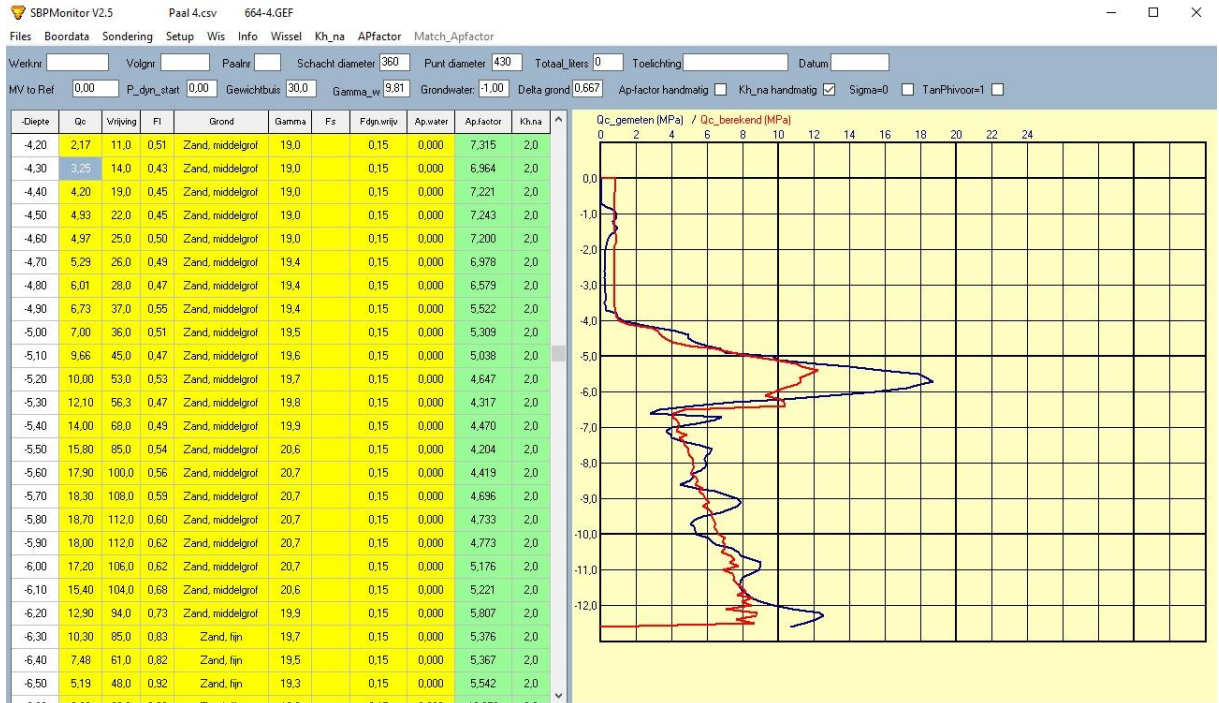
Figuur 7.22 Paal 2, vergelijking gecreëerde virtuele sondering (rode lijn) en oorspronkelijke voorsondering (blauwe lijn)

Paal 3



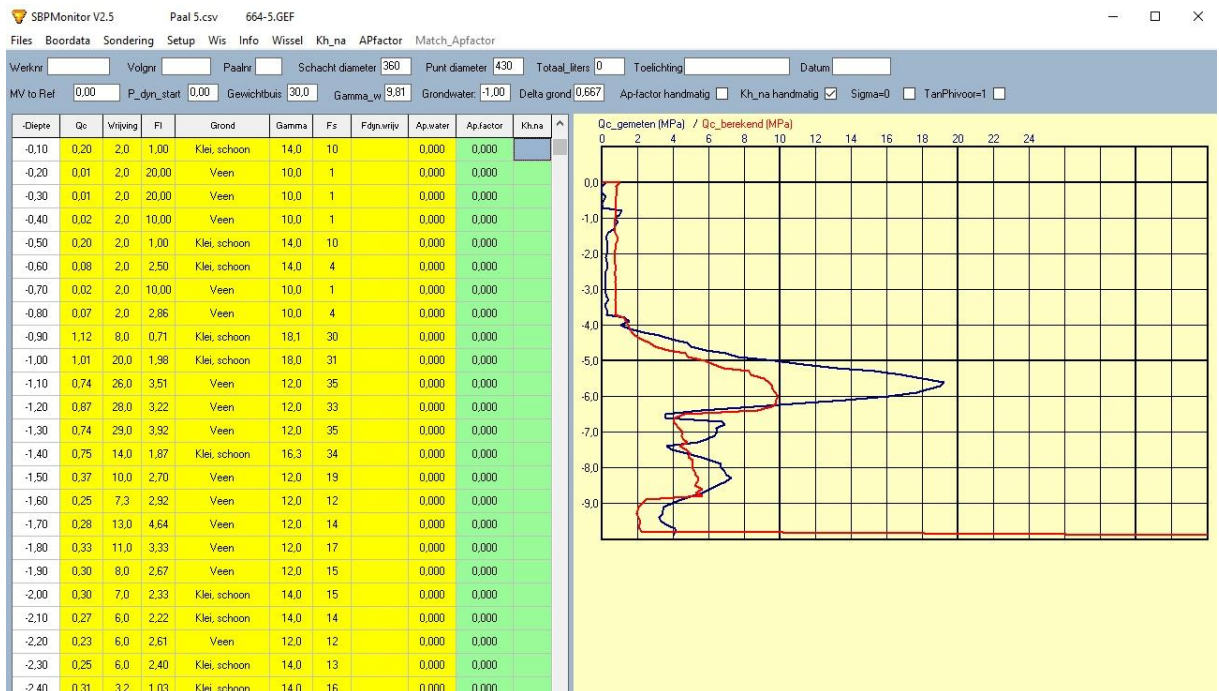
Figuur 7.23 Paal 3, vergelijking gecreëerde virtuele sondering (rode lijn) en oorspronkelijke voorsondering (blauwe lijn)

Paal 4



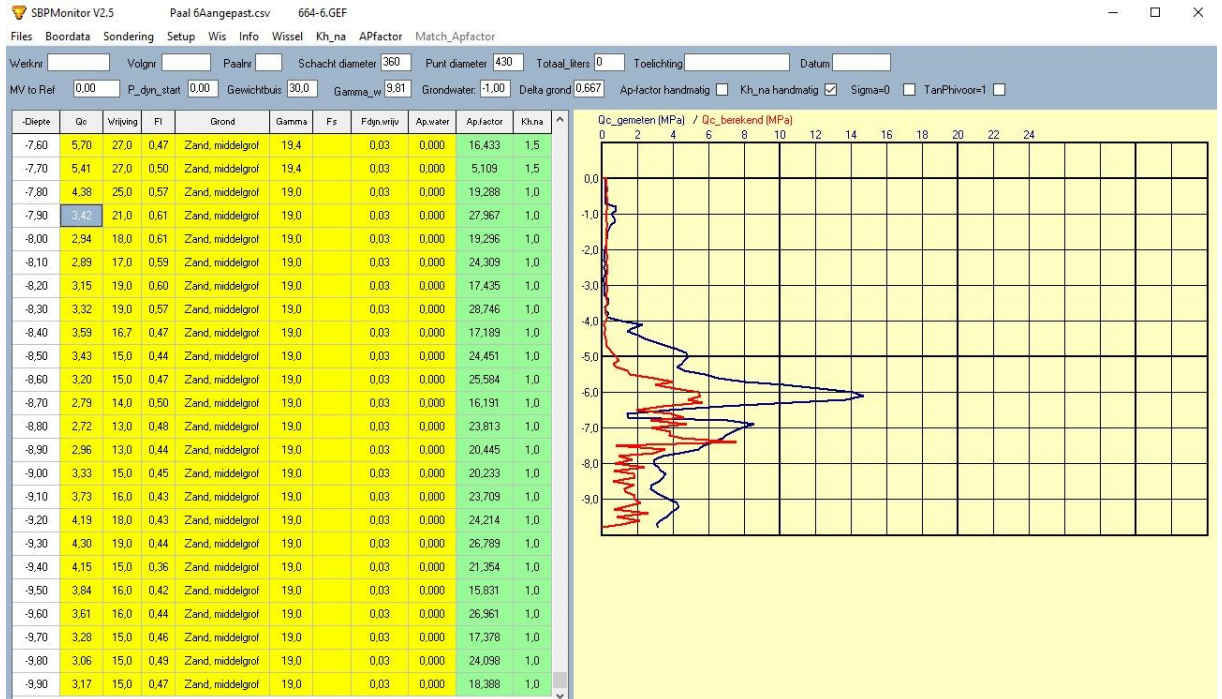
Figuur 7.24 Paal 4, vergelijking gecreëerde virtuele sondering (rode lijn) en oorspronkelijke voorsondering (blauwe lijn)

Paal 5



Figuur 7.25 Paal 5, vergelijking gecreëerde virtuele sondering (rode lijn) en oorspronkelijke voorsondering (blauwe lijn)

Paal 6



Figuur 7.26 Paal 6, vergelijking gecreëerde virtuele sondering (rode lijn) en oorspronkelijke voorsondering (blauwe lijn)

De gegevens zijn statistisch verwerkt, analoog aan de verwerking in hoofdstuk 7.7.2. De simulatiewaarden gelden voor $F_{dyn} = 0,15$.

