

# Protocol voor de selectie en installatie van waterspanningsmeters

Protocol voor het selecteren, plaatsen, toepassen en behouden van instrumenten voor het monitoren van waterspanningen in de ondergrond voor gebruik tijdens toetsingen, het ontwerp en de realisatie van dijkverbeteringen en gedurende de beheerfase van dijken.

VN-67440-1 / 1417-0042-000 | 16 januari 2019



Onderwerp: Protocol waterspanningsmeters  
 Opdrachtnummer WSRL 643558  
 Projectnummer W&P VN-67440-1  
 Projectnummer Fugro 1417-0042-000  
 Klant: Project Overstijgende Verkenning Macrostablieit  
 De Blomboogerd 1  
 4003 BX Tiel  
 Datum: 16 januari 2019  
 Auteurs: Franck Hogervorst (Fugro)  
 Kees-Jan van der Made (Wiertsema & Partners)  
 Arend Pool (Fugro, projectleider)

#### Verantwoording

Op verzoek van Project Overstijgende Verkenningen Macrostablieit (POVM) is het voorliggende protocol waterspanningsmeters opgesteld. Het protocol is opgesteld door Fugro NL Land B.V. en Wiertsema & Partners B.V. Het protocol is voor commentaar voorgelegd aan de leden van de Vereniging Ondernemers Technisch Bodemonderzoek waarin vrijwel alle geotechnische onderzoeksbedrijven in Nederland verenigd zijn, Deltares en het cluster 'Monitoring van de sterkte' van de POVM.

Versie	Datum	Omschrijving
1	3 augustus 2018	Concept groene versie voor commentaar POVM
2	16 januari 2019	Definitieve groene versie

<b>1</b>	<b>Onderwerp en toepassingsgebied .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Normen, termen en definities .....</b>	<b>7</b>
2.1	Normen .....	7
2.2	Samenvatting JCGM 200:2012 .....	7
2.3	Onzekerheidsbenadering .....	8
2.4	Algemene begrippen meetprocessen .....	9
2.5	Specifieke begrippen waterspanningsmetingen .....	9
<b>3</b>	<b>Kader en randvoorwaarden waterspanningsmetingen .....</b>	<b>12</b>
3.1	Kader .....	12
3.2	Notitie uitgangspunten en randvoorwaarden meetsysteem .....	12
3.2.1	Eisen Meetnetontwerp.....	12
3.2.2	Inpassing in meet- en besluitstrategie .....	13
3.2.3	Datalevering en informatieverstrekking.....	13
3.3	Monitoringsplan op te stellen door monitoringsaannemer.....	14
3.3.1	Meetnetontwerp.....	14
3.3.2	Inpassing in meet- en besluitstrategie .....	16
3.3.3	Datalevering en informatieverstrekking.....	16
<b>4</b>	<b>Selectie componenten meetsysteem.....</b>	<b>18</b>
4.1	Waterspanningsmeter.....	18
4.1.1	Grondfilter.....	19
4.1.2	Waterkamer .....	20
4.1.3	Schouder .....	20
4.1.4	Sensoren.....	21
4.1.5	Samenhang tussen instrument-kenmerken .....	22
<b>5</b>	<b>Installatie apparatuur en waterspanningsmetingen .....</b>	<b>23</b>
5.1	Algemeen .....	23
5.2	Werkvoorbereiding .....	24
5.3	Aanbrengen waterspanningsmeters .....	25
5.4	Aansluiten van sensorkabels en opstarten van datalevering.....	28
5.5	Site Acceptance Test rapportage, start nulmeting.....	29
5.6	Afwerking meetlocaties en communicatie met andere partijen op locatie.....	29
5.7	Preventie van fouten bij plaatsing.....	31
<b>6</b>	<b>Beoordeling monitoringssystemen .....</b>	<b>33</b>
6.1	Richtlijnen voor beoordeling monitoringssystemen .....	33
6.1.1	Eenvoudige beoordelingsmatrix.....	33
6.1.2	Uitgebreide beoordelingsmatrix .....	33
6.2	Voorbeeldberekeningen nauwkeurigheid en samengestelde meetfouten van meetsystemen .....	38
6.2.1	Voorbeeld 1: waterspanningsmeting met één sensor met luchtdrukcompensatie.....	39

6.2.2	Situatie 2: verschilmetingen tussen twee luchtdrukgecompenseerde waterspanningsmeters .....	42
6.2.3	Voorbeeldgrafiek verstoring door gasvorming .....	43
6.3	Hoe kom je van een monitoringsvraag tot een instrumentselectie.....	44
6.4	Aandachtspunten buiten de scope van dit protocol .....	46
<b>7</b>	<b>Literatuur.....</b>	<b>47</b>

Bijlagen:

A	Algemene begrippen meetprocessen	
	A.1.1 Definities metrologie :	conform JCGM 200:2012
	A.1.2 Definities metingen en de kenmerken daarvan :	Handreiking Life Cycle Monitoring
	A.1.3 Definities metingen en de kenmerken daarvan :	Dunnicliffe
	A.2 Meetsysteem robuustheid	
	A.3 Algemene kenmerken van meetsysteemcomponenten	
	A.4 Meetsysteem prestaties en meetwaarde kwaliteit	
	A.5 Kwaliteitsverlies na SAT gedurende de projectlooptijd	
	A.6 Vreemde waarnemingen of systeemstoringen?	
B	Eigenschappen, aspecten en typen waterspanningsmeters	
C	Checklijsten	
	C.1 Checklist werkvoorbereiding	
	C.2 Checklist veldmedewerker	
D	Ontluchten waterspanningsmeters	
E	Plaatsen Geopoint waterspanningsmeters en loggerkasten	

## Voorwoord

**Voor contractmanagers en inkopers bij opdrachtgevers:** op pagina 14 staat een checklist voor een complete uitvraag. Voor het vaststellen van de juiste kwaliteitsklasse is overleg nodig met de experts bij de opdrachtgever.

**Voor monitoringspecialisten bij opdrachtnemers:** op pagina 17 staat een checklist voor een compleet monitoringsplan / monitoringsaanbieding. Op pagina 21 staat een overzicht van de klasse-indeling voor sensoren. Aanbevolen wordt om in aanbiedingen zoveel mogelijk naar dit protocol te verwijzen.

Waterspanningsmetingen bij dijken vinden plaats gedurende meerdere opeenvolgende fasen van een proces/project:

1. Voorafgaand aan een ontwerp of toetsing. Deze metingen worden veelal uitgevoerd om natuurlijke variaties in parameterwaarden vast te stellen. De metingen worden daarna gebruikt als input voor ontwerp of toetsing;
2. Tijdens de realisatie van projecten. Hier worden de metingen gebruikt om aannamen tijdens het ontwerpproces te controleren en om de realisatieprocessen, zoals ophoogsnelheden, te sturen en om tijdig afwijkingen te kunnen signaleren op basis waarvan aanpassingen in de voorziene uitvoeringswijze nodig zijn of maatregelen getroffen kunnen worden om calamiteiten te voorkomen;
3. Tijdens de beheerfase. Efficiënt asset management van dijken vergt een systematische planning van dijkmonitoringactiviteiten. Asset management van een dijk houdt in dat de optimale prestatie uit de dijk gehaald wordt tegen acceptabele risico's en aanvaardbare kosten, gemeten over de gehele levenscyclus van de dijk. De resultaten van meerjarige metingen worden gebruikt om tijdig veranderingen te signaleren en inzicht in meerjarige processen en de conditie van dijken.

Betrouwbare gegevens over de waterspanning in verschillende grondlagen is van belang voor geotechnische berekeningen om de stabiliteit van dijken in verschillende fasen te kunnen bepalen. Voor het verrichten van waterspanningsmetingen in dijken was geen protocol beschikbaar. Om het ontwerp en gebruik van deze meetsystemen in verschillende fasen van de levenscyclus van een dijk af te stemmen op de behoefte aan betrouwbare data is dit protocol opgesteld.

Dijkmonitoring, bestaande uit metingen en inspecties met perspectief op vereiste vervolghandelingen, kan bijdragen aan het significant verkleinen van onzekerheden omtrent het gedrag van de dijk. Voor elk dijkveiligheidsproject, in elke fase van deze cyclus, moet om die reden een dijkmonitoringsplan worden opgesteld en geactualiseerd als de omstandigheden ingrijpend wijzigen. Het is belangrijk bij het plannen van dijkmonitoring de volgende fase in de levenscyclus van een dijk ook mee te nemen. Deze actie wordt in de huidige praktijk doorgaans genegeerd. Hierdoor ontbreekt vaak cruciale informatie in een latere fase, terwijl deze er wel had kunnen zijn, indien de planning van dijkmonitoring vanuit de totale levenscyclus zou zijn beschouwd (Life Cycle Monitoring). Hieraan verwant is het feit dat, door overdracht van monitoring-verantwoordelijkheid, bij de overgang tussen opeenvolgende fasen soms cruciale metingen voor de vervolgfase niet gestart zijn in een eerdere fase. Om deze kansen te benutten, is het van belang 'het nut van het eerder weten' expliciet in de planning van dijkmonitoring te beschouwen.

Voorliggende versie 2 van dit protocol dient gezien te worden als 'groene versie' waarmee de komende periode praktijkervaring opgedaan kan worden. Het wordt aanbevolen om over een jaar een nieuwe versie van dit protocol uit te brengen waarin deze praktijkervaringen zijn verwerkt.

## 1 Onderwerp en toepassingsgebied

Het protocol is bedoeld voor het monitoren van waterspanningen in de ondergrond voor gebruik tijdens toetsingen, het ontwerp en de realisatie van dijkverbeteringen en de beheerfase van dijken. Het protocol is opgesteld in opdracht van de Project overstijgende Verkenning Macrostabieliteit (POVM).

Het belang van monitoring van waterspanningen en de keuze voor een specifieke monitoringsaanpak worden bepaald door de volgende 4 criteria:

1. Welke informatie dient beschikbaar te zijn, welke risico's en fenomenen spelen een rol;
2. Hoe snel dient informatie beschikbaar te zijn en hoeveel waarschuwingstijd is nodig;
3. Hoe betrouwbaar dient de informatie te zijn;
4. Kosten – baten analyse met beschouwing risicoreductie en mogelijke opportuniteitsvergroting

De monitoringsaanpak omvat niet alleen de sensor- en locatiekeuze, maar ook de installatie van de sensoren, de wijze van beschikbaar stellen van data, periodieke rapportages in monitoringsrapporten en de oplevering plus overdracht naar een volgende fase. In onderstaande figuur zijn de verschillende stappen voor het realiseren van een monitoringssysteem in een eenvoudige flow chart schematisch weergegeven.



*Het protocol is gericht op de prestaties van meetsystemen en het gebruik van meetresultaten van waterspanningsmeters.*

## 2 Normen, termen en definities

In dit hoofdstuk zijn de relevante normen en belangrijkste termen en definities opgenomen die in het protocol gebruikt worden. De relevante termen zijn afgestemd met de Handreiking Life Cycle Monitoring (concept augustus 2018).

### 2.1 Normen

Naar de volgende documenten wordt voor een gedeelte of in hun geheel normatief verwezen in dit document. Deze zijn relevant voor de toepassing van dit document. Bij verwijzingen, die voorzien zijn van een datum is alleen de aangehaalde versie van toepassing. Bij ongedateerde verwijzingen is de laatste versie van het document waarnaar is verwezen (met inbegrip van wijzigings- en correctiebladen) van toepassing.

Het meten van waterspanning is een uitwerking van metrologische technieken, specifiek voor geotechnische en hydrologische toepassingen. Metrologie is “de wetenschap van meten en haar toepassing”. Om over metrologie te kunnen communiceren is een begrippenlijst opgesteld en daarvan is de laatste herziening uitgegeven in 2012.

JCGM 200:2012 (E/F)\*\* International vocabulary of **metrology** – Basic and general concepts and associated terms (VIM); JCGM member organisations: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP an OIML

Omdat de internationale begrippenlijst van groot belang is voor de inbedding van het protocol waterspanningsmeters krijgt deze in de volgende paragraaf uitgebreid aandacht. Normen zoals de NEN-EN-ISO normen hieronder volgen de begrippenlijst, of ze maken voor zover mogelijk gebruik van dezelfde terminologie en definities.

NEN-EN-ISO 14688-1	Geotechnisch onderzoek en beproeving - Identificatie en classificatie van grond - Deel 1: Identificatie en beschrijving;
NEN-EN-ISO 22476-1	Geotechnisch onderzoek en beproeving - Veldproeven - Deel 1: Elektrische sondering met en zonder waterspanningsmeting;
NEN-EN-ISO 22475-1	Geotechnisch onderzoek en beproeving - Methoden voor monsterneming en grondwatermeting - Deel 1: Technische grondslagen voor de uitvoering;
NEN-EN-ISO 18674-1	Geotechnical investigation and testing – Geotechnical monitoring by field instrumentation. – Part 1: General rules; ISO/FDIS 18674-1:2014(E)
NEN-EN-ISO 18674-4	Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field instrumentation — Part 4: Measurement of pore water pressure: Piezometers (draft).

### 2.2 Samenvatting JCGM 200:2012

Voordat mensen kunnen communiceren moeten de gewenste termen bekend en begrepen zijn. Dit geldt ook voor metrologie, waarin geen misverstanden meer mogen bestaan over de concepten en begrippen zoals meetresultaat, meetfout en meetzekerheid, willen ze op een consistente manier worden gebruikt. Omdat metrologie een zich ontwikkelend vakgebied is (van klassiek naar volwaardig probabilistisch) is deze internationaal gedeelde begrippenlijst van groot belang. De rapportage omvat de thema's grootheden en eenheden (zie ook ISO/IEC 80000 and the SI), meten, meetinstrumenten, eigenschappen van meetinstrumenten en meetstandaarden

(Etalons).

The basis principes van metingen in verschillende disciplines zijn gelijk, en de behoefte aan specifieke concepten voor meettechnieken worden in discipline-specifieke begrippenlijsten uitgewerkt zoals bijvoorbeeld het concept 'reactie-tijd (response time)', dat het temporele gedrag van een meetsysteem beschrijft, dat wordt beschreven in IEC 60050, International Electrotechnical Vocabulary, IEV.

### 2.3 Onzekerheidsbenadering

De verandering in de behandeling van meet-onzekerheid van fout-benadering (soms omschreven als 'traditioneel' of 'werkelijke waarde benadering') naar een onzekerheids-benadering heeft de noodzaak blootgelegd om gerelateerde concepten te herzien. Het doel van metingen in de fout-gerichte benadering is om vast te stellen wat de geschatte werkelijke waarde is, die zo dicht mogelijk bij de enkelvoudige werkelijke waarde ligt. De afwijking daartussen bestaat uit random en uit systematische fouten. Deze twee fouten waarvan wordt aangenomen dat die van elkaar kunnen worden onderscheiden, moeten apart behandeld worden. Er kan geen regel worden afgeleid over hoe ze samen komen tot een totale fout van ieder gemeten resultaat, hetgeen normaal gesproken als schatting door het leven gaat. Normaal gesproken kan alleen een bovengrens worden aangegeven voor de absolute waarde van de totale fout. Deze werd (en wordt) soms nog losjes 'onzekerheid' genoemd.

Volgend op de CIPM aanbeveling INV-1 (1980) wordt gesteld dat de componenten van meet-onzekerheid in twee categorieën moet worden verdeeld: type A en B, al naar gelang ze worden geëvalueerd door statistische methoden (type A) danwel met andere methoden (type B). Zowel type A als type B componenten moeten in termen van variantie worden beschreven zodat ze kunnen worden gecombineerd tot een samengestelde variantie waardoor gangbare statistische rekenmethoden kunnen worden toegepast. De resulterende standaardafwijking is een uitdrukking van een onzekerheid van een meting. Een visie op de onzekerheidsbenadering is uitgewerkt in de "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM 1995) waarin dieper ingegaan werd op de wiskundige behandeling van meetonzekerheid door een expliciet meetmodel toe te passen onder de aanname dat de te meten grootte gekarakteriseerd kan worden door een in essentie unieke waarde. Verder is in de GUM en in de andere IEC documenten richting gegeven in de onzekerheidsbenadering in gevallen waarin een enkele meting van een gekalibreerd instrument is verkregen, een veel voorkomende situatie in de metrologie.

Het doel van metingen in de onzekerheidsbenadering is niet om de werkelijke waarde zo nauwkeurig mogelijk te bereiken. Er wordt aangenomen dat de informatie die in een meting verborgen zit alleen toestaat om een interval vast te stellen waarbinnen redelijke waarden van de te meten grootte kunnen liggen, uitgaande van de aanname dat er geen fouten gemaakt zijn bij het uitvoeren van de metingen.

Iedere toevoeging van nieuwe informatie kan (zal) het interval van redelijke waarden verkleinen, echter zelfs de meest hoogwaardige meting kan het interval niet terugbrengen tot een enkele waarde, omdat er geen einde is aan de detaillering die nodig is om tot de definitie van een te meten grootte te komen. Deze minimale afmeting van het onzekerheidsinterval wordt de definitie-onzekerheid genoemd. Deze kan over het algemeen worden verwaarloosd.

Het scenario dat verder wordt uitgewerkt in het IEC 60050 betreft metingen met enkelvoudige resultaten, waarmee tijd-variabiliteit wordt vastgelegd. De onderlinge vergelijkbaarheid van metingen is dan van belang, en die worden bepaald door de validiteit van de metingen die volledig afhankelijk zijn van de metrologische eigenschappen van het instrument en het meetsysteem zoals dat wordt vastgelegd in diens kalibratie. Het interval



van waarden dat wordt geleverd door het meetsysteem om de te meten grootheid mee te beschrijven is het interval van waarden van meetstandaarden (normgewichten, kalibratielengtes, kalibratiedrukken) die dezelfde resultaten zouden hebben kunnen opleveren gezien de kalibratieresultaten.

## 2.4 Algemene begrippen meetprocessen

Met betrekking tot het uitvoeren van waterspanningsmetingen worden algemene begrippen gebruikt die gerelateerd zijn aan meetprocessen. Omdat deze niet specifiek zijn voor het uitvoeren van waterspanningsmetingen, zijn deze opgenomen in de informatieve bijlage A1.

## 2.5 Specifieke begrippen waterspanningsmetingen

### Absolute waterdruk ( $p_{abs}$ )

De druk van het water overeenkomend met de som van de relatieve waterdruk en de atmosferische druk.

### Contactzone

Zone waarover het grondfilter in contact is met de bodem, waarover water in de grond kan stromen om de meetinrichting te bereiken, waardoor de meetzone / punt voor de meting wordt gedefinieerd.

### Dijkmonitoring

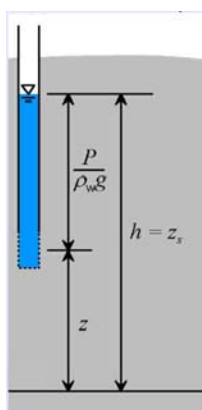
Het geheel van tijdsafhankelijke, waar nodig herhaalde, metingen en inspecties in of aan een dijk of de relevante omgeving daarvan, en de tijdige verwerking van die metingen en inspecties, om indien nodig te kunnen besluiten tot onderbouwde wijzigingen ten aanzien van de dijk en zijn omgeving, het beheer van de dijk of de monitoring ervan. (Gebaseerd op Van den Berg & Koelewijn (2014)).

### Dijkmonitoringsplan

Plan van aanpak voor het leveren van de voor de dijk gevraagde monitoringsinspanning of meer, omvat minimaal de benodigde informatiedragers die worden gebruikt voor de beoordeling van dit plan.

### Dijkmonitoringssysteem

De infrastructuur die nodig is voor het verrichten van metingen en het tijdig verwerken van die metingen. (Opmerking: Het gaat hierbij dus niet alleen om het geheel van de instrumenten en de opslag van meetgegevens, maar ook de verwerking ervan binnen een relevant tijdsbestek.)



### Drukhoogte ( $h_p$ )

De hoogte van de waterkolom die een druk levert gelijk aan de relatieve waterdruk ( $P / \rho_w g$ ). Bij waterspanningsmetingen is dit de ratio ( $u / \gamma_w$ ) van de waterspanning ( $u$ ) en het specifiek gewicht van water ( $\gamma_w$ ) ten opzichte van de plaatshoogte ( $z$ ) voor de meting

Als referentieniveau voor  $h$  wordt een vrije waterspiegel onder atmosferische druk gekozen. Voor de grondwaterspiegel geldt daarom altijd  $h = 0$  cm. Onder de grondwaterspiegel heeft  $h$  dus een positieve waarde. Hoe dieper, des te hoger de waarde van  $h$ .

### **Electrische waterdruksensor**

Waterdruksensor met een diafragma waarbij de vervorming van het diafragma wordt gemeten door een elektrische sensor / transducer. Elektrische waterspanningsmeters maken veelal gebruik van rekstrookjes, piëzo-elektrische -, 'vibrating wire' - of capacitieve sensoren om de vervorming van het diafragma te meten.

### **Factory Acceptance Test (FAT)**

Een FAT is een formeel test- en inspectieproces dat wordt uitgevoerd door de fabrikant wanneer het systeem of de faciliteit volledig is gefabriceerd en geassembleerd voorafgaand aan de verzending. Een FAT kan uit verschillende inspectiepunten en tests bestaan, op basis van vereisten en unieke apparatuur specificaties. De FAT wordt gebruikt om te verifiëren of conform contract geproduceerd is en of de apparatuur voldoet aan de specificaties. In de context van dit protocol wordt hiermee bedoeld de testen die de monitoringsaannemer uitvoert voor mobilisatie.

### **Glasvezel waterdruksensor**

Waterdruksensor met een diafragma waarbij de vervorming van het diafragma wordt gemeten door een glasvezelsensor.

### **Grondfilter**

Een poreus materiaal dat vaak in direct contact is met de grond. Door het filter kan waterdruk vanuit de grond aan de meetkamer worden doorgegeven. Het filter beperkt tevens het aantal bodemdeeltjes die de meetkamer kunnen binnendringen.

### **Grondwaterspiegel (freatisch vlak)**

Het vlak door de punten waar het grondwater een drukhoogte gelijk nul heeft.

### **Grondwaterstand (freatisch niveau)**

De hoogte van een punt waar het grondwater een drukhoogte gelijk nul heeft (de absolute waterdruk is dan gelijk aan de druk van de atmosfeer) t.o.v. een referentieniveau.

### **High air entry (HAE) –grondfilter**

Grondfilter met relatief kleine poriën (gewoonlijk 0,5 – 2 micron) die een hogere weerstand bieden tegen de passage van lucht dan tegen de passage van water. HAE-grondfilters worden gebruikt om gas buiten de vloeistofkamer te houden. In onverzadigde grond is de druk van de gasfase aanzienlijk hoger dan die van het poriewater.

### **Hydrodynamische vertraging**

Tijd tussen een verandering van de poriewaterdruk in de grond en de bijbehorende verandering in de meting.

### **Life Cycle Monitoring**

Het planmatig opstellen, uitvoeren en optimaliseren van dijkmonitoring als een integraal geheel over de levensduur van de dijk.

### **Low air entry (LAE) –grondfilter**

Grondfilter met relatief grote poriën (gewoonlijk 100 – 200 micron) die een lagere weerstand (1-2 kPa) tegen de passage van lucht geven waardoor de doorgang van zowel lucht als water gemakkelijk is.

**Meetconfiguratie of meetnet**

De meetopstelling van de ingezette sensoren (3D locaties en aantallen) om de te monitoren parameters te meten.

**Plaathoogte (z)**

De hoogte van een deeltje grond of water t.o.v. een referentieniveau (bijvoorbeeld NAP).

**Pneumatische waterdruksensor**

Drukmeetinrichting met een diafragma en waarbij de vervorming van het diafragma pneumatisch wordt gebalanceerd door een druk die van buitenaf wordt uitgeoefend via met gas gevulde buizen / slangen.

**Sensor**

Instrument waarmee een waarneming wordt gedaan.

**Site Acceptance Test (SAT)**

Een SAT wordt uitgevoerd op de locatie wanneer het systeem is geïnstalleerd op de permanente bedieningspositie. De SAT is om functies te testen en controleren met andere interfaces op de site.

**Stijghoogte (h)**

Drukhoogte ( $h_p$ ) en plaatshoogte (z) vormen samen de stijghoogte (h):  $h = h_p + z$  (cm)

**Vloeistofkamer**

Ruimte tussen de grond en de sensor, gevuld met een vloeistof, waardoor de waterspanning van de bodemporiën inwerkt op het sensorelement van de meetinrichting. De poriën in het grondfilter vormen een integraal onderdeel van de vloeistofkamer.

**Waterdruksensor**

Onderdeel van een waterspanningsmeter dat wordt gebruikt om de waterspanning van de poriën in een gesloten systeem te meten. De meetinrichting is meestal een druktransducer met een membraan. Het membraan scheidt de binnenste en buitenste (vloeistof)kamer van de transducer, waarbij de vervorming van het membraan een functie is van de waterspanning van de poriën.

**Waterspanning of (relatieve) waterdruk (u)**

De waterdruk in de poriën van de grond ten opzichte van atmosferische druk. De poriewaterdruk is het verschil tussen de totale spanning en de effectieve spanning in verzadigde grond. De toestand van grond waar de poriën volledig met water zijn gevuld, wordt "verzadigd" genoemd. Poriewaterdrukmetingen kunnen positieve of negatieve waarden opleveren. Instrumenten die direct negatieve poriedrukken meten (zuigspanning), in de onverzadigde zone en de capillaire zone, worden ook wel 'tensiometers' genoemd, maar vallen niet binnen het bereik van dit protocol. Veranderingen van de waterspanning van de poriën worden mede veroorzaakt door veranderingen in de atmosferische druk.

**Waterspanningsmeter ofwel piëzometer**

De term piëzometer wordt gebruikt om een meetinstrument aan te duiden die afgedicht geplaatst is in de ondergrond, zodanig dat deze alleen reageert op het omringende grondwater en niet op het grondwaterniveau op andere diepten. De waterspanningsmeter meet absolute waterdrukken, zodat deze meter gevoelig is voor luchtdrukvariëaties. De waterspanningsmeter bestaat uit een meetkamer, grondfilter en sensor.

## 3 Kader en randvoorwaarden waterspanningsmetingen

### 3.1 Kader

Waterspanningsmetingen bij dijken kunnen plaatsvinden binnen verschillende kaders en met verschillende doelen, te weten:

1. Voorafgaand aan een ontwerp of toetsing. Deze metingen worden veelal uitgevoerd om natuurlijke variaties in parameterwaarden vast te stellen. Deze worden daarna gebruikt als input voor ontwerp of toetsing;
2. Tijdens de realisatie van projecten. Hier worden de metingen gebruikt om aannamen tijdens het ontwerp proces te controleren en om de realisatieprocessen, als snelheden van ophogingen, te sturen en om tijdig afwijkingen te kunnen signaleren op basis waarvan aanpassingen in de voorziene uitvoeringswijze nodig zijn of maatregelen getroffen kunnen worden om calamiteiten voorkomen kunnen worden;
3. Tijdens de beheerfase. Efficiënt asset management van dijken vergt een systematische planning van dijkmonitoringactiviteiten. Asset management van een dijk houdt in dat de optimale prestatie uit de dijk gehaald wordt tegen acceptabele risico's en aanvaardbare kosten, gemeten over de gehele levenscyclus van de dijk.

Het kader waarbinnen de metingen worden uitgevoerd is mede bepalend voor de eisen die aan de uitvoering, rapportage en inbedding van de metingen gesteld worden.

### 3.2 Notitie uitgangspunten en randvoorwaarden meetsysteem

Waterspanningsmeters worden met een bepaald doel aangebracht. Dit doel kan sterk variëren en heeft invloed op de lay-out van het meetsysteem en de keuze van apparatuur. Het doel bepaalt tevens hoe er met de meetgegevens dient te worden omgegaan. De opdrachtgever voor de metingen dient om deze reden op basis van een geotechnische risicobeoordeling een notitie met uitgangspunten en randvoorwaarden voor het meetsysteem op te stellen.

#### 3.2.1 Eisen Meetnetontwerp

De notitie dient een beschrijving van de bodemopbouw te bevatten en eventuele werkzaamheden die gedurende de meetperiode plaatsvinden. Tevens dient te worden beschreven welke waterspanningen er in deze periode verwacht kunnen worden in verschillende grondlagen en of er sprake is van verschillen in watersamenstelling die de meetresultaten kunnen beïnvloeden.

*Opmerking: Bij dit laatste kan gedacht worden aan de verdeling van zoet, brak en zout water in de ondergrond, het voorkomen van agressieve verontreinigingen en ervaring in het verleden met gasvorming die de metingen kan beïnvloeden.*

In deze notitie dient tevens te worden beschreven wat het doel is van de metingen, op hoeveel locaties en in welke grondlagen er gemeten dient te worden en met welk tijdsinterval, de gewenste nauwkeurigheid en betrouwbaarheid (Bijlage A) en hoe de opdrachtnemer deze nauwkeurigheid en betrouwbaarheid dient aan te tonen.

### **3.2.2 Inpassing in meet- en besluitstrategie**

Indien de metingen worden gebruikt om processen te monitoren dient de opdrachtgever tevens aan te geven wat de grens- en signaalwaarden zijn met de bijhorende berekening hiervan en wie er bij overschrijdingen dient te worden geïnformeerd binnen welke termijn.

Bij ophogingen en/of ontgravingen zijn de meetgegevens van belang voor het sturen van het tijdschema van de civiele werkzaamheden. In de notitie dient eenduidig te zijn aangegeven wie verantwoordelijk is voor deze zogenaamde backoffice werkzaamheden.

In de notitie dient tevens aangegeven te worden wat het geaccepteerde percentage uitval van het meetsysteem mag zijn en binnen welke termijn meetpunten dienen te worden vervangen in geval van uitval of twijfel over resultaten.

*Opmerking: Gevallen van twijfel over meetresultaten geven vaak discussie tijdens de uitvoering tussen betrokkenen. Om dit te voorkomen dient in de notitie eenduidig omschreven te worden hoe hiermee omgegaan wordt.*

### **3.2.3 Datalevering en informatieverstrekking**

In de notitie dient de opdrachtgever aan te geven met welk interval de meetresultaten beschikbaar moeten worden gesteld en met welk interval de metingen gevalideerd moeten worden en met welke nauwkeurigheid (toleranties) de metingen moeten worden geleverd.

*Opmerking: Veel systemen worden uitgerust met telemetrie en worden gepresenteerd via een web portaal. De standaard wijze van communicatie tussen de meetpunten en servers van de web portalen is via verschillende niveaus van GSM-data, maar ieder jaar dienen zich nieuwe methoden aan.*

*Opmerking: Indien door de opdrachtgever een telemetriesysteem gewenst is, is het belangrijk om aan te geven of voor alle meetpunten mag worden uitgegaan van een voldoende GSM dekking en welke telecom provider deze dekking garandeert.*

Indien informatie aan de Basis Registratie Ondergrond (BRO) of Dijk Data Service Center (DDSC) dient te worden aangeleverd dan dient de opdrachtgever dit in deze notitie aan te geven.

*Opmerking: De meetwaarden kunnen belangrijke informatie voor hergebruik bevatten en daarom bijvoorbeeld in de BRO dienen te worden opgeslagen. Vanuit de backoffice berekeningen kunnen de metingen vergeleken worden met bodemparameters die vooraf op basis van grondonderzoek zijn bepaald of ingeschat. Door de grotere schaal kan deze informatie belangrijk zijn voor toekomstige werkzaamheden op dezelfde locatie.*

Indien het meetsysteem tevens beschikbaar moet zijn tijdens calamiteiten dan dient dit eveneens te worden vermeld.