Laag 1	Type	Gemiddelde waarde	Gemiddeld verschil	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
		MPa	MPa	% van %	-
Paal 3	Vooraf	9,8			
	Simulatie	9,8	0,06	18,7	1,08
Paal 4	Vooraf	9,7			
	Simulatie	7,7	-1,94	26,6	0,74
Paal 5	Vooraf	9,97			
	Simulatie	6,27	-3,69	13,59	0,36
Paal 6	Vooraf	6			
	Simulatie	1,119	-4,09	15,78	0,21

Laag 2	Type	Gemiddelde waarde	Gemiddeld verschil	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
		MPa	MPa	% van %	-
Paal 3	Vooraf	7,63			
	Simulatie	6,46	-1,16	11,84	0,54
Paal 4	Vooraf	5,65			
	Simulatie	5,06	-0,59	10,83	0,5
Paal 5	Vooraf	5,55			
	Simulatie	4,38	-1,16	12,51	0,5
Paal 6	Vooraf	4,4			
	Simulatie	2,44	-1,96	41,49	0,65

Laag 3	Type	Gemiddelde waarde	Gemiddeld verschil	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
		MPa	MPa	% van %	-
Paal 3	Vooraf	2,4			
	Simulatie	2,4	0,01	16,84	1,42
Paal 4	Vooraf	7,01			
	Simulatie	6,93	-0,08	7,08	0,5
Paal 5	Vooraf	3,74			
	Simulatie	3,37	0,37	40,6	0,7
Paal 6	Vooraf	3,45			
	Simulatie	1,65	-1,80	21,15	0,4

Laag 4	Type	Gemiddelde waarde	Gemiddeld verschil	Standaard afwijking van de individuele waarden	Variatie coëfficiënt van de individuele waarden
		MPa	MPa	% van %	-
Paal 3	Vooraf	7,77			
	Simulatie	7,54	-0,23	15,09	1,15
Paal 4	Vooraf	9,87			
	Simulatie	8,11	-1,76	14,08	0,87

Tabel 7.2 Vergelijking van de vooraf-sondering en de simulatie van de sondering (voor Paal 5 en Paal 6 komt laag 4 niet voor i.v. m geringere inboordiepte)

7.9 Berekening van de schachtweerstand voor de door Deltares en GeoConsult uitgevoerde testen (tekst GeoConsult)

De navolgende tekst (*cursief*) is aangeleverd door GeoConsult. Opmerkingen van Deltares zijn in de tekst **regulier**, **vet** aangegeven.

De berekende schachtweerstand volgens NEN-9997-1:2016 uit de vóór-sondering en simulaties en de verschillen van Deltares en GeoConsult zijn weergegeven in onderstaande tabel. Het blijkt, dat de tweede simulatie (met $F_{dyn} = 0,03$) van Deltares sterk uit de pas loopt. Bij de eerste simulatie (met $F_{dyn} = 0,15$) zijn de resultaten van Deltares zelfs beter. De vergelijking laat zien, dat de berekening conform NEN-9997-1:2016 een resultaat oplevert waarbij de verschillen voor palen 3 t/m 5 niet meer dan ca. 2 tot 12 % (berekening door GeoConsult) bedragen. De berekeningen door Deltares geven een iets hogere bovengrens voor het mogelijke verschil, orde 15 %.

De resultaten van Paal 6 geven een sterk afwijkend beeld. De sondering van Paal 6 geeft op zich zelf al een merkwaardig beeld t.o.v. de ander sonderingen. Waarschijnlijk zijn daar afwijkende condities aanwezig die dit beeld tot gevolg hebben en navenant afwijkende resultaten voor de paalberekening opleveren.

	Sondering Vóór	Simulatie GeoConsult	Simulatie Deltares	Vershil GeoConsult	Vershil Deltares	Uit $P_{wrijvcum}$ GeoConsult	Proefbelasting
Rs;cal	kN	kN	kN	%	%	kN	kN
Paal 3	612	602	602* en 705**	-1,6	- 1,6 en + 15,2	1076	1265
Paal 4	664	589	662 en 966	- 11,3	- 0,3 en + 50,0	1084	1295
Paal 5	444	472	467 en 516	+ 6,3	+ 6,3 en + 16,2	633	697
Paal 6	298	127	209 en 252	- 57,4	29,9 en 15,4	632	858

* $F_{dyn} = 0,15$ ** $F_{dyn} = 0,03$

Tabel 7.3 Berekening van de schachtweerstand voor de door Deltares en GeoConsult uitgevoerde testen. Vergelijking a.d.h.v. de simulaties van de sonderingen.

De berekening van de schachtwrijving uit de in SBPMonitor door GeoConsult berekende in-situ geotechnische parameters, samengenomen in $P_{wrijvcum}$ (zie punt (5) op pagina 15) blijkt aanzienlijk dichter te liggen bij de werkelijk optredende waarden, zoals vastgesteld in de paalbelastingproef. Ook hier kan met betrekking tot de nog bestaande verschillen gesteld worden, dat SBPMonitor een innovatief systeem is, waarbij door het experimenteren met het systeem in de praktijk de kennis over de procesfactoren, zoals $R_{t\phi}$ en de geotechnische parameter $K_{h,na}$, de resultaten in de toekomst geoptimaliseerd moeten kunnen worden.

8 Fase 2: Testen van SBPMonitor op uitgevoerde projecten (rapportage door GeoConsult)

De navolgende tekst (*cursief*) is aangeleverd door GeoConsult. Opmerkingen van Deltares zijn in de tekst **regulier**, **vet** aangegeven.

Er zijn door GeoConsult testen uitgevoerd met sonderingen en schroefregistraties aangeleverd door Van 't Hek, Fundex en Volker Staal en Funderingen op locaties bij Wijdewormer, in Rotterdam en Amsterdam. Informatie over de door deze bedrijven gebruikt boormaterieel en de toegepaste installatiemethodiek is tevens weergegeven. Bij al deze grondverdringende schroefpalen werd grout toegepast tijdens het inbrengen van de palen. Dit met uitzondering van het proefproject van Van 't Hek bij Wijdewormer, waar tevens palen droog geschroefd werden.

8.1 De resultaten zijn gepresenteerd, zoals visueel in SBPMonitor waar te nemen, waarbij de virtuele sondering kan worden vergeleken met de oorspronkelijke sondering. Testen Wijdewormer

Dit project betreft geen voorspellingen van virtuele sonderingen op een andere locatie. Het gaat hier om een voorspelling van een virtuele sondering op de locatie van de ijkpaal, dus een terug substitutie van de ijkfactoren, op dezelfde locatie en met dezelfde inboorgegevens als gebruikt bij de ijking. Dit is dus een consistentiecheck zoals bij Paal 3 in Almere.

8.1.1 Geologische en geotechnische situatie

Ter plaatse van de test locatie Wijdewormer wordt een geologisch profiel aangetroffen, zoals weergegeven in Tabel 8.1.1.

Bovenkant laag m - NAP	Onderkant laag m - NAP	Beschrijving	Conusweerstand q_c in MPa	Periode
ca. 3, 7 à 4,0	5,0	Organische KLEI	0,1 tot 4	Holoceen
5,0	7,5	KLEI, zwak siltig	ca. 0,5	Holoceen
7,5	9,0	ZAND	tot ca. 5	Holoceen
9,0	11,5	KLEI, zwak siltig en SILT, zwak kleilig	0,5 tot 4,5	Holoceen
11,5	14,5	ZAND	3 tot 8	Holoceen
14,5	17,5	KLEI, zwak siltig	0,5 tot 2	Holoceen
17,5	18,5	VEEN	1,5 tot 2	Holoceen
18,5	Tot einde sondering ca. 25,0	ZAND	5 tot > 20	Pleistoceen

Tabel 8.1.1 Geologische opbouw testlocatie Wijdewormer

Tot aan de Pleistocene zandlagen met hoge conusweerstand zijn afwisselingen van kleilige en zandige lagen aanwezig die een geringe conusweerstand laten zien.

8.1.2 Beschrijving paalsysteem

De grondverdringende schroefpaal die gebruikt is, is de HEK-paal. Bij de installatie van de paal wordt een stalen hulpbuis, hier $D_s = 360$ mm, voorzien van een losse stalen boorpunt $D_b = 430$

mm, op het maaiveld geplaatst en vervolgens in de grond geschroefd. Op de boorpunt is een verticale stalen rib gelast met een hoogte van 30 mm die als functie heeft het losmaken van de grond onder de boorpunt en het zijdelings wegdrücken daarvan.

De boorpunt is tevens voorzien van één volledige schroefdraadgang met flensbreedte van 35 mm (buitendiameter flens komt overeen met $D_b = 430$ mm) en een spoed van 75 mm. (Fig. 8.1.1)

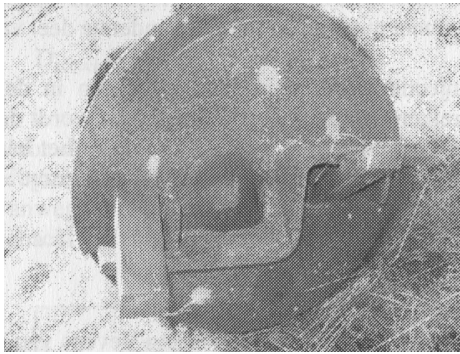


Fig. 8.1.1 Paalvoet met rib en stangen

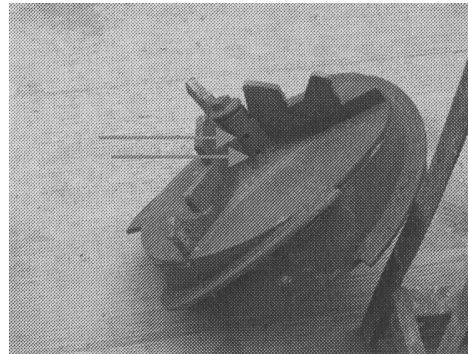


Fig. 8.1.2 Paalvoet met getande ribben en groutopeningen

Voor de testen in Wijdewormer zijn naast deze conventionele palen, palen met groutinjectie toegepast. De grout wordt in de grond gebracht middels openingen die zich centraal in de verloren paalvoet bevinden, waaromheen drie radiaal geplaatste, getande, ribben zijn aangebracht voor het losmaken van de grond (Fig. 8.1.2). Hierbij wordt in de slappe cohesieve en minder dichte zandlagen gedurende het inbrengen van de paal geïnjecteerd met dunne grout. Bij het bereiken van de draagkrachtige laag wordt de water/cement factor van de grout verlaagd tot 0,7. Over de laatste 0,25 m wordt de grouttoevoer gestopt en wordt de paal vast in het zand gezet.

8.1.3 Bijzonderheden paalinstallatie

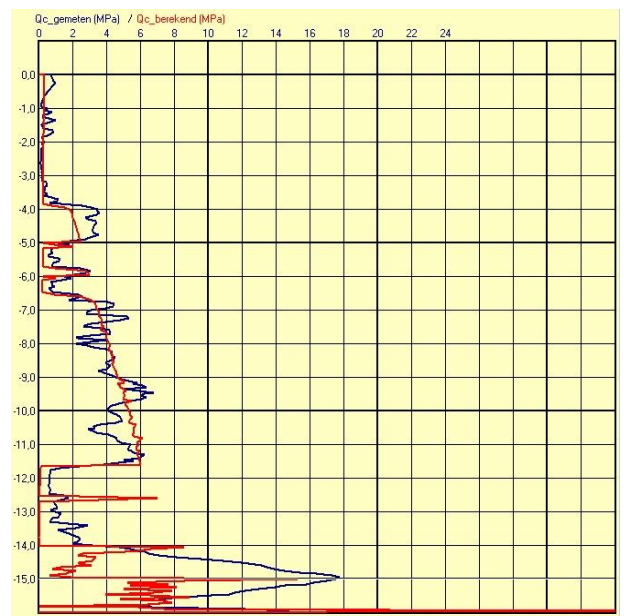
De buis wordt schroevend op diepte gebracht met een variabele draaisnelheid van $n = 6$ of 10 omwentelingen/min, onder het aanbrengen van een axiale druk P_i (maximaal 250 kN op de gebruikte boorstelling) en een draaimoment M_i (maximaal 400 kNm). Bij het bereiken van het gewenste paalpuntniveau wordt de wapening in de buis afgehangen, nadat gecontroleerd is of de buis droog en vrij van grond is. De buis wordt vervolgens gevuld met betonspecie. Tenslotte wordt de buis oscillerend getrokken.

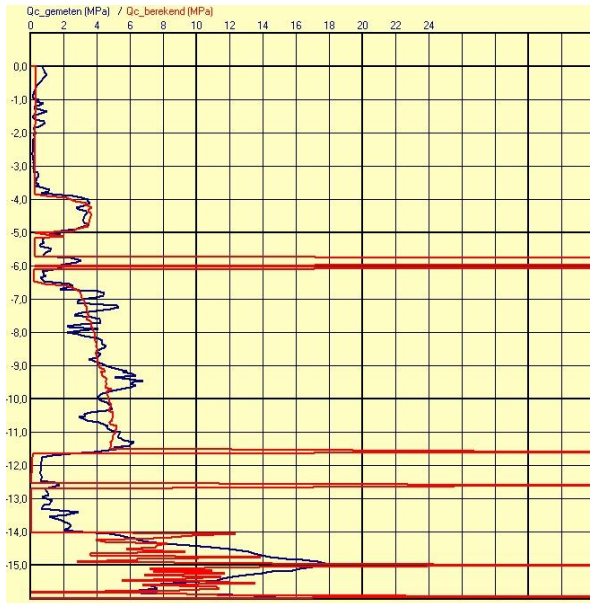
Er is voor Paal 3, zonder groutinjectie, en Paal 34, met groutinjectie, onderzocht wat het verschil in resultaat voor de grootte van Q_c -berekend is voor gebruik van de resultaten van $A_{pfactor}$ van alle zandlagen apart en van alle zandlagen samen.

8.1.4 Resultaten simulatie met SBPMonitor

De resultaten hiervan zijn weergegeven in Fig. 8.1.3a, b en 8.1.4a, b.

Voor de simulatie van de palen zonder grout injectie geldt $F_{dyn} = 0,1$ en $K_{h,na} = 0,7$

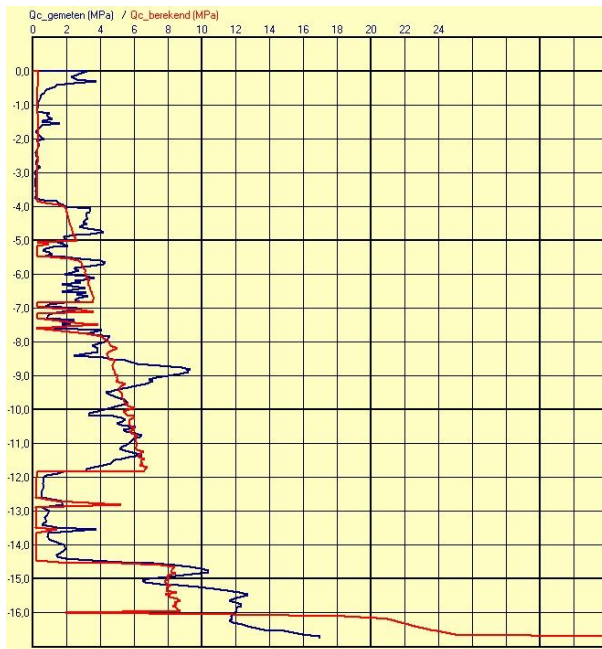




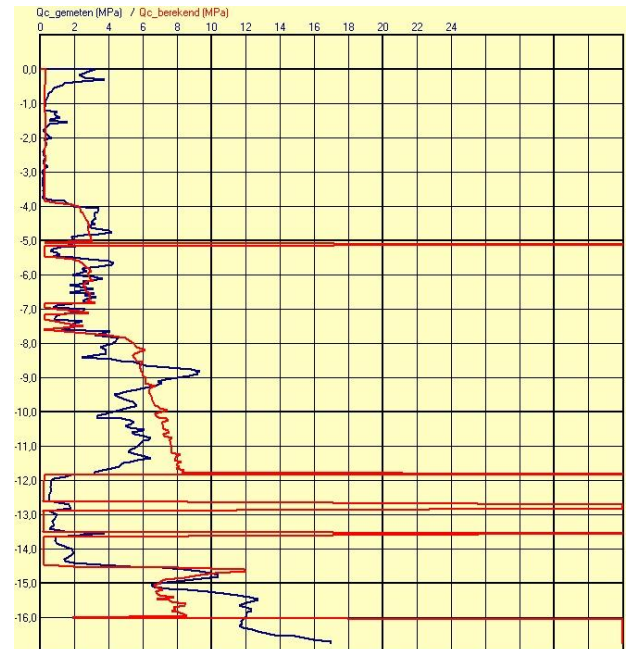
Figuur 8.1.3 a
Figuur 8.1.3 b

Virtuele sondering Paal 3,
Virtuele sondering Paal 3,
zonder groutinjectie
 $A_{pfactor}$ van alle zandlagen apart

Voor de simulatie van de palen met grout injectie geldt $F_{\text{dyn}} = 0,001$ en $K_{h;na} = 0,7$



Figuur 8.1.4a Virtuele sondering Paal 34, met groutinjectie
 A_{pfactor} Van alle zandlagen apart



Figuur 8.1.4b Virtuele sondering Paal 34, met groutinjectie
 A_{pfactor} Van alle zandlagen samen

8.1.5 Evaluatie door GeoConsult

Dit project betreft geen voorspellingen van virtuele sonderingen op een andere locatie. Het gaat hier om een voorspelling van een virtuele sondering op de locatie van de ijkpaal.

De resultaten laten zien, dat kwalitatief de virtuele sondering bij terug substitutie goed overeenkomt met de oorspronkelijk gemaakte sondering. De laageenheden zijn overal goed te onderscheiden.

De pieken die te zien zijn moeten toegeschreven worden aan nog onopgeloste inconsistenties in de software van het systeem.

Kwantitatief zijn er wat verschillen in de grootte van $Q_{c\text{-berekend}}$ in de virtuele sondering voor de verschillende laageenheden.

Voor zowel zonder als met groutinjectie zijn de resultaten voor de Holocene zandlagen conservatief, maar liggen dicht bij de oorspronkelijke sondering. Voor de Pleistocene zandlaag geeft de zandlaag apart de beste resultaten voor Paal 3, zonder groutinjectie.