*Opmerking : In dit soort situaties kan het goed zijn dat het GSM netwerk overbelast is en de metingen niet doorkomen. In deze gevallen kan gekozen worden voor een onafhankelijk communicatiesysteem.*

Tabel 3.1 Checklist inhoud notitie uitgangspunten en randvoorwaarden meetsysteem door opdrachtgever

Omschrijving onderdeel
Omschrijving lokale situatie en bodemopbouw
Omschrijving doel van de metingen
Omschrijving van het aantal gewenste metingen, aanduiding van de bandbreedte (onnauwkeurigheid sensor plus plaatsing), de gewenste klasse meetinstrumenten, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid en hoe deze laatste aangetoond moeten worden
Omschrijving eventuele signaal en alarmwaarden met bijbehorende berekeningen
Omschrijving gewenste beschikbaarheid van meetgegevens (interval, personen, DDSC, BRO)
Aanduiding noodzaak telemetrie en telecom provider met garantie voldoende GSM dekking
Omschrijving wijze waarop de metingen gevalideerd dienen te worden en met welk interval
Omschrijving hoe om te gaan met uitval van meetpunten en twijfel over meetresultaten
Aanduiding of het systeem ook tijdens calamiteiten gebruikt moet kunnen worden
Omschrijving wie verantwoordelijk is voor eventuele back-office werkzaamheden

### 3.3 Monitoringsplan op te stellen door monitoringsaannemer

#### 3.3.1 Meetnetontwerp

Voorafgaand aan de plaatsing van waterspanningsmeters dient door de monitoringsaannemer een monitoringsplan waterspanningsmetingen te worden opgesteld.

*Opmerking : Het belangrijkste doel van monitoringplan is de beschrijving van hoe wordt bereikt dat wordt voldaan aan de uitgangspunten en randvoorwaarden voor het monitoringssysteem uit de notitie. Het is belangrijk om hierbij aandacht te hebben voor:*

- de criteria voor het risicomangementsysteem
- de maximaal toelaatbare tijd tussen meting en meetwaarde toetsing/presentatie,
- de maximaal acceptabele toleranties voor de toetsingswaarden die het eindresultaat zijn van het totale meetsysteem
- de maximaal toelaatbare tijd tussen storing en diagnose,
- de maximaal toelaatbare tijd tussen storing en herstel.

In het monitoringsplan dienen alle keuzes met betrekking tot het monitoringsysteem te worden onderbouwd, zoals de keuze voor de lay-out van het meetsysteem, de dataopslag en datacommunicatie en de keuze van de componenten.

Bij het ontwerpen van het monitoringsysteem dienen de bodemopbouw, eventuele geplande werkzaamheden en verwachte variaties in te meten waterspanning vastgelegd te worden en tevens de tijdsduur waarover gemeten moet worden. Indien afgeweken wordt van de gewenste nauwkeurigheid van de sensoren zoals aangegeven in de notitie uitgangspunten en randvoorwaarden meetsysteem van opdrachtgever dient te worden onderbouwd door de monitoringsaannemer waarom deze van mening is dat hier van afgeweken mag worden.

*Opmerking : Voorafgaande aan het inrichten van een meetsysteem zijn veelal sonderingen en boringen beschikbaar die informatie geven over de opbouw van de ondergrond. Op korte afstanden zijn significante variaties mogelijk. Deze kunnen voor een deel de respons van waterspanningsmetingen bepalen. Indien de meetinstrumenten met een*

*sondeerwagen worden aangebracht, is het vaak zinvol om op korte afstand van de meetinstrumenten een sondering uit te voeren om de lokale bodemopbouw inzichtelijk te hebben. Dit is zeker het geval indien de metingen gebruikt worden voor omstandigheden waar zetting en stabiliteit van belang zijn.*

*Opmerking : Het doel van de meting bepaalt de locatie waar het beste gemeten kan worden. Hierbij dient o.a. rekening gehouden te worden met de volgende aspecten en factoren:*

- toegankelijkheid van de beoogde plaatsingslocatie voor het nodige materieel (hellingen, draagkrachtproblemen, verdichting/structuurbederf landbouwgrond;*
- aanwezigheid van grondwateronttrekkingen zoals landbouwberegeningsputten;;*
- verhardingen of objecten in de ondergrond (wegen, oude funderingen of historische constructies, illegale oude waterinlaatleidingen);*
- bomen, greppels, hekwerken of andere obstakels;*
- beschermde natuurwaarden, vergunningen en toestemmingen;*

*Bij het ontwerpen van de lay-out van een monitoringsysteem dient men tevens rekening te houden met stakeholders met verschillende belangen. Om problemen bij plaatsing of tijdens het daaropvolgende werk te vermijden dient afstemming hierover plaats te vinden met alle partijen die betrokken zijn bij het meetnetontwerp. Bijvoorbeeld : Voor het karakteriseren van het freatische regime of het verhang in een weiland is een peilbuis nodig in het midden van een veld, en is de afstand tot drains en bomen essentieel voor de interpretatie van de resultaten. De pachter van het perceel zal echter een voorkeur hebben voor een peilbuis aan de rand van een perceel.*

*Opmerking: Voor waterspanningsmeters is de exacte plaatsingsdiepte en een exacte positie essentieel. Bijvoorbeeld:*

- De exacte plaatsingsdiepte en positie kan informatie verschaffen over de toestand in een maatgevend bevonden glijcirkel;*
- Bij de monitoring van de voortgang van consolidatie is het verloop van de waterspanning in de laag die het meest maatgevend is voor de consolidatie van belang en niet die in de net daarboven gelegen dunne zandlaag.*

*Opmerking : De bodemopbouw speelt ook een belangrijke rol bij de keuze van de sensoren. Bijvoorbeeld: In gebieden met veenlagen kan gasvorming optreden in de ondergrond. Deze processen kunnen ook tot gevolg hebben dat zich gas ophoopt in de meetkamer van de waterspanningssensor. Omdat dit gas samendrukbaar is en gasvorming leidt tot een onbekende variatie van de druk die door de sensor gemeten wordt, zijn de metingen waar dit optreedt niet te gebruiken. Het al dan niet optreden van dit fenomeen kan lokaal sterk variëren. Momenteel is onvoldoende bekend om dit te voorspellen. Indien de opdrachtgever reeds eerder dit type metingen op deze locatie heeft uitgevoerd is het belangrijk om deze informatie kenbaar te maken. Met speciale waterspanningsmeters kan hierop ingespeeld worden. Deze instrumenten zijn echter vele malen duurder dan de traditioneel gebruikte waterspanningsmeters.*

*Opmerking: Ondersteunende meetinstrumenten. Voor de interpretatie van waterspanningsmetingen en trillingsmetingen wordt aanbevolen om deze metingen uit te voeren in samenhang met instrumenten die daadwerkelijke vervormingen en verplaatsingen vastleggen. Voor de verticale bewegingen van bodemlagen onderling blijken zettingsmeetslangen zeer geschikt. Bijvoorbeeld: Om de diepte van het oude maaiveld niveau te volgen tijdens consolidatie kan ook gebruik worden gemaakt van horizontale zettingsmeetslangen waarmee langs een lijn het verloop van de zakking kan worden gevolgd, eventueel met een telemetrisch systeem.*

### 3.3.2 Inpassing in meet- en besluitstrategie

Indien de metingen worden gebruikt voor het sturen van processen dient in het plan te worden aangegeven:

- welke meetwaarden per sensor tot welke actie leiden,
- wie verantwoordelijk is voor deze actie;
- welke maatregelen er eventueel genomen dienen te worden;
- wie verantwoordelijk is voor het nemen van eventuele maatregelen.

Het monitoringsplan dient vooraf te worden afgestemd met de betrokken partijen om te voorkomen dat werkzaamheden van partijen naar het aanbrengen van het monitoringsysteem nadien leiden tot schade aan apparatuur en het verlies van meetdata.

Indien sprake is van ontgravingen en ophogingen of het aanbrengen van andere objecten in de nabijheid van de meetinstrumenten dienen in het plan de afspraken vastgelegd te worden over:

- Verantwoordelijkheden bij het optreden van schades die niet veroorzaakt zijn door de monitoringsaannemer;
- Communicatie over de uitvoering van werkzaamheden die de meetresultaten kunnen beïnvloeden;
- Bescherming van de meetapparatuur inclusief de kwetsbare bekabeling;
- Oplengen en/of verplaatsing van meetapparatuur bij ophogingen en of ontgravingen.

### 3.3.3 Datalevering en informatieverstrekking

In het monitoringsplan dient te worden opgenomen hoe de metingen worden uitgevoerd en gevalideerd en hoe de data aangeleverd wordt aan de opdrachtgever.

*Opmerking: Waterspanningsmetingen kunnen op verschillende wijzen uitgevoerd worden:*

- *Handmatig op gezette tijden individuele sensoren uitlezen;*
- *Handmatig op gezette tijden gelogde sensordata uitlezen;*
- *Automatische verzending van individuele metingen op gezette tijdstippen;*
- *Automatische verzending van gelogde meetreeksen op gezette tijdstippen.*

Absolute drukmetingen dienen voor luchtdrukvariaties gecompenseerd te worden.

Voorafgaande aan presentatie van gegevens dienen de ruwe meetdata gevalideerd te worden.

*Opmerking : Validatie is veelal een combinatie van:*

- *Vergelijken met meetdata van andere waterspanningssensoren in de directe omgeving;*
- *Vergelijken met verwachtingspatroon (bijvoorbeeld bij bekende ophogingen) en andere metingen zoals zakbaken of zakking van de vaste verbinding van de sensor;*
- *Bij langdurige meetreeksen zijn ook sensor drift correcties mogelijk noodzakelijk;*
- *Bij BAT type meetsystemen is het mogelijk om sensoren tussentijds te controleren en kalibreren zonder de meetopstelling opnieuw in de bodem aan te brengen.*

De wijze van verstrekking van meetinformatie en tijdsintervallen van verstrekking dient in het monitoringsplan te worden vastgelegd.



*Opmerking: De meetdata kan op verschillende wijzen verstrekt worden:*

- *Rapportage in PDF op gezette tijdsintervallen;*
- *Datafiles met meetresultaten;*
- *Presentatie meetresultaten op een web platform.*

Indien het voor projecten van belang is dat er een continue meetreeks beschikbaar is waarbij op gezette tijdsintervallen metingen zijn geregistreerd, dient in het plan te worden opgenomen hoe en binnen welke termijn er wordt gereageerd op uitval en/of beschadiging van onderdelen van het meetsysteem.

De beschikbaarheid, de frequentie van levering van data, validatie, koppeling naar andere databases (bijvoorbeeld DDSC) en opslag van de meetinformatie dient in het monitoringplan te worden vastgelegd. Indien informatie aan centrale databanken dient te worden aangeleverd als de BRO of DDSC, dan dient deze informatielevering met de bijbehorende tijdsintervallen in het monitoringsplan te worden aangegeven.

*Opmerking: De meetwaarden kunnen belangrijke informatie voor hergebruik bevatten en daarom bijvoorbeeld in de BRO dienen te worden opgeslagen.*

Voor een telemetrisch meetsysteem dienen de individuele meetlocaties gecontroleerd te worden op GSM-dekking bij de aangegeven telecom provider. Indien onvoldoende, dan dient in het monitoringsplan te worden aangegeven op welke wijze een betrouwbare datavoorziening wordt gegarandeerd door bijvoorbeeld LoRa™, Sigfox™, of een andere narrow band toepassing.

*Tabel 3.2. Checklist inhoud monitoringsplan door opdrachtnemer*

<b>Omschrijving onderdeel</b>
Omschrijving en onderbouwing keuze lay-out meetsysteem (aantal sensoren, diepte, locatie)
Onderbouwing nauwkeurigheid meetsysteem
Omschrijving en onderbouwing keuze sensoren, data opslag en data communicatie
Indien gekozen wordt voor een telemetrisch netwerk omschrijving hoe datatransmissie wordt gegarandeerd en het interval waarmee data worden verzonden
Omschrijving en onderbouwing proces sturing (alarm- en signaalwaarden, verantwoordelijke voor actie en acties bij overschrijding van alarm- en signaalwaarden)
Omschrijving acties bij uitval / beschadiging (onderdelen)meetsysteem en reactietijd
Omschrijving beschikbaarheid van meetgegevens (interval, welke personen, DDSC, BRO)
Omschrijving wijze waarop de metingen gevalideerd worden en met welk interval
Omschrijving hoe wordt omgegaan met twijfel over meetresultaten
Eventuele aanduiding of het systeem ook tijdens calamiteiten gebruikt moet kunnen worden
Omschrijving hoe componenten meetsysteem vooraf op goede werking worden gecontroleerd
Omschrijving en onderbouwing hoe de waterspanningssensoren worden aangebracht
Omschrijving verificatie functioneren meetsysteem en juistheid meetwaarden.

## 4 Selectie componenten meetsysteem

Een meetsysteem voor waterspanningsmetingen bestaat uit de volgende onderdelen:

- waterspanningsmeter;
- verbindingkabel;
- elektrische voeding;
- uitleesunit of datalogger;

Indien systemen uitgerust worden met telemetrie dan wordt aan het meetsysteem een communicatie-unit toegevoegd die meetsignalen naar een externe computer stuurt die de meetdata weergeeft op een webpagina.

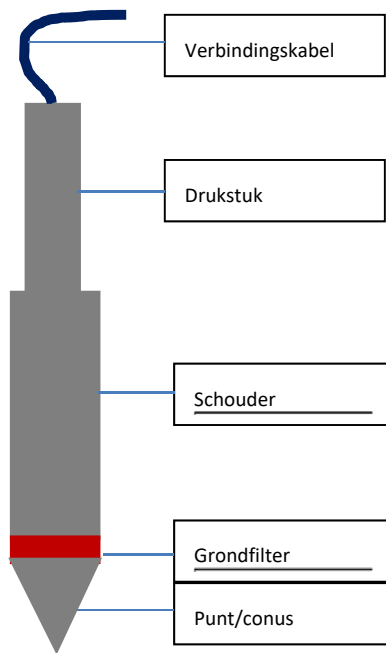
De verschillende componenten van een meetsysteem dienen geselecteerd te worden op basis van de volgende criteria:

- A. Het aanleveren van de juiste informatie (geschiktheid en nauwkeurigheid). Hiervoor is begrip van de risico's en fenomenen noodzakelijk en de koppeling met eventuele beslissingen;
- B. Het tijdig beschikbaar zijn van de informatie. Het tijdig uitvoeren van nulmeting(en) en benodigde waarschuwingstijd zijn hierbij belangrijke aspecten;
- C. De informatie dient betrouwbaar en controleerbaar te zijn. Data-validatie (cross-checks) en robuustheid van het meetsysteem zijn hierbij belangrijke aspecten;
- D. Kosteneffectiviteit van het meetsysteem. Belangrijke aspecten hierbij zijn de mate waarin het meetsysteem bijdraagt aan risicoreductie en opportuniteitsvergroting.

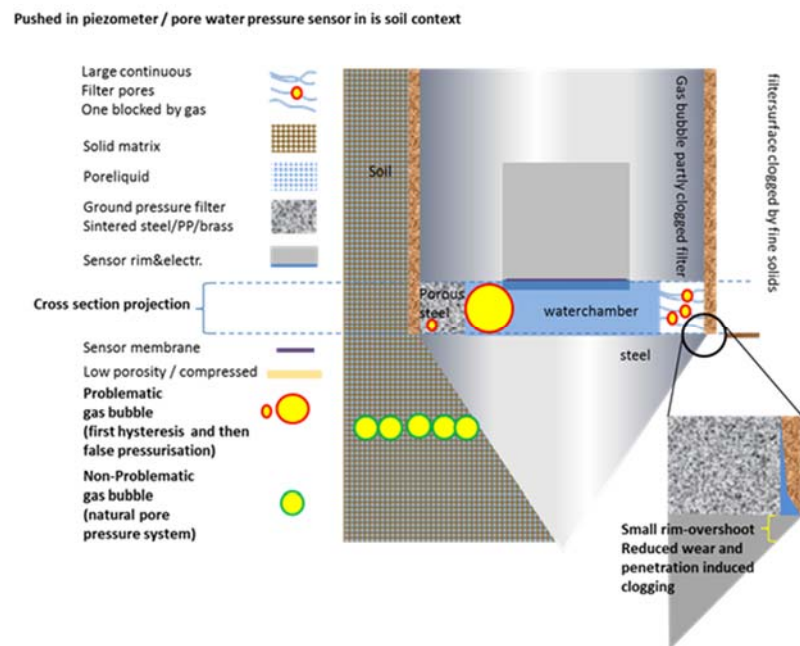
*Opmerking: Voor evaluatie van de criteria C en D speelt ook de lay-out van het gehele monitoringsysteem dat bestaat uit meerdere meetsystemen een rol. Bijvoorbeeld het vergroten van het aantal waterspanningsmeetsystemen geeft extra mogelijkheden om cross-checks uit te voeren en bij uitval van een individuele sensor zijn nog gegevens van andere meetsystemen beschikbaar.*

### 4.1 Waterspanningsmeter

Met waterspanningsmeters kan de waterspanning in zandige en slappe bodemlagen worden gemeten. Waterspanningsmeters staan in direct contact met het poriënwater in de bodem. Omdat er –anders dan in peilbuizen- geen volumeverplaatsing nodig is voor registratie van drukveranderingen reageren waterspanningsmeters direct op drukveranderingen. Voor het verrichten van representatieve metingen dient de waterspanningsmeter/piëzometer een blijvend ongestoord contact te hebben met het poriënwater zodat drukverschillen via het grondfilter en de waterkamer aan de druksensor kunnen worden doorgegeven. De vorm en componenten van een waterspanningsmeter hebben invloed op de meting. Er zijn tientallen producenten en daarom ook vele vormen en varianten van waterspanningsmeters beschikbaar. Op basis van de eisen die aan de monitoring van de waterspanning binnen een project gesteld worden en de mogelijkheden om deze aan te brengen in de bodem, dient een geschikte waterspanningsmeter geselecteerd te worden. In bijlage B worden de verschillende mogelijkheden in tabelvorm weergegeven. In de volgende paragrafen zal nader ingegaan worden op aspecten die een rol spelen bij de keuze van componenten en vorm.



Figuur 4.1 Schematische weergave onderdelen waterspanningsmeters.



Figuur 4.2 Schematische weergave van wsm conus met nadruk op verscheidene cruciale onderdelen en storingsbronnen. Let op: hier is een smal ringvormig grondfilter afgebeeld terwijl ook hoge cilindervormen en schijfvormen bestaan.

#### 4.1.1 Grondfilter

Grondfilters dienen de druk te weerstaan die wordt uitgeoefend door de korrelspanning en dienen een contactroute te zijn tussen waterkamer en bodemwater. Grondfilters hebben daarom bij voorkeur een hoge porositeit. De grootste poriën worden aan de buitenzijde bezet door bodemmateriaal maar zolang er geen vaste stof door de poriën naar binnen kan worden gedrukt, kan er praktisch gezien geen volledige verstopping optreden. Immers, de fijnste materialen zouden anders de hele omliggende bodem ook verstoppem.

Voor het selecteren van een grondfilter met een optimale functionaliteit en levensduur zijn verschillende factoren van belang om af te wegen. In onderstaande tabel worden deze nader toegelicht.

Tabel 4.1 Factoren van belang bij selectie grondfilter

Factor	Toelichting
Afmeting	effectieve natte oppervlakte/ porositeit
Vorm: cirkel, ring, of cilinder	constructieve mogelijkheden
Dikte en sterkte	toepassingsdiepte
Materiaal	corrosie, sterkte, poriëngrootteverdeling

## Afmetingen

Hoe groter het oppervlak van het grondfilter hoe beter. Bij een cilindervormig apparaat zoals de meeste stafvormige is het oppervlak bepaald door de omtrek en de hoogte. Deze hoogte dient enigszins te worden beperkt omwille van de plaats zekerheid van de sensor in het apparaat, maar in principe is er geen bezwaar tegen 10 cm hoge cilinderfilters. Filters zijn echter zwakker dan de behuizingen van de waterspanningsmeters en bij hoge-druktoepassingen of hoge conusweerstand wordt daarom vaak gebruik gemaakt van gesinterd stalen filters met beperkte hoogte.

## Poriëngrootteverdeling en porositeit

Zoals de poriëngrootteverdeling en porositeit van bodemmaterialen sterk uiteenlopen is dat ook het geval bij grondfilters. Omwille van sterkte van de constructie wordt voor de robuuste instrumenten vaak gekozen voor een gesinterd metaal. Voor de meeste toepassingen zijn gesinterd kunststof filters, metaalgaas of keramisch materiaal ook sterk genoeg. Voor alle materialen geldt dat er een keuze gemaakt moet worden voor de gewenste poriënverdeling. Bij gesinterd en geweven gaas materiaal neemt de poriënvolumefractie zeer sterk af met de poriëngrootte. Bij keramisch materiaal is dit minder extreem. De porositeit van het omliggende bodemmateriaal is vrijwel altijd een veelvoud van de porositeit van een filter met vergelijkbare gemiddelde poriëngrootte. Exotischer materialen zoals gesinterd corund of gesinterde glasparsels worden alleen gebruikt voor monsternamemateriaal en eigenlijk nooit als alleen druk hoeft te worden gemeten.

De grootste porie in een filter bepaald de luchtintredewaarde. De versmering die optreedt tijdens het indrukken van een waterspanningsmeter bepaald de effectieve luchtintredewaarde tijdens en na plaatsing. Voor een goede werking van filters is om die reden de porositeit (doorlatende oppervlakfracitie) van groter belang dan de poriënverdeling.

## Vorm van het grondfilter

Omdat een groot waterdoorlatend oppervlak wenselijk, is leidt een een lagere porositeit tot een groter filteroppervlak. Door een ring- of cilindervormig filter toe te passen wordt het hele contactoppervlak van een staafvormige constructie benut. Productiekosten van cilindervormige gesinterde filters zijn vergelijkbaar met plaatvormige. Door een cirkelvormige uitsparing te vullen met een schijfje gesinterd materiaal kan hetzelfde doel worden bereikt maar vaak met een relatief laag oppervlak als gevolg. Een dergelijke gang-uitgang constructie maakt het makkelijker om het grondfilter op dezelfde positie te plaatsen als die van de druksensor.

### 4.1.2 Waterkamer

In figuur 4.2 is een waterkamer weergegeven waarbij het sensormembraan overeenkomt met de bovenrand van het filter. De waterkamer wordt bij voorkeur gevuld met ontlucht water. Na verloop van enkele uren tot dagen wordt evenwicht bereikt tussen gasgehalte in het omringende porienwater. De vorm van de waterkamer is minder bepalen voor het optreven van verstoring door gasbellen dan het grondfilter. Gasbeldruk kan wel eerder worden vastgesteld bij een slanke waterkamer.

### 4.1.3 Schouder

Het doel van de schouder achter het grondfilter is het voorkomen van een mogelijke lekkage van poriëndruk in cohesieve lagen bij gedrukte waterspanningsmeters. De diameter van de schouder is vaak de grootste diameter en bepaald de diameter van het gat achter de waterspanningsmeter tot aan maaiveld. Indien de casing / verbuizing later wordt getrokken, is deze open ruimte moeilijk vanaf maaiveld goed af te dichten. Aanbevolen wordt om bij verloren waterspanningsmeters voor de schouder achter het grondfilter minimaal een lengte van 10cm aan te

houden.

Bij waterspanningsmeters die op grotere diepte dienen te worden aangebracht of waar meer kracht voor nodig is om deze aan te brengen kan een minimale lengte van de schouder van 10 cm stabiliteitsproblemen geven. Als alternatief voor een lange schouder kan ook een kleefbreker worden toegepast boven de waterspanningsmeter die achter blijft in de bodem. Bij waterspanningsmeters met een korte schouder dient bij het trekken van de casing / verbuizing de ruimte die in de grond ontstaat gevuld te worden met een krimparme, slecht-waterdoorlatende grout, bijvoorbeeld bentoniet grout.

*Toelichting: Er dient bij voorkeur gebruik gemaakt worden van Cebo Drill-Grout of Cebo Drill-Grout-plus of een gelijkwaardig product. Voor het mengsel dienen de aanwijzingen van de leverancier gevolgd te worden. Voor Cebo Drill-Grout dient bij voorkeur aanmaakwater met de volgende eigenschappen gebruikt te worden:*

- geleidbaarheid: < 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- pH: 7,5 – 10
- Hardheid : < 100 ppm

*De verhouding voor het aanmaken is 160 kg Cebo Drill-Grout per 1 m<sup>3</sup> aanmaakwater. Het volume van de grout dient 15% groter te zijn dan het berekende volume van de op te vullen ruimte. Bij verticale boorgaten wordt een zogenaamde tremie pijp toegepast waarmee de ruimte van onderaf tot aan maaiveld wordt volgepompt met grout.*

*In boorgaten, ook in rots, of zeer grove materialen, worden voornamelijk inhang-waterspanningsmeters toegepast. Deze worden vaak toegepast met filtergrind maar soms worden de boorgaten van onderaf volledig met grout gevuld. Daarmee worden soms goede resultaten bereikt maar er gelden wel specifieke aandachtspunten (Mikkelsen, 1999; Mikkelsen & Green, 2003). Het aanbrengen van waterspanningsmeters in volledig met grout gevulde boorgaten valt buiten de scope van dit protocol. Voor nadere informatie hierover wordt verwezen naar NEN- EN - ISO 18674-4.*

#### 4.1.4 Sensoren

Afhankelijk van de eisen die aan de monitoring van de waterspanning worden gesteld dient een passende sensor gekozen te worden. In onderstaande tabel is een klasse-indeling voor sensorunits weergegeven.

Tabel 4.2 Klasse-indeling sensorunits voor waterspanningsmetingen

Klasse	1	2	3	4
Membraan sensor	RVS316	RVS316	RVS316	RVS316
	Laser gelast	Laser gelast	Laser gelast	Laser gelast
Type uitgang	4..20mA of 0...10V	I2C	4..20mA of 0...10V	RS485
Meetparameters	druk	druk + temp	druk	druk + temp
Total error band (druk) *	1% - 2% FS	0,7% FS	0,25% FS	0,1% FS
Total error band (temperatuur)	-	2 °C	-	0,5°C
Min. eis lineariteit	0,7% FS	0,40% FS	0,15% FS	0,01% FS
Max. toegestane herhaalfout #	2% FS	0,7% FS	0,25% FS	0,1% FS
Max. toegestane hysteresis	0,01% FS	0,01% FS	0,01% FS	0,01% FS
Max. toegestane temperatuurfout	0,50% FS	0,30% FS	0,20% FS	0,10% FS
A/D convertor in sensor unit	Nee	Nee	Ja	Ja
Automatische ontgassing sensor unit	Nee	Nee	Nee	Ja
Verticale verplaatsing sensor meetbaar	Nee	Nee	Ja	Ja
Materiaal behuizing WSM sensor	PVC/RVS316	PVC/RVS316	RVS316	RVS316
* = inclusief lineariteit, herhaalfout, hysteresis en temperatuurfout				
# = Zie definitie 2.21 uit bijlage A.1.1				

*Opmerking: sensoren die niet aan de specificaties van klasse 1 voldoen, vallen in klasse '0' en voldoen daarmee niet aan de minimaal gedefinieerde eisen in dit protocol.*

Door nieuwe sensoren of meet- en communicatietechnologie kunnen verschuivingen optreden in de markt.

Bovenstaande klasse-indeling is een momentopname van de huidige stand van de techniek. De opdrachtgever kan er voor kiezen om een sensorklasse voor te schrijven. Met het oog op toekomstige ontwikkelingen dient echter de mogelijkheid open gelaten te worden voor de monitoringsaannemer om bij een afwijkende keuze deze op basis van criteria voor instrumentselectie kwalitatief te verantwoorden in het monitoringsplan.

#### **4.1.5 Samenhang tussen instrument-kenmerken**

De beoordelingscriteria van instrumenten en componenten hangen samen, soms positief (met het een krijg je onvermijdelijk ook het ander) en soms negatief (eigenschappen zijn onverenigbaar). De 'hoger' scorende instrumenten zijn ook kostbaarder waardoor de plaatsingskosten per meetpunt naar verhouding lager worden. Meetnetontwerpers zijn erbij gebaat om in een vroeg stadium te weten hoe de marginale kosten per *extra* meetpunt uitpakken. Een verdeling van het budget over een groot aantal laagwaardige sensoren kan een groot voordeel opleveren in termen van robuustheid van het meetnet, mits de laagwaardige sensoren voldoende betrouwbaar zijn.

Samenhangende selectiecriteria leiden tot een beperking aan keuzevrijheid. In aanbestedingen en aanbiedingen is het zinvol om aan te geven of er al dan niet mogelijkheden kunnen worden benut door de waardering van bepaalde kwaliteiten te verschuiven.

*Voorbeeld: "door toepassing van laagwaardige sensoren kan in sommige situaties gedurende korte tijd voldoende nauwkeurige data worden geleverd terwijl tegelijkertijd grotere aantallen sensoren kunnen worden ingezet voor hetzelfde budget".*

## 5 Installatie apparatuur en waterspanningsmetingen

### 5.1 Algemeen

Voordat waterspanningsmeters worden aangebracht dient de monitoringsaannemer een monitoringsplan (zie paragraaf 3.3) op te stellen dat goedgekeurd wordt door de opdrachtgever.

Het aanbrengen van waterspanningsmeters mag geen permanente invloed hebben op de grondwaterstroming en grondwaterkwaliteit. Alle water scheidende lagen in het bodemprofiel die door het aanbrengen verstoord worden, dienen hersteld te worden. Hiervoor wordt ook verwezen naar het *VOTB Protocol afdichten sondeergaten*.

Directe infiltratie van oppervlaktewater of neerslag ter plaatse van de waterspanningsmeter dient voorkomen te worden. Dit kan bereikt worden door een minimaal 1 meter dikke afdichtende laag aan te brengen tot 0,5 m onder de vorstzone.

Als de bodemomstandigheden ter plaatse onbekend zijn, moet vooraf een onderzoek van de bodem worden uitgevoerd. In gelaagde gronden moet de verwachte variatie in grondwaterpotentiaal met diepte worden meegewogen worden bij de keuze van het meetsysteem en installatieniveau.

Indien de waterspanningsmeter in een boorgat moet worden geïnstalleerd, moet de diameter van het boorgat groot genoeg zijn om plaats te bieden aan het filterpakket en de afdichting. De mogelijkheid van waterspanningsmeters op meerdere diepten dient beschouwd te worden bij het bepalen van de diameter van het boorgat.

Bij het boren voor het aanbrengen van waterspanningsmeters moeten boorspoelingen worden vermeden. Als het gebruik van boorspoeling noodzakelijk zijn voor het boorproces dan dient rekening worden gehouden met de (mogelijke) effecten van het gebruik hiervan op de metingen.

Waterspanningsmeter dienen altijd zo te worden geplaatst en bevestigd dat derden geen gevaar lopen. Er moeten verder passende maatregelen worden genomen om risico's bijvoorbeeld als gevolg van verontreiniging, overstroming, verkeer of bevrozing te voorkomen. Maatregelen om de installatie tijdens de verwachten meetperiode te beschermen, moeten worden uitgevoerd.

De wijze van installatie en gebruikte apparatuur en codering van de waterspanningsmeter moet vastgelegd. Na voltooiing dienen de coördinaten van de locatie en NAP-hoogte van de locatie en de NAP-hoogte van de sensor te worden vastgelegd en gedocumenteerd op een locatieplan.

## 5.2 Werkvoorbereiding

De veldwerkzaamheden voor het aanbrengen van een monitoringsysteem dienen te worden voorbereid. Deze werkvoorbereidingsfase dient de volgende werkzaamheden te omvatten:

- 1) Benodigde materialen dienen beschikbaar gemaakt te worden en gecontroleerd te worden;
- 2) Benodigde vergunningen en toestemmingen dienen verkregen te worden;
- 3) Benodigde gegevens over de ondergrond dient beschikbaar gemaakt te worden;
- 4) Een planning voor de werkzaamheden dient te worden opgesteld en afgestemd met betrokken partijen;
- 5) Voor de veldmedewerkers dient een instructie opgesteld te worden voor de uitvoering van de werkzaamheden. Deze instructie dient te worden doorgenomen met de veldmedewerkers. In onderstaande tabel is een beknopte checklist weergegeven voor de informatievoorziening voor de veldmedewerkers.

*OPMERKING 1: In bepaalde bodems kan gasvorming optreden. Hiermee dient bij de selectie van de benodigde materialen rekening gehouden te worden. Om te voorkomen dat gas zich ophoopt in het vloeistofreservoir, kan het meetsysteem worden uitgerust met een ontgassingsmogelijkheid. Dit is bijvoorbeeld een dunne slang met een membraan waardoor alleen gas kan passeren. Via deze verbinding naar het maaiveld kan de sensor tevens in-situ gekalibreerd worden.*

*OPMERKING 2: In bijlage C is een uitgebreide informatieve checklijst opgenomen.*

<b>Beknopte checklist informatievoorziening veldmedewerkers</b>
Een korte toelichting over het doel van de metingen
Verantwoordelijke projectleider of taakverantwoordelijke binnen het bedrijf en contactpersoon van de opdrachtgever met contactgegevens
Afspraken met terreineigenaren en/of pachters en contactgegevens van deze personen
Afspraken met bedrijfsonderdelen die deeltaken uitvoeren zoals sonderen en machinaal boren
Planning en deadline oplevering met Site Acceptance Test (SAT)
Communicatie bij afwijkingen (b.v. omstandigheden, planning)
Verwachting t.a.v. de looptijd van de nulmeting die direct na de SAT aanvangt
Duidelijke project/locatiebeschrijving: -tekening omgeving; -informatie bodemopbouw (boringen + sonderingen) -KLIC informatie, verontreinigingen, NGE, vergunningen en toestemmingen; -planning, werkwijze en nauwkeurigheid van evt. aan te brengen referentiemarkeringen; -beoogde plaatsingsdiepte of doel-laag t.o.v. referentiepunt en nauwkeurigheid dieptemeting; -werkwijze aanbrengen (vermeld noodzaak registratie meetwaarden bij installatie) en afdichten; -omschrijving te gebruiken sensor en procedure vullen / ontluchten; -locatie en beschermwijze van logger(+telemetrie); -beoogde kabelligging en wijze van afscherming en codering sensoren en kabels.
Overzicht benodigde registraties vooraf, tijdens en na aanbrengen.
Instructie opslag geregistreerde gegevens na afloop van de veldwerkzaamheden.



### 5.3 Aanbrengen waterspanningsmeters

Voorafgaand aan het installeren dient de vloeistofkamer en het grondfilter volledig verzadigd te worden met een niet-samendrukbare vloeistof.

*OPMERKING 1: Bij voorkeur wordt als vloeistof voor het grondfilter en de vloeistofkamer gebruik gemaakt van ontlucht water.*

*OPMERKING 2: Een algemene methode voor ontluichten van water voor het vullen van het grondfilter en de vloeistofkamer is koken of vacuüm koken.*

*OPMERKING 3: Voor het volledig vullen van het grondfilter en vloeistofkamer wordt aanbevolen om de werkinstructies van de leverancier te volgen. In bijlage D zijn informatief werkwijzen en procedures opgenomen waarin dit wordt omschreven.*

Na volledige verzadiging van het grondfilter en de vloeistofkamer dient het grondfilter, terwijl het nog ondergedompeld is in de vloeistof, afgesloten te worden met een elastisch membraan om te voorkomen dat lucht in het grondfilter en de vloeistofkamer kan indringen voordat de waterspanningsmeter in de grond wordt gebracht.

*TOELICHTING: Verzadiging en ontluchting. Lucht of gasbellen in de vloeistofkamer leiden direct tot hysteresis en kunnen na verloop van tijd een meetreeks volledig verstoren. Gasbelverstoren zijn niet altijd makkelijk te detecteren en deze vormen daardoor een belangrijke bron van wantrouwen bij gebruikers. De drukveranderingen leiden tot volumeverandering van bellen en daarmee tot vloeistoftransport over het grondfilter. Dat heeft drie gevolgen:*

- *Demping/vertraging van het druksignaal indien de stromingsweerstand over het grondfilter "groot is",*
- 1. *vergroting van de uitwisselingssnelheid tussen grondwater en wsm-vloeistofkamer waardoor opgeloste gassen makkelijker kunnen diffunderen naar grotere gasbellen in de vloeistofkamer;*
- 2. *kans op verstopping van het grondfilter.*

*Herkomst gasbellen. Kleine gasbellen zijn instabiel vanwege de hoge druk door de belwandradius. Gas gaat dan makkelijk weer in oplossing. Als een gasbel groter is dan 2 mm wordt de bel makkelijk groter. Een bel in de wsm-vloeistofkamer kan geïntroduceerd worden tijdens het vullen of door contact met droge grond vlak voor plaatsing. Daarnaast worden in de bodem gasbelvormende stoffen geproduceerd. Bij lage concentraties zijn die stoffen opgelost in het grondwater, maar ze kunnen na verloop van tijd overal ontstaan en dan zijn ze normaal onderdeel van de bodem. Ze vormen pas problemen als ze in de wsm ontstaan en groeien. De volgende oorzaken van belvorming in de wsm-vloeistofkamer zijn bekend:*

- *methaan, H<sub>2</sub>S- en H<sub>2</sub>-vorming door microbiologische activiteit,*
- *H<sub>2</sub> door corrosie,*
- *plotselinge drukveranderingen zoals ook bij trillingen,*
- *verlaging van oplosbaarheid van gassen (temperatuur, opgeloste zouten, drukverlaging)*

*Aanbevelingen werkwijze ter minimalisatie van gasbelproblemen:*

3. *WSM-vloeistofkamer (inclusief grondfilter) vooraf volledig vullen met ontgast water (vacuumstolp, koken), of ontluchte glycol-wateroplossing of siliconen "olie" (wateroplosbaar);*
4. *Toepassing van een condoom met afgeknipt zaadreservoir na volledig vullen van grondfilter en vloeistofkamer;*
5. *Waterspanningsmeter niet laten uitdrogen en niet schudden na vulling;*

Elke verontreiniging van het filter (bijv. door olieachtige of vette substanties en aanraking met blote vingers) en onvoldoende verzadiging tijdens opslag en transport, die de doorlaatbaarheid van het filter beïnvloedt, moet worden vermeden.

Waterspanningsmeter dienen in de ondergrond worden geïnstalleerd door deze grond verdringend in de betreffende grondlaag te drukken (handmatig of machinaal, al dan niet na voorboren) of door ze in een boorgat te af te hangen en later te omstorten.

Waterspanningsmeters die grond verdringend in de ondergrond worden aangebracht dienen voorzien te zijn van een punt onder het grondfilter.

*OPMERKING 1: In zachte bodems mogen de sensoren grond verdringend worden aangebracht door deze op diepte te drukken na voorboren. Voorboren is toegestaan tot een diepte van maximaal 0,5 m boven de inbouwdiepte van de sensor. Het instrument dient minimaal 0,5 m grond verdringend in het ongestoorde profiel zijn gedrukt.*

*OPMERKING 2: De sensoren mogen niet sonisch worden aangebracht tenzij middels referentiemetingen wordt aangetoond dat de sensoren representatief meten.*

De waterspanningsmeters dienen zodanig aangebracht te worden dat een representatieve meting kan worden verricht van het verloop van de waterspanning in betreffende grondlaag. Lekkage van waterdruk langs kabel, stangen of boorgataanvulling dient te worden voorkomen.

Voor gedrukte waterspanningsmeters mogen de verlengingspijpen in de grond blijven zitten om als afdichting te werken. Bij het terugtrekken van de verlengpijpen kan de overblijvende holte worden afgedicht door deze tot het grondoppervlak te vullen met een geschikte suspensie met een doorlaatbaarheid die lager is dan die van de oorspronkelijke grond, of het onderste deel van de buis (bijvoorbeeld 1 m) kan achterblijven in de grond om als een afdichting te fungeren.

*OPMERKING: Als het de bedoeling is om een in de grond gedrukte waterspanningsmeter opnieuw te gebruiken, kunnen de verlengpijpen in de grond worden gelaten totdat de waterspanningsmeter wordt teruggetrokken.*

Tijdens het grond verdringend aanbrengen van waterspanningsmeters in slecht doorlatende grondlagen dient de waterspanning gemeten te worden. De maximale gemeten waterdruk tijdens het aanbrengen dient geregistreerd te worden en te worden vergeleken met de maximaal toegestane waterdruk voor de sensor.

*TOELICHTING: Tijdens het grond verdringend aanbrengen van waterspanningsmeters kan een aanzienlijke wateroverdruk ontstaan in de vloeistofkamer. Voor installatie dient de toegestane maximale waterdruk voor de sensor bekend te zijn voor de veldploeg die de apparatuur aanbrengt. Er moet voor worden gezorgd dat het meetapparaat niet wordt beschadigd door overbelasting. Overbelasting moet worden gecontroleerd door metingen van de waterspanning tijdens het installeren.*

*OPMERKING 1: De wateroverspanning tijdens het grond verdringend in de bodem drukken van een waterspanningsmeter kan worden verminderd door de snelheid waarmee deze in de bodem gedrukt wordt te verlagen.*

*OPMERKING 2: Overbelasting van de drukomvormer kan ook worden voorkomen door een transducer te gebruiken die wordt ingebracht na installatie van het filter.*

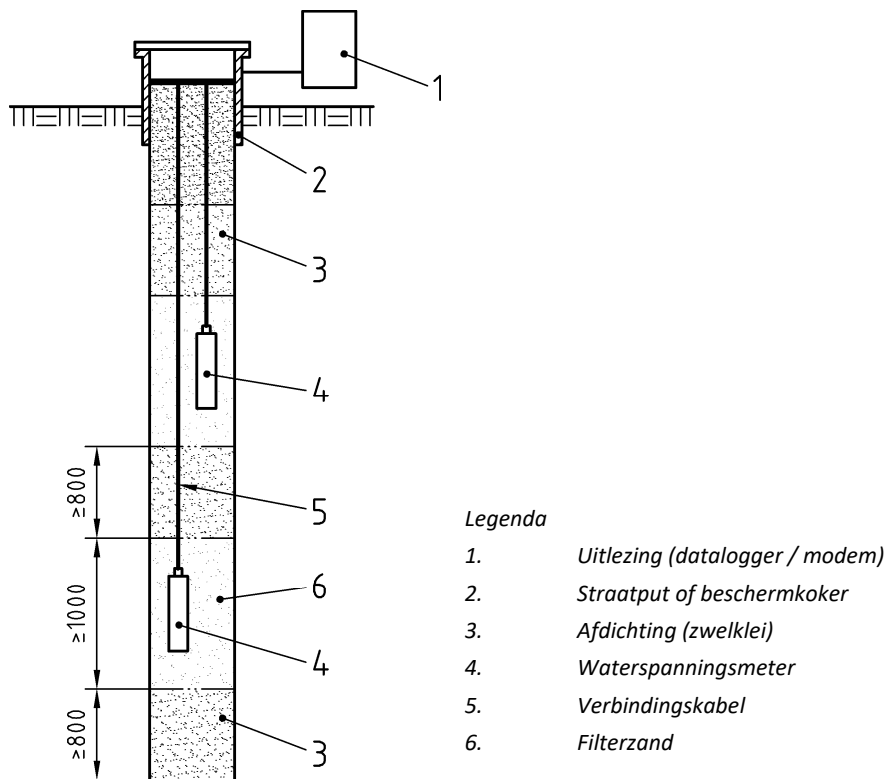
Waterspanningsmeters die geïnstalleerd worden in gaten die zijn geboord tot onder het meetniveau moeten worden geïnstalleerd in een verzadigd filterpakket. Boven het filterpakket moet een afdichting worden geplaatst.

*TOELICHTING: Indien het boorgat en diepte van de sensor onder de grondwaterstand zijn gelegen kan de sensor eenvoudig in een verzadigd filterpakket worden aangebracht door het boorgat te vullen met water, de sensor op de juiste diepte af te hangen en nadien het boorgat aan te vullen. Indien een sensor en omstorting onder droge condities worden aangebracht, kan de vloeistofkamer leeg lopen waardoor de sensor niet meer naar behoren functioneert.*

*OPMERKING 1: Wanneer de toestroming van grondwater gering is vanwege de lage doorlatendheid van de bodemlaag waarin de waterspanningsmeter wordt aangebracht, worden de waterspanningsmeters bij voorkeur grond verdringend in de bodem gedrukt.*

*OPMERKING 2: Wanneer de grondwaterdruk hoger is dan het maaiveld dan dient tijdens het boren een voldoende hoge druk in het boorgat aanwezig te zijn. Dit kan bereikt worden door een zwaardere boorvloeistof te gebruiken. Om lekkage te voorkomen van kleiafdichtingen is het van belang dat de vloeistofdruk pas wordt verminderd als de kleiafdichting voldoende afdicht, zodat er geen uitspoeling verticaal in het boorgat kan optreden.*

*OPMERKING 3: Het aantal waterspanningsmeters dat in een boorgat kan worden geplaatst, is afhankelijk van de diameter van de boring, de afmetingen van de instrumenten, de ruimte die wordt gebruikt door de kabels en / of buizen, de afstand tussen de sensoren en de aanvulprocedure.*



Figuur 5.1 Schematische weergave installatie meerdere waterspanningsmeters in een boorgat

Alle kabelverbindingen van waterspanningsmeetsystemen moeten worden beschermd tegen mechanische schade.

*OPMERKING 1: Om kabelverbindingen te beschermen, bijvoorbeeld als er meerdere waterspanningsmeters op een centraal op een terrein geplaatste kast met een logger moeten worden aangesloten, dan kunnen de kabels ingegraven worden, al dan niet met mantelbuizen.*

#### 5.4 Aansluiten van sensorkabels en opstarten van datalevering

Modemloggers dienen te zijn gemonteerd in een waterdichte kast met kabelwartels aan de onderzijde om de kabels in de kast te voeren.

Nadat de kabels zijn gemonteerd op de betreffende kanalen dient een foto genomen te worden waarop het label van de kabel, het poortnummer, het nummer van de logger, het nummer van het modem en het nummer van de meetlocatie en project duidelijk zichtbaar zijn.

Alle draden van de kabels dienen voorzien te worden van kabelschoentjes.

*OPMERKING 1: Extra weerstanden in het elektrisch systeem kunnen afwijkende meetresultaten veroorzaken. Om dit risico te reduceren dienen kabels voorzien te worden van kabelschoentjes.*

De kasten met (modem)loggers worden bij voorkeur in de directe nabijheid boven de waterspanningsmeters te worden aangebracht. Indien de buizen waarmee de waterspanningsmeters zijn opgelengd stevig genoeg zijn dan kunnen de kasten hieraan bevestigd worden. Indien dit niet mogelijk is dan dienen de kasten bevestigd te worden aan een perkoenpaal die voldoende stevig in de bodem staat of een ander stabiel object.

Overtollige kabel dient opgerold en met een ty-rap onder de kast bevestigd te worden.

### **5.5 Site Acceptance Test rapportage, start nulmeting**

Na plaatsing dient de definitieve plaatsingsdiepte te worden vastgelegd (hoogte sensor t.o.v. het referentieniveau, zoals NAP).

Meetgegevens die tijdens en direct na het plaatsen worden verzameld dienen onderdeel te zijn van de Site Acceptance Test (SAT)-rapportage.

De SAT dient bij voorkeur uitgevoerd in bijzijn van een tekenbevoegde vertegenwoordiger van de klant en dient binnen een week schriftelijk gerapporteerd te worden.

De rapportage van een SAT dient minimaal de volgende informatie te bevatten:

- Projectinformatie / tijd / locatie;
- Instrumenttype, leverancier en systeemtype
- Resultaat systeem test en eerste meetwaarden.

*OPMERKING 1: Minimaal moet de eerste aflezing plaatsvinden, bij voorkeur via het voorbereide data presentatieplatform. Bij het gereedkomen van het meetpunt contact opnemen met de binnendienstmedewerker die de eerste datalevering verifieerd en narekent.*

*Sensor output kan ter plaatse of door een binnendienstmedewerker omgerekend worden.*

*OPMERKING 2: Als de SAT niet compleet is of storingen laat zien, dient het herstelwerk zodanig snel te worden ingepland en uitgevoerd dat er een reële kans is op tijdig opleveren.*

### **5.6 Afwerking meetlocaties en communicatie met andere partijen op locatie**

#### **Sensorcodering**

Alle kabels van individuele meetsensoren dienen minimaal bij het aansluitpunt en een meetkast eenduidig gecodeerd te zijn.

*OPMERKING 1: De codering van de sensoren vormt de sleutel tot nauwkeurige verrekening van ruwe meetwaarde naar druk. Hoe meer coderingen op de kabel zijn gemaakt hoe lager de kans op onzekerheid over de identificatie van een sensor zoals tbv reparatie van kabels.*

*OPMERKING 2: Bij digitale sensoren is via adressering eenduidig vast te stellen welke sensor een meting levert.*

#### **Beschermen van kwetsbare bekabeling**

Kabels en meetkasten dienen zodanig te worden aangebracht dat de kans op schade beperkt is.

*OPMERKING: Door kabels goed af te schermen in duidelijk herkenbare constructies, als mantelbuizen, kunnen*

*beschadigingen worden beperkt. Beschadiging van materiaal in de praktijk van de geotechniek valt in de praktijk nooit helemaal uit te sluiten.*

### **Gedegen aansluitingen**

Mogelijke storingen door kabelaansluitingen dienen voorkomen te worden.

*OPMERKING: Storingen door kabelaansluitingen treden maar zelden op als waterdichte stekkers en kabeldoorvoeren worden gebruikt.*

### **Keuze juiste IP klasse**

Onderdelen van een meetsysteem die in de grond worden aangebracht dienen zodanig te zijn vervaardigd en/of aangebracht dat schade als gevolg van lekkage wordt vermeden.

*OPMERKING: Lekkage van water kan optreden tussen stangholte en vloeistofkamer. In het ergste geval ontstaat kortsluiting in de elektronica. Elektrische storingen zijn alleen te verhelpen door bijplaatsen van vervangende instrumenten.*

### **Vorbereiden voor reparatie en ‘terugvinden’ sensorlocaties**

Bij het ontwerpen van de lay-out van een meetsysteem dient rekening te worden gehouden met toekomstige reparaties.

*OPMERKING: Om de locatie van componenten van een meetsysteem eenvoudig te kunnen lokaliseren wordt bij voorkeur gebruik maken van kokers met een minimale hoogte boven maaiveld van één meter. Indien een ondergrondse afwerking noodzakelijk is kunnen ook straatputten als afwerking worden toegepast. Door het stuk betonstaal bij het meetpunt in combinatie met een nauwkeurige GPS locatie bepaling, is nazoeken met een instapmodel metaaldetector eenvoudig. Verder is het zinvol, voor het lokaliseren van objecten, om een veldformulier te voorzien van een foto van gemarkeerde locatie in lokale ruimtelijk herkenbare context.*

### **Vorbereiding voor onderhoud en projectafroning**

Bij het in bedrijf houden van meetsystemen dient rekening gehouden te worden met onderhoud en het ontmantelen van het systeem aan het einde van de opdracht.

*OPMERKING 1: De SAT en de nulmeting vormen een natuurlijk startpunt voor de aanvang van het project van de klant. Het vormt ook de basis voor de verwachtingen tav onderhoud en de tussentijdse rapportages en eindrapportage.*

*TOELICHTING : Onderhoud inplannen en afstemmen maakt de kosten beheersbaar. Hoe eerder bekend is dat schade is ontstaan of kan ontstaan hoe makkelijker het is om rust in de planning te houden.*

*Opleveren van de SAT en nulmeting rapportage vormt ook een moment voor overleg over de gewenste voortgang van het klantproject en werkzaamheden van derden. Het blijkt zeer handig om derden op de hoogte te brengen van de ligging van kabels en de kosten van schadegevallen of extra onderhoud. Ook het bekend maken van contactgegevens en opnemen van mailadressen van uitvoerders in status-berichten maakt een groot verschil in de bereikbaarheid voor schademeldingen en verzoeken voor verplaatsingen.*

Voor het afronden van een project en eventuele ontmanteling van een installatie dienen afspraken gemaakt te worden over eindrapportage, afwerking van de locatie en planning.

*OPMERKING 2: Projectafronding omvat vaak demobilisatie van meetapparatuur en afwerken van gaten. Daarvoor zijn afspraken gemaakt met de klant en de planning van deze werkzaamheden kan met de laatste datarapportage worden gecombineerd.*

### **5.7 Preventie van fouten bij plaatsing**

Gedurende plaatsing van waterspanningsmeters dient voorkomen te worden dat deze te snel worden weggedrukt of dat er nadien onduidelijkheden zijn over de exacte diepte waarop de sensor is aangebracht.

*TOELICHTING: Gedurende plaatsingswerk worden in korte tijd veel handelingen verricht waarbij ook veel kansen bestaan op fouten. Een gewenning aan gehaast werken verhoogt de kans op fouten en rust maakt afwijkingen van routines direct zichtbaar. De meest voorkomende fouten door onzorgvuldigheid worden in deze paragraaf beschreven.*

*Lang niet alle verstoringen van meetgegevens hebben met het meetsysteem te maken, natuur en de geotechnische praktijk zijn immers ruw en vol verrassingen. Echter door een zorgvuldige werkwijze wordt voorkomen dat de verdenking kan ontstaan dat verstoringen aan de meetpartij te verwijten zijn. De bewijslast voor goede werking van ondergrondse meetsystemen in situaties waar wel "onverwachte meetwaarden worden gemeten" kan zwaar wegen op de projectkosten.*

#### ***Te snel wegdrukken***

*Tijdens sonderen of wegdrukken wordt grond verkneed rondom de punt van het instrument. Daardoor ontstaat lokaal tijdelijk wateroverspanning en die is meer dan proportioneel met de inbrengsnelheid. Waterspanningsmeters hebben een beperkt meetbereik dat over het algemeen goed is afgestemd op het meetdoel om een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid te bereiken. Hoe kleiner het drukbereik hoe lager de druk waarbij blijvende verandering optreedt van de karakteristiek of totaal verlies van functie van de sensor. De relatie tussen sensoroutput en opgelegde druk (vastgelegd met Kalibratiekarakteristiek) kan ongemerkt veranderen bij overbelasting. Een verschuiving van de offset is makkelijk vast te stellen maar een verandering van de richtingscoëfficiënt of lineariteit kan eigenlijk alleen achteraf na terugwinning in een hercalibratie worden vastgesteld. Dat is maar zelden mogelijk en wordt nog minder vaak geëist.*

*Alleen sensorsystemen waarbij de sensor pas na plaatsing op de vloeistofkamer wordt aangesloten zoals bijvoorbeeld het BAT-filter-systeem, kunnen met hoge snelheid geplaatst worden.*

*Bij andere complete systemen volstaat het om tijdens het indrukken tot kort na plaatsing permanent te meten en zorg te dragen dat geen maximaaldruk wordt overschreden. Door de indruksnelheid te verlagen kan een te sterke drukstijging worden vermeden.*

#### ***Sensordiepte***

*De sensordiepte dient altijd vastgelegd te worden. Er dienen vooraf afspraken gemaakt te worden over de nauwkeurigheden. Indien verlangd wordt dat deze minimaal op 1 centimeter nauwkeurig vastgelegd/bepaald dient te worden is het inmeten met een 06-GPS met RTK correctie niet mogelijk maar moet bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van een precisie waterpastaestel.*

*Indien een plaatsingsdiepte-marge is aangegeven houdt dat in dat er eventueel dieper of ondieper mag worden geplaatst, maar ook dan wordt aanbevolen om de uiteindelijke plaatsingsdiepte minimaal in centimeters nauwkeurig vast te leggen/bepalen.*

*Wellicht ten overvloede: Om uit te komen op een plaatsingsdiepte nauwkeurigheid van 1 cm moet zowel het referentiepunt als de stanglengtemarkering op 1 mm nauwkeurig worden uitgevoerd. Ook als een beoogde plaatsingsdiepte wordt omschreven in meters dan nog dient de plaatsing bij voorkeur te worden uitgevoerd op 1 cm nauwkeurig.*

*Boringen en sonderingen bieden de mogelijkheid om nauwkeurig de diepte van sensoren te bepalen. Piketpalen en grondankers kunnen nauwkeurig worden ingemeten. Starre stangen naar maaiveld kunnen zeer nauwkeurig worden gemarkeerd. Gedurende de meetperiode wordt er vaak veel ruw werk verricht rondom de instrumenten tijdens een uitvoeringsfase van een project. Om later toch te kunnen achterhalen of plaatsingsdiepte veranderd is wordt aanbevolen om ook de resterende kabellengte vanaf maaiveld altijd op te meten en vast te leggen op het plaatsingsformulier in cm nauwkeurig.*

*Eventueel worden markeringen op de kabel alvast aangebracht tbv toekomstige ophogingen.*

*Indien sensoren verloren worden geplaatst is een verrekening van kabellengtes de enige manier om de plaatsingsdiepte vast te stellen. Daartoe wordt de resterende kabellengte afgetrokken van de bekend veronderstelde kabellengte tussen sensor en stekker/kabeleinde.*

*Indien de wsm wordt geplaatst met een stang of buis is via het inwendige van de buis de plaatsingsdiepte soms ook achteraf nog vast te stellen.*

*Plaatsingsdiepte kan onder sommige omstandigheden ook worden vastgesteld door TDR kabel testers waarmee impedantie verschillen over de kabel kunnen worden gelokaliseerd. Voor nauwkeurige kabellengtemetingen is een extra set aders nodig in de datakabel.*



## 6 Beoordeling monitoringsystemen

### 6.1 Richtlijnen voor beoordeling monitoringsystemen

Door de POV-M is recent een handreiking opgesteld voor Life Cycle Monitoring. Verwacht wordt dat deze de komende jaren de basis zal zijn voor het beoordelen van monitoringsystemen. De systematiek die in dit document nader wordt toegelicht leidt tot vergelijkbare aanbiedingen en daardoor ook direct 1 op 1 een handvat voor beoordeling en betaalbaarstelling van een monitoringssysteem. Omdat de richtlijnen in de handreiking Life Cycle Monitoring nieuw zijn en relevant zijn voor zowel de aannemer als opdrachtgever is hieraan een separaat hoofdstuk gewijd.

Tabel 6.1. vereenvoudigde beoordelingsmatrix.

Eenvoudige beoordeling KIS vak V (klimaatdijk)		laatste keer aangepast: door:		08-Nov-16 ARK		
KWALITEITSASPECT	KWALITEITSKLASSE			Toelichting bepalende aspecten		
	Nee	Twijfel	Ja			
A	Juiste informatie			x	Begrip risico's en fenomenen	Koppeling met beslissing
B	Tijdig beschikbaar		x		Nulmeting(en)	Waarschuwingstijd
C	Betrouwbare informatie			x	Data-validatie (cross-checks)	Robuustheid
D	Kosten-effectieve monitoring		x		Risicoreductie	Opportuniteitsvergroting

Toelichting:

A -

B Eerste insteek was om met consolidatiegraad de uitvoering te sturen --> maar dat vereist een goede nulmeting. Later is gekozen om met de gemeten waterspanning te rekenen.

C Cross-checks zijn mogelijk doordat de wsm's juist bij de zakkaken staan. Robuustheid: weinig meetpunten, daarom gevoelig voor uitval. Slechts 10% uitval zakkaken, slechts 2 wsm's stuk.

D risicoreductie: vraagteken, vanwege onverklaarbare horizontale deformatie, maar er zijn ook pluspunten.

#### 6.1.1 Eenvoudige beoordelingsmatrix

In de eenvoudige beoordelingsmatrix zijn de kwaliteitsaspecten geformuleerd als Key Performance Indicators (KPI's). De geleverde prestatie op een KPI wordt uitgedrukt met een kwaliteitsklasse. Voor de eenvoudige beoordelingsmatrix wordt gebruik gemaakt van een driepuntschaal, variërend van 'nee' via 'twijfel' naar 'ja'. Visueel is dit uitgedrukt met de kleuren van een verkeerslicht. Per cluster dienen twee vragen beantwoord te worden. In de spreadsheet is dit overigens mogelijk op een continue schaal tussen 0 (overtuigend 'neen') en 1 (volmondig 'ja'). Na beantwoording van beide vragen voor het betreffende kwaliteitsaspect is de score zichtbaar door het gekleurde vlak onder 'kwaliteitsklasse'.

#### 6.1.2 Uitgebreide beoordelingsmatrix

In de uitgebreide beoordelingsmatrix zijn de kwaliteitsaspecten ook weer geformuleerd als Key Performance Indicators. Voor de uitvoerige beoordelingsmatrix wordt gebruik gemaakt van een vijfpuntschaal, met scores uitgedrukt in een cijfer variërend van 1 (lage kwaliteit) tot 5 (hoge kwaliteit). Per aspect is elke kwaliteitsklasse afgebakend door een beschrijving van de prestatie. Wanneer niet geheel aan de omschrijving behorend bij een bepaalde kwaliteitsklasse Q wordt voldaan, dan wordt teruggevalen op de lagere klasse. Daardoor is het ook mogelijk om de (niet omschreven) score 0 te bereiken.

Voor elk kwaliteitsaspect is een gedetailleerde omschrijving gegeven in de beoordelingsmatrix. Naast de omschrijvingen voor de kwaliteitsklassen kan de onderbouwing worden gegeven voor de gegeven score, die naast de omschrijving van kwaliteitsklasse 5 kan worden ingevuld (een geheel getal van 1 t/m 5, of 0). De ingevulde scores worden overgenomen op de samenvatting in de laatste sheet.

Tabel 6.2. Uitgebreide beoordelingsmatrix.