De $Q_{c\text{-berekend}}$ voor de Pleistocene zanden zijn echter wat lager dan de werkelijke waarden. Dit is ook al geconstateerd bij de Eolische zanden bij de palen van Almere. Dit kan veroorzaakt worden door:

- *Een inconsistentie in het programma, welke verder uitgezocht moet worden.*
- *Bij Paal 34 met groutinjectie is er duidelijk ook een te lage waarde voor de $Q_{c\text{-berekend}}$, terwijl in de laatste meter de waarde zeer sterk toeneemt.*
- *Door een vermindering in aandrukkraft door de machinist dicht bij het bereiken van de*

einddiepte, waarbij vervolgens voor de laatste meter de aandrukkracht maximaal opgevoerd wordt voor het “vastzetten van de paal” doordat de Pleistocene zandlaag overgeconsolideerd is, terwijl hier toch een $K_{nna} = 0,7$ toegepast is.

8.2 Testen Rotterdam

Paal 158 zoals hier gerapporteerd is geijkt aan sondering S07 (op afstand van circa 9 m). Het gaat hier om een voorspelling van een virtuele sondering op de locatie van de ijkpaal, dus een terug substitutie van de ijkfactoren, op dezelfde locatie en met dezelfde inboorgegevens als gebruikt bij de ijking. Dit is dus een consistentiecheck zoals bij Paal 3 in Almere.

8.2.1 Geologische en geotechnische situatie

De bouwplaats waar de palen in dit project zijn uitgevoerd ligt direct ten zuiden van het Centraal Station te Rotterdam.

Het geologische profiel dat daar aanwezig is en de conusweerstand zijn gegeven in Tabel 8.2.1.

Bovenkant laag m - NAP	Onderkant laag m - NAP	Beschrijving	Conusweerstand q_c in MPa	Periode
ca. 1,5	3,0	Opgebracht ZAND	2 tot 3,5	Attropogeen
3,0	4,0	Organische KLEI	ca. 0,1 tot 0,2	Holoceen
4,0	8,0	VEEN, naar de onderkant overgaand in organische KLEI	ca. 0,1 tot 0,2	Holoceen
8,0	9,0	KLEI, zwak siltig	ca. 0,1 tot 0,2	Holoceen
9,0	14,6	SILT, zwak kleiig	ca. 0,1 tot 0,2	Holoceen
14,6	16,5	VEEN, naar de onderkant overgaand in organische KLEI	1,5 tot 2	Holoceen
16,5	Tot einde sondering ca. 27,0 m	ZAND	10 tot 20	Pleistoceen

Tabel 8.2.1 Geologische opbouw testlocatie Rotterdam

8.2.2 Beschrijving paalsysteem

Het gebruikte paalsysteem is vergelijkbaar met dat toegepast in Almere en Wijdewormer. Het paalttype is de Fundex groutinjectiepaal gebruikt met een stalen steunbuis van $D_s = 609$ mm, voorzien van een losse stalen boorpunt $D_b = 842$ mm.

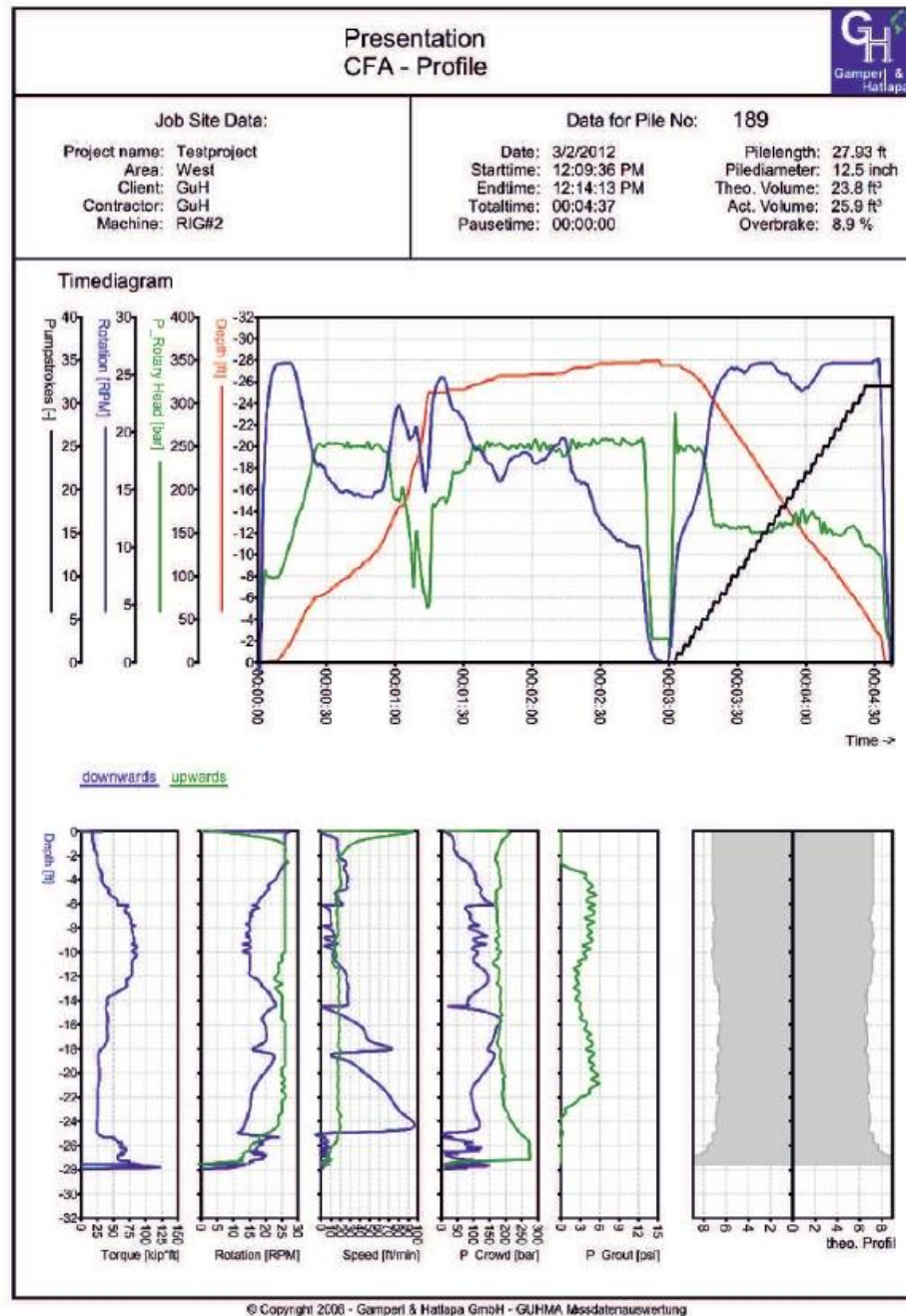
De conische verloren paalvoet is de typische Fundex-voet (Figuur 8.2.1) bestaande uit een spiraalvormige naar boven toenemende spoed.



Figuur 8.2.1 Fundex verloren paalvoet

8.2.3 Bijzonderheden paalinstallatie

Voor de registratie van de boorgegevens wordt door Fundex gebruikt gemaakt van het systeem van Gamperl & Hatlapa GmbH; www.guh-messtec.de. In Figuur 8.2.3 is de pagina als voorbeeld weergegeven, zoals deze na de installatie van de paal beschikbaar is.



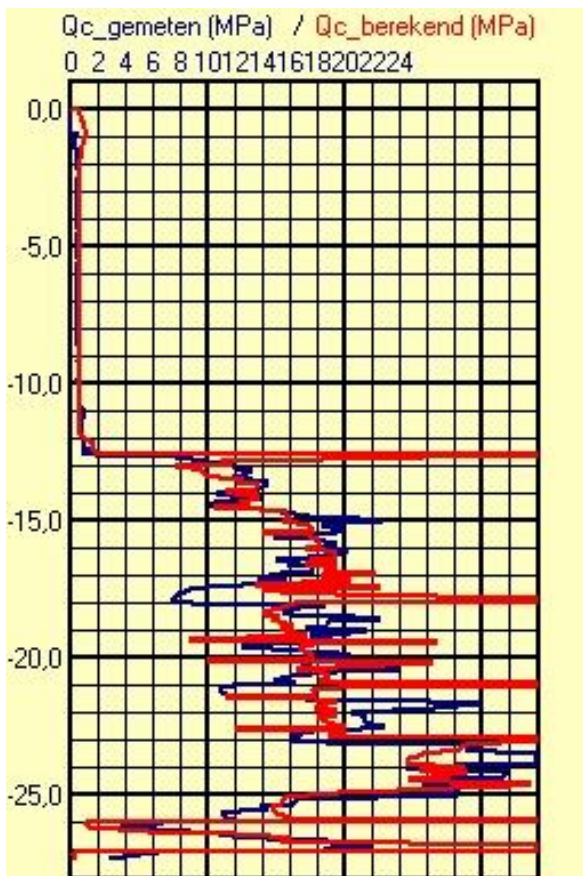
Figuur 8.2.3 Data pagina van het Gamperl & Hatlapa systeem

De boordata worden met dit systeem per tijdseenheid seconde geregistreerd. Dit is een zeer hoog bemonsteringsniveau gezien de lage penetratie snelheid van de paal.
Voor het uitvoeren van de testen zijn de boordata gemiddeld over intervallen van 0,10 m.

Er zijn geen verdere bijzonderheden over paalinstallatie bekend.

8.2.4 Resultaten simulatie met SBPMonitor

Voor de simulatie van palen met grout injectie geldt $F_{dyn} = 0,001$ en $K_{n,na} = 0,7$.
Paal 158 zoals hier gerapporteerd is geijkt aan sondering S07 (op afstand van circa 9 m).
Het gaat hier om een voorspelling van een virtuele sondering op de locatie van de ijkpaal, dus een terug substitutie van de ijkfactoren,



Figuur 8.2.4 Paal 158 geijkt met alle zandlagen apart

8.2.5 Evaluatie door GeoConsult

Het resultaat van de Q_c -berekend, in vergelijking met de originele sondering, toont een sterke overeenkomst bij terug substitutie.

De pieken die te zien zijn moeten toegeschreven worden aan nog onopgeloste inconsistenties in de software van het systeem.

De berekening van de schachtwrijving onder trekbelasting of drukbelasting conform NEN 999-7:2016 zal voor de oorspronkelijke sondering en de virtuele sondering nagenoeg dezelfde resultaten opleveren, omdat de Q_c afgesneden moet worden op 15 MPa bij een laagdikte ≥ 1 m, dan wel 12 MPa bij een laagdikte < 1 m.

Bij de berekening met de door SBP monitor berekende in-situ geotechnische eigenschappen na installatie van de paal zal de berekende schachtweerstand aanzienlijk toenemen.

8.3 Testen Amsterdam

Paal 38-06 is geijkt aan sondering KW520-DKM98 die op ca. 2,5 m afstand stond en de virtuele sondering is samengesteld uit de resultaten van de ijking. Paal 58-13 is geijkt aan sondering KW520-DKM158 die op ca. 10 m afstand stond en de virtuele sondering is samengesteld uit de resultaten van de ijking.

Het gaat hier in beide gevallen om een terug substitutie van de ijfactoren.

8.3.1 Geologische en geotechnische situatie

Op deze locatie in het Westelijk havengebied van Amsterdam zijn palen geboord in een profiel met de Pleistocene zandlaag op ca. 12 m – NAP (Tabel 8.3.1) en in een profiel met een Holocene geul, in de Pleistocene zandlaag ingesneden en opgevuld met een afwisseling van dunne lagen siltig zand en zandig silt, en met een diepte van 23,5 m – NAP (Tabel 8.3.2).

Bovenkant laag m - NAP	Onderkant laag m - NAP	Beschrijving	Consus-weerstand q_c in MPa	Periode
mv ca. 1,2 + NAP	0,8	Opgebrachte TEELARDE en ZAND	?	Antrapogeen
0,8	4,5	ZAND	4 tot 6	Holoceen
4,5	6,0	Zandige SILT en siltig ZAND	0,5 tot 2	Holoceen
6,0	10,0	siltig ZAND	1 tot 4,5	Holoceen
10,0	12,0	Kleilig en zandige SILT	3 tot 8	Holoceen
12,0	12,5	BasisVEEN	1	Holoceen
12,5	18	ZAND, pakketten van ca. 2 m dik, afgewisseld met kleilige SILT en siltig ZAND	4 tot 20	Pleistoceen
18	Tot einde sondering ca. 30,0	ZAND	14 tot > 30	Pleistoceen

Tabel 8.3.1 Geologische opbouw testlocatie Amsterdam-West Steunpunt #38

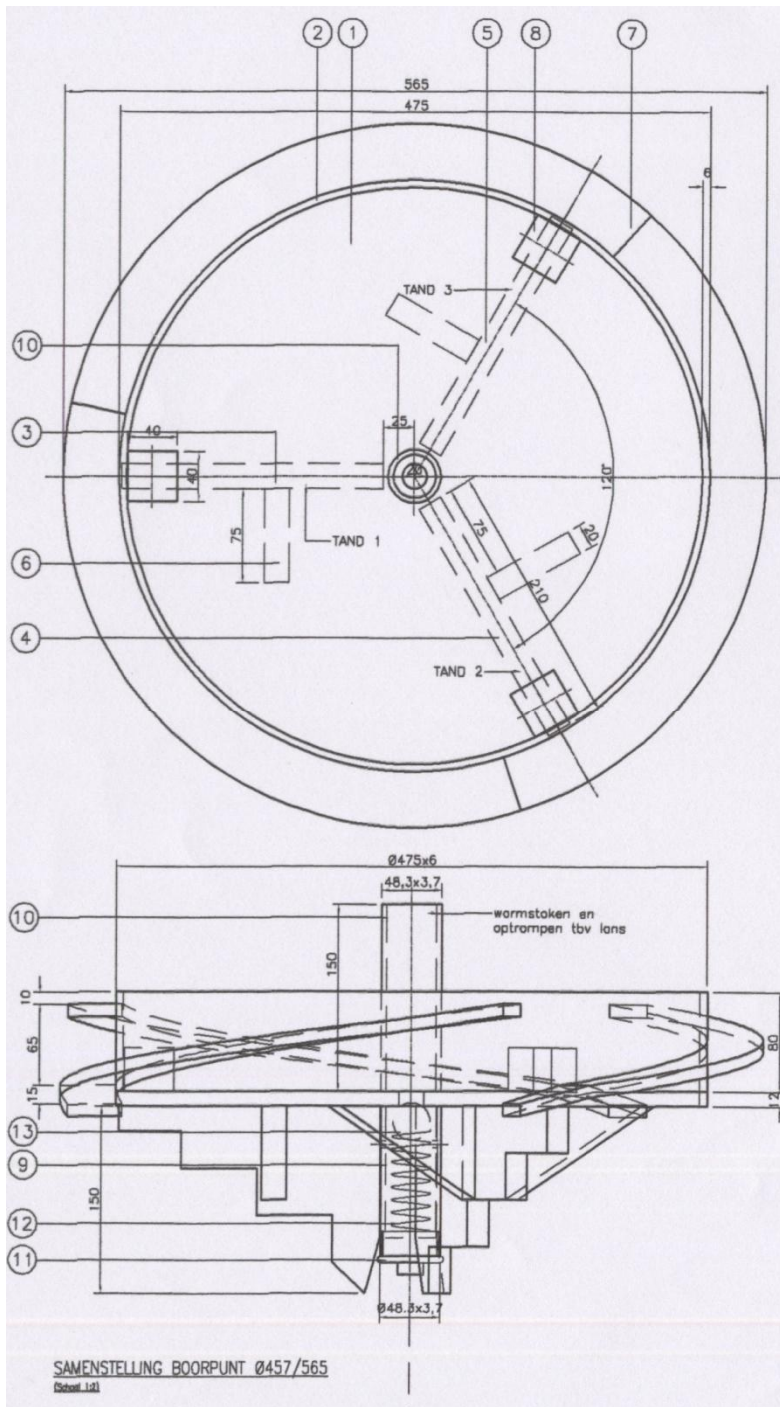
Bovenkant laag m - NAP	Onderkant laag m - NAP	Beschrijving	Consus-weerstand q_c in MPa	Periode
mv ca. 1,2 + NAP	0,8	Opgebrachte TEELARDE en ZAND	?	Antrapogeen
0,8	5	Kleilige SILT tot siltige KLEI	0,2 tot 0,5	Holoceen
5	8,7	Zandige SILT en siltig ZAND	0,5 tot 2	Holoceen
8,7	10,0	Siltig ZAND	1 tot 4,5	Holoceen
10,0	23,5	Siltig ZAND en zandige SILT en	3 tot 8	Holoceen
23,5	27,5	ZAND	20 tot 28	Holoceen
27,5	Tot einde sondering ca. 33,5	ZAND	10 tot > 45	Pleistoceen

Tabel 8.3.2 Geologische opbouw testlocatie Amsterdam-West Steunpunt #58

8.3.2 Beschrijving paalsysteem

Het gebruikte paalsysteem en de verloren paalvoet (Figuur 8.3.1) is weer sterk vergelijkbaar met dat van de HEK-paal met groutinjectie.

Het betreft hier de TVSi-paal van Volker Staal en Funderingen. Deze afkorting staat voor Terra Verdringend Schroef-injectiepaal.