1 Informatiebehoefte dijkveiligheid	Q Prestatie per kwaliteitsklasse Q	Onderbouwing	score
1a Signalering van de relevant geachte faalmechanismen	1 Detectie is alleen mogelijk bij geïdealiseerde omstandigheden		
	2 Detectie van de relevante faalmechanismen is waarschijnlijk mogelijk, maar eventuele uitval van één of enkele instrumenten is daarvoor funest		
	3 Detectie van de relevante faalmechanismen is te verwachten, ook bij de gebruikelijke uitval en bij de te verwachten variatie in de ondergrond		
	4 De instrumentatie is afgestemd op de onderzochte heterogeniteit en het systeem is bestand tegen optredende uitval		
	5 Flexibel, adaptief systeem gebaseerd op de onderzochte heterogeniteit en waar nodig vinden aanpassingen plaats op basis van de interpretatie van de gemeten data		
1b Kans op nuttige bijvangst Detectie van andere fenomenen, omgevingsaspecten en <i>unknown unknowns</i>	1 De monitoring is strikt gericht op het als maatgevend bepaalde faalmechanisme		
	2 De monitoring is zo ingericht dat het optreden van andere faalmechanismen opgemerkt zou kunnen worden		
	3 Bij de monitoringsopzet is rekening gehouden met het eventueel optreden van andere faalmechanismen		
	4 Andere faalmechanismen kunnen onderscheiden worden, waarbij het systeem voor het noodzakelijke onderscheid waar nodig ook voorzien is van aanvullende instrumentatie		
	5 Als klasse 4, met bovendien flexibiliteit en aanpassing naar veranderende omstandigheden op basis van de metingen		
1c Robuustheid voor variaties in belasting, geometrie en ondergrondeigenschappen	1 De instrumentatie is geplaatst in de representatief geachte doorsnede(n), hydraulische randvoorwaarden worden van elders betrokken		
	2 Met de locaties van de instrumentatie is rekening gehouden met grote variaties in de geometrie en de ondergrond (indien bekend), de hydraulische randvoorwaarden worden dusdanig in de buurt gemeten dat er geen grote verschillen zijn met de plaatselijke situatie		
	3 Met de locaties van de instrumentatie is rekening gehouden met de aanwezige variatie in de geometrie en de ondergrond, te onderscheiden belastingregimes kunnen worden gemeten en de afwijking door plaatsverschillen in de belasting is klein ten opzichte van de omvang van de belasting		
	4 De instrumentatie is afgestemd op de aanwezige variatie in de geometrie en de ondergrond, de belastingen worden lokaal bepaald of komen daar praktisch gezien mee overeen		
	5 Als klasse 4, met flexibiliteit en aanpassing naar veranderende omstandigheden op basis van de metingen		
1d Meetprincipe Lokaal/direct versus elders/indirect	1 De gemeten parameters zijn indirect te relateren aan een (faal)mechanisme maar er wordt géén indicatie verkregen van de zone van optreden		
	2 De gemeten parameters zijn indirect te relateren aan een (faal)mechanisme en er wordt een indicatie verkregen voor de zone van optreden		
	3 De gemeten parameters zijn direct te relateren aan een (faal)mechanisme en er wordt een indicatie verkregen voor de zone van optreden		
	4 De gemeten parameters zijn direct te relateren aan een (faal)mechanisme en worden gemeten in de zone waar dit optreedt		
	5 De gemeten parameters zijn direct te relateren aan een (faal)mechanisme en worden gemeten in de zone waar dit ontstaat		

2 Tijdsige beschikbaarheid	Q Prestatie per kwaliteitsklasse Q	Onderbouwing	score
<b>2a Kwaliteit meetreeks</b> Beschikbaarheid nulmetingen, duur van de meetperiode	1 Er zijn geen nulmetingen beschikbaar en de meetperiode is waarschijnlijk te kort om bruikbare metingen op te leveren 2 Er zijn nulmetingen beschikbaar, maar de meetperiode is waarschijnlijk te kort om bruikbare metingen op te leveren 3 Er zijn nulmetingen beschikbaar en de meetperiode zal naar verwachting bruikbare metingen opleveren 4 Er zijn nulmetingen beschikbaar en de meetperiode is ruimschoots langer dan de statistische herhalingsstijd van bruikbare variaties in de meetreeks 5 Er zijn nulmetingen beschikbaar en de meetperiode is ruimschoots langer dan de statistische herhalingsstijd van bruikbare variaties in de meetreeks, bovendien kan de meetperiode indien nodig worden verlengd		
<b>2b Signaleringsnelheid</b> Van optreden fenomeen tot waarschuwing/alarmering	1 Er is geen aandacht voor signalering (de meetdata wordt periodiek verwerkt, maar zonder rekening te houden met snelle escalatie op basis van de data) 2 De data wordt veel sneller (geautomatiseerd) gecontroleerd op eventuele fouten of tekortkomingen dan de snelheid waarmee de relevante mechanismen zich ontwikkelen, bij mogelijke problemen vindt controle van het monitoringssysteem plaats, daarna vindt eventueel opvolging plaats 3 Als 2, met periodieke controle door geotechnisch/geofysisch/geohydrologisch expert met opvolgende acties om tekortkomingen op te lossen 4 Als 3, met onmiddellijke controle door geo-expert en opvolgende acties bij overschrijding van waarschuwings- of alarmwaarden 5 Als 4, geïntegreerd met voorbereide mobilisatie van materieel (integratie metingen met actieplan beheerder in samenwerking met aannemer(s))		
<b>2c Instandhouding systeem</b> Tijdige vervanging met analyse van de noodzaak daartoe	1 Er is niet voorzien in vervanging van componenten die niet meer functioneren 2 Nadat gebleken is dat componenten niet meer functioneren wordt tot vervanging overgegaan. 3 Zodra componenten niet meer blijken te functioneren worden deze vervangen (de meest gangbare componenten zijn op voorraad beschikbaar) 4 Periodieke analyse in hoeverre het bestaande monitoringssysteem voortgezet moet worden, met vervanging van componenten die niet meer functioneren (of tijdige vervanging bij het verstrijken van de levensduur) 5 Periodieke herziening van het monitoringssysteem als geheel, met mogelijke uitbreiding of inkrimping en daarbij waar nodig passende vervanging/vernieuwing		

3 Gebruikswaarde	Q prestatie per kwaliteitsklasse Q	Onderbouwing	score
<b>3a Gebruiksgemak</b> Heldere presentatie van gegevens per gebruikersgroep	1 De meetdata zijn als getalswaarden beschikbaar 2 Als 1, de meetdata zijn bovendien beschikbaar in grafiekvorm 3 Als 2, waarbij er sprake is van passend gekozen vaste combinaties van data t.b.v. grafieken 4 Als 3, selecteerbaar via een toegankelijk geografisch informatiesysteem 5 Als 4, met in de grafieken (en bij eventuele tabellen) fysieke begrenzingen zoals de kruinhoogte en het maaiveld aangegeven		
<b>3b Flexiliteit en handelingsperspectief</b> Vergroting van mogelijkheden, ook buiten waterveiligheid	1 Het monitoringssysteem biedt geen verdere mogelijkheden 2 Het monitoringssysteem levert informatie met betrekking tot de ontwikkeling van mechanismen (naast falen ook bijvoorbeeld consolidatie en kruip) waarmee een flexibeler planning of uitvoering in beperkte mate mogelijk is 3 Het monitoringssysteem levert informatie met betrekking tot de ontwikkeling van mechanismen waarmee een flexibeler planning of uitvoering in redelijke mate mogelijk is 4 Het monitoringssysteem levert vroegtijdig informatie met betrekking tot de ontwikkeling van mechanismen waarmee een flexibeler planning of uitvoering in ruime mate mogelijk is 5 Als 4, met geïntegreerde voorspellingsmethoden (voor bijvoorbeeld zetting of stabiliteit)		
<b>3c Projectbeheersing</b> Risicoreductie en rendement op investering	1 Er is geen aandacht voor risicomanagement (het monitoringssysteem speelt hierbij geen rol van betekenis) 2 Er zijn beoordelingschematiseringen beschikbaar waarmee de meetdata vergeleken kan worden 3 Er zijn meerdere scenario's opgesteld die afhankelijk van de meetwaarden relevant kunnen worden 4 Uitgaande van één of meer basisscenario's wordt met behulp van de meetdata regelmatig een update gemaakt waarmee het handelen wordt aangepast 5 Uitgaande van één of meer basisscenario's wordt met behulp van de meetdata regelmatig een update gemaakt inclusief een vooruitblik waarop het handelen (inclusief de configuratie van het monitoringssysteem) wordt aangepast		
<b>3d Overdraagbaarheid van informatie</b> Naar andere gebruikers in zelfde en in volgende fase(n) van de levenscyclus	1 Het monitoringssysteem en de omgang daarmee zijn alleen gericht op het nu 2 Het monitoringssysteem is uitsluitend gericht op de huidige levensfase uit de cyclus; er vindt geen overleg plaats over de volgende levensfase 3 Het monitoringssysteem is mede afgestemd op de volgende levensfase, in overleg met in elk geval de opdrachtgever 4 Het monitoringssysteem is mede afgestemd op de volgende levensfase, in overleg met de belangrijkste huidige en toekomstige stakeholders 5 Er is een integraal afgewogen monitoringsplan over de gehele levenscyclus in afstemming met relevante stakeholders (voor iedere fase tenminste één) NB: dit integrale plan hoeft nog niet volledig ontwikkeld en geïmplementeerd te zijn, sommige delen zullen immers pas in toekomstige levensfasen opportuun zijn		

4 Betrouwbaarheid sensordata (systeem als geheel)	Q prestatie per kwaliteitsklasse Q	Onderbouwing	score
<b>4a Nauwkeurigheid</b>			
Factory Acceptance Tests, Site Acceptance Tests, sensordrift en fysieke verplaatsing van de sensor	1	FAT, SAT of installatierapporten ontbreken	
	2	Specificaties zijn beschikbaar (en voldoen voor het redelijkerwijs te verwachten verloop van de meetwaarden gedurende de gewenste levensduur), kalibratiewaarden zijn beschikbaar en de installatie is uitgevoerd zoals voorgeschreven door ervaren mensen (ervaring blijkt uit referenties met betrekking tot goed functionerende vergelijkbare instrumenten), er is een logboek	
	3	Als 2, met voldoende nauwkeurigheid over het gehele fysiek denkbare meetbereik (situatieafhankelijk) en met beschikbare protocollen en handleidingen voor de instrumenten en het functioneren ervan is gecontroleerd, er wordt een logboek bijgehouden, er zijn onderbouwde schattingen om de verplaatsing van de sensor te bepalen	
	4	Als 3, met regelmatig te vervangen en/of kwetsbare onderdelen in reserve en aantoonbare zorg voor onderhoud, er zijn schattingen van de sensordrift beschikbaar en periodieke metingen om de verplaatsing van de sensor te bepalen	
	5	Als 4, met regelmatig te vervangen en/of kwetsbare onderdelen in reserve en aantoonbare zorg voor onderhoud, er zijn onderbouwde inschattingen van de sensordrift beschikbaar	
<b>4b Beschikbaarheid</b>			
Mate van afwezigheid van willekeurige uitval in de tijd en uitval onder bijzondere omstandigheden zoals hoogwater of extreme droogte, zowel voor metingen als voor doorgifte van data	1	Onder min of meer kritieke omstandigheden zal het systeem niet meer functioneren en/of na oplevering van het systeem zijn er geen garanties over de levering van de meetdata	
	2	Onder kritieke omstandigheden zal er waarschijnlijk nog wel worden gemeten, maar de doorgifte van data is onzeker (data is dan pas naderhand beschikbaar), voor de datadoorgifte worden publieke communicatiekanalen gebruikt, indien relevant kan de data onder normale omstandigheden eens per etmaal worden doorgegeven	
	3	Metingen onder kritieke omstandigheden zullen beschikbaar zijn, de data kan indien gewenst ieder uur worden doorgegeven met een regelmatig onderhouden systeem via publieke communicatiekanalen, storingen in de doorgifte worden binnen 24 uur opgelost	
	4	Het systeem zal ook onder kritieke omstandigheden functioneren, de data kan indien gewenst <i>near real time</i> (= met minder dan 1 minuut vertraging) worden doorgegeven met een regelmatig onderhouden systeem dat ook onder kritieke omstandigheden kan functioneren, maar wel gebruik maakt van publieke communicatiekanalen	
	5	Als 4, met indien nodig een alternatief communicatiesysteem dat ook onder kritieke omstandigheden zal functioneren	
<b>4c Controleerbaarheid</b>			
Correlatie van meetwaarden tussen instrumenten en met omstandigheden, <i>common sense</i>	1	Er is sprake van losse metingen, zonder onderling verband	
	2	Ad-hoc kunnen verbanden worden gelegd	
	3	Relevante veranderingen in het ene instrument zouden bevestigd moeten worden door veranderingen in andere instrumenten	
	4	Meetwaarden worden volgens meerdere scenario's gecheckt op onderlinge samenhang	
	5	Verschillende mogelijke verbanden kunnen met (of door) het systeem gedetecteerd worden; daarvan afwijkende patronen worden ook als zodanig herkend	

4-1 Betrouwbaarheid sensordata (SENSORTYPE 1)	Q prestatie per kwaliteitsklasse Q	Onderbouwing	score
<b>4a Nauwkeurigheid</b>	1 FAT, SAT of installatierapporten ontbreken		
Factory Acceptance Tests, Site Acceptance Tests, sensordrift en fysieke verplaatsing van de sensor	2 Specificaties zijn beschikbaar (en voldoen voor het redelijkerwijs te verwachten verloop van de meetwaarden gedurende de gewenste levensduur), kalibratiewaarden zijn beschikbaar en de installatie is uitgevoerd zoals voorgeschreven door ervaren mensen (ervaring blijkt uit referenties met betrekking tot goed functionerende vergelijkbare instrumenten), er is een logboek		
	3 Als 2, met voldoende nauwkeurigheid over het gehele fysiek denkbare meetbereik (situatieafhankelijk!) en met beschikbare protocollen en handleidingen voor de instrumenten en het functioneren ervan is gecontroleerd, er wordt een logboek bijgehouden, er zijn onderbouwde schattingen om de verplaatsing van de sensor te bepalen		
	4 Als 3, met regelmatig te vervangen en/of kwetsbare onderdelen in reserve en aantoonbare zorg voor onderhoud, er zijn schattingen van de sensordrift beschikbaar en periodieke inmetingen om de verplaatsing van de sensor te bepalen		
	5 Als 4, met regelmatig te vervangen en/of kwetsbare onderdelen in reserve en aantoonbare zorg voor onderhoud, er zijn onderbouwde inschattingen van de sensordrift beschikbaar		
<b>4b Beschikbaarheid</b>	1 Onder min of meer kritieke omstandigheden zal het systeem niet meer functioneren en/of na oplevering van het systeem zijn er geen garanties over de levering van de meetdata		
Mate van afwezigheid van willekeurige uitval in de tijd en uitval onder bijzondere omstandigheden zoals hoogwater of extreme droogte, zowel voor metingen als voor doorgifte van data	2 Onder kritieke omstandigheden zal er waarschijnlijk nog wel worden gemeten, maar de doorgifte van data is onzeker (data is dan pas naderhand beschikbaar), voor de datadoorgifte worden publieke communicatiekanalen gebruikt, indien relevant kan de data onder normale omstandigheden eens per etmaal worden doorgegeven		
	3 Metingen onder kritieke omstandigheden zullen beschikbaar zijn, de data kan indien gewenst ieder uur worden doorgegeven met een regelmatig onderhouden systeem via publieke communicatiekanalen, storingen in de doorgifte worden binnen 24 uur opgelost		
	4 Het systeem zal ook onder kritieke omstandigheden functioneren, de data kan indien gewenst <i>near real time</i> (= met minder dan 1 minuut vertraging) worden doorgegeven met een regelmatig onderhouden systeem dat ook onder kritieke omstandigheden kan functioneren, maar wel gebruik maakt van publieke communicatiekanalen		
	5 Als 4, met indien nodig een alternatief communicatiesysteem dat ook onder kritieke omstandigheden zal functioneren		
<b>4c Controleerbaarheid</b>	1 Er is sprake van losse metingen, zonder onderling verband		
Correlatie van meetwaarden tussen instrumenten en met omstandigheden, <i>common sense</i>	2 Ad-hoc kunnen verbanden worden gelegd		
	3 Relevante veranderingen in het ene instrument zouden bevestigd moeten worden door veranderingen in andere instrumenten		
	4 Meetwaarden worden volgens meerdere scenario's gecheckt op onderlinge samenhang		
	5 Verschillende mogelijke verbanden kunnen met (of door) het systeem gedetecteerd worden; daarvan afwijkende patronen worden ook als zodanig herkend		

4-2 Betrouwbaarheid sensordata (SENSORTYPE 2)	Q prestatie per kwaliteitsklasse Q	Onderbouwing	score
<b>4a Nauwkeurigheid</b>			
Factory Acceptance Tests, Site Acceptance Tests, sensordrift en fysieke verplaatsing van de sensor	1	FAT, SAT of installatierapporten ontbreken	
	2	Specificaties zijn beschikbaar (en voldoen voor het redelijkerwijs te verwachten verloop van de meetwaarden gedurende de gewenste levensduur), kalibratiewaarden zijn beschikbaar en de installatie is uitgevoerd zoals voorgeschreven door ervaren mensen (ervaring blijkt uit referenties met betrekking tot goed functionerende vergelijkbare instrumenten), er is een logboek	
	3	Als 2, met voldoende nauwkeurigheid over het gehele fysiek denkbare meetbereik (situatieafhankelijk) en met beschikbare protocollen en handleidingen voor de instrumenten en het functioneren ervan is gecontroleerd, er wordt een logboek bijgehouden, er zijn onderbouwde schattingen om de verplaatsing van de sensor te bepalen	
	4	Als 3, met regelmatig te vervangen en/of kwetsbare onderdelen in reserve en aantoonbare zorg voor onderhoud, er zijn schattingen van de sensordrift beschikbaar en periodieke metingen om de verplaatsing van de sensor te bepalen	
	5	Als 4, met regelmatig te vervangen en/of kwetsbare onderdelen in reserve en aantoonbare zorg voor onderhoud, er zijn onderbouwde inschattingen van de sensordrift beschikbaar	
<b>4b Beschikbaarheid</b>			
Mate van afwezigheid van willekeurige uitval in de tijd en uitval onder bijzondere omstandigheden zoals hoogwater of extreme droogte, zowel voor metingen als voor doorgifte van data	1	Onder min of meer kritieke omstandigheden zal het systeem niet meer functioneren en/of na oplevering van het systeem zijn er geen garanties over de levering van de meetdata	
	2	Onder kritieke omstandigheden zal er waarschijnlijk nog wel worden gemeten, maar de doorgifte van data is onzeker (data is dan pas naderhand beschikbaar), voor de datadoorgifte worden publieke communicatiekanalen gebruikt, indien relevant kan de data onder normale omstandigheden eens per etmaal worden doorgegeven	
	3	Metingen onder kritieke omstandigheden zullen beschikbaar zijn, de data kan indien gewenst ieder uur worden doorgegeven met een regelmatig onderhouden systeem via publieke communicatiekanalen, storingen in de doorgifte worden binnen 24 uur opgelost	
	4	Het systeem zal ook onder kritieke omstandigheden functioneren, de data kan indien gewenst <i>near real time</i> (= met minder dan 1 minuut vertraging) worden doorgegeven met een regelmatig onderhouden systeem dat ook onder kritieke omstandigheden kan functioneren, maar wel gebruik maakt van publieke communicatiekanalen	
	5	Als 4, met indien nodig een alternatief communicatiesysteem dat ook onder kritieke omstandigheden zal functioneren	
<b>4c Controleerbaarheid</b>			
Correlatie van meetwaarden tussen instrumenten en met omstandigheden, <i>common sense</i>	1	Er is sprake van losse metingen, zonder onderling verband	
	2	Ad-hoc kunnen verbanden worden gelegd	
	3	Relevante veranderingen in het ene instrument zouden bevestigd moeten worden door veranderingen in andere instrumenten	
	4	Meetwaarden worden volgens meerdere scenario's gecheckt op onderlinge samenhang	
	5	Verschillende mogelijke verbanden kunnen met (of door) het systeem gedetecteerd worden; daarvan afwijkende patronen worden ook als zodanig herkend	

## 6.2 Voorbeeldberekeningen nauwkeurigheid en samengestelde meetfouten van meetsystemen

In aanbestedingen worden soms strenge criteria genoemd voor nauwkeurigheid van meetresultaten (bijvoorbeeld “nauwkeurigheden binnen 1 cm stijghoogte”), maar meestal ontbreken nauwkeurigheidseisen geheel. Omdat waterspanningsmeters in toenemende mate worden ingezet om risico's te beheersen, neemt de meetfrequentie toe en worden de kwaliteit en leveringszekerheid steeds belangrijker (ook al wordt dat niet expliciet uitgevraagd). Dit zou een belangrijk onderdeel van de aanbestedingsfase moeten zijn.

In deze paragraaf wordt aan de hand van twee veel voorkomende situaties uitgelegd hoe meetfouten dienen te worden gecommuniceerd en gepresenteerd om misverstanden te voorkomen. Voor een juiste beoordeling van inschrijvingen is het van belang om heldere beoordelingscriteria te hanteren zonder de ruimte voor inschrijvers teveel te beperken zodat ze daar op verschillende manieren invulling aan kunnen geven.

Aan de hand van processchema in bijlage A1 wordt in de volgende paragrafen voor twee situaties een voorbeeld beschreven van de bijdragen van de sensor en meetopstelling aan de samengestelde onzekerheid in het eindresultaat:

- Situatie 1 : Waterspanningsmeting met 1 druksensor en 1 luchtdruksensor voor compensatie.
- Situatie 2 : Verschil tussen twee gecorrigeerde waterspanningsmetingen.

In dit hoofdstuk wordt ook een voorbeeld gegeven van een meetreeks die verstoord wordt door gasvorming.

### 6.2.1 Voorbeeld 1: waterspanningsmeting met één sensor met luchtdrukcompensatie

Bij het opzetten van een meetsysteem voor het meten van waterspanning worden meerdere componenten samengebracht waardoor meerdere bronnen van fouten gelijktijdig voorkomen (zie processchema, figuur A.1 in bijlage A.2):

1. Afstand tussen sensor en locatie van oorsprong van het georisicoproces
  - a. Het bekende deel van het verschil tussen de geplande en de daadwerkelijk gerealiseerde sensorlocatie
  - b. Onvermijdbare afstand tussen sensor en risicoproces (sensor kan nooit op de locatie van een intrillende damwand staan; Het is niet te voorspellen welke in een rij damwandplanken uit het slot loopt of op een steen stuit)
  - c. Resolutie van de methode die heeft geleid tot het bepalen van de optimale meetlocatie (bijvoorbeeld de onzekerheid in de parameterisatie van de berekening die voorafging aan de meetlocatiebepaling, zoals een glijcirkelbepaling)
2. Afwijking tussen de daadwerkelijke sensorlocatie en de geregistreerde sensorlocatie (bijvoorbeeld een plaatsingsdieptefout)
3. Sensor-onnauwkeurigheid
  - a. Het bekende deel van de sensoronnauwkeurigheid (zoals beschreven door de sensorkalibratie, inclusief hysteresis, temperatuurvariatie, etc.)
  - b. Het onbekende deel van de sensoronnauwkeurigheid, zoals overbelasting of beschadiging na kalibratie)
4. Data-Acquisitie systeem onnauwkeurigheid
  - a. Intrinsieke kenmerken van meetsysteem (maximaal haalbare systeemnaauwkeurigheid (Analoog-digitaalconversie, bit-diepte van het opslaggeheugen en het werkgeheugen)
  - b. Configuratie-afstemming van sensor outputbereik op meetsysteembereik (effectieve benuttingsgraad van de maximaal haalbare systeemnaauwkeurigheid)
  - c. Onverwachte onregelmatigheden (Signaaloverdracht verstoringen, stroomstoringen, netwerkverbindingen)
5. Verschilberekeningen (verwerking van drukmeting naar bruikbare engineering parameters, bijv. van mA naar kPa)
6. Tijdstapfouten
  - a. Acceptabele traagheid
  - b. Onverwachte regelmatige traagheid
7. Vervorming van het meetnet na plaatsing
  - a. Onbekende trage verplaatsing
  - b. Meetbare verzakking van een sensor (uitstekende stanglengte als zakbaak)
8. Marge tussen toetsingsgrenswaarden en het daadwerkelijke optreden van een risicoproces. (deze marge dient altijd positief te zijn, rekening houdend met de spreiding in zowel de meetwaarde als de spreiding in de daadwerkelijke risicoproces grenswaarde. In andere woorden: de kansdichtheidsfunctie van het risico-detectiesysteem mag niet overlappen met de kansdichtheidsfunctie van het risicoproces.)
9. Factor mens (Gross error, pech, sabotage, etc)

Van de bovenstaande aspecten worden de groen gemarkeerde onderdelen gedekt door de **Factory Acceptance Test**. De paars gemarkeerde aspecten kunnen worden gedetecteerd bij de **Site Acceptance Test**. De factor mens kan met FAT en SAT maar ten dele worden afgedekt.

### Factor 1: bruto / totaal druk – luchtdruk

Deze situatie beschrijft allereerst de factoren 3 ‘Sensor’ en 4 ‘Meetsysteem’ van een meetketen.

In dit voorbeeld worden twee sensoren gebruikt om netto waterspanning te kunnen meten:

1. Een luchtdruksensor meet de heersende luchtdruk  $L$ , een normaal verdeelde variabele met gemiddelde  $\mu_l$  en standaardafwijking  $\sigma_l$
2. Een tweede sensor (in de waterspanningsmeter) meet via het grondwater Totaaldruk van waterspanning en luchtdruk  $T$ , ook een normaal verdeelde variabele met gemiddelde  $\mu_t$  en standaardafwijking  $\sigma_t$

De luchtdruksensor registreert op een hoogte van hooguit enkele meters boven maaiveld. De luchtdrukcomponent in de totaaldruksensor is hoger als gevolg van het hoogteverschil. Dit is in veel gevallen maar enkele meters en bij een drukverval van 0,1 kPa per 8 meter hoogte (vuistregel op zeeniveau) is het zelden meer dan 0,1 kPa. Bij diepe plaatsing van een waterspanningsmeter op NAP -24 m en een luchtdruksensor op 6 meter boven zeeniveau is deze afwijking 0,375 kPa, bijna 4 cm waterkolomhoogte (cmwk). In dat geval :  $\mu_l = - 0,375$  kPa, immers van de totaal druk wordt 0,375 kPa teveel afgetrokken.

Voor  $T$  geldt een sensoronauwkeurigheid die wordt uitgedrukt in full scale (FS) error. Uitgaande van een 90 kPa tot 350 kPa sensor, met een 0.09% full scale error :

$$(350 - 90 =) 260 \text{ kPa} * 0,09\% = 0,23 \text{ kPa} = 2,4 \text{ cmwk.}$$

Voor  $L$  geldt bij een 0.09% full scale error van een absolute luchtdruksensor met een meetbereik van 0 tot 110 kPa:

$$110 \text{ kPa} * 0,09\% = 0,099 \text{ kPa oftewel } 1,0 \text{ cmwk}$$

In het geval van een luchtdruksensor met een verschoven nulpunt (90-110kPa) en eenzelfde FS error :

$$20 \text{ kPa} * 0,09\% = 0,018 \text{ kPa oftewel } 0,2 \text{ cmwk}$$

Om dit in een verdelingsfunctie te kunnen uitdrukken is eigenlijk een standaardafwijking nodig. Er worden echter nooit spreidingsmaten bepaald voor de afwijking, alleen maar een interval waarbinnen alle afwijkingen liggen binnen het meetbereik. Gemakshalve zou men er vanuit moeten kunnen gaan dat de FS error ongeveer gelijk is aan een *eenzijdig* 99% betrouwbaarheidsinterval, met als grenzen  $-3\sigma$  en  $+3\sigma$ , aangezien dat bij normaal verdeelde parameters 99,7% van de kansdichtheidsfunctie dekt.

Op basis van de berekende FS errors zijn de standaardafwijkingen:

$$\underline{L} \text{ met } \mu_l = 0 \text{ en } \sigma_l = 0,099 / 3 = 0,033 \text{ kPa}$$

$$\underline{T} \text{ met } \mu_t = 0 \text{ en } \sigma_t = 0,23 / 3 = 0,077 \text{ kPa}$$

Bij het onderling verrekenen van drukken  $T$  en  $L$  neemt de samengestelde standaardafwijking toe met  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  wat in deze situatie neerkomt op:

$$\sigma_w = \sqrt{0.033^2 + 0.077^2} = 0.084 \text{ kPa} \approx 0,8 \text{ cmwk}$$



Concreet betekent dit dat een gemeten waarde met onderstaande apparatuur/randvoorwaarden met een zekerheid van 99,7% ( $3\sigma$ ) minder dan 0,25 kPa afwijkt van de werkelijke waarde, mits bij alle gemeten waarden 0,375 kPa wordt opgeteld ter compensatie van het hoogteverschil tussen luchtdruksensor en de diepte waarop de totaaldruk gemeten wordt. Gehanteerde uitgangspunten:

- Plaatsingsdiepte NAP -24 m
- Luchtdrukmeting op NAP +6 m
- Absolute luchtdruksensor, meetbereik 0 – 110 kPa
- Totaaldruksensor, meetbereik 90 – 350 kPa

### Factor 2 : onbekende locatiefout of plaatsingsdieptefout

In de situatie dat de sensor in de grond wordt geplaatst wordt een plaatsingsdieptefout geproduceerd (dieptefout  $\underline{D}$  met  $\mu_d$  en  $\sigma_d$ ).

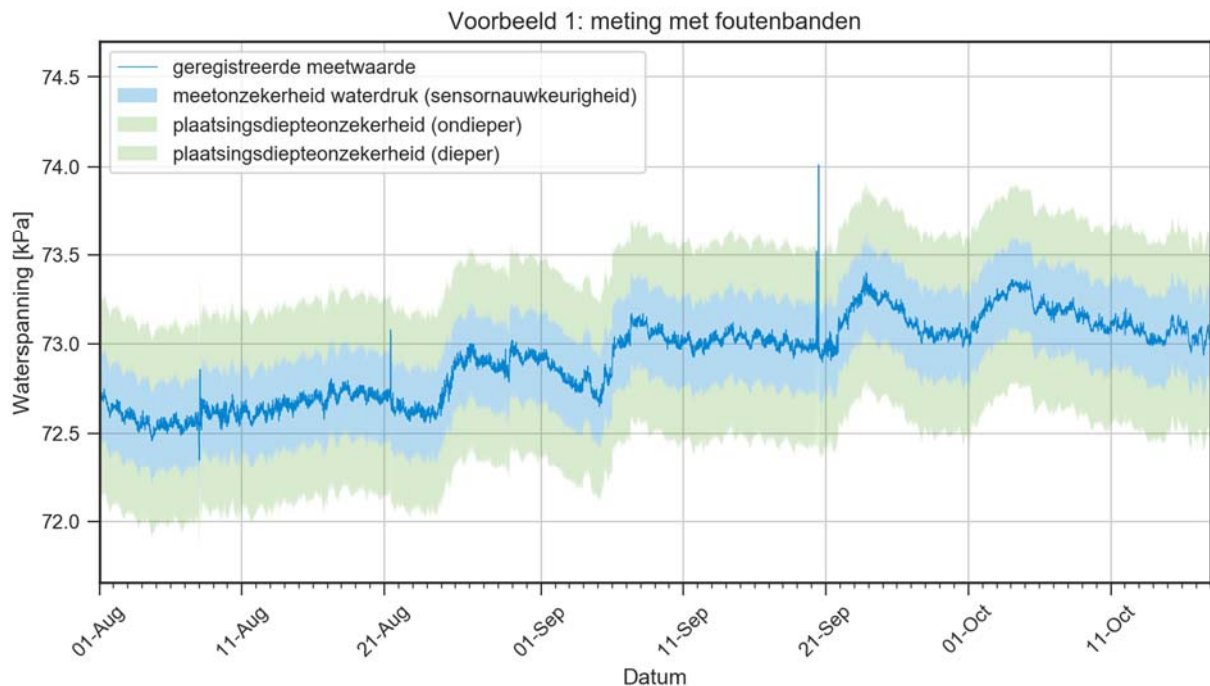
Deze is afhankelijk van :

- A. de plaatsingsmethode (sonderen, inhangen in boorgat, wegdrukken in boorgat)
- B. de gebruikte referentiehoogte (NAP, maaiveld, oppervlaktewaterstand)
- C. de kwaliteit van de gebruikte plaatsingsmaterialen en zorgvuldigheid van werk (indraaidiepte stangen kan verschillen, telfout aantal stangen = Gross Error)
  - Landwerk : Sondeerstangen / gasbuizen /
  - Waterwerk : Sondeerstangen scheefstand Inclinatie  $\underline{l}$  (exponentieel verdeeld)  $x_i > 0$  en  $\lambda_i$
- D. de meetmethode voor het bepalen van de hoogte ten opzichte van de gekozen referentiehoogte: (GPS / RTK / 06 of waterpassing lokaal / NAP)

Door een goede meting van de plaatsingsdiepte met uitstekende sondeerstang kan fout  $\underline{D}$  normaal gesproken zeer sterk worden teruggebracht. In het geval van een lokale waterpassing tot  $\sigma_d = 0,01$  cm.