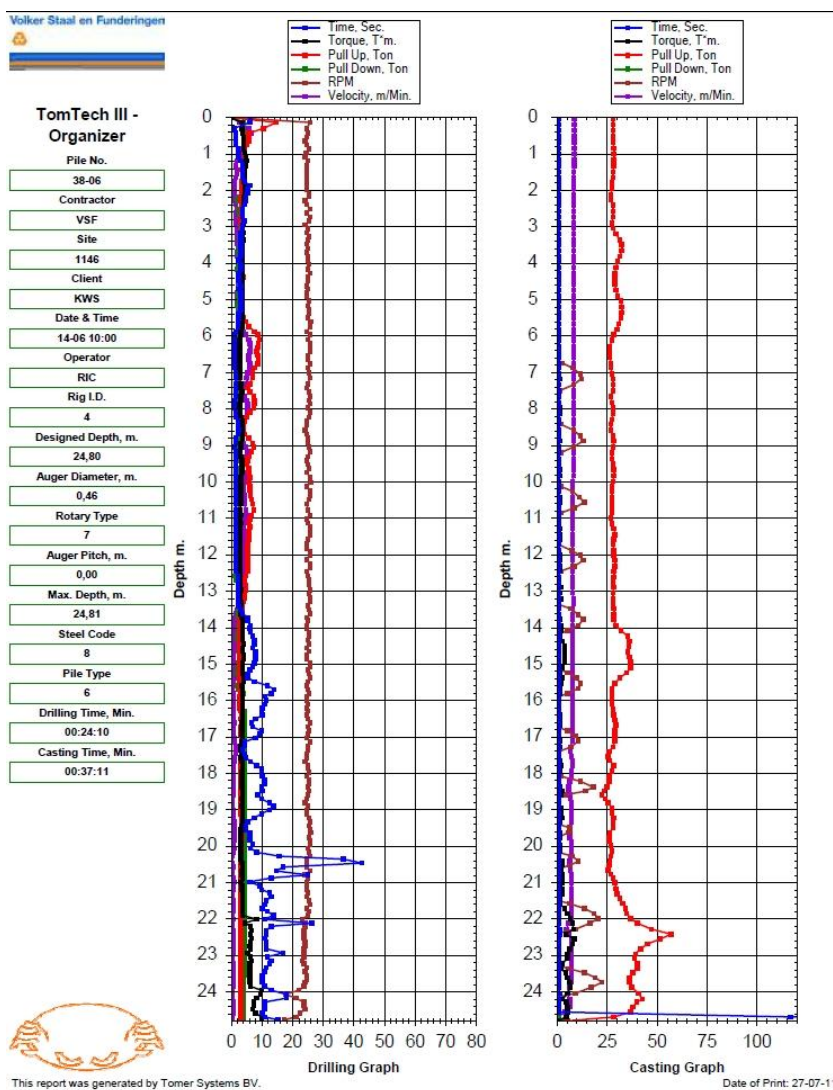
Figuur 8.3.1 Verloren paalvoet van de TVSi-paal

8.3.3 Bijzonderheden paalinstallatie

Voor de registratie van de boorgegevens wordt door VSF het Tomer Tom Tech III systeem gebruikt.

De registratie vindt plaats op basis van tijd, waardoor afhankelijk van de boorsnelheid 6 tot 10 registraties per meter gerealiseerd worden.

Een voorbeeld van een grafiek, zoals die met dit systeem over het boren, het plaatsen van de beton en van het trekken van de mantelbuis geleverd wordt, is weergegeven in Figuur 8.3.2



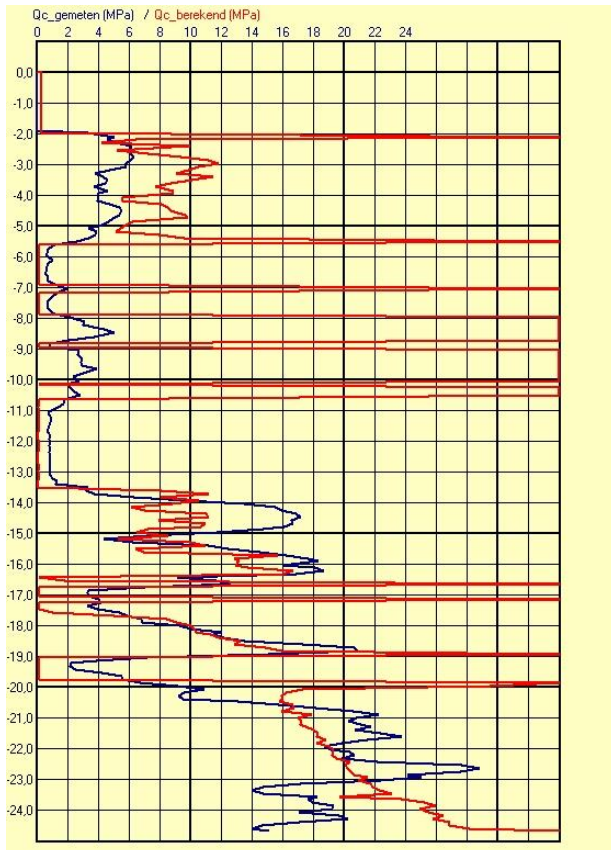
Figuur 8.3.2 Data pagina van het Tomer systeem

Er zijn geen bijzonderheden bekend over de paalinstallaties zelf.

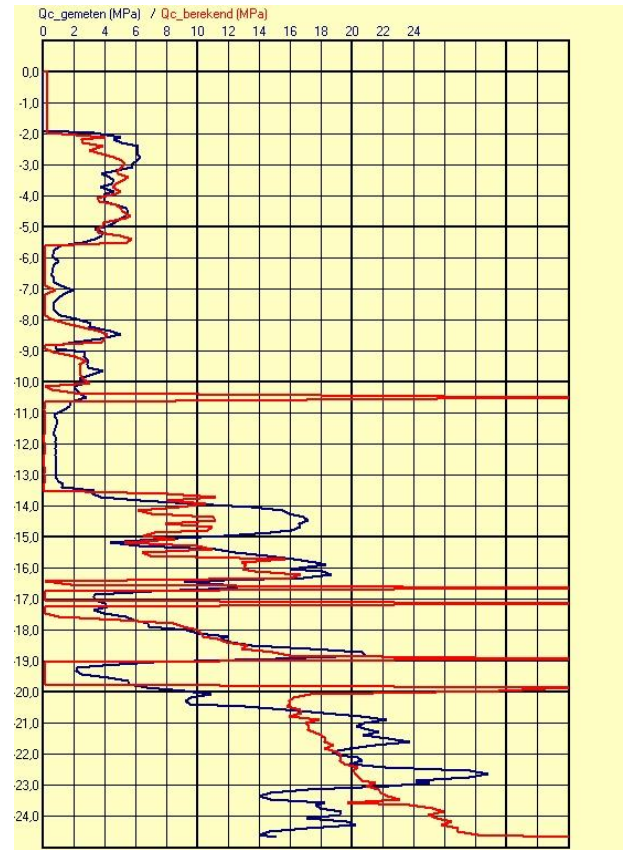
8.3.4 Resultaten simulatie met SBPMonitor

Voor de simulatie van paal 38-06 met grout injectie bij steunpunt # 38 geldt $F_{dyn} = 0,001$ en $K_{h,na} = 0,7$.

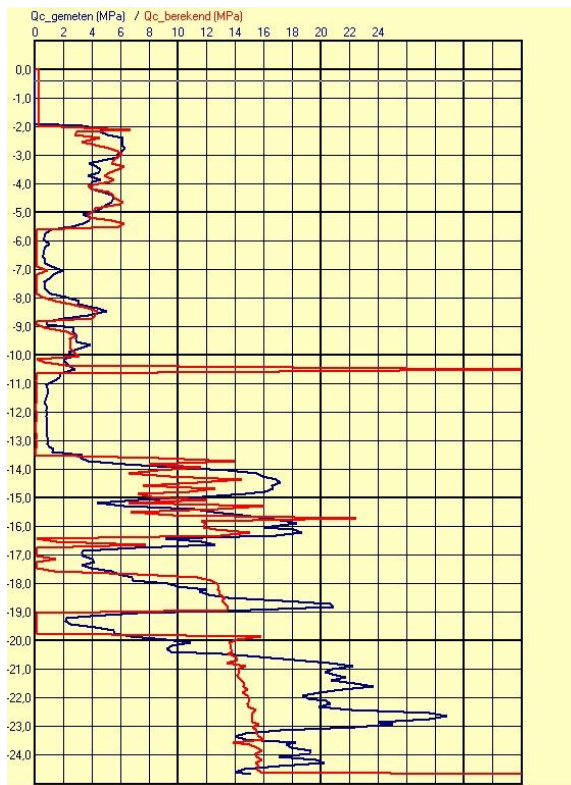
Noot: de correlatiefactor A_p kan worden bepaald door voor alle zandlagen een eigen factor vast te stellen of een factor te bepalen waarbij alle zandlagen worden meegenomen. Ook kan een splitsing worden gemaakt tussen Holoceen en Pleistoceen.