Met uitzondering van plaatsingsdieptefouten die typisch zijn voor waterwerk (zie bijlage A3) zijn al deze meetfouten van het type A meetfouten, omdat ze allen kunnen worden beschreven als normaal verdeelde afwijkingen zonder systematische component.

In figuur 6.1 hieronder is een voorbeeld gegeven van hoe een waterspanningsmeetreeks inclusief onzekerheden/nauwkeurigheden kan worden gepresenteerd. In het voorbeeld zijn 2 foutenbanden rondom de gemeten waarden weergegeven: de samengestelde meetafwijking t.g.v. de gebruikte sensoren (luchtdruk en totaaldruk, waarbij een interval van  $-3\sigma$  tot  $+3\sigma$  is aangehouden,  $\sigma = 0,084$  kPa) en een plaatsingsdieptefout van 3 cm, overeenkomend met een bijvoorbeeld een 06-GPS.



Figuur 6.1: Voorbeeld meetreeks met foutenbanden (samengestelde meetonzekerheid en plaatsingsdiepteonzekerheid)

#### Nb 1

In dit voorbeeld wordt uitgegaan van absolute meetsensoren. Sommige leveranciers leveren geventileerde druksensoren waarmee de luchtdruk uit de vergelijking wordt geëlimineerd door het aan de achterzijde van de sensor toe te laten. Het sensormembraan heeft daardoor luchtdruk aan een zijde van het sensormembraan en totaaldruk aan de natte zijde. De luchtdruk wordt dus bij iedere meting constant direct gecompenseerd : er zit daardoor geen enkel restant van luchtdruk meetfouten in de sensoroutput. Hierbij treedt echter soms verstopping op waardoor er hysteresis in de correctiedruk ontstaat of in een meest extreem geval totale uitval van de luchtdrukcompensatie.

#### Nb 2

Scheefstand van een sondeerstang of gasbuis treedt altijd op en bij diepe plaatsingen is daarom altijd sprake van x-y-z onzekerheid. Alleen in speciaal gefabriceerde instrumenten worden hellingsensoren ingebouwd zoals doelgericht schuin gesondeerde instrumenten en onderzoekssituaties waarbij onderlinge afstand tussen bron en meetinstrument het vereist. Bij verreweg de meeste ondiepe toepassingen (mv -5 m) zijn de scheefstandfouten beperkt tot hooguit enkele centimeters. In Bijlage A3 wordt de dieptecorrectie voor scheefstand verder besproken.

### 6.2.2 Situatie 2: verschilmetingen tussen twee luchtdrukgecompenseerde waterspanningsmeters

In dit voorbeeld gaat het om het vaststellen van een drukverschil tussen twee (of meerdere) absoluut metende sensoren. Dit komt voor binnen meetnetten waarbij na uitval van een sensor in een netwerk wordt gekeken naar onverklaarbare verschillen of waar na uitval van een sensor wordt overwogen om de reeks aan te vullen op basis van eerder gebleken samenhang tussen reeksen.

Daarbij spelen de onnauwkeurigheden van de beide sensoren een rol, die als ze bekend zijn kunnen worden uitgedrukt als twee kansdichtheidsfuncties : de verwachting ten aanzien van de werkelijke waarde van de druk

wetende wat het meetresultaat is.

Sensoron nauwkeurigheid bij kalibratie (zie ook voorbeeld 1): 0.09% full scale error (260 kPa) = 0,23 kPa

Het verschil tussen 2 metingen van 2 sensoren waarvan de dieptes beide perfect bekend zijn (verstoringen zijn onafhankelijk) leidt tot een samengestelde standaardafwijking.

Die wordt berekend als  $\sqrt{\sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2}$  :

$$\sigma_s = \sqrt{0,23^2 + 0,23^2} = 0,33 \text{ kPa}$$

De standaardafwijking van berekeningsresultaten groeit dus een beetje naar mate er meer rekenkundige bewerkingen mee worden uitgevoerd.

In de praktijk zijn onnauwkeurigheden als gevolg van hoogtemetingen, scheefstand en verzakkingen vrijwel altijd veel groter dan sensor- & meetsysteem onnauwkeurigheden, maar die zie je niet terug als ruis omdat ze een vrijwel constante waarde hebben (verschuiving). In de hierboven beschreven situatie worden de twee plaatsingsdiepte – onnauwkeurigheden verwaarloosd. Dat is pas acceptabel als hierover geen enkele onduidelijkheid bestaat bij de klant. Vaak is er bijvoorbeeld alleen interesse in *relatieve* veranderingen van waterspanning, maar soms is die juist wel zeer belangrijk, bijvoorbeeld als grondwaterstromingsnelheid en -richting moet worden vastgesteld.

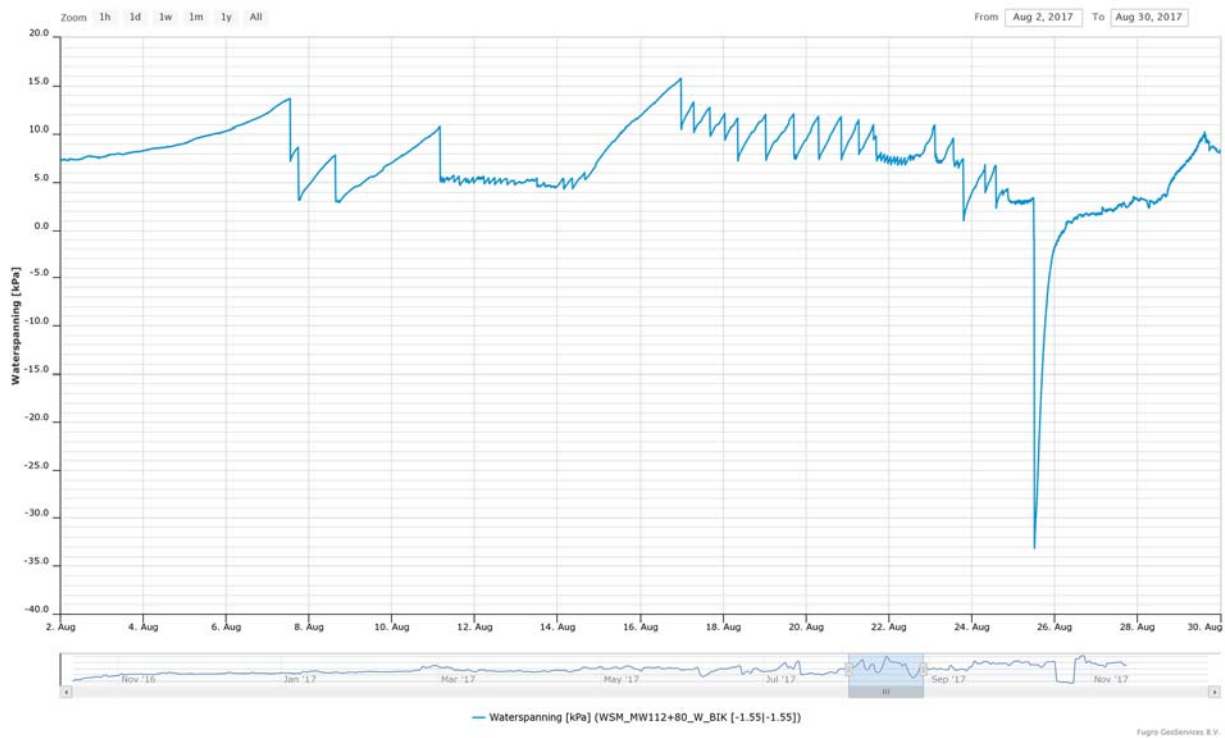
### 6.2.3 Voorbeeldgrafiek verstoring door gasvorming

Bij waterspanningsmetingen in klei- en veenlagen is het mogelijk dat methaangasvorming in de waterkamer de metingen verstoort. Dit wordt verder uitgelegd in bijlage A.6 en meer gedetailleerd in de POVM publicatie 'Gasbestendige waterspanningsmeter, syntheserapport Onderzoeksfase'. In deze paragraaf is een voorbeeldgrafiek opgenomen van een verstoorde meetreeks die typisch is voor gasbellen in de waterspanningsmeter om het begrip en de bekendheid met dit fenomeen te vergroten.

De meetreeks in figuur 6.2 wordt onregelmatig verstoord alsof er sprake is van een overdrukventiel. Deze verstoring met scherpe pieken en abrupte dalingen noemen we gemakshalve 'zaagtandvormige verstoringen'. Deze verstoringen zijn goed te verklaren uit de druk die nodig is om gasbellen door een vloeistof verzadigd poreus medium (het grondfilter) te drukken.

Het algemene beeld is dat iedere 'zaagtand' hetzelfde is, de gestage uren- en soms dagenlange druktoename wordt abrupt onderbroken door een kortdurende gebeurtenis die plaats vindt binnen het meetinterval van 10 minuten. De drukafname lijkt de reeks terug te brengen tot ongeveer op het basisniveau dat voorafging aan de toename. De reeks volgt dit patroon vervolgens vele wekenlang waarbij het maximum en minimum niet meer sterk worden over- of onderschreden. De tijdsduur tussen de verschillende 'resets' of 'drukดาลingen' is soms zeer onregelmatig en soms opvallend periodiek. Op 25 augustus is herstelwerk uitgevoerd, waarbij de vacuumbehandeling van het BAT-filter herkenbaar is als scherpe en grote drukdaling.

Opgemerkt wordt dat dit een van de typische voorbeelden is van gasbeldrukopbouw. Verstoringen kunnen zich ook moeilijk herkenbaar zijn en zich manifesteren als niet-opgemerkte verstoringen waarbij de druk langzaam en beperkt toeneemt. Pas bij het vervangen of bijplaatsen (of vacuumbehandeling van een BAT-filter) kan opgemerkt worden dat de meting daarvoor verstoord was.



Figuur 6.2: Voorbeeldgrafiek van zichtbare gasbeldrukopbouw

### 6.3 Hoe kom je van een monitoringsvraag tot een instrumentselectie

Hoogwaardige, nauwkeurige meetinstrumenten zijn kostbaar als ze gedurende korte tijd veel gegevens moeten produceren. De kosten nemen nog veel sterker toe als die gegevens real-time beschikbaar moeten worden gemaakt om geo-risico's te kunnen beheersen. Hoe hoger de waarde van de beslissing, hoe meer zekerheid moet worden ingebouwd om rekening te kunnen houden met alledaagse verstoringen zoals netwerk, voeding, molest, onweer of overstromingen. Systemcomponenten worden dubbel of parallel uitgevoerd en er moet een overdaad aan instrumenten en systemen worden geplaatst om leveringszekerheid te kunnen bieden.



Figuur 6.2 Van laagwaardige karakterisatie waar meetfrequentie en meetnetdichtheid niet zwaar wegen, tot droomsituatie voor hoogwaardige risicobeheersing, met veel permanente metingen met korte tijd tussen meting en presentatie, waarin er nooit een tekort aan gegevens is.

### Hoe de kosten zich verhouden tot de waarde

Een groot deel van de beoordelingscriteria zoals geformuleerd door Koelewijn en van der Meer (Life Cycle Monitoring, 2017) zijn samengevoegd in figuur 6.2. Hierin zijn verschillende kwaliteiten, aantallen en waarde van monitoring gesorteerd richting de rechter bovenhoek waarin de gedroomde situatie beschreven is van riskante projecten die volledig beheerst en rustig verlopen. Hoe de kosten zich verhouden tot de waarde is niet op voorhand aan te geven. Wel is zeker dat in een dergelijke situatie sprake zal zijn van een *vooraf aantoonbaar* voldoende sterke informatiepositie over bodemeigenschappen, processen en toestandparameters (meetresultaten). Er is dus op alle terreinen informatie verzameld tot op het niveau waarbij niemand nog een behoefte kan ontdekken. Het enige nut van misschien wel een groot deel van de informatie, is het bevestigen van een perfecte passing van verwacht gedrag (simulatie, prognose) bij de werkelijkheid die zich tijdens de uitvoeringsfase van het project openbaart. Dat is in veel gevallen zeer kostbaar, en mogelijk zelfs duurder dan het herstel van schade. Er is altijd een *gegevensoverschot* omdat de laagste kosten per meting altijd worden bereikt bij een grotere omvang van het meetwerk (ook grondonderzoek).

Het kan niet beter of goedkoper, aangezien het ontbreekt aan methoden die effectief *achteraf* kunnen vaststellen hoe ver had kunnen bezuinigd op data of meetnet. Waterspanningsmeters vervullen een speciale rol in monitoring van geotechnische uitvoering. De allerscherpste afbakening van de werkelijke informatiebehoefte is die waarbij het gedrag van de ondergrond perfect kan worden voorspeld en beheerst, en waarbij tijdens de uitvoering vrijwel permanent near-failure condities heersen, zonder dat dat ook maar enige onrust oplevert bij de betrokkenen. Waterspanningsmeters hebben binnen het geotechnische risicomangement de hoogste Early Warning Potential. Let op: *Potential*, want zonder zorgvuldigheid in meetnetontwerp, specificatie en levering kan die waarde niet verzilverd worden.

### Voorbeelden selectieproces van doel tot monitoringsysteem

1) In de Handreiking Life Cycle Monitoring is de beoordelingssystematiek voor monitoringsystemen uitgewerkt en voorzien van beoordelingstabellen. In het Achtergronddocument Handreiking LifeCycle Monitoring (Koelewijn en Van der Meer, 2017a) is een voorbeeld monitoringplan uitgewerkt op basis van het project KIJK. De scoring van het systeem op verschillende onderdelen is hiermee navolgbaar en in aanbesteding kan een opdrachtgever meer of minder ruimte bieden aan aanbieders om gemotiveerd af te wijken van de voorgeschreven criteria.

2) In de volgende zinsnede staat een tekst afkomstig uit een aanbesteding van een waterspanningsmeetnet :

*“De vereiste nauwkeurigheid van de waterspanningsmetingen is +/- 0,02 m waterkolom.”*

Deze nauwkeurigheid van 0,2 kPa kan gehaald worden met de instrumenten zoals beschreven in paragraaf 6.2 maar ook sensoren van klasse 1 kunnen voldoen, mits juist gekozen. Bij een meetbereik van 15 kPa is een total error band van 0,5% FS nog altijd een maximale afwijking van 0,075 kPa (0,008 m waterkolom).

Er worden echter geen referentieniveaus aangegeven, dus moet verondersteld worden dat in de sector geen onduidelijkheid bestaat over wat dat betekent voor de meetopstelling, de plaatsingsdiepte en de toleranties voor onderlinge verschillen. Impliciet staat in die aanbesteding wel een verwachting t.a.v. absolute nauwkeurigheid, een zaak die bij een nota van inlichtingen kan worden angescherpt. Daarbij kan het nog altijd gebeuren dat geen duidelijkheid ontstaat over hoe om te gaan met plaatsingsdieptefouten, zettingen en toleranties voor de positie van de sensoren in de beoogde slappe lagen.

*Opmerking: Kosten van instrumenten, voorbereidingen, aanbesteding, verzekeringen, data-architectuur en onderhoud zijn zeer veranderlijk in de tijd waardoor geen algemene uitspraken kunnen worden gedaan die langer dan 5 jaar gelden voor de dagelijkse praktijk. De verhoudingsgewijze kosten van personeel, materiaal en ict zal in de nabije toekomst naar verwachting sterk verschuiven waarbij personeel kostbaarder zal worden en ict zal door lagere kosten steeds meer ten dienste komen te staan van personeel voor diagnose en beheersing.*

### 6.4 Aandachtspunten buiten de scope van dit protocol

Voor het gebruik van monitoringsgegevens zou het wenselijk zijn om in de toekomst methoden voor te schrijven voor de onderstaande aspecten:

- Eenduidig bepalen van alarmwaarden voor verschillende parameters op verschillende locaties;
- Eenduidig kwantitatief waarden van de omvang van een meetreeks (totale tijdsduur, meetfrequentie, ruimtelijke omvang);
- Eenduidig berekenen van de betrouwbaarheid van informatie gezien het feit dat de samenstelling van de ondergrond in detail overal verschilt, het belastingoverloop niet op voorhand bekend is en het gedrag onder extreme omstandigheden onbekend is;
- Eenduidig bepalen hoe vaak er gemeten moet worden om metingen betrouwbaar te kunnen verwerken en een eenduidige methode om uit metingen een betrouwbaar, semi-automatisch alarmsignaal te verkrijgen.

## 7 Literatuur

- CUR Bouw & Infra, 2010. *Richtlijn Meten en monitoren van bouwputten, Instrument voor kwaliteits- en risicomanagement*. CUR Publicatie 233. Gouda: Stichting CURNET.
- Dirksen, C., 1999. *Soil Physics Measurements*. Reiskirchen : Catena-Verl.
- Dunnicliff, J., 1993. *Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance*. New York: Wiley-Interscience.
- Hvorslev M.J., 1951. *Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations, Bulletin No. 36, Waterways Experiment Station*. Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers.
- Karabacak D.M., Ibrahim, S.K., Koumans, Y., Meulblok, B. en Knoppers, R., 2016. High-speed system for FBG-based measurements of vibration and sound. In: Udd, E., Pickrell, G. en Du, H.H. (Eds.), *Fiber Optic Sensors and Applications XIII*, Proc. SPIE 9852, Baltimore (Maryland), United States, 18-21 april 2016. Bellingham: Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- Koelewijn, A.R. en Van der Meer, M.T., 2017a. *Achtergrondrapportage Handreiking Life Cycle Monitoring*. Project 3.2A4, cluster Monitoring van Sterkte (concept, versie 0.7), 31 augustus 2017.
- Koelewijn, A.R. en Van der Meer, M.T., 2017b. Life Cycle Monitoring of Dikes. In: Lee, W., Lee, J.-S., Kim, H.-K., & Kim, D.-S. (Eds.), *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Zuid-Korea, 17-22 september 2017. Seoul: ISSMGE.
- Mikkelsen, P.E., 1999. *Grouting in Piezometers – An Experiment at Slope Indicator*. [online] Beschikbaar via: <https://durhamgeo.com/resources/tech-notes/piezometers/grouting-in-piezometers/> [geraadpleegd op 3 januari 2019].
- Mikkelsen, P.E., 2002. Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments. *Geotechnical News*, 20(4), pp. 38-42.
- Mikkelsen, P.E. en Green, G.E., 2003. Piezometers in Fully Grouted Boreholes. In: F. Myrvoll (Ed.), *Field Measurements in Geomechanics: Proceedings of the 6th International Symposium*, Oslo, Norway, 15-18 september 2003. Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Peters, E.T. en Van der Vliet, P.P., 2011. GeoBeads, multi-parameter sensor network for soil stability. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics*, Berlijn, Duitsland, 12-15 september 2011.
- STOWA, 2012. *Handboek Meten van Grondwaterstanden in Peilbuizen*, rapport 2012-50. [pdf]. Beschikbaar via: <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202012/STOWA%202012-50.pdf> [geraadpleegd op 3 januari 2019].
- TAW, 2004. *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*. Rapportnummer DWW-2004-057. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Gonthier, G.J., 2007. *A Graphical Method for Estimation of Barometric Efficiency from Continuous Data—Concepts and Application to a Site in the Piedmont, Air Force Plant 6, Marietta, Georgia*, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5111. [pdf] Web-only publicatie beschikbaar via <http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5111/> [geraadpleegd op 3 januari 2019].

Van den Berg, F.P.W. en Koelewijn, A., 2014. Monitoringsfilosofie voor de Nederlandse waterkeringen. *Geotechniek*, 18(3), pp. 30-34.

Von Asmuth, J.R. en Van Geer, F.C., 2013. *Kwaliteitsborging grondwaterstand- en stijghoogtegegevens, Op weg naar een landelijke standaard*. Rapportnummer KWR 2013.027. Nieuwegein: KWR.



# Bijlage A

(informatief)

## Algemene begrippen meetprocessen

### A.1.1 Definities metrologie conform JCGM 200:2012

#### Selectie begrippenlijst metrologie conform JCGM 200:2012

Selectie van definities, gecodeerd naar groepen

1 grootheden en eenheden

2 meten

3 meetapparaten / instrumenten

4 eigenschappen en kenmerken van meetapparaten / instrumenten

5 meetstandaarden

*Onderstaande definities zijn een eigen vertaling van de Engelstalige definities uit JCGM 200:2012. De vertaling is zo zorgvuldig mogelijk gedaan; er kunnen echter geen rechten aan worden ontleend.*

#### **1.19 grootheidswaarde (quantity value)**

Combinatie van getal en eenheid die de grootte van een grootheid uitdrukt.

*Opmerking: kortweg kan ook de term 'waarde' gebruikt worden. Voor deze definities wordt de term grootheidswaarde gebruikt.*

#### **2.1 meting (measurement)**

Proces van experimenteel vaststellen van een of meerdere grootheidswaarden die redelijkerwijs aan een grootheid kunnen worden toegeschreven.

#### **2.3 te meten grootheid (measurand)**

Grootheid die beoogd wordt gemeten te worden.

#### **2.10 gemeten waarde (measured quantity value)**

Grootheidswaarde die een meetresultaat vertegenwoordigt.

#### **2.13 meetnauwkeurigheid (measurement accuracy)**

Nabijheid van overeenstemming tussen een gemeten waarde en de te meten werkelijke waarde van de grootheid.

*Toelichting: hoe hoger de nauwkeurigheid, hoe kleiner de meetfout.*

#### **2.14 meetjuistheid (measurement trueness)**

Nabijheid van overeenstemming tussen het gemiddelde van een oneindig aantal herhaalde gemeten grootheidswaarden en een referentiewaarde.

#### **2.15 meetprecisie (measurement precision)**

Nabijheid van overeenstemming tussen aanwijzingen of gemeten grootheidswaarden verkregen door herhaalde metingen op

dezelfde of vergelijkbare objecten onder gespecificeerde omstandigheden.

**2.16 meetfout (measurement error)**

Gemeten grootte waarde min een referentie grootte waarde.

**2.17 systematische meetfout (systematic measurement error)**

Component van meetfout die in herhaalde metingen constant blijft of verandert op een voorspelbare manier.

**2.18 meetafwijking (measurement bias)**

Schatting van een systematische meetfout.

**2.19 willekeurige meetfout (random measurement error)**

Component van meetfout die in herhaalde metingen verandert op een onvoorspelbare manier.

**2.20 herhaalbaarheidconditie (repeatability condition of measurement)**

Metingconditie uit een set van condities die dezelfde meetprocedure, dezelfde bediener, hetzelfde meetsysteem, dezelfde bedieningscondities en dezelfde locatie en herhalingsmetingen omvatten op dezelfde of vergelijkbare objecten binnen een korte tijdsperiode.

**2.21 herhaalbaarheid van meting (measurement repeatability)**

Meetprecisie binnen een set van herhaalbaarheidscondities.

**2.24 reproduceerbaarheidsconditie (reproducibility condition of measurement)**

Metingconditie, uit een set van condities die verschillende locaties, bedieners, meetsystemen en herhalingsmetingen omvatten op dezelfde of vergelijkbare objecten.

**2.25 metingreproduceerbaarheid (measurement reproducibility)**

Meetprecisie onder reproduceerbaarheidscondities.

**2.26 meetonzekerheid (measurement uncertainty)**

Niet-negatieve parameter die de spreiding karakteriseert van de grootte waarde die wordt toegeschreven aan een te meten grootte, gebaseerd op de gebruikte informatie.

**2.27 definitieonzekerheid (definitional uncertainty)**

Component van meetonzekerheid die het resultaat is van de eindige hoeveelheid detail in de definitie van een te meten grootte.

*Opmerking: Definitieonzekerheid is de meetonzekerheid die praktisch minimaal haalbaar is bij enige meting van een gegeven te meten grootte.*

**2.28 Type A evaluatie van meetonzekerheid (Type A evaluation of measurement uncertainty)**

Evaluatie van een component van meetonzekerheid door een statistische analyse van de gemeten grootte waarden verkregen onder gedefinieerde meetcondities.

**2.29 Type B evaluatie van meetonzekerheid (Type B evaluation of measurement uncertainty)**

Evaluatie van een component van meetonzekerheid door een andere wijze dan een Type A evaluatie van meetonzekerheid.

### **2.30 standaard meetonzekerheid (standard measurement uncertainty)**

Meetonzekerheid uitgedrukt als een standaard afwijking.

### **2.31 samengestelde meetonzekerheid (combined standard measurement uncertainty)**

Standaard meetonzekerheid die is verkregen door gebruik te maken van de individuele standaard meetonzekerheden die hoer bij de invoerwaarden in een meetmodel.

### **2.32 relatieve standaard meetonzekerheid (relative standard measurement uncertainty)**

Standaard meetonzekerheid gedeeld door de absolute waarden van de gemeten groothedswaarde.

### **2.33 onzekerheidsbudget (uncertainty budget)**

Verklaring van een meetonzekerheid, van de componenten van die meetonzekerheid en van hun berekening en samenstelling.

### **2.34 doelmeetonzekerheid (target measurement uncertainty)**

Meetonzekerheid gespecificeerd als een bovengrens en besloten op basis van het beoogde gebruik van meetresultaten.

### **2.36 dekkingsinterval (coverage interval)**

Interval dat de set van werkelijke groothedswaarden van een te meten grootheid bevat met een aangegeven waarschijnlijkheid, gebaseerd op de beschikbare informatie.

### **2.37 dekkingswaarschijnlijkheid (coverage probability)**

Waarschijnlijkheid dat de set van werkelijke groothedswaarden van een te meten grootheid is ingesloten door een gespecificeerd dekkingsinterval.

### **2.39 kalibratie (calibration)**

Operatie die, onder gespecificeerde condities, in een eerste stap een relatie tot stand brengt tussen de groothedswaarden met meetonzekerheden geleverd door meetstandaarden en corresponderende aanwijzingen met bijbehorende meetonzekerheden en, in een tweede stap, deze informatie gebruikt om een relatie tot stand te brengen om een meetresultaat van een aanwijzing te verkrijgen.

### **2.44 verificatie (verification)**

Verschaffing van objectief bewijs dat een gegeven onderdeel gespecificeerde voorwaarden vervuld.

### **2.45 validatie (validation)**

Verificatie waarbij de gespecificeerde voorwaarden toereikend zijn voor het beoogde gebruik.

### **2.46 metrologische vergelijkbaarheid van meetresultaten (metrological comparability of measurement results)**

Vergelijkbaarheid van meetresultaten voor waarden van een gegeven soort die metrologisch herleidbaar zijn tot dezelfde referentie.

### **2.53 correctie (correction)**

Compensatie voor een geschat systematisch effect.

### **3.7 meettransducer (measuring transducer)**

Apparaat, gebruikt in metingen, die een uitvoerwaarde levert die een gespecificeerde relatie heeft met de invoerwaarde  
*Voorbeelden: thermokoppel, rekstrook, pH electrode, bimetalen strip*

### **3.8 sensor (sensor)**

Element van een meetsysteem dat direct beïnvloed wordt door een fenomeen, lichaam of substantie die de waarde draagt die gemeten dient te worden.

### **3.9 detector (detector)**

Apparaat of substantie die de aanwezigheid van een fenomeen, lichaam of substantie aanwijst wanneer een drempelwaarde van een bijbehorende waarde wordt overschreden.

### **3.10 meetketen (measuring chain)**

Serie van elementen van een meetsysteem bestaande uit een enkelvoudig pad van het signaal van een sensor tot een uitvoerelement.

### **3.11 aanpassing van een meetsysteem (adjustment of a measuring system)**

Set van operaties die uitgevoerd worden op een meetsysteem zodanig dat het voorgeschreven aanwijzingen levert die overeenkomen met gegeven waarden van een grootheid die gemeten moet worden.

### **3.12 nulcorrectie van een meetsysteem (zero adjustment of a measurement system)**

Aanpassing van een meetsysteem zodanig dat het een nulaanwijzing levert die overeenkomt met een nulwaarde van een grootheid die gemeten moet worden.

## **4.1 Aanwijzing (indication)**

Groothedswaarde geleverd door een meetinstrument of een meetsysteem.

*Voorbeelden: de uitslag van een wijzer bij een analoge meting, een weergegeven getal op een display, een aflezing van een lineaal.*

*Opmerking: Een aanwijzing en een corresponderende waarde van de grootheid die gemeten wordt zijn niet noodzakelijkerwijs waarden van dezelfde grootheden.*

## **4.7 meetinterval (measurement interval)**

Set van waarden van grootheden van dezelfde soort die gemeten kunnen worden door een gegeven meetinstrument of meetsysteem met gespecificeerde instrumentmeetonzekerheid onder gedefinieerde omstandigheden.

## **4.9 geclassificeerde operationele conditie (rated operating condition)**

Operationele conditie waaraan voldaan moet worden gedurende de meting zodat een meetinstrument of meetsysteem presteert zoals ontworpen.

## **4.10 beperkende operationele conditie (limiting operational condition)**

Extreme operationele conditie die een meetinstrument of meetsysteem moet kunnen weerstaan zonder schade en zonder achteruitgang van gespecificeerde metrologische eigenschappen wanneer het hierna wordt bediend onder zijn geclassificeerde operationele condities.

## **4.12 gevoeligheid van een meetsysteem (sensitivity of a measuring system)**

Quotiënt van de verandering in een aanwijzing van een meetsysteem en de bijbehorende verandering in de waarde van de

grootheid die gemeten wordt.

#### **4.14 resolutie (resolution)**

Kleinste verandering in een waarde die gemeten wordt die een waarneembare verandering in de bijbehorende aanwijzing veroorzaakt.

#### **4.15 resolutie van het weergavesysteem (resolution of a displaying device)**

Kleinste verschil tussen weergegeven aanwijzingen dat betekenisvol onderscheiden kan worden.

#### **4.16 onderscheidend vermogen (discrimination threshold)**

Grootste verandering in een waarde van een grootheid die gemeten wordt die geen waarneembare verandering in de bijbehorende aanwijzing veroorzaakt.

#### **4.17 dode band (dead band)**

Maximale interval waardoor een waarde van een grootheid die wordt gemeten kan worden veranderd in beide richtingen zonder dat een waarneembare verandering in de bijbehorende aanwijzing wordt opgeleverd.

#### **4.18 detectielimiet (detection limit)**

Gemeten grootheidswaarde, verkregen door een gegeven meetprocedure, waarvoor de waarschijnlijkheid van onterecht beweren dat de afwezigheid van een component in een materiaal  $\beta$  is, gegeven de waarschijnlijkheid  $\alpha$  dat onterecht wordt beweerd dat het aanwezig is.

#### **4.19 stabiliteit van meetinstrument (stability of a measuring instrument)**

Eigenschap van een meetinstrument waarbij zijn metrologische eigenschappen constant in de tijd blijven.

#### **4.20 instrumentafwijking (instrument bias)**

Gemiddelde van herhaalde aanwijzingen min een referentie grootheidswaarde.

#### **4.21 instrumentele drift (instrumental drift)**

Continue of incrementele verandering in de tijd van aanwijzing, als gevolg van veranderingen in metrologische eigenschappen van een meetinstrument.

#### **4.22 variatie als gevolg van een beïnvloedingsgrootheid (variation due to an influence quantity)**

Verskil in aanwijzing voor een gegeven gemeten grootheidswaarde of in grootheidswaarden geleverd door een materiaalmeting, wanneer een beïnvloedingsgrootheid opeenvolgend twee verschillende grootheidswaarden aanneemt.

#### **4.23 stapgrootte reactietijd (step response time)**

Tijdsduur tussen het moment wanneer een invoergrootheidswaarde van een meetinstrument of meetsysteem wordt onderworpen aan een abrupte verandering tussen twee gespecificeerde constante grootheidswaarden en het moment wanneer een bijbehorende aanwijzing neerstrijkt tussen gespecificeerde limieten rond zijn definitieve stabiele waarde.