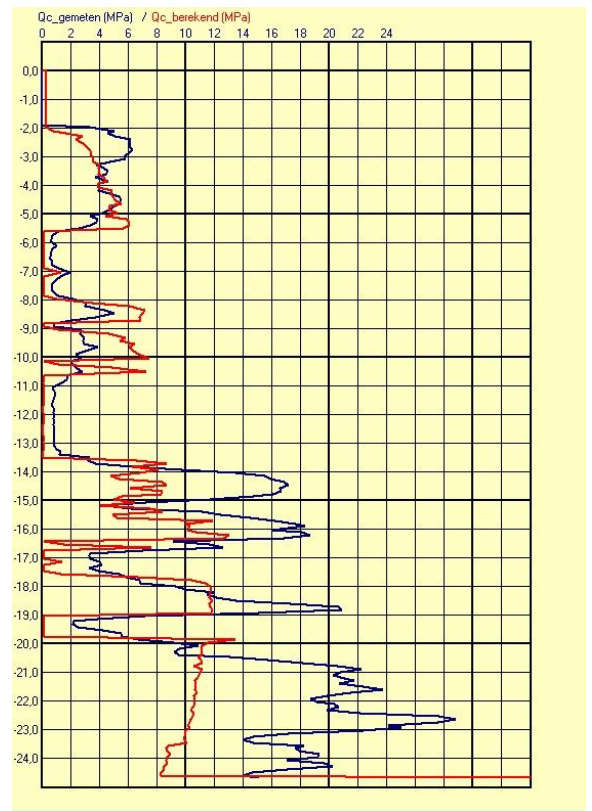
Figuur 8.3.3a IJking met alle zandlagen apart



Figuur 8.3.3b IJking met Holoceene zandlagen samen, Pleistocene zandlagen apart

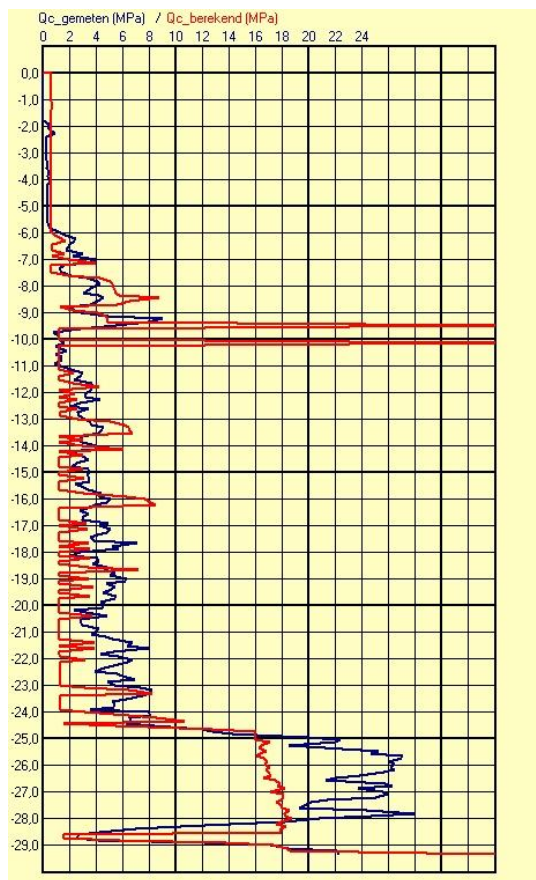


Figuur 8.3.3c IJking met Holocene zandlagen en Pleistocene zandlagen apart



Figuur 8.3.3d IJking met alle zandlagen samen

Voor de simulatie van paal 58-13 met grout injectie steunpunt # 58 geldt $F_{dyn} = 0,001$ en $K_{h,na} = 0,7$. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 8.3.5a.



Figuur 8.3.5a Locatie Westelijk havengebied Amsterdam - simulatie van paal 58-13 met grout injectie steunpunt # 58

8.3.5 Evaluatie door GeoConsult

Paal 38-06 is geijkt aan sondering KW520-DKM98 die op ca. 2,5 m afstand stond en de virtuele sondering is samengesteld uit de resultaten van de ijking. Paal 58-13 is geijkt aan sondering KW520-DKM158 die op ca. 10 m afstand stond en de virtuele sondering is samengesteld uit de resultaten van de ijking. Het gaat hier in beide gevallen om een terug substitutie van de ijfactoren.

Hier zijn ook weer de pieken te zien die moeten toegeschreven worden aan nog onopgeloste inconsistenties in de software van het systeem.

Bij steunpunt #38 blijkt dat, indien de Holocene zandlagen samen genomen worden, dit de beste resultaten op levert (Figuur 8.3.3b en c).

De Pleistocene zandlagen apart (Figuur 8.3.3b) geven dan weer de beste resultaten, zij het, dat in dat geval de zandlaag tussen de 13,5 m en 15 m – mv weer een te lage waarde voor de Q_c -berekend blijkt te geven, zoals dat ook bij de palen Pleistocene lagen van Almere en Wijdewormer het geval was.

Bij steunpunt #58 is sprake van een met siltige zanden opgevulde geul. De lagere waarden uit de boorregistratie worden door het systeem nog niet goed verwerkt.

Wel laat het resultaat zien, dat de geul door de operator van de machine goed herkend kan worden en dat de overgang naar de funderingslaag op ca. 25 m – NAP duidelijk waargenomen kan worden. Dit is een belangrijk fenomeen aangezien de diepte van de geul varieert over de bouwplaats van niet aanwezig bij steunpunt #38 naar de genoemde diepte bij steunpunt #58.

8.4 Conclusie door GeoConsult met betrekking tot de procesfactor F_{dyn} en geotechnische parameter $K_{h,na}$

Voor de palen bij Wijdewormer waar geen grout werd toegepast voor het inschroeven bedroeg $F_{dyn} = 0,1$ en de $K_{h,na} = 0,7$.

Voor alle met grout toegepaste palen in Holocene en Pleistocene zanden en met drie verschillende systemen bedroeg de $F_{dyn} = 0,001$ en de $K_{h,na} = 0,7$.

Deze resultaten lijken erop te duiden, dat er voor de in West-Nederland aangetroffen geologische en geotechnische profielen consistentie bestaat bij de toe te passen procesfactor F_{dyn} en de geotechnische parameter $K_{h,na}$.

9 Evaluatie en conclusie

9.1 Evaluatie

(1)

Het systeem SBPMonitor maakt gebruik van de verhouding puntspanning (tijdens inboren) en de conusweerstand op die diepte. De verhouding wordt op diverse diepten in een geologisch homogene grondlaag bepaald, waarbij wordt aangenomen dat alle verhoudingsgetallen in de laag bruikbaar zijn (de zogenaamde ijking). De gevonden relatie wordt toegepast om voor grondverdringende schroefboorpalen in dezelfde geologische laag (op hetzelfde bouwterrein) vanuit de inboorgegevens ter plaatse van de betreffende paal een voorspelling van de voorafsondering te maken. Tijdens de ijking moet nog een keuze worden gemaakt voor de waarde van een zogenaamde dieptefactor (F_{diepte}); de dieptefactor is geïntroduceerd om rekening te houden met een graduele verandering van de verdringing en/of het bezwijkmechanisme. Voor de keuze van (F_{diepte}) zijn geen regels bekend; de (F_{diepte})-waarde wordt via visuele beoordeling van het resultaat van de ijking bepaald (terugvertalen van de voorafsondering op de locatie van de ijking).

In de werkbankversie is F_{diepte} niet als invoerveld beschikbaar.

(2)

De inboorgegevens bestaan uit de aangebrachte drukkracht op de paalkop als functie van de diepte. Hierbij wordt rekening gehouden met een aantal correcties, zoals het netto gewicht van de boorcasing.

De puntspanning wordt daarna berekend door de wandwrijving op de boorcasing in mindering te brengen. De wandwrijving wordt berekend met de horizontale gronddruk en een wandwrijvingshoek. De zo bepaalde statische wandwrijving wordt vertaald in een dynamische wandwrijving via dynamische wrijvingsfactor (F_{dyn}) die in het project Almere 0,03 tot 0,15 bedraagt (Fase 1, Hoofdstuk 7). Voor zanden in niet glaciaal beïnvloedde gebieden (beschouwde projecten in Fase 2, Hoofdstuk 8) zijn deze waarden consistent anders: $F_{\text{dyn}} = 0,1$ zonder grouttoepassing en $F_{\text{dyn}} = 0,001$ met grout. Voor de keuze van de F_{dyn} zijn geen regels bekend; de F_{dyn} -waarde wordt via visuele beoordeling van het resultaat van de ijking (terugvertalen van de voorafsondering op de locatie van de ijking).

Dit zijn op het eerste gezicht lage waarden maar in de boorpraktijk voor diepe olieboringen worden dergelijke lage waarden toegepast (term: draft friction). Een uitgangspunt is daarbij dat er sprake is van een doorgaande rotatiebeweging. Bij stagnatie hiervan zal de wrijving oplopen richting statische waarden.

(3)

De wandwrijvingshoek inclusief het effect van het boorproces wordt vastgesteld via een bekende correlatie met de conusweerstand (Robbertson&Campanella, 1983) voor bepaling van de ϕ -waarde van het zand en een empirische factor ($R_{\tan(\phi')}$) om de effecten van het boorproces in rekening te brengen. De ϕ -waarde van het zand ($\text{tg } \phi'_{\text{voor}}$) wordt geacht onafhankelijk te zijn van de zandeigenschappen door verschijnselen zoals crushing van zandkorrels onder de hoge korrelspanningen.

De ϕ'_{voor} wordt vertaald naar een ϕ'_{na} (inclusief het effect van installeren) met behulp van een empirische factor ($R_{\tan(\phi');n}$). Deze laatste factor is in Almere vastgesteld uit proefbelastingen en na-sonderingen. De achtergrond en wijze van uitvoering van analyse is niet beschikbaar gesteld.

De horizontale gronddrukcoëfficiënt, inclusief het effect van het boorproces ($K_{h,na}$), wordt vastgesteld via toepassen van een empirische procesfactor $R_{k;n}$. Deze factor is nog niet nader ingevuld en nog niet in de werkbankversie/systeembeschrijving opgenomen. De $K_{h,na}$ -waarden moet worden gekozen via visuele beoordeling van het resultaat van de ijking (terugvertalen van de vooraf-sondering op de locatie van de ijking).