#### **4.24 instrument-meetonzekerheid (instrumental measurement uncertainty)**

Component van meetonzekerheid die ontstaat door een meetinstrument of meetsysteem in gebruik.

#### **4.25 nauwkeurigheidsklasse (accuracy class)**

Klasse van meetinstrumenten of meetsystemen die voldoen aan opgegeven metrologische voorwaarden die bedoeld zijn om meetfouten of instrument-meetonzekerheden binnen gespecificeerde limieten te houden onder gespecificeerde operationele omstandigheden.

#### **4.26 maximale toelaatbare meetfout (maximum permissible measurement error)**

Extreme waarde van meetfout, met betrekking tot een bekende referentie groothedswaarde, toegelaten door specificaties of voorschriften voor een gegeven meting, meetinstrument of meetsysteem.

#### **4.27 meetfout in referentiepunt (datum measurement error)**

Meetfout van een meetinstrument of een meetsysteem bij een specifieke gemeten groothedswaarde.

#### **4.28 nulfout (zero error)**

Meetfout in referentiepunt waarbij de gespecificeerde gemeten groothedswaarde nul is.

#### **4.29 nul-meetonzekerheid (null measurement uncertainty)**

Meetonzekerheid waarbij de gespecificeerde gemeten groothedswaarde nul is.

#### **4.30 kalibratiediagram (calibration diagram)**

Grafische uitdrukking van de relatie tussen aanwijzing en bijbehorende meetresultaat.

#### **4.31 kalibratiecurve (calibration curve)**

Uitdrukking van de relatie tussen aanwijzing en bijbehorende meetresultaat.

#### **5.1 meetstandaard (measurement standard)**

Realisatie van de definitie van een gegeven grootheid, met opgegeven groothedswaarde en bijbehorende meetonzekerheid, gebruikt als referentie.

#### **5.12 kalibrator (calibrator)**

Meetstandaard gebruikt in kalibratie.

## A.1.2 Definities metingen en de kenmerken daarvan : Handreiking Life Cycle Monitoring

### Begrippenlijst POVM handreiking Life Cycle Monitoring

In deze paragraaf wordt ingegaan op de definities waarmee alle discussies over kwaliteit, gebruikswaarde en betrouwbaarheid kunnen worden gevoerd. In de POVM Handreiking Life Cycle Monitoring (concept augustus 2018) worden de onderstaande begrippen gehanteerd:

<b>Kwaliteit</b>	De 'kwaliteit' van een meting, vooropgesteld dat vooraf de geschikte meetmethode en/of meetinstrument is gekozen, is een combinatie van <ul style="list-style-type: none"> <li>– nauwkeurigheid,</li> <li>– betrouwbaarheid (beschikbaarheid, leveringszekerheid, tijdigheid) en</li> <li>– controleerbaarheid (begrijpelijkheid, redundancy, cross-checks).</li> </ul>
<b>Nauwkeurigheid</b>	De nauwkeurigheid betreft de bandbreedte, met daarin bijdragen van de sensor zelf en de plaatsing daarvan (de zekerheid over de positie en de nauwkeurigheid van de inmeting), en de mogelijke variatie in de loop van de tijd, zowel door sensordrift als door mogelijke fysieke verplaatsing van de sensor zelf.
<b>Betrouwbaarheid</b>	De betrouwbaarheid heeft betrekking op de mate waarin de beoogde tijdreeks compleet is en hangt zowel samen met de beschikbaarheid tijdens kritieke omstandigheden als de algemene beschikbaarheid (negatief bepaald door 'willekeurige' uitval), dit laatste is te bepalen uit historische gaten in de tijdreeks, het eerste is in te schatten uit de gevoeligheid van het dijkmonitoringssysteem voor kritieke omstandigheden (ontwerp én uitvoering) en uit de algemene beschikbaarheid.
<b>Controleerbaarheid</b>	De controleerbaarheid heeft zowel te maken met ernstige verstoringen van de meetwaarden als de aannemelijkheid van de optredende veranderingen, wat met cross-checks kan worden bepaald (bijvoorbeeld onder een ophoging laten zakbaken een geleidelijke daling zien die overeenstemt met de afname van de wateroverspanningen gemeten met waterspanningsmeters).
<b>Geschiktheid</b>	De mate waarin met de sensor / het instrument de vereiste parameters kunnen worden gemeten in de omstandigheden waarin moet worden gemeten

### A.1.3 Definities metingen en de kenmerken daarvan, Dunnycliffe (1993)

#### Systemfalen / Gross error

Door Dunnycliffe (1993) wordt uitdrukkelijk gewezen op Gross error. Uitval van het systeem als gevolg van blunders, onzorgvuldigheid of andere vermijdbare menselijke factoren. Het hanteerbaar maken van de menselijke factor is het doel van training en professionaliteit. Bewustzijn en kennis van de kwetsbaarheid van individuen voor menselijke faalmechanismen zoals vermoeidheid, stress, afleiding, desinteresse, haast en onervarenheid vormt de basis voor een betrouwbaar meetbedrijf.

De prestaties van een team kan worden aangetoond door langjarige zichtbare prestaties en het tonen van leiderschap en kwetsbaarheid in de markt.

#### Beïnvloeding door instrument / Conformance

Een speciale vorm van onzorgvuldigheid / gross error heet "Conformance". Toepassing van verkeerde instrumenten of op de verkeerde wijze kunnen leiden tot onopgemerkte "ongevoeligheid" of "trendmatige verandering" voor de te meten indicator. Het meten van vervormingen in slappe grond zonder goede verankering of met te stijve constructies leidt tot een verlies aan zicht op de vervorming van de relevante grondlagen.

Voor waterspanningsmeters speelt er een risico op "conformance" als gevolg van bijvoorbeeld de volgende oorzaken:

1. het verdringen van water door fijne bodemdelen in de vloeistofkamer door het grondfilter;
2. het toepassen van ingehangen wsm's in volledig met grout gevulde boorgaten
3. trekkrachten uitgeoefend op sensoren via kabels bij grondvervormingen.

Ad 1) In het eerste geval kunnen klei en organische stof doordringen tot in de waterkamer en komt er geleidelijk aan een gronddruk component in de reeks terecht. De "gronddruk der weke delen" kan minder makkelijk dissiperen. De gemeten druk kan daardoor ongemerkt oplopen en voor daadwerkelijke waterspanning kunnen worden aangezien.

Ad 2). Het afvullen van boorgaten met ingehangen waterspanningsmeters is sinds de publicaties van Mikkelsen en Greene (2003) goed gebruik vooral buiten Nederland. Doorlatendheid en plasticiteit van de grout moeten zo goed mogelijk passen bij de omgevingsmaterialen en dat maakt het voor sterk gelaagde situaties zoals die in Nederland vrijwel ondoenlijk.

Ad 3) Ketens van sensoren aan 1 kabel in een boor- of sondeergat of in een sleuf hebben een groot voordeel voor een meetnetontwerper, omdat door de relatief lage kosten raaiconfiguraties van verticale reeksen kunnen worden opgebouwd. Daarmee ontstaat een veel completer beeld van het drukveld in een dijkdoorsnede, precies wat nodig is voor validatie van modelberekeningen (zie bijvoorbeeld het niet meer leverbare Geobeads systeem van Alert Solutions (Peters en Van der Vliet, 2011). Bij grondvervorming kunnen echter grote trekkrachten worden uitgeoefend door de kabelverbinding. Sensoren werken als verankering in een kralenketting waardoor



soms mogelijk meer schade dan voordeel ontstaat.

### **Taakoverdracht**

Taken worden overgedragen van ontwerpers aan uitvoerders, soms zelfs aan andere bedrijven en zonder dat de mensen elkaar kennen.

### **Achtergrond verschillen**

Effectieve communicatie is niet vanzelfsprekend als mensen moeten samenwerken die qua cultuur en samenleven van elkaar gescheiden zijn geraakt. Personeel in monitoringteams heeft sterk uiteenlopende scholingstrajecten doorlopen en heeft vaak sinds de basisschool niet meer samengewerkt totdat ze lid worden van de vakgemeenschap.

### **Belangen verschillen**

Werkende mensen in een team zijn niet allemaal even kwetsbaar voor falen van een team. Reputatieschade en projectschade hebben op iedere functie en iedere persoon een andere uitwerking. Wat belangrijk is voor de een kan bijzaak zijn voor de ander.

### **Contractvorm**

Uitzendkrachten, zzp-ers, onderzoekers, meettechnici en projectmanagers hebben allemaal andere belangen en doelen.

### **Eenheden en jargon**

Wat voor de één glasheldere en makkelijk interpreteerbare eenheid is, is dat niet automatisch voor de ander. Begripsverwarring zoals over stijghoogtes, potentiaal en druk of onduidelijkheid over rolverdeling, taakinfilling en besluitverantwoordelijkheid kunnen zich te laat openbaren.

### **Beheersbaarheid en overzicht**

De toename van aantallen meetpunten en data inwinningsfrequentie leidt tot een sterke toename van de druk op meetnetbeheerders. De effectiviteit van hun tijdbesteding wordt doorslaggevend voor de betrouwbaarheid en robuustheid van het besluitvorming systeem.

## A.2 Meetsysteem-robustheid

### Robuustheid

De robuustheid van een meetoplossing is de bestendigheid tegen oorzaken van systeem falen.

Kwaliteitsmanagementsystemen zoals die in de industrie worden gebruikt (Kaizen, 6Sigma, TQM, etc) bieden handvaten om systematisch alle stappen en componenten in processen te analyseren op robuustheid. De inspanningen en effectiviteit daarvan kunnen worden vastgelegd en krijgt aandacht in aanbestedingen in de vorm van een **risicodocument**.

In de figuur A.1 staat de inventarisatie van de componenten en oorzaken van fouten en verstoringen in het proces van volautomatische meting van waterspanning. Iedere stap in de meet-beslisketen heeft kenmerken met gevolgen voor "nauwkeurigheid (zie paragraaf over meetsysteem prestaties en meetwaarde kwaliteit ) en faalkans". Iedere processtap een kans op uitval of blunder. De kans op dergelijke abrupte verstoringen bepaalt de uiteindelijke robuustheid van het systeem.



Een complete faalkansanalyse dient alle stappen van de beslisketen te behandelen. Vervolgens kunnen er maatregelen worden genomen om tot een passende (= doelmatige) en kosteneffectieve oplossing te komen. In de figuur wordt ook aangegeven dat per stap in het proces een onzekerheid wordt toegevoegd wat aan het eind in ieder meetresultaat leidt tot een “samengestelde meetfout”.

De borging van systeemkwaliteit (de factor mens en de factor machine) kan deels worden geleverd door geformaliseerde prestatierapportages zoals SAT en FAT.

- *Factory Acceptance Tests* leiden tot testrapportages voorafgaand aan mobilisatie, en bieden vertrouwen in een vlotte en tijdige plaatsing. Daarnaast vormen ze de basis voor scherpe diagnose van eventuele latere storingen.
- *Site Acceptance Tests* leiden tot SAT-rapportages en de levering daarvan vormt de start van nulmetingen voor het klantproject.

De robuustheid van meetketens kan worden vastgelegd in het risicodocument en de rapportage daarover in termen van **Uptime/Downtime** en **Beschikbaarheid tijdens doelgebeurtenissen**.

### **Uptime / Downtime**

De verhouding uptime / downtime is bruikbaar als beoordelingsmethode en verrrekenmodel voor systemen waarbij ieder meetmoment gedurende het project even waardevol is. In situaties waarbij slechts periodiek intensieve metingen nodig zijn (extreme hoogwatergebeurtenissen) of bijvoorbeeld haasje over opstellingen waarbij gedurende korte perioden op opeenvolgende locaties moet worden gemeten zoals bij de passage van een meetopstelling door een damwandkraan is Uptime / downtime niet geschikt. Dan is alleen de beschikbaarheid *gedurende die doelgebeurtenissen* van belang.

### **Beschikbaarheid tijdens doelgebeurtenissen**

Meetcampagnes voor risicobeheersing zijn vaak ingericht om gedurende kortdurende gebeurtenissen zekerheid te geven. Alleen de metingen tijdens die momenten zijn relevant en juist dan zijn de omstandigheden vaak extremer (storm, hoogwater, hoog-energetische plaatsingsmethoden, zwaar materieel) dan tussen de bedrijven door. Tussen deze gebeurtenissen door kan echter sluipend schade ontstaan aan kabels en voedingssystemen. Accu's kunnen leeglopen of vochtig worden, zonnepanelen kunnen vies worden of scheef zakken, voedingskabels kunnen worden losgetrokken of bijna losgetrokken. Onderhoudsmomenten en controlemomenten moeten daarop worden afgestemd.

Voor het repareren tijdens en vlak voor meetdoelgebeurtenissen zijn de volgende zaken van belang:

- de voorspelbaarheid van schade;
- mobilisatiesnelheid;
- tijd tot herstel;
- personele beschikbaarheid;
- beschikbaarheid reservemateriaal;

### A.3 Algemene kenmerken meetsysteem-componenten

#### Meetfouten

Metingen gaan gepaard met afwijkingen die het zicht op het meetdoel/procesindicator, kunnen ontnemen. Dat is niet altijd een probleem zolang er vanaf contractvorming maar duidelijkheid bestaat over de maximaal toelaatbare afwijking. Zowel instrumentselectie als plaatsingswijze en gekoppelde meetapparatuur hebben gevolgen voor afwijkingen en daarom wordt allereerst ingegaan op definities zoals die gebruikelijk zijn in de meet- & regeltechniek en statistiek.

#### Samengestelde meetfout

Zoals weergegeven in figuur A.1 en in het voorbeeld in paragraaf 6.2 worden de signalen van twee sensoren (water- en luchtdruk) van elkaar afgetrokken. Beide sensoren hebben een ruiscomponent die meestal normaal verdeeld is en dus kan worden beschreven met een standaardafwijking. De resulterende standaardafwijking per waterspanningsmeter wordt als volgt berekend:

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_l^2}$$

Waarin w = waterdruk, a = absolute druk in de waterspanningsmeter, l = luchtdruk.

De datalogger en eventuele afrondingsprocessen in de data opslag en presentatie voegen daar nog ruis aan toe, maar bij een goed ontwerp en gebruik van hoogwaardige meetapparatuur vallen die in de praktijk weg in verhouding tot de samengestelde sensorruis.

Het verschil tussen twee waterspanningsmeters (verhang) leidt tot een sterke toename van  $\sigma_w$ :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{w1}^2 + \sigma_{w2}^2}$$

De correctie voor dichtheid en temperatuur is maar zelden nodig, maar bij grotere dieptes kunnen dichtheidsverschillen wel significant worden. Gebieden met een ondiep zout-zout grensvlak in het grondwater vormen hierop een uitzondering. Ook het vergelijken van peilbuiswaarnemingen met waterspanningsmetingen behoeft extra aandacht omdat er vaak geen sprake is van een bekende dichtheidsverdeling van de waterkolom in de peilbuis waardoor zelfs afwijkingen kunnen ontstaan tussen handpeilingen en drukmetingen op diepte in een peilbuis.

#### Systematische fout / Systematic error

Systematische fouten zijn alle afwijkingen die het gevolg zijn van het gebruik van vaste uitgangspunten die vervolgens bij iedere herhaling hetzelfde zijn, totdat de uitgangspunten worden gecheckt. Bij een foute kalibratie, of een verandering van sensor karakteristiek kan gedurende lange tijd sprake zijn van een overschatting of onderschatting van de waarde van het meetdoel.

Een systematische fout kan onopgemerkt blijven door bijvoorbeeld de toepassing van een sensor in een sterk afwijkende omgevingstemperatuur, of toepassing van een extra verlengkabel (na FAT) waardoor een extra weerstand wordt toegevoegd. Niet alle meetmethoden zijn ongevoelig voor temperatuur of seriële weerstandveranderingen.

Voorbeeld plaatshoogte metingen met GPS:

Een veelvoorkomend probleem is een verschil in eisen aan de nauwkeurigheid van plaats-hoogtemetingen voor verschillende disciplines.

#### Plaatshoogte voorbeeld GPS

Een aannemer registreert hoogtes van piketpaaltjes op een bouwterrein van 150 m lang, om het verhang van een regenwaterrioolleiding zeker te stellen. Hij wordt gevraagd om ook twee hoogtes te bepalen van peilbuizen in twee koude warmteopslag bronlocaties, op tegenoverliggende perceelgrenzen. Er wordt door de aannemer gewerkt met een nieuw GPS systeem dat toentertijd €15K gekost heeft dat een maximale verticale meetfout zou hebben van 15mm. Het stijghoogteverschil dat wordt berekend met de gerapporteerde piëzometerhoogtes is 90 mm over 150 m en met de geschatte doorlatendheid van het watervoerende pakket zou dat neerkomen op een grondwaterstromsnelheid van 36 meter per jaar. Met een kans van 16% dat het stijghoogteverschil  $90+15+15=120$ mm met een corresponderende grondwaterstromsnelheid van ruim 50 m per jaar zou zijn, desastreus voor het thermisch rendement van een koude warmteopslag. De meetfout bleek aanzienlijk hoger dan 15mm omdat het stijghoogte verhang in dit geval nota bene de andere kant op ligt. De herkomst van de hoogtefout was een gebrekkige zichtbaarheid van GPS-satellieten aan een kant van het bouwterrein door een naastgelegen gebouw, waardoor de GPS kruispeiling onvoldoende zicht gaf op de hoogte. De waarschuwing van de apparatuur is niet gerapporteerd, omdat die voor rioolaanleg nooit relevant wordt geacht door de uitvoerders.

#### Plaatshoogtefout in meetraai in een dijk

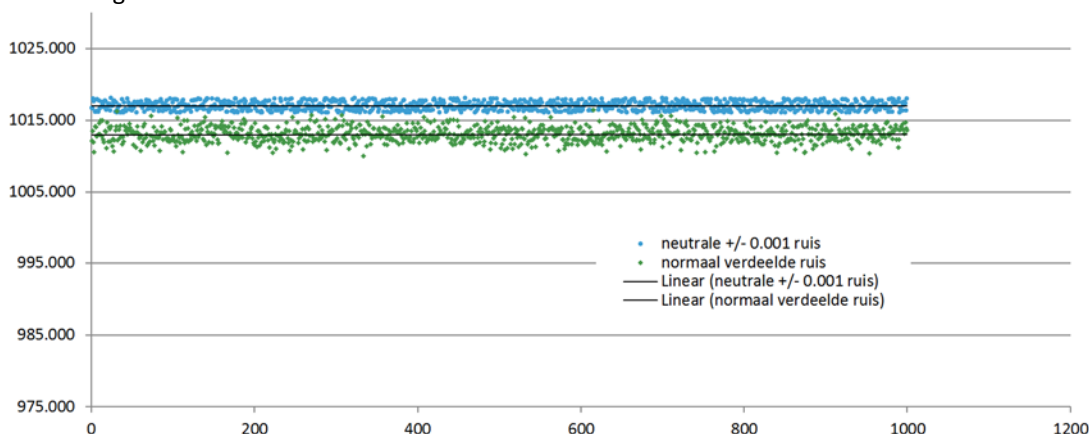
In het geval van een meetraai voor stijghoogteverhang in een zandlaag onder een dijk zou het effect van dezelfde plaatshoogte standaardafwijking van 15 mm per hoogtemeting neerkomen op een onzekerheid van stijghoogte onder een dijk met een breedte van 50 meter zou een hoogtemeetfout van 90 mm leiden tot een foute inschatting van de doorlatendheid.

*Tekstblok A.1, voorbeeld van een systematische fout als gevolg van een vermijdbaar misverstand rondom plaatshoogtemetingen en relevantie voor specifieke gebruikers. Een herhaling van de meting met hetzelfde apparaat op dezelfde locatie zal in verder ongewijzigde situaties vergelijkbare afwijkingen vertonen, zoals in dit geval meer witte ruis dan elders.*

Na het elimineren van de systematische fouten blijft witte ruis over. Die zou slechts variatie moeten laten zien zonder patroon en neutraal moeten zijn, gemiddeld precies de beoogde meetwaarde.

#### Nauwkeurigheid en Precisie

De relatie tussen nauwkeurigheid en precisie leidt makkelijk tot begripsverwarring. Voor iedereen is de onderstaande figuur glashelder: twee reeksen van 1000 luchtdrukmetingen in een gesloten tank zonder temperatuurveranderingen. De reeks met neutrale ruis is preciezer dan die met standaard normale ruis. Maar omdat de luchtdruk in de tank 1013 mbar is blijkt de reeks met de normaal verdeelde ruis echter wel nauwkeuriger.



*Figuur A.2, Twee reeksen bij 1013 mbar: Nauwkeurige maar niet preciese reeks (groen) en preciese maar niet nauwkeurige reeks (blauw).*

De gebruiker gaat er bij aanbestedingen vanuit dat de overeengekomen en geleverde nauwkeurigheid en precisie van instrumenten en methoden geldt voor de gehele keten van meten tot rapporteren. Dat omvat dus alle verstoringen gecombineerd.

### **Ruis**

Variaties in meetsysteem output die van invloed zijn op de nauwkeurigheid van de metingen. Witte ruis is de ruis die overblijft nadat alle verklarende factoren uit de bruto ruis zijn weggenomen. Witte ruis heeft ook geen tijd-afhankelijkheid

### **Hysterese**

Afhankelijkheid van de afwijking van een meting, van de positieve of negatieve herkomst van de voorafgaande meting. Als eerder een lagere waarde van de meetwaarde is voorafgegaan aan een meting zal de afwijking enige tijd negatief blijven, of zelfs permanent negatief blijven. Een meetsysteem met hysterese heeft altijd zowel positief als negatief achterblijvende afwijkingen.

Hysterese doet zich voor als “een traagheid of een dode band van ongevoeligheid”, zoals peilbuizen bij een verandering van de grondwaterdruk eerst water moeten ontvangen of lozen voordat ze de “werkelijke stijghoogte” weergeven. Peilbuizen zijn als gevolg van toestromingsweerstand-hysterese totaal ongevoelig voor snelle drukveranderingen, en peilbuizen waarvan het filter in klei of veen staat kunnen hooguit een idee geven van de langdurig gemiddelde stijghoogte. Een waterspanningsmeter heeft daarin ook zijn hoogste meerwaarde ten opzichte van peilbuizen. De drukverandering wordt als gevolg van de niet-comprimeerbaarheid van water vrijwel instantaan doorgegeven door het grondfilter, in plaats van door volumeverplaatsing. Zelfs als een grondfilter sterk verkit is met klei of andersoortige neerslag neemt de gevoeligheid van de wsm niet af.

Bellen in de waterkamer leiden echter wél tot hysterese omdat ze een volumeverandering krijgen bij drukverandering, waardoor wel grondwater moet worden verplaatst over een grondfilter. Dat is al snel een verstorende factor. Waterverplaatsing leidt naast hysterese ook tot versnelde diffusie van stoffen die gasbellen kunnen vormen. Hysterese is daardoor een voorspeller (zij het wel een goed lastig detecteerbare) voor het ontstaan van gasbellen in de vloeistofkamer van waterspanningsmeters.

### **Nauwkeurigheid en Meetfout**

De nauwkeurigheid is het verschil tussen gemeten waarde en werkelijke waarde van de procesvariabele / indicator / meetgrootte. De nauwkeurigheid beschrijft hoe de meetfouten (errors) er uitzien. Een meetfout van een individuele meting valt dus altijd binnen de statistische kenmerken van de nauwkeurigheid.

Bij kalibratie wordt de nauwkeurigheid vastgesteld en wordt de systematische afwijking gecorrigeerd met een offset (zoals wat nodig is bij de blauwe reeks in figuur 2.1). Bij kalibratie is uiteraard van groot belang dat de werkelijke waarde van de te meten grootte wordt vastgesteld met een instrument waarvan de afwijkingen geverifieerd zijn tot een geaccepteerde standaard.

De nauwkeurigheid kan worden uitgedrukt op verschillende manieren:

- +/- getalswaarde met eenheid t.o.v. gemeten waarde (constant);
- +/- percentage van de gemeten grootte (proportioneel);
- +/- percentage van het volledige meetbereik / full scale range (constant).

De selectie van sensoren en meetinstrumenten en dataverwerkingssysteem op basis van de vereiste nauwkeurigheid betreft dus de ruiscomponenten en systematisch afwijkingen van alle componenten en foutbronnen in de meetketen. Een klant die een bepaalde nauwkeurigheid verlangt vraagt dus om een kwantitatieve bepaling en verantwoording daarvan.

### Precisie

De mate waarin herhalende metingen bij eenzelfde meetwaarde dezelfde meetresultaten opleveren. De vorm van de afwijkingen verraadt de aanwezigheid van verklarende ruisfactoren.

Precisie is een maat voor herhaalbaarheid en reproduceerbaarheid van een meetresultaat en kan worden uitgedrukt als :

- +/- getalswaarde met statistische kenmerken (spreidingmaat, verdelingsfunctie etc.)

### Resolutie / scheidend vermogen.

Kleinste verandering van de procesvariabele / grootte die kan worden weergegeven. Voornamelijk bepaald door de meetapparatuur en presentatiemethode. In een ideaal geval zijn resolutie, gevoeligheid en nauwkeurigheid perfect op elkaar afgestemd. Oplossend vermogen

### Voorbeeld sensorspecificaties

Hieronder een voorbeeld WSM specificatieoverzicht van een leverancier van geotechnische meetinstrumenten waarin de kwantificeerbare kenmerken zijn benoemd.

Range (kPa)	300   500   700   1000   1500   2000   4000
Material	316 grade Stainless Steel
Accuracy	±0.1% full scale
Linearity	±0.5% full scale
Resolution*	0.025% full scale minimum
Over range	200% Of full scale
Diaphragm displacement	< 0.001 cm <sup>3</sup>
Diameter	19mm
Weight (without cable & filter)	190g
Temperature range	-20 to +80°C

Figuur A.3, Specificaties van Interfels Vibrating Wire pushin piezometer (wsm).



De specificaties zoals in figuur A.3 weergegeven gelden als minimum specificaties voor alle geleverde instrumenten. Deze kenmerken zijn bepaald op basis van praktijkwaarnemingen aan grote aantallen geproduceerde instrumenten.

Individuele geleverde instrumenten voldoen allemaal aan deze kenmerken tijdens de fabriekstest.

De resultaten daarvan worden meegeleverd met ieder instrument.

Alle instrumenten zijn beter en sommigen zijn aanzienlijk beter dan deze specificaties.

Door in plaats van een lineaire fit gebruik te maken van een polynoom als sensor karakteristiek kan vaak nog nauwkeuriger worden gewerkt zoals te zien is aan het verschil tussen linearity en accuracy.

Resolutie is in het geval van een Vibrating Wire in ieder geval theoretisch beperkt tot het onderscheidend vermogen van het meetinstrument dat vaak beperkt is tot 1 Hz van de trillende snaar.

Sensornauwkeurigheid en lineariteit worden dus opgegeven in verhouding tot het meetbereik. Door een reeks waarnemingen over het gehele meetbereik te verspreiden en daarna door lineaire regressie een karakteristiek te bepalen kan worden berekend in hoeverre de oorspronkelijke metingen van de regressielijn afwijken. Die afwijkingen worden in de onderstaande tabel in de groene kolom gepresenteerd en getoetst of ze groter of kleiner zijn dan de specificaties. Gemakshalve rekenen we niet mee hoe nauwkeurig de referentiesensor is. In de groene kolom blijkt dat over het gehele meetbereik de afwijking lager is dan 0.1% van het meetbereik van in dit geval effectief 2.6 bar.

Uit de vergelijking van dataparen (twee waarnemingen bij vergelijkbare druk) blijkt al dat de afwijking per meting in termen van % t.o.v. full scale bij dalende druk groter is dan bij stijgende druk. Er zit vermoedelijk enige hysteresis in.

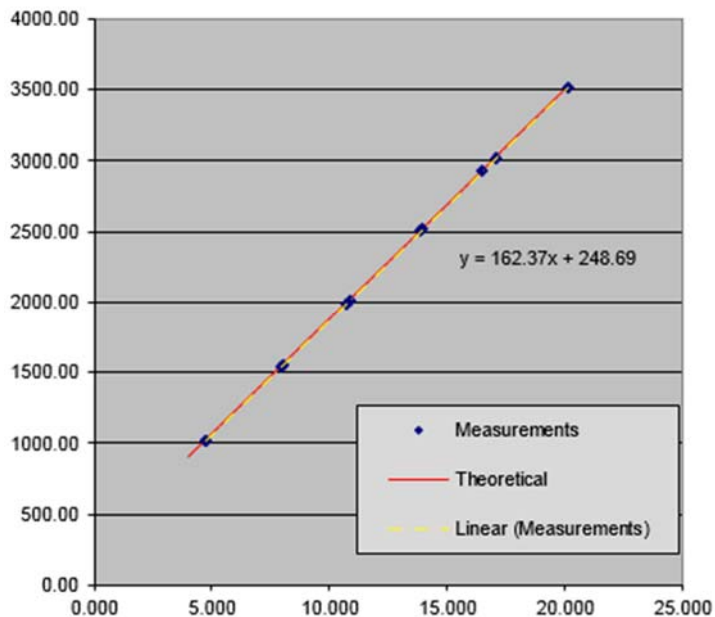
### sensorkalibratie

Hieronder staan meetwaarden beschreven die samen leiden tot de vaststelling van de sensor karakteristiek. Een sensor wordt gekalibreerd naar omstandigheden in een testopstelling waarbij de sensor wordt blootgesteld aan een aantal verschillende drukstappen die in een ideale situatie het gehele meetbereik van de sensor verdeeld in gelijke intervallen.

Tabel 2.1, voorbeeldgegevens sensorcalibratie in termen van full scale error. (druk in witte kolom in 0.1 kPa)

Measured [unit-parameter value-date-time]				Calculated parameter value with regression formula	Full Scale Diff [%]
4.752	1019.3	14/12/2016	14:40:11	1020.280403	0.02801
7.921	1535.4	14/12/2016	14:40:22	1534.834017	0.01617
10.855	2011.7	14/12/2016	14:40:32	2011.230452	0.01342
13.954	2516.1	14/12/2016	14:40:43	2514.418097	0.04805
17.043	3014.7	14/12/2016	14:40:56	3015.982033	0.03663
20.105	3510.0	14/12/2016	14:41:05	3513.161952	0.09034
20.105	3510.0	14/12/2016	14:41:05	3513.161952	0.09034
16.496	2930.2	14/12/2016	14:41:14	2927.165111	0.08671
13.872	2502.0	14/12/2016	14:41:22	2501.103677	0.02561
10.727	1990.6	14/12/2016	14:41:33	1990.446967	0.00437
8.013	1549.6	14/12/2016	14:41:49	1549.772146	0.00492
4.754	1019.4	14/12/2016	14:41:53	1020.605145	0.03443

In de grafiek hieronder is de lineaire regressie karakteristiek weergegeven en indien wenselijk kan er een polynoom worden gefit waardoor nog verbetering mogelijk is.



Om de samengestelde meetfout van een meetsysteem te kunnen bepalen zijn deze kalibratie gegevens ontoereikend omdat daarvoor standaardafwijkingen nodig zijn. De standaardafwijking kan bepaald worden door bij een vastgestelde druk een reeks opeenvolgende metingen te verrichten waarbij de omgevingsdruk, temperatuur en opgelegde druk echt constant moet blijven.

In het geval van hoogwaardige sensoren zal de standaardafwijking die bij vaste druk kan worden vastgesteld, vergelijkbaar zijn met de outputresolutie van de kalibratieapparatuur. Bijvoorbeeld bij een meetbereik tot 350 kPa (absolute druk) wordt over het effectieve meetbereik van 250 kPa met een lineaire sensor karakteristiek makkelijk een maximale afwijking van 0,02% Full Scale error bereikt, oftewel 0,05 kPa. Dat komt overeen met een stijghoogte van ruwweg 5 mm. Een veelgebruikt kalibratie-apparaat levert een nauwkeurigheid van 0,012% FS bij een meetbereik van 700kPa. Deze outputresolutie is afgestemd op de detectielimiet van het kalibratiesysteem om de kwaliteit van een kalibratie tot op een zeker niveau te kunnen garanderen. Zodra de kalibrator-outputresolutie zichtbaar storend, of erger nog, bepalend wordt in een reeks van herhalingen, kan die variatie niet meer eenduidig aan de sensor toegeschreven worden. In een extreem geval knippert de kalibrator-outputwaarde rondom een drempel, mogelijk als gevolg van veel kleinere fluctuaties van de sensoroutput. In zulke situaties kan echter een willekeurige andere factor niet worden uitgesloten. Na deze paragraaf is een kalibratieblad weergegeven van de kalibratie van de kalibrator. Daarin is de score zichtbaar over het meetbereik van 700kPa, waarbij de afwijkingen in dit geval maximaal 0,007% FS bedragen, ongeveer 0,049 kPa. De structuur van deze afwijkingen is zo dat de afwijkingen halverwege het bereik het hoogste zijn. Met een dergelijke kalibrator-karakteristiek die ruim voldoet aan het criterium van 0,025% Full Scale error kan dus inderdaad worden vertrouwd op de kalibrator output resolutie van 0,1 mbar, oftewel 0,01 kPa. De prestaties van een te kalibreren waterspanningsmeter kunnen dus niet worden vastgesteld tot binnen 2x de outputresolutie (0,02 kPa) van de kalibratie apparatuur. Deze resolutie is zodanig laag dat die de vorm/structuur van de "schijnbare ruis in

de sensoroutput” bepaalt.

Om toch een beeld te geven van de standaardafwijking van sensoren kan in dergelijke gevallen voor het gemak de grootste waarde worden gebruikt die in de kalibratie is gemeten, in dit specifieke voorbeeld  $0,09\% = 0,23 \text{ kPa}$ . Daarbij is nog enige marge achter de hand aangezien de werkelijke standaardafwijking waarschijnlijk kleiner is.

Na verloop van tijd verandert een sensor als gevolg van veroudering van elektronische componenten en door het verlies van spanning in het sensormembraan en/of verslapping van de snaar in “vibrating wire sensoren”. Door vergaande ontwikkeling in materiaalkennis en voorbelastingsbehandelingen is deze spanningsdrift sterk teruggedrongen.

Sensorveroudering kan worden vastgesteld door herhaling van de kalibratie na terugwinning van het instrument en vergelijking van de regressieparameters (sensorkarakteristiek).



T.C.L. Tradinco Calibration Laboratory

**CALIBRATION CERTIFICATE**

Page 1 of 2

Certificate number :

**Applicant** Fugro GeoServices B.V.  
Veurse Achterweg 10  
2264 SG Leidschendam

**Instrument** Digital pressure calibrator

**Manufacturer**

**Type**

**Serial number**

**Service number**

**Customer identification number**

**Calibration method** This calibration is carried out with :  
abs. pressure gauge type : PPG 6220  
Deadweight tester type : T2300/1

During calibration a testpressure is put under a calibrated measuring piston which is loaded with calibrated weights  
The absolute pressure is measured with the standard barometer

**Environmental conditions** Temperature: 20.0°C ± 2°C  
Humidity: 55 %rh ± 25 %rh

**Date / period of calibration** 6 February 2018

**Recalibration date as stated on applicants request** 6 February 2019

**Results** See following page(s)

**Uncertainty** ± 0.012 % of full scale with use of correction figures in the range of 0 - 100 % of full scale

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor of  $k = 2$ , which provides a confidence level of approximately 95 %.  
The standard uncertainty has been determined in accordance with document EA-4/02.

Calculated by software revision: 2.7.6.6/2.44

**Traceability** The measurements have been executed using standards for which the traceability to (inter)national standards has been demonstrated towards the RvA.

**Date** 6 February 2018

**Name** S. Beidjmath-Misier  
Head of TCL



T.C.L. Tradinco Calibration Laboratory

**CALIBRATION CERTIFICATE**

Page 2 of 2

Certificate number :

	Standard 1 / Barometer	Standard 2	Instrument
Service number			
Type			
Manufacturer			
Description	abs. pressure gauge	Deadweight tester	Digital pressure calibrator
Serial number			
Range	(10 ÷ 1300) mbar (abs)	(0.2 ÷ 35) bar	(0 ÷ 7) bar (abs)
Medium	Air	Air	Air
Accuracy	±0.01 % R +0.06 mbar	±0.01 % R	±0.025 % FS
Temperature	20.2°C ± 0.5°C	20.2°C ± 0.5°C	

MP.	STANDARD		INSTRUMENT					
	INPUT UP bar (abs)	INPUT DOWN bar (abs)	READING UP bar (abs)	READING DOWN bar (abs)	ERROR UP % FS	ERROR DOWN % FS	LIMIT UP % FS	LIMIT DOWN % FS
1	0.01000	0.01000	0.0099	0.0101	-0.001	0.001	± 0.025	± 0.025
2	0.70000	0.70000	0.6999	0.7000	-0.001	0.000	± 0.025	± 0.025
3	1.417837	1.417837	1.4175	1.4177	-0.005	-0.002	± 0.025	± 0.025
4	2.11790	2.11790	2.1174	2.1177	-0.007	-0.003	± 0.025	± 0.025
5	2.81794	2.81794	2.8175	2.8177	-0.006	-0.003	± 0.025	± 0.025
6	3.51798	3.51798	3.5177	3.5179	-0.004	-0.001	± 0.025	± 0.025
7	4.21808	4.21808	4.2179	4.2181	-0.003	0.000	± 0.025	± 0.025
8	4.91810	4.91810	4.9180	4.9181	-0.001	0.000	± 0.025	± 0.025
9	5.61814	5.61814	5.6181	5.6183	-0.001	0.002	± 0.025	± 0.025
10	6.31825	6.31825	6.3183	6.3184	0.001	0.002	± 0.025	± 0.025
11	7.01831		7.0183		0.000		± 0.025	

Calibration after adjustment (As left calibration).

Customer ref. :  
Our ref. :  
Customer : Fugro GeoServices B.V.

Calibrated by  
TCL Technician  
  
P. Verhoef  
Cal. date : 6 February 2018

Approved by  
Phys of TCL  
  
Date : 6 February 2018  
Zoetermeer

## A.4 Meetsysteem prestaties en meetwaarde kwaliteit

### Druk en trillingen

De kwaliteit van meetsysteem worden uitgedrukt met grootheden zoals resolutie, gevoeligheid, dynamisch bereik, signaal-ruisverhouding en (frequentie)bereik. Bij drukveranderingen maakt het ook nogal wat uit of er sprake is van een golfbeweging in de druk omdat dan de frequentie medebepalend wordt voor hoe moet worden gemeten. Bij waterspanningsmetingen gaat de interesse normaal gesproken uit naar een beperkt frequentiebereik tot 1 Hz omdat risicodragende processen vaak nog wel traag genoeg zijn om de mens nog een rol te laten vervullen in de waarschuwing/beslisketen.

Als er sprake is van trillingen ontstaat er een ruis door undersampling of nog erger, aliasing. Immers, meetapparatuur bevragen de sensoren gedurende een kort moment, vaak 100 ms. In feite komt dat overeen met een zeer sterk “undersampled 10Hz meting” waardoor de drukamplitude van eventuele trillingen vanaf 30 Hz een ruisfactor worden.

Omdat juist trillingen een van de belangrijkste risicobronnen in geotechnische uitvoering zijn is de kortdurende meting (sampling) van druk ook als een voordeel te gebruiken. Het primaire doel van sensoren en meetsystemen is dan de kleinst mogelijke verandering te kunnen detecteren (resolution) zonder beperking van het vereiste meetbereik (max dynamic range) bij een zo hoog mogelijke bereik van snelheidsveranderingen (frequency range). Elektronische meetsystemen in combinatie met piëzo-resistieve sensoren kunnen in principe worden gebruikt tot misschien 10 kHz.

Glasvezel systemen bieden door de uiterst lineaire materiaaleigenschappen in vergelijking met mechanische-piëzo-elektrische sensor constructies een veel grotere gevoeligheid over een veel grotere bandbreedte. Voor een uitgebreidere behandeling van voor en nadelen van glasvezel systemen is uitgebreide literatuur beschikbaar (voor een introductie zie Karabacak et al., 2016) en er worden diverse symposia aan gewijd.

### Uitdagingen voor simultane meting van waterspanning en trillingen

De simultane meting van trillingen en waterspanning is onmisbaar voor energie intensieve zeer risicovolle geotechnische ingrepen en vraagt onafhankelijk van de gebruikte sensor/meettechnologie een veel uitgebreidere dataverwerking en datareductiemethoden om te komen tot eenduidig interpreteerbare resultaten. Immers het gehele frequentiedomein moet in de gaten worden gehouden.

Sensoren van waterspanningsmeters zitten ingebouwd in stalen of kunststof behuizingen en ze maken via poreuze grondfilters contact met de waterfase in de bodem. De vervorming van drukvariaties en trillingen in hogere frequenties ligt voor de hand en kan op dit moment nog niet worden gekwantificeerd. Voor trillingen worden daarom versnellingsopnemers gecombineerd met druksensoren, soms in 1 sensorbehuizing.

### Gevoeligheid / Sensitivity

Verhouding tussen reactie van het complete meetsysteem t.o.v. verandering in druk.

$$S = dh/dV [-]$$

h = uit sensorsignaal berekende verandering; V = drukverandering;

Een andere maat voor gevoeligheid is het dynamisch bereik (Dynamic Range) van een meetsysteem. Deze geeft aan hoe de gevoeligheid zich verhoudt tot het gehele meetbereik. Vaak ligt dat in de ordegrootte van 10.000 tot 100.000 voor systemen gebaseerd op piëzo-resistieve sensoren.

Uit de gevoeligheid volgen de detectielimiet en veranderingsgevoeligheid.

#### **Detectielimiet en de kans op detectie van een minimale verandering**

Het maakt nogal wat uit of er sprake is van :

De kleinst waarneembare verandering van de te meten grootte die met 99% zekerheid zal worden gedetecteerd door het meetsysteem. Of:

De grootte van de verandering die met 50% zekerheid kan worden gedetecteerd.

Analytische meetsystemen die gericht zijn op het vaststellen van de aanwezigheid of afwezigheid van zeer schadelijke stoffen hebben een detectielimiet die in feite de gevoeligheid bepaald op het nulpunt van de ijklijn. Hoe hoger de waarde hoe minder belangrijk de gevoeligheid wordt.

In het geval van monitoring van grenswaarden waarboven meetwaarden onacceptabel zijn gaat het om de veranderingsgevoeligheid (nauwkeurigheid en precisie) *rondom de grenswaarde*.

#### **Veranderingsgevoeligheid:**

“kwaliteit van de richtingscoëfficiënt op *iedere waarde* binnen het meetbereik is het belangrijkste”.

Bij meetsystemen zoals waterspanningsmeters is de gevoeligheid voor veranderingen van belang *over het gehele meetbereik*: dus het verschil met de vorige meting, onafhankelijk van de hoogte van het voorafgaande signaal, positief of negatief.

#### **Signaal/ruis verhouding / Signal to noise ratio**

De verhouding tussen het signaal en de ruis bepaald het ervaren ruisniveau, ofwel het onderscheidend vermogen.

#### *rekenvoorbeeld gangbare waterspanningsmeter*

Meetbereik	0bar tot 3000mbar	
nauwkeurigheid waterspanning sensor	0,1% Full Scale (FS) Range	0,001*3000 = 3 mbar
nauwkeurigheid luchtdruksensor	0,5% FSR	0,005*200 = 1 mbar

stelsysteemresolutie logger: 16 bit  $3000/65536 = 0,04577$  mbar

*Uitgangspunt nodig voor benutting van potentiële resolutie: meetbereik van logger is perfect afgestemd op het bereik van de sensor output.*

In het geval van een 12 bit logger neemt de systeemresolutie (meetstapgrootte) af tot :

$3000/4096 = 0,7324$  mbar

De dominante bron van afwijkingen in het meetsysteem is hiermee bepaald door de sensor kwaliteit van de waterspanningsmeter. De logger toont bij 24 bit de sensorafwijkingen in zijn volle glorie tot op het niveau van duizendsten millibar.

De resulterende “meetfout” is in dit voorbeeldgeval dus 3.16 voor de beide sensoren en die wordt uitgelezen met stapgroottes van 0,04577 mbar vanwege de 16 bit logger.

Als de afwijking zich echt gedraagt als normaal verdeeld met een standaardafwijking van 3,16mbar, dan zou 66% van de waarnemingen bij een bekende druk, binnen +3,16 en -3,16 mbar t.o.v. die druk moeten liggen, nog altijd een bandbreedte van 6,32 mbar. Het kan ook zijn dat de variatie veel kleiner is en dat er sprake is van een systematische afwijking van 3,16 mbar t.o.v. de referentiedruk. Niemand heeft namelijk iets beweerd over de aard van de afwijkingen. Wij maken zelf immers hier de aanname dat de nauwkeurigheid kan worden geïnterpreteerd als standaardafwijking.

#### Voorbeeld meetsysteemverantwoording

##### **ACCURACY SPECIFICATIONS**

**Metric Systems:**  $\pm 0.25$  mm per reading and  $\pm 6$  mm per 50 readings.

**English Systems:**  $\pm 0.01$  inch per reading and  $\pm 0.3$  inch per 50 readings.

These system accuracy specifications were derived empirically from the analysis of a large number of surveys and include both random and systematic errors introduced by casing, probe, cable, readout, and operator. Casing was installed within 3 degrees of vertical, and operators followed recommended reading practices.

When corrections for systematic error are made, the remaining error is random. It accumulates with the square root of the number of readings. Thus the best precision obtainable with a metric system is approximately  $\pm 1.4$  mm per fifty readings, and the best precision of an English unit system is approximately  $\pm 0.05$  inch per fifty readings.

*Tekstblok A.2, Verantwoording systeemspecificaties nauwkeurigheid en precisie.*

Voorbeeld meetfout door niet optimale afstemming van het meetsysteem bereik op het bereik van de sensoroutput (Samengestelde meetfout door verrekening van diverse drukmetingen in § 6.2.)



*Sensoroutput range 0-400 mV, 16 bit meetsysteem instelling leidt tot meetbereik van 0-1000 mV.  
Van de beschikbare 65536 meetstapjes wordt maar gebruik gemaakt van 40% = 26214 stapjes.  
Het sensormeetbereik van 3 bar kan dan op zijn best met stapgroottes van 0,11 mbar worden uitgelezen. Nog altijd ruim genoeg.*

*Door van tevoren de sensor te kalibreren met polynoom of lineair maar dan specifiek gericht op een klein deel van het meetbereik, en tegelijkertijd ook het meetbereik van de logger perfect op het gekalibreerde deel van de sensor karakteristiek te richten kan in veel gevallen een veel beter resultaat verkregen worden.*

### **Ontbrekende verklarende factoren**

Als meetvariaties als gevolg van externe factoren niet worden geëlimineerd uit de signalen neemt de systeemruis toe. Ruis vormt dus een verzamelbak van ruiscomponenten.

Voorbeelden van ontbrekende verklarende factoren op metingen:

*Achterloopse waterspanningsmeters of peilbuizen (slecht afgedicht) verstoren soms lokaal de grondwaterdruk.*

De achterloopsheid van peilbuizen en het niet afdichten van peilbuizen of wsm's lokaal een verstoring geven van de druk in het pakket waarin het filter is afgesteld. Daarnaast veroorzaakt het onwenselijke uitwisseling van water tussen pakketten met kwaliteitsverschillen.

*Daling van bodemlagen:* Verloren geplaatste waterspanningsmeters volgen perfect de grondlaag waarin deze werden geplaatst, maar plaatshoogte veranderingen kunnen alleen geschat worden op basis van zakkaken. De plaatsing met sondeerstang of gasbuis of pvc buis maakt het mogelijk om de plaatsingsdiepte te verifiëren. Door een stang ontstaat echter ook een potentiële lekweg al zijn daarvan weinig gevallen bekend.

*Stijve deformatiemeters of groutvullingen verzetten zich tegen grondvervorming.* Als deformaties moeten worden gemeten moet het instrument in principe zich identiek gedragen als het materiaal waarin het de deformaties moet meten. Als een groutvulling te stijf verhard na plaatsing (een grout in een gelaagde grond met verschillende plasticiteit), of als bepaalde segmenten van een hellingsmeetbuis langer of juist korter moeten worden om vervormingen te kunnen volgen (squeezeing). Het gevolg is een verlies van het zicht op de werkelijke vervorming.

*Trillingen* kunnen zoals eerder besproken waterspanningsmetingen verstoren maar vaker nog zijn ze de bron het hele risicoproces en dus het meetdoel.

*Scheefstand veroorzaakt z-onzekerheid.* De druk en waterspanning die wordt gemeten door niet z-gecorrigeerde instrumenten is systematisch lager. De verdelingsfunctie van  $\Delta$  hiervan is lognormaal verdeeld omdat deze fout altijd bestaat maar bijna altijd zeer klein is.

*Plaatsingsdieptefouten* kunnen makkelijker ontstaan bij werk op het water dan op land. Waterwerk vraag in alle opzichten meer aandacht dan werk op het land. Alle fouten die op het land gemaakt kunnen worden gelden ook voor waterwerk en daarbij komen nog wat speciale factoren die een rol spelen bij het bereiken en vastleggen van meetlocaties zoals:

getijdebeweging,

hoge stroomsnelheden,  
bestortingen en andere onbekende harde objecten,  
deining door wind en passerende schepen,  
dichtheidsverschillen van water.

De volgende factoren krijgen speciale aandacht voor waterspanningsmetingen vanaf water:

- I. verzakken van een sondeerwerktuig (zoals een werkschip) na hoogtemeting van het schip  $\underline{W}$ ,

$$x_w > 0 \text{ en } \lambda_w$$

- II. verandering van oppervlaktewaterstand tussen opmeten van de plaatsingsdiepte en referentie  $\underline{V}$

$$\mu_v = 0 \text{ en } \sigma_v$$

$\mu_w < 0$  omdat het schip niet omhoog kan verzakken. Door een verzakking van het schip na hoogtemeting wordt in dat geval de sensor onbewust iets dieper geplaatst dan wordt geregistreerd. Dit kan eenvoudig worden vermeden door altijd direct na het op diepte brengen van een sondeerstreng een herhalingsmeting uit te voeren, bij voorkeur met een hoogwaardige GPS of waterpassing vanaf de oever.  $\underline{W}$  is daarom net als  $\underline{I}$  een type B meetfout, exponentieel verdeeld met parameters  $x$  en  $\lambda$ .

In dit voorbeeld gaan we uit van een goed vastgestelde diepte met restant meetfout  $\underline{D}$  bepaald met een DGPS.

$$\mu_d = 0 \text{ en } \sigma_d = 3 \text{ cm}$$

### Luchtdrukcompensatie en Barometrische efficiency

Luchtdrukcorrectie is nooit perfect. De locatie van luchtdruk en waterdruk sensoren kan verschillen waardoor vooral bij frontpassages pieken en dalen zichtbaar kunnen worden in waterspanningsreeksen die moeten worden toegeschreven aan deze luchtdrukverschillen.

Barometrische (in-)efficiency beschrijft de relatie tussen luchtdruk en waterspanning of piëzometrisch niveau. Normaal gesproken stijgt en daalt de waterspanning vrijwel direct en proportioneel met de luchtdruk en daarom wordt vrijwel altijd de luchtdruk direct 1 op 1 verrekend met de gemeten bruto druk. Daarbij ontstaat normaal gesproken dus een maximale meetfout die kan worden berekend met de werkwijze die in de paragrafen hierboven is beschreven. Dit is voor waterspanningsmeters en peilbuissensoren gelijk.

Er zijn echter situaties waarbij de 1-op-1 correctie voor luchtdruk leidt tot vreemde systematisch afwijkingen. Vooral peilbuizen die immers direct in contact staan met luchtdruk kunnen een daling laten zien bij toename van luchtdruk en stijging bij afnemende luchtdruk die niet overeenkomt met het piëzometrisch niveau, zoals dat bijvoorbeeld met een waterspanningsmeter gemeten zou kunnen worden. Het resultaat is dat de peilbuisgegevens een nerveus beeld laten zien dat tegengesteld is aan de luchtdrukvariatie. Er zijn voorbeelden bekend van benodigde correctiefactoren van 30%.

### Dikke onverzadigde zone-ademing

Het fenomeen van een niet perfecte barometrische efficiency wordt waargenomen in freatische als in gespannen aquifers. Ook bij een dikke onverzadigde zone zijn verschillen tussen luchtdruk en bodemgasdruk soms groot genoeg om extra variatie of ruis te veroorzaken. Vooral peilbuizen zijn daarvoor gevoelig en soms sneller in evenwicht met het peilbuisniveau dan lucht die moet doordringen door de onverzadigde zone.

Waterspanningsmeter plaatsingen laten soms ook grote kieren achter naar de atmosfeer waardoor ook daarbij imperfecte luchtdrukcorrecties kunnen ontstaan.

### **Spanningsoverdracht**

Waterspanningsmeters staan soms in smalle kleilenzen of voormalige veenputten. De geometrie van zandlichamen daaromheen kan leiden tot een niet perfect verticale overdracht van korrelspanning. Vertragingen of hysteresis in de samendrukking van klei of veen door van boven uitgeoefende last van luchtdruk zou in een dergelijk geval leiden tot niet reële luchtdruksignaal componenten in waterspanning. Hiervan zijn geen voorbeelden bekend.

## **A.5 Kwaliteitsverlies na SAT gedurende looptijd project**

### **Drift**

Sensordrift is het gradueel veranderen van de sensor karakteristiek. In eerste instantie is drift vaak beperkt tot verloop van het snijpunt van de sensor-regressielijn met de horizontale as van de relatie tussen meetdoel en sensoroutput. Drift van het snijpunt heeft een andere oorzaak dan een verandering van de vorm van de sensor karakteristiek. Zo leidt de verdamping van vloeistof uit een manometer tot drift maar niet tot een verandering van de richtingscoëfficiënt van de regressielijn, omdat de dichtheid en zwaartekracht niet veranderen. Het verplaatsen van een kwikmanometer zou wel leiden tot verandering van de richtingscoëfficiënt omdat de zwaartekracht verschilt over het aardoppervlak. Een manometer kan vanwege de eenvoudige constructie dus moeilijk verouderen.

### **Mechanische veroudering constructie**

Waterspanningsmeters zijn vroeger vaak voorzien van Vibrating Wire sensoren en die werden vroeger niet zwaar voorbelast. De ontspanning van de snaar leidde tot een verandering van zowel het snijpunt als van de richtingscoëfficiënt van de sensor-regressielijn. De veroudering van moderne Vibrating Wire en ook die van halfgeleider-druksensoren is vaak zeer beperkt, maar er zijn grote verschillen tussen sensoren zoals ook de prijzen sterk uiteenlopen. Moderne sensoren worden zwaar voorbelast waardoor de drift beperkt zou moeten zijn. Sensoren laten vaak een zeer beperkte drift zien die bij gestage voortgang tot decennialang binnen de fabriekstoleranties kunnen blijven.

### **Corrosie en slijtage**

Door corrosie en slijtage kan de vorm en karakteristiek van een meetinstrument veranderen. Druksensoren in waterspanningsmeters worden voornamelijk aan corrosie blootgesteld en daardoor kan op termijn plotseling een verandering optreden van het snijpunt en de richtingscoëfficiënt van de regressielijn.

### **Voedingsspanning**

Als voedingsspanning van een ratiometrische druksensor verandert zal ook een drukverandering worden gemeten. Daarnaast is de weerstand van voedingsleidingen sterk temperatuurgevoelig. Om die reden worden vaak 4-20mA sensoren toegepast. Kabellengteverschil, temperatuur en voedingsspanning zijn daardoor geen belangrijke ruisfactoren meer.

## **Oplossingsrichtingen**

Oplossingen worden voor een groot deel bepaald door menselijke factoren vakmanschap, professionaliteit en opdrachtgeverschap.

## **Diagnose van storingen en identificatie van oorzaken**

Tijdige herkenning van systeem falen en juiste identificatie van oorzaken is soms nog belangrijker dan het vermijden van systeem falen. Systeem falen is in de ruwe geotechnische praktijk niet altijd vermijdbaar en de gevolgen ervan moeten worden beperkt door ofwel dubbel uitvoeren van systeemprocessen dan wel snel en effectief reageren.

De snelheid en kwaliteit van diagnose en handeling zijn gebaat bij een breed bewustzijn van menselijke factoren een werkcultuur waarin werk wordt vastgelegd en waar fouten kunnen worden besproken, zelfs gekoesterd.

## **Preventie**

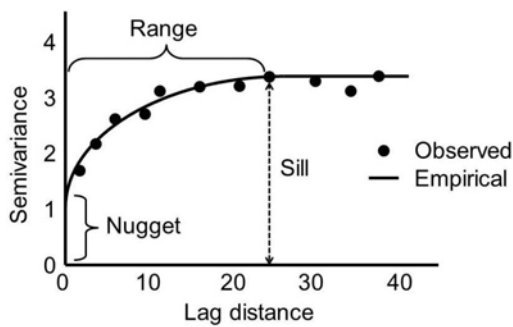
Als fouten via het risicodocument en toezeggingen t.a.v. kwaliteit kostbaarder en afrekenbaar worden gemaakt in contracten, zal kwaliteit in alle aspecten worden meegewogen vanaf het plan van aanpak en meetnetontwerp. Dit leidt tot waardering van vakmanschap en werkzorgvuldigheid.

De razendsnelle ontwikkeling van ICT en daling van datakosten leiden tot een toename van het gebruik van automatische controle processen waaronder toetsing op basis van eenvoudige statistische kenmerken (trendanalyse, compleetheidsanalyse) en zelfs automatische diagnose van dreigend falen op basis van tijdreeksanalyse en geclusterde trendanalyse.

## **Redundancy**

Dubbeling dekt abrupte totale beschadigingen en verstoringen van de meetketen. Dubbeling levert naast datazekerheid en robuustheid van een meetnet ook een beter zicht op de variatie die zich op ieder meetpunt voordoet.

Statistisch gezien is een dubbel meetinstrument op 1 punt een zeer nuttige bron van informatie over de witte ruis die onlosmakelijk verbonden is aan metingen in natuurlijke omstandigheden. Bij dichte meetnetten of situaties waarin veel informatie over de ondergrond beschikbaar is kunnen geostatistische methoden informatie geven over normale en abnormale verschillen op basis van de relatie tussen nabijgelegen instrumenten en diens onderlinge afstand.



Figuur 2.1, Relatie tussen variatie en afstand tussen meetpuntparen op een vlak (Semivariogram). Deze relatie laat zien hoe meetwaarden ruimtelijk met elkaar samenhangen.

Dubbele sensoren op 1 locatie/meetpunt bieden ook mogelijkheden om ruis te onderdrukken en eventueel om voordelen van verschillende meetprincipes te kunnen uitbuiten als vooraf niet bekend is welke doorslaggevend zullen zijn.

### Doorrollende sensorvoorraad

Het vroegtijdig vervangen of inwisselen voor “schoongemaakte” instrumenten (doorrollende voorraad) kan een oplossing zijn voor schade als gevolg van langdurige blootstelling aan de elementen.

Goed geplaatste waterspanningsmeters kunnen zelfs decennialang data leveren maar uiteindelijk zal door drift en corrosie aan alle sensoren een eind komen. Indien vooraf bekend is met welke levensduur rekening moet worden gehouden kan vervanging op twee manieren worden gedaan: preventief of reactief. De keuze voor preventief of reactief is afhankelijk van de verhouding tussen

- de meerkosten van boete + mobilisatie + plaatsing voor 1 instrument bovenop die van groepsvervangings enerzijds en
- de kansverdeling van uitval anderzijds.

Immers niet onnodig vervangen is altijd goedkoper dan wel vervangen.

De ervaringen met gasvorming in waterspanningsmeters heeft vaak geleid tot een voorkeur voor vroegtijdig vervangen van alle instrumenten om maar onzekerheid over meetresultaten te vermijden. Doorrollende sensorvoorraden komen vaker voor naar mate de niet-levering van data kostbaar wordt gemaakt door boeteclausules of anders niet binnen de nodige / afgesproken termijn kan worden gemobiliseerd voor bijplaatsing.

### In-situ validatie

In-situ validatie kan de verdenking van sensordrift onderdrukken. Het beoogt een controle van de meetketen zonder het meetpunt te veranderen of beïnvloeden en zou goedkoop moeten zijn. Validatie kan op twee wijzen:

- kortdurend blootstellen aan een nauwkeurig bepaalde druk, of
- op een andere manier de druk in die locatie meten.

Afwijkingen kunnen leiden tot aanpassing van de offset van de kalibratie curve. In het eerste geval kan bij

herhaling bij verschillende drukken een gehele kalibratie worden gedaan waarbij dus ook de richtingscoëfficiënt of zelfs hogere orde polynoom factoren bepaald worden.

## Meetnetontwerp

Door in het meetnetontwerp rekening te houden met bovengenoemde oplossingsmogelijkheden kan een grote bijdrage worden geleverd aan de robuustheid van het meetsysteem. Geostatistiek, tijdreeksanalyse en numerieke modelstudies kunnen worden gebruikt om het meetnetontwerp te toetsen op deze kwaliteiten.

## A6. Vreemde waarnemingen of systeemstoringen?

Tijdens meetprojecten wordt vaak tijd besteedt aan vragen van klanten over vreemde waarnemingen. Die moeten altijd met spoed behandeld worden omdat moet worden uitgesloten of er sprake is van een systeemstoring of niet. Door in de aanbidding duidelijk aan te geven hoe wordt omgegaan met de reactietijd en kosten van tijdbesteding aan verklaringen en systeemstoringen kan de kwaliteit van de geautomatiseerde storingsdiagnose worden getoond.

Hoe nauwkeuriger en hoe vaker gemeten wordt, hoe duidelijker variaties kunnen worden toegeschreven aan externe oorzaken van waterspanningsvariaties. Hoogteveranderingen in veen en klei zijn vaak niet groot in vergelijking met de effecten van de processen die met waterspanningsmeters worden gemeten. Toch zijn ze opvallend en kunnen ze een deel van de gemeten variaties verklaren.

Veenademing of Mohratmung. Veen is in staat om enorme volumefracties water te bergen en weer af te geven, totdat het belast wordt. Na belasting of veraarding neemt de expansiekracht sterk af maar ook dan kan de maaiveldhoogte van een veengebied tientallen centimeters per seizoen stijgen en dalen onder invloed van de beschikbaarheid van water. Peilbuizen en waterspanningsmeters bewegen mee met de veenlagen al naar gelang de materialen in een bepaalde laag verankerd zijn.

Een verankering in onderliggende zandlagen (ankerpeilbuis) of met een zakbaken / zakbaak kan zorgen voor een duidelijk beeld van de herkomst van de maaiveldhoogte verschillen. De exacte diepteligging van een begraven waterspanningsmeter kan worden vastgesteld als een vaste buis is toegepast en herhaaldelijk wordt ingemeten.

Ook kan middels markeringen op de waterspanningsmeterkabel worden herleid wat de maximale afstand is tot een dieper gelegen waterspanningsmeter. Echter in situaties met gekrompen grond kan de sensor wel minder diep liggen aangezien een kabel kan knikken in de grond.