(4)

Het is belangrijk om op te merken dat voor verschillende combinaties van F_{diepte} , F_{dyn} , $K_{h,na}$ en $(R_{(\tan(\varphi'))})$ een gelijke kwaliteit van de visuele match kunnen opleveren. De waarden van deze parameters, in afhankelijkheid van de geologische gelaagdheid en de sterkte in termen van conusweerstand, zijn specifiek voor de detail-configuratie van de boor- en boorpunt en de geologische en geotechnische eigenschappen van de laag. Deze waarde moet uit eerdere projecten bekend zijn (of worden ingeschat). Verder moet vooraf een gedetailleerd beeld van de geologische/geotechnische gelaagdheid van de grond voor de projectlocatie beschikbaar zijn.

(5)

De voorspelling van vooraf-sonderingen met de huidige versie van SBPMonitor is hoopgevend maar geeft nog geen consequente kwaliteit. Hier speelt mee dat het inboorproces voor elke paal anders kan zijn verlopen qua boorefficiëntie in termen van: kracht op de paalkop, toegepast boormoment en volumebalans van de hoeveelheid getransporteerde grond en de gerealiseerde zakking van de paal. Aan de boorefficiëntie (mate van ontspanning) moeten eisen worden gesteld om vanuit een bepaalde locatie een vooraf-sondering op een andere locatie te voorspellen. Door meermalen itereren van het ijkproces kan een nauwkeuriger resultaat worden verkregen; dit als uitgangspunt voor de voorspelling van de na-sondering bij naburige palen.

(6)

Het systeem is gebaseerd op correcte mechanische principes en gangbare geotechnische analyses, e.e.a. omgeven door een iteratieproces. Voor de te hanteren parameterwaarden van F_{diepte} , F_{dyn} , $K_{h,na}$ en $(R_{(\tan(\varphi'))})$ is er echter geen theoretische achtergrond aanwezig en moet vooralsnog worden teruggevallen op een visuele beoordeling van het ijkproces en ervaringscijfers.

(7)

Het valt op dat bij overgang tussen lagen relatief grote verschillen optreden tussen de voorspelling en de vooraf-sondering. Het rekenmodel in de monitor kan wellicht worden verbeterd door de rekenroutine aan te vullen met een gewogen gemiddelde conusweerstand volgens Koppejan (4d-8d methode). Het is bekend dat de methode Koppejan een zeer goede voorspeller is voor de draagkracht van grondverdringende palen in het overgangsgebied tussen twee lagen met verschillende vastheden (conusweerstand). Deze gewogen conusweerstand kan dan worden gecorreleerd aan de boorgegevens om de ijking uit te voeren en om daarna de voorspelling te maken.

(8)

De virtuele sondering is bedoeld om alleen de schachtweerstand van de paal te simuleren.

De volgende bevindingen over de **toepassing** van de werkbankversie kunnen worden gemeld. In deze versie is de F_{diepte} -factor niet geïmplementeerd.

(1)

Bij het gebruik van de “werkbankversie” is geconstateerd dat bij de invoer van de ijktabel “Ap-factor” er te weinig getallen achter de komma worden meegenomen. In eerste instantie kunnen de juiste waarden worden ingevoerd, maar bij heropenen van de file komen afgeronde getallen tevoorschijn. Deze afrondingen spelen direct door in het eindresultaat van de voorspelling. De richtingscoëfficiënt van de trendlijn is zeer gevoelig voor het aantal cijfers achter de komma (minimaal benodigd 4).

(2)

De ijkprocedure geeft steeds iets afwijkend resultaat bij precies dezelfde invoer van de getallen. Ook hier moet een optimalisatie van de rekenroutine nog worden doorgevoerd.

De volgende bevindingen over de **kwaliteit** van de voorspellingen kunnen worden vastgesteld.

(1)

Met de uiteindelijke ijkfactoren A_p -factor uit een 3^e iteratieslag kan voor het project Almere de oorspronkelijke vooraf-sondering bij Paal 3 worden gesimuleerd. Voor de beide keuzen voor F_{dyn} geeft de gegenereerde sondering in het algemeen een redelijke benadering, maar de kwaliteit is afhankelijk van de gekozen parameter-waarden (F_{dyn} , $K_{h;na}$ en ook de factor $R_{(\tan \varphi)_{na}}$ welke nu als vaste relatie in de werkbankversie is geprogrammeerd). Als de conusweerstand op een bepaald diepteniveau wordt vergeleken blijkt een maximale afwijking tot 30% en 50% mogelijk.

(2)

Opgemerkt moet worden dat de vooraf-sondering in de Pleistocene (de diepste) grondlaag niet goed kan worden gesimuleerd en dat dit kan worden toegeschreven aan het ontbreken van een eenduidige uniforme relatie voor de verhouding kracht aan de paalpunt-conusweerstand (ijkwaarden voor A_p).

In de praktijk kan het voorkomen, dat de kracht die door de machine op de grond uitgeoefend wordt (actie van de machinist) niet constant is.

(3)

De waarden voor F_{dyn} , $K_{h;na}$ en ook de factor $R_{(\tan \varphi)_{na}}$ moeten bekend zijn uit eerdere projecten met palen in dezelfde geologische grondlaag. Deze factor zal equipment specifiek zijn. Voor verschillende combinaties van getalwaarden voor deze factoren blijken redelijke en minder goede voorspellingen van het sondeerbeeld mogelijk.

(4)

Voor Paal 1 en Paal 2 in project Almere is door Deltares geen simulatie van de vooraf-sondering uitgevoerd door een inleesfout van de sondeer/boordata. De overige data van Paal t/m Paal 6 geven echter voldoende achtergrond om een beoordeling van het systeem te kunnen uitvoeren.

(5)

Voor de door GeoConsult aangeleverde ijkresultaten van Noord-Holland, Amsterdam en Rotterdam, met de waarden voor F_{diepte} en $R_{(\tan(\Phi_i))}$ gelijk aan die voor de situatie Almere, blijkt dat de verandering van $K_{h;na}$ t.o.v. $K_{h;voor}$ relatief zeer gering is en dat een waarde van $K_{h;na} = 0,7$ werkbaar is. De waarde van $F_{dyn} = 0,1$ is werkbaar geacht voor palen met grout en $F_{dyn} = 0,001$ voor palen zonder grout.

(6)

Er moet vanuit worden gegaan dat een uniform inboorproces een voorwaarde is voor een goede reconstructie van de vooraf-sondering en voor voorspellingen van vooraf-sonderingen op andere boorlocaties op het terrein.

(7)

Het trekdraagvermogen van een paal wordt bepaald door de gemiddelde conusweerstand langs de paalschacht; de afwijkingen van de gemiddelde waarden voor de verschillende lagen in de grondopbouw liggen voor de individuele conusweerstand in de range van 20% tot 50% en soms hoger. Opgemerkt wordt dat bij een gemiddelde waarde over de gehele lengte van de paalschacht er een verdere uitmiddeling plaatsvindt en dat de verschillen dan afnemen.

9.2 Conclusie

- 9.2.1 Kan met het systeem de geotechnische kwaliteit van een grondverdringende schroefpaal beoordeeld worden?

Bij het beschikbaar komen van theoretische achtergrond of empirische informatie over de invoerparameters F_{diepte} , F_{dynwrijv} , $K_{h;na}$ en $(R_{(\tan(\varphi'))})$ zal het wellicht mogelijk blijken om een voorspelling van de vooraf-sondering op basis van inboorgegevens te verbeteren. Er zullen wel eisen moeten worden gesteld aan de efficiëntie van het boorproces (uniform en voor alle palen gelijk).

Kunnen geotechnische parameters (gerepresenteerd door de virtuele sondering) ter plaatse van de paal tijdens het inbrengen worden bepaald?

Het blijkt dat het met de huidige versie van SBPMonitor mogelijk is om een voorspelling van de vooraf-sondering uit te voeren. De voorspelling is echter niet eenduidig. Als met de virtuele sondering de wrijving langs de paal wordt berekend kunnen afwijkingen van 2% tot circa 12% (GeoConsult, gebaseerd op berekeningen voor Almere, Wijdewormer, Rotterdam, Amsterdam) worden verwacht. De berekeningen door Deltares, gebaseerd op Almere, geven een iets hogere bovengrens voor het mogelijke verschil, orde 15 %.

- 9.2.2 Kan de draagkrachtberekening “in real time” worden uitgevoerd?
Voor een draagkrachtberekening op trek volgens de geldende Nederlandse norm NEN 9997:2016 zou de voorspelde vooraf-sondering direct input kunnen gaan leveren voor het berekenen van de component paalschachtwrijving.

10 Literatuur

Huybrechts, N&J, Maertens (2004). Statische paalbelastingproeven op grondverdringende schroefpalen aangezet in Tertiair zand, Geotechniek, april 2004.

Patent EP 2348159A1- Method for the installation of a rotary soil displacement pile. Publication date 27 th July 2011. Inventor Floris Schokking (bron: internet Google).

Robertson&Campanella (1983). Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand; Canadian Geotechnical Journal, Vol 20, pp.718-733

Schokking, F & P. IJnsen. (2014). Onderzoek installatie en belasting van grondverdringende schroefpalen, Almere-Poort. Geotechniek no. 10, juli 2014.

Van Impe, W.F. & H. Pfeiffer (1997). Influence of screw pile installation on the stress state in soil. Key-note lecture in: Design of Axially Loaded Piles – European Practice, De Cock&Legrand, Balkema, Rotterdam, pp. 3-19

A Steemopzet SBPMonitor