Zwel en krimp van klei. De reversibele volumeveranderingen van klei bij cyclisch opeenvolgende vernatting-verdroging leiden tot een eeuwigdurende seizoensafhankelijke zwel en krimp van kleilichamen die zoals dijken en akkers. De potentiële zwel en krimp van klei is afhankelijk van de lutumfractie, kleimineralogie (bepalend voor de Cation Exchange Capacity), de fractie organische stof, de ionensamenstelling van omgevingswater (bepalend voor de Ionen bezetting, verzadigingsgraad van de klei en de verhouding tussen een- en twee-waardige ionen

Exchangeable Sodium Percentage). De lokale hydrologie en verdamping bepalen daarna de mate waarin zwel en krimp zich daadwerkelijk voor doen.

Elasticiteit van zandlagen. In situaties waarin waterspanning in zandlagen onder invloed staat van oppervlaktewater in de omgeving kan een elastische reactie van een zandpakket worden teruggevonden in de hoogte van dijken en constructies zoals lichte woningen op staal. Een getijdesignaal met een amplitude van enkele millimeters is waargenomen in meetbouts op de fundering van woningen op dijken in West Nederland. De warmte-instraling-uitzettingseffecten van constructies zouden zichtbaar worden bij hoger geplaatste meetbouts.

Periodieke dichtheidsverschillen van grondwater. In gevallen waarbij door getijdebewegingen of grote seizoen verschillen in de verhouding van binnenwaterstand en buitenwaterstand kunnen zout of koud water, zoet en warm water elkaar verdringen. Dichtheidsverschillen zijn vaak beperkt en het effect daarvan is lineair met de dikte van de verdrongen waterlaag. Hoe dieper hoe constanter temperatuur en zoutgehalte, dus in veel gevallen zal dit effect in termen van waterspanning zeer beperkt zijn. Hoe klein ook, ze leiden tot een toenemende meetwaarde onzekerheid die tenzij vernoemd altijd aan het meetsysteem zal worden toegeschreven.

#### **Gasbellen in de meetkamer**

Gasbellen zijn pas een probleem als ze door de drukverandering in het omliggende water leiden tot stroming over het filter en toestroming door de bodem. Immers daardoor wordt de waterdoorlatendheid een factor en is tijd nodig om tot evenwicht te komen. Bij druktoename kan dat even duren omdat gas in oplossing gaat waardoor volume vrij komt. Dit uit zich in hysteresis.

Gasbellen kunnen ook leiden tot verstopping van de grotere poriën maar voordat dat een probleem geeft moet er eerst stroming plaatsvinden of er moet sprake zijn van een filter met een zeer lage porositeit.

Drukveranderingen zouden in principe vrijwel ongestoord doorgegeven worden via de kleinste poriën, zolang er geen vloeistofstroming hoeft plaats te vinden.

Hoe groter de waterkamer hoe langer het duurt voordat een gasbel zo groot is dat hij kracht uit oefent op het membraan. Bellen zijn qua "oppervlaktenspanning optimaal" in ronde vorm. Er is een kracht nodig om ze af te platten en ook om ze in een klein hoekje te duwen. Gasbellen kunnen door gaatjes worden geperst zoals die in het grondfilter. Het drukverschil dat nodig is om gas door een waterverzadigd filter te persen heet de luchtintrede waarde. (air entry value) en die wordt bepaald door de grootste porie waarmee de bel in contact staat. Dat kan oplopen van één kPa bij grove schone filters in zand (150 $\mu$ ), tot enkele tientallen kPa als gevolg van de versmering van de buitenste schil van het grondfilter.

Ontsnappingsmogelijkheden voor gasbellen uit de vloeistofkamer zijn er niet omdat alle poriën na plaatsing een hoge luchtintredewaarde hebben.

Meer gedetailleerde uitleg over gasbellen in de meetkamer van waterspanningsmeters is te vinden in de POVM publicatie 'Gasbestendige waterspanningsmeter, syntheserapport Onderzoeksfase'.

## **Bijlage B**

(informatief)

### **Eigenschappen, aspecten en typen waterspanningsmeters**



B*	kenmerken	Beperkt beschikbaar	Gangbaar	Hoogwaardig	Maatwerk
<b>Sensorkwaliteit</b>					
1m	Meetbereik (absoluut)	0-200kPa	0-350 kPa	90-350 kPa	Vbeeld: 250-500 kPa
1n	Nauwkeurigheid druksensor (full scale excursion error)	<0.5%	<0.25%	<0.1%	<<0.1%
1s	Stabiliteit mbt drift (per jaar)	1kPa	0.1 kPa	0.01kPa	
1t	Temperatuurgevoeligheid (toepassing temperatuur als tracer)	onbekend	ongevoelig, niet gecorrigeerd	ongevoelig, gecorrigeerd	intern gemeten en gecorrigeerd
<b>Meetsysteemkwaliteit bij gekozen/voorgeschreven meetmethode</b>					
2m	Meetbereik (instelopties / sensorpassing)				
2d	Adconversieresolutie	lage resolutie	normale resolutie	hoge resolutie	maatwerk
2s	Stabiliteit mbt drift (per jaar)	1kPa	0.1 kPa	0.01kPa	
2t	Temperatuurgevoeligheid				
2c	calibratiegeschiedenis	Fabriek	Tbv certificering	project	
2z	Leveringszekerheid / robuustheid	reactietijd 5 dagen	reactietijd 1 dag	permanent toezicht	bemand automatisch meten
2a	Aantallen sensoren/ meetmethoden per opstelling	1	meerdere	veel-zeer veel	
<b>Constructiekenmerken</b>					
3k	Kegelvorm	stomp	60 graden punt	45 graden punt	
3m	Totaalgewicht / hanteerbaarheid	>5 kg	1-5 kg	<1 kg	
3d	Diameter	groot	36mm	klein	
3s	Sterkteklasse / plaatsingsdiepte	ingraven	<0.1Mpa zand	5Mpa zand	50Mpa zand
3h	Herwinbaarheid	niet	niet rendabel	optioneel	
3i	Inbrengmethode	ingraven / inhangen	handmatig indrukken	graafmachine ondersteund indrukken	Sonderen
<b>Grondfilter / waterkamer kenmerken</b>					
4m	Grondfiltermateriaal	PP PE PA	RVS 316	Keramisch	
4p	Grondfilter porositeit	<10%	10-20%	20-30%	>30%
4i	Grondfilter luchtintreewaarde	15kPa	10kPa	5kPa	1kPa
4o	Grondfilter oppervlak per instrument	<1cm <sup>2</sup>	1-2cm <sup>2</sup>	2-5cm <sup>2</sup>	>5cm <sup>2</sup>
4v	Volume/filteroppervlak [cm]	>5	1-mei	<1	
4s	Verschuiving filter-sensormembraan	>10 cm	10-2 cm	2-0 cm	
4R	Regeneratie of ontgassing	nee	Handmatig	permanent	
4f	50% signaaldempingsdrempelfrequentie	0.1Hz	1Hz	10Hz	100Hz
<b>Levensduurkenmerken</b>					
5v	Insitu validatie	geen	handmatig	automatisch	
5c	Calibratie	geen	handmatig	Insitu	
5o	Ontgassingsmogelijkheid	geen	handmatig	automatisch	passief
5h	Herstel na uitdroging	geen	handmatig	automatisch	beltestprotocol
<b>Opties</b>					
6m	Monstername mogelijkheid	geen	optie tegen meerkosten	standaard	
6a	Aantal koppelbaar per sonderstang	nee	nee	Ja	
6k	kabel varianten	VolkernPVCmantel	Twisted pair, meerdraads, PU mantel	Alle tot en met offshorekabel	Alle tot en met offshorekabel
6m	Multisensortype per node (helling, trilling, temperatuur)	nee	beperkt	veelvoud	Koppelbaar in keten
6 <sup>e</sup>	explosieveilig	niet	niet	wel	
6l	sensorkabellengte	<10 m	10-1000 m	>1 km	
<b>kosten voor gangbare meetoplossingen</b>					
7a	Aanschaf incl voorbereiding				
7h	Huur				
7t	Data Aquisitie / telemetrie (int >12uur) (trage processen)				
7s	DAQ / telemetrie (int >59 sec) (waterspanning voorspellend risico)				Beslissings-Ondersteuning op afstand
7b	DAQ / telemetrie hoge resolutie/ hoge frequentie (waterspanning volgend op risicoproces)				BO bemand

Electronische sensoren voor druk	Klassebereik	Loggertechniek	Energieverbruik	Stabiliteit
Vibrating wire	0-10 bar	Specifiek	Zeer laag	Vele jaren bruikbaar tot onbeperkt
Digitaal / PC	0-1000 bar	Gangbaar	Zeer laag	Jaren bruikbaar
V/V ratiometrisch	0-1000 bar	Klassiek	Zeer laag	Jaren bruikbaar
MEMS	Onbekend	Specifiek	Zeer laag	Onbekend
4-20mA	Onbeperkt	Gangbaar	Laag	Jaren bruikbaar
Fibre Optic	Sterk in ontwikkeling	Zeer specifiek, hoge werkfrequentie, veel sensoren per kanaal	Hoog	Vele jaren bruikbaar tot onbeperkt

Producent/leverancier	sensor	constructie
Website voor informatie		
Alert Solutions (niet meer actief) / geobeads	MEMS	Koppelbaar
Geopoint <a href="http://geopoint.nl/diensten/veldmeetapparatuur/">http://geopoint.nl/diensten/veldmeetapparatuur/</a>	4-20mA Vibr. Wire	Push-in
Geo-Sense <a href="https://www.geosense.co.uk/products/piezometers">https://www.geosense.co.uk/products/piezometers</a>	4-20mA V/V	Divers
Slope Indicator <a href="http://www.slopeindicator.com/instruments/piezo-intro.php">http://www.slopeindicator.com/instruments/piezo-intro.php</a>	Vibr. Wire 4-20mA	Koppelbaar
Encardio Rite <a href="http://encardio.com/products-geotechnical-piezometer-water-level-measurement.php">http://encardio.com/products-geotechnical-piezometer-water-level-measurement.php</a>	4-20mA V/V	Divers
GeoSense <a href="https://www.geosense.co.uk/products/piezometers">https://www.geosense.co.uk/products/piezometers</a>	4-20mA V/V	Divers Koppelbaar
Interfels <a href="http://www.interfels.de/pages/porenwasserdruckgeber">http://www.interfels.de/pages/porenwasserdruckgeber</a>	Vibr. Wire	Push in
BAT <a href="http://www.bat-gms.com/bat-piezometer.asp">http://www.bat-gms.com/bat-piezometer.asp</a>	4-20mA	Terugwinbare sensor
SISGEO <a href="http://www.sisgeo.com/de/produkte/piezometer.html">http://www.sisgeo.com/de/produkte/piezometer.html</a>	Vibr. Wire 4-20mA	Divers Koppelbaar
Geokon <a href="http://www.geokon.com/Piezometers">http://www.geokon.com/Piezometers</a>	4-20mA V/V	Divers koppelbaar
Fugro	4-20mA V/V	Push-in Koppelbaar & Terugwinbaar
Geo-supporting b.v.	4-20mA V/V	Push-in

Gangbare goed verkrijgbare waterspanningsmeters in de Europese markt: zie volgende pagina's.



*Figuur 2 BAT System filtertypes*



*Figuur 4 Interfels Piezocone*



*Figuur 3 Sisgeopiezometers*



*Figuur 1 RST piezometer system with accessories*



*Figuur 5 Geopoint piezometers for lost placements, standpipes and grouted boreholes*



*Figuur 6: Slope indicator piezocones for grouted bore holes, standpipes or CPT*



*Figuur 7 Geonor M-600 system*



*Figuur 8: Pizzi Instruments Casagrande piezometer*



*Figuur 9: Geokon piezometers for retrievable CPT and lost CPT placement*



*Figuur 10: Encardio Rite piezometer*



*Figuur 11: Fugro FWSII piezometersystem and accessories*

Een extreme vorm van een lange schouder ontstaat als gekozen wordt voor plaatsing met sondeerstang. Hierboven links een figuur van een sondeerstang met meerdere waterspanningsmeters, een ringvormig filter en twee schijfvormige.



*Figuur 13 Waterspanningsmeter sets voor plaatsing in boorgaten die daarna kunnen worden afgegrout met of zonder filtergrindpockets.*

Hierboven zijn verschillende type waterspanningsmeters weergegeven. De units variëren qua sensortechniek (vibrating wire, piëzo resistief), contactvlak met de bodem (één, vier ronde contactvlakken, filterring), hoogte van de schouder en terugwinbaarheid. Voor de preparering van de meetunits dienen de aanwijzingen van de leverancier gevolgd te worden.

## Bijlage C

(informatief)

### Checklijsten

Checklist werkvoorbereiding	
Documentatie ten behoeve van buitendienstmedewerkers:	
KLIC meldingrapport	
Heldere beschrijving van de beoogde plaatsingslocatie en logistiek voor materieel.	
Indicatieve beschrijving bodemopbouw, freatisch niveau en grondwaterstijghoogte.	
Documenten Keur en daaruit voortvloeiende voorschriften werkwijze en afdichting.	
Documenten tav eventuele nabije grondwateronttrekkingen en injectiebronnen ivm werkwijze en afdichting.	
Lijst met locaties met daarin : <ul style="list-style-type: none"> <li>A. Plaatsingsmethode,</li> <li>B. Instrumentbeschrijving,</li> <li>C. Kabel,</li> <li>D. Te gebruiken referentiehoogte,</li> <li>E. Plaatsing op vast omljnde diepte: tov ref , eventueel toegestane dieptemarge en vereiste plaatsingsdieptenauwkeurigheid,</li> <li>F. Plaatsing in bodemlaag: opzoeken met guts, boorgegevens en omschrijving geven van doel en situatie, vereiste plaatsingsdieptenauwkeurigheid.</li> </ul>	
Opmerkingen tav afspraken met terreineigenaren of beheerders mbt werkwijze en afwerking	
Markering van hoogte en locatie met piketpaaltje of Fenomarker/grondanker.	
Markering van beoogde locatie eventuele proefsondering.	
Vorbereide plaatsingsformulieren inclusief afdichtingswijze en afwerkingswijze.	
Gewenste plaatsingsdiepte, referentieniveau en beoogde bodemlaag, (werkwijzebeschrijving meegeven).	
Gewenste wsm vulmethode (beschrijving meegeven)	
Gewenste uitsteekhoogte van stangen.	
Gewenst verloop van kabels, locatie telemetriekast en afwerkingswijze.	
Gewenste werkwijze bij oplengingen ophogingen.	
Gewenste opslaglocatie van veldrapporten	
Contactgegevens en bereikbaarheid van de beslissingsbevoegden en projectleiders klant.	
Afstemming planning en inschatting benodigde tijd / productietempo voor uitvoering. Vastleggen van afspraken tav communicatie over afwijkingen in tijdbesteding en productietempo.	
Toelichten buitendienst van meetdoel en planning van klantproject en afspraken met klant.	
FAT rapportage bespreken met buitendienstmedewerker indien dit nieuw is, en in geval van afwijkingen	
Vewachtingen tav SAT incl. Vorbereide formulieren	
Afstemming derden uitvoering:	
Afstemming uitvoeringsdatum met beslissingsbevoegde.	
Afstemming van uitvoeringsplanning met kraanmachinist / uitvoerder voor "op diepte nadrukken".	

Afstemming waterschap in geval van keur.	
Afstemming met werkvoorbereiding sondeerploeg over noodzaak steuncasing.	
Afstemming met terreineigenaar / beheerder.	
Instructieblad maaibedrijf ivm markering, schadebedragen en contactinformatie.	
<b>Factory Acceptance Test</b>	
Instellen en testen meetketen op overeengekomen frequenties, eenheden, webpresentatie en rapportage.	
Controleren Sensor Kabellengte tussen stekker, Sensor ID, testwaarde bij actuele luchtdruk	
In geval van verschillende sensorproducenten: zorg dragen voor nadruk op specifieke toepassingen. Opletten dat aandacht bestaat voor verschillen in afstand tussen sensor en grondfilter	
<b>Materiaal</b>	
Zwelklei korrels, staven, grout, stortkoker, druksteel, werkwater, mengmateriaal	
Locatie afwerk materiaal: potten, kokers, tape, kabelbinders, maaimarkering	
Instructieblad meetapparatuur, oplengwijze, contactgegevens en indicatieve schadebedragen voor in de keet.	
Plaatsing: handuitleesapparaat; stangen/buizen; kleefbreker; bevestigingsmateriaal; ontluchtingsmateriaal; reparatiemateriaal; trek materiaal; gereedschap; meetlint;	
Waterspanningsmeters; verlengkabels; kabelbescherming; tape	
Beschrijving meetstreng per locatie voor inclusief drukstuk, kleefbreker of groutinjectiestuk	
SAT formulieren; markeermateriaal / nummerplaatjes; schrijfmateriaal	
Kruiwagen / materiaalalkar	
GPS; Waterpasinstrumenten	
Handboorset; schep; emmer	
PBM's; Vuilniszak;	

In de paragrafen hieronder worden de belangrijkste technische werkzaamheden toegelicht die in het kader van de werkvoorbereiding dienen te worden uitgevoerd toegelicht.

### Sensoren / instrumenten calibratie

#### Monitoringplan

In het monitoringsplan is aangegeven welke sensoren gebruikt moeten worden voor het meetsysteem. Afhankelijk van de eisen die aan het meetsysteem gesteld worden dienen deze gecontroleerd te worden op een goede werking. De basis hiervoor is een zorgvuldig georganiseerde administratie van kalibratiegegevens, kabelgegevens en nummering.

#### Welke sensoren

Kalibratie is bepalend voor de selectie van sensoren. Onderdeel van de kalibratie is toetsing aan de vereiste nauwkeurigheid over het gehele meetbereik van de sensor. Het gebruik van regelmatig gecertificeerde kalibratieapparatuur voorkomt onbekende afwijkingen.

#### Maatwerk kalibratie

In de technische beschrijving van de leverancier van de sensor is aangegeven in hoeverre de meetreeks lineair is op het moment van levering, vaak onderverdeeld in een toetsing per deel van het meetbereik. Door gebruik van kwadratische of hogere polynomen in de kalibratielijnen kunnen vaak hogere nauwkeurigheden bereikt worden. Vanwege drift en blootstelling aan hogere druk zijn kalibratiewaarden na verloop van tijd niet meer actueel



genoeg. Administratie van kalibratiedatum is dus belangrijk.

#### Factory Acceptance Test (FAT) en Site Acceptance Test (SAT)

In de overeenkomst moet zijn vastgelegd of er een temperatuurregistratie en temperatuurcorrectie dient plaats te vinden tijdens FAT, SAT of ook gedurende de meetperiode. Omdat wsms vaak op enkele meters onder maaiveld worden toegepast is de variatie van bodemtemperatuur op sensordiepte vaak beperkt tot enkele graden. Uit onderzoek van grondwaterleiding bedrijven is vastgesteld dat maar zelden bodemtemperaturen van >17°C voorkomen onder het grondwaterniveau.

#### **Dataloggers, telemetrie en voeding**

##### Vorbereiding dataloggers en accessoires

Toepassing van dataloggers, modems en voedingssystemen is vakwerk en vraagt zorgvuldige voorbereiding. Dataloggers kunnen net als sensoren drift vertonen maar over het algemeen is de noodzaak voor calibratie daarvan minder dringend dan bij sensoren. Tijdens inzet ligt het voor de hand om auto-diagnostische gegevens te laten inwinnen en waarschuwingketens uit te breiden met voeding en toestand van loggersystemen en voeding.

##### Programmeren ADconversie en kalibratie

Loggers en handheld meetapparatuur maken voor hun metingen en voor conversie van analoog naar digitale informatie gebruik van processors en geheugenkenmerken die soms beperkingen opleggen aan de nauwkeurigheid waarmee kan worden gemeten. Aannemers en meetbedrijven zijn zelf verantwoordelijk voor de toetsing van geschiktheid van meetinstrumenten voor de overeengekomen nauwkeurigheid van het meetresultaat.

#### **Factory Acceptance Test**

##### Functioneel testen

Na selectie van de componenten van het meetsysteem verdient het aanbeveling om het geheel inclusief alle sensoren functioneel te testen. Soms wordt een FAT voorgeschreven waarvan de resultaten dienen te worden gecontroleerd en gerapporteerd voordat gemobiliseerd kan worden. De toetsing van het meetsysteem is gericht op levering van de overeengekomen nauwkeurigheid, en vaak is de betaalbaarstelling van onderdelen van opdrachten hieraan gekoppeld.

##### FAT rapportage en meetnetoverzicht

De FAT is het moment om het dossier voor de klant compleet te maken met:

het definitieve meetnetoverzicht met :

overeengekomen meet en verzendfrequentie;

overeengekomen eenhedengebruik;

overeengekomen referentiehoogte (NAP, maaiveld hoogte, meetpunt-piketpaal of grondanker),

planning inclusief :

uitvoeringsplanning;

SAT;

Nulmeting;

klantprojectstart en -einde;

gepland onderhoud en demob periode;

contactpersonen;  
stukslijsten, calibraties en materiaaldocumentatie;  
handleiding voor webdata presentatie of andere rapportage;  
FAT-resultaten.

Checklist veldmedewerker	
<b>Algemeen aandachtspunten</b>	
Meld je bij de klant en diens medewerkers als die op locatie aanwezig zijn en introduceer jezelf en je taken.	
Heb aandacht voor werkzaamheden derden: Waterspanningsmeters mogen bij voorbeeld niet zonder goedkeuring van de projectleider worden geplaatst nabij een verticale drainage of nabij ondergrondse toepassing van waterglas, Polyurethaan of grout. Zoek eventuele verticale drains op en controleer of deze in een rechthoekig- of driehoekig stramien zijn geplaatst. Markeer het midden tussen de verticale drains met een piket en plaats de sondeerinrichting boven de piket.	
<b>Materiaal klaarleggen</b>	
Bereid het plaatsingsformulier zo ver mogelijk voor, en laat eventueel een collega de bodemopbouw verifiëren.	
Meetstreng voorbereiden conform eventuele instructie inclusief drukstuk, kleefbreker of grout injectie stuk	
Voorboren en positioneren van sondeertruck kan op de achtergrond worden uitgevoerd.	
Sondeerstangen of andere stangen tellen en vastleggen van de lengte [cm] van G. Koppelstuk H. Kleefbreker I. Drukstuk J. Grout injectiestuk	
<b>Bodemopbouw en locatie</b>	
Bevestig de veronderstelde bodemopbouw in de registratieformulieren.	
Boorgat maken tot uiterlijk 0.5 meter boven de beoogde plaatsingsdiepte. Eventueel gebruik maken van een guts met een kleinere diameter;	
Maak een foto van instrument en locatie.	
Treedt in overleg met de aanvrager/adviseur bij relevante afwijkingen.	
<b>Vorbereiding ter plaatse</b>	
Ontlucht de wsm en gebruik de ontluchting-werkwijze beschrijving;	
Opende veldbon aan en controleer /zorg ervoor dat bij iedere WSM de maximaal toelaatbare druk is genoteerd.	
Sluit het veld-meetapparaat aan op de kabel van de waterspanningsmeter en schrijf de waarde voor en na ontluchting op als ontluchting niet door de werkvoorbereider is uitgevoerd.	
Registreer een 0-meting van de wsm met de punt naar beneden, en registreer sensornummer en tijdstempel.	
NB: beschrijving hoe de meting met de field unit uitgevoerd moet worden is in de koffer van de unit bijgevoegd.	
<b>Diepteregistratie</b>	
Kabellengte opmeten indien er twijfel over bestaat, tussen sensor en stekker, EN afstand tussen sensor en grondfilter	
Markeren plaatsingsdiepte op de kabel of op stang/buis met tape-ring (onderzijde tape-ring is de maat)	
Sluit de sensor aan op de loggerkast of het uitleesapparaat.	
Diepe registratie van sondeermachine laten registreren en opslaan onder naam meetpunt (sondeerconus aansluiten en aan de kant leggen)	
Start de diepteregistratie zodra het filter gelijk is met het maaiveld	
Indien de maaiveldhoogte is ingemeten ten opzichte van een referentievlak moet de maaiveldhoogte meetlocatie worden	

	gemarkeerd met spuitbusverf, piket, tegel of ander herkenningspunt zoals een fenomarker. Noteer welk referentiemateriaal is gebruikt voor de bepaling van de plaatsingsdiepte en maak er een foto van.	
	Registreren van afwijkingen: K. lengte-effect van eventueel niet volledig vastgeschroefde sondeerstangen [cm] L. niet 100 cm lange stangen of bij getaperde draadsoorten zonder duidelijke aanslag opmeten totale lengte [cm]	
	<b>Plaatsen</b>	
	Probeer de sensorstreng rustig op de bodem van het boorgat te zetten en probeer de sensor in een aantal korte rukken op diepte te krijgen. Verleng de stang indien nodig;	
	Druk de sensor rustig met standaard sondeersnelheid weg. In klei lagen is het soms noodzakelijk om nog rustiger te drukken of regelmatig te stoppen om overbelasting van de druksensor te voorkomen;	
	Houd tijdens het wegdrukken de druk in de sensor in de gaten en vertraag de sondeersnelheid als die buiten het meetbereik dreigt te komen. Als de waarden te hoog worden of ineens snel oplopen dient er te worden gewacht tot deze weer zijn afgenomen (in klei lagen extra goed opletten).	
	Per meter de waarden op het installatieformulier opschrijven als de logger niet wordt gebruikt; Als de einddiepte is bereikt, de waterspanningsmeter even laten stabiliseren en dan de laatste meetwaarde opschrijven	
	Trek de sondeerstang in het geval van verloren plaatsing en houd de hoogte van de kabelmarkeringen in de gaten om terug slepen te kunnen waarnemen en registreer de geconstateerde terugsleeplengte;	
	Grout het gat af of gebruik de overeengekomen / voorgeschreven afdichtingsmethode met zwelkleikorrels.	
	Na plaatsing resterende kabellengte noteren [cm]	
	Na plaatsing stick up vastleggen, Tenzij anders aangegeven moeten de sondeerbuizen circa 1,5 m boven maaiveld uitsteken.	
	Controleer en noteer de meetwaarde direct na plaatsing en 10 minuten na plaatsing op het plaatsingsformulier en rond het plaatsingsformulier af;	
	Locatie afwerken (straatpot, koker, pvc buis, perkoenpalen etc.)	
	Sluit de waterspanningsmeter aan op de aansluitkast volgens de vooraf gegeven codering en noteer op het plaatsingsformulier het kastnummer.	
	Check of de aansluitkabels voldoende speling hebben (WSM in hart ophoging moet de kabel met ruime slingers op de grond worden gelegd en ingegraven, zodat deze niet kapot gereden of getrokken wordt).	
	<b>Site Acceptance test</b>	
	Project informatie / tijd / locatie	
	Instrumenttype, leverancier en systeemtype	
	Minimaal moet de eerste aflezing plaatsvinden, bij voorkeur via het voorbereide data presentatieplatform. Bij het gereedkomen van het meetpunt contact opnemen met de binnendienstmedewerker die de eerste datalevering verifieerd en narekent. Sensor output kan ter plaatse of door een binnendienstmedewerker omgerekend worden.	

## Bijlage D

(informatief)

### Ontluchten waterspanningsmeters

#### Inleiding

In deze bijlagen worden handreikingen gegeven om verschillende typen waterspanningsmeters te ontluchten en voor te bereiden voorafgaande aan het plaatsen hiervan in de grond.

#### Vorbereidende werkzaamheden

##### Ontgassen vloeistof voor vloeistofkamer

Voor het vullen van de vloeistofkamer (en het grondfilter) wordt veelal gebruik gemaakt van water, een glycol/water oplossing of siliconen olie. Voorafgaande aan het vullen van de vloeistofkamer wordt aanbevolen om de vloeistof te ontgassen.

Het ontgassen kan als volgt plaatsvinden:

1. Vacuüm methode voor alle vloeistoffen: De vloeistof wordt in een afgesloten cilinder voldoende lang onder vacuüm geplaatst tot dat er zichtbaar geen bellen meer ontstaan. Voor viskeuzere vloeistoffen als siliconen olie duurt dit beduidend langer dan minder viskeuze vloeistoffen als water.
2. Kookmethode voor water: Het water gedurende 1 minuut te koken en afkoelen in een volle container.
3. Industriële gasstripper voor alle vloeistoffen: Deze methode is kostbaarder en is vaak gericht op specifieke gassen waardoor de noodzaak bestaat te controleren of het water echt ontgast is.

Let op: De gasconcentraties zullen na enkele dagen van blootstelling aan lucht vanzelf weer toenemen. De ontgassing dient dus bij voorkeur maximaal 12 uur voor mobilisatie en plaatsing plaats te vinden.

Controle op gasvrijheid vloeistof “provisorische spuitmethode”:

- De vloeistof gedurende korte tijd bloot stellen aan absoluut vacuüm door ¼ deel gevulde injectiespuit (zonder bellen!!) uit te trekken tot maximale stand.
- Door de spuit in die toestand te schudden wordt in korte tijd vrijwel al het opgeloste gas verleid tot het vormen van bellen.
- Na tien seconden schudden kan de spuit worden losgelaten en het vrijgekomen belletje worden uitgespoten.
- Dit kan enkele keren worden herhaald tot geen noemenswaardige bel meer vrij komt.

##### Ontgassen grondfilters:

De filters voor waterspanningsmeters worden ontlucht door ze ondergedompeld in water, glycerol/water oplossing of siliconen “olie” gedurende een uur bloot te stellen aan een beperkt vacuüm van maximaal 100 mbar absolute druk.

Na het prepareren van de filters worden deze direct geplaatst in de waterspanningsmeter of meegegeven aan de buitendienst in een potje met de ontluchte filters. Uit voorzorg is afsluiten van het potje aan te raden maar het oplossen van gas in de vloeistof kan daarmee niet worden vermeden.

### Werkwijze samenbouw en uitlevering door werkvoorbereider

Het vullen en voorbereiden van waterspanningsmeters wordt bij voorkeur vooraf uitgevoerd, maximaal 24 uur voor plaatsing van de instrumenten in het veld. Goed voorbereide materialen zorgen voor optimale werksnelheid en aandacht voor zorgvuldigheid van plaatsingswerk. In een zeldzaam geval is het onvermijdelijk dat het voorbereiden en vullen van de waterspanningsmeters toch in het veld moet gebeuren, zoals in situaties waarin op verzoek van de klant ter plaatse moet worden gevuld. Met dat doel is hieronder onderscheid gemaakt naar beide situaties.

### Prepareren waterspanningsmeter door werkvoorbereiding

Algemeen / alle waterspanningsmeters:

- Zet het reservoir met ontgaste vloeistof klaar met daarin een ontgast grondfilter en een 20ml injectiespuit gevuld met de vloeistof voor het vullen van de vloeistofkamer ,
- Leg condoom klaar en beschermende zak en (losbare) tie-wrap,
- Houd de waterspanningsmeter met de waterkamer geheel onder water in een geschikte bak zodat alle bellen eruit kunnen ontsnappen,
- Bouw het gehele instrument samen onder water en fixeer de nodige onderdelen,
- Zuig met de spuit nog wat vloeistof aan door het grondfilter of een daarvoor beschikbaar gat om te testen onder druk,
- Schuif het condoom in de bak onder water over de waterspannings-meter,
- Haal de waterspanningsmeter uit het water en bind de behuizing met condoom vast aan de kabelbundel met de tie-wrap,
- M. Doe het geheel met kabel in de beschermzak,
- Verifieer of het sensornummer op de zak staat en noteer de voorbereide status.
- Vlak voor plaatsen moet het zaadreservoir van de condoom worden geknipt.



*Figuur 2, Waterspanningsmeter met 150µm gesinterd stalen grondfilter.*



*Figuur 3. Waterspanningsmeter met 4 kunststof grondfiltertjes (witte stippen) In de schouder achter de punt.*

### Interfets of GeoKon Vibrating Wire of 4-20mA

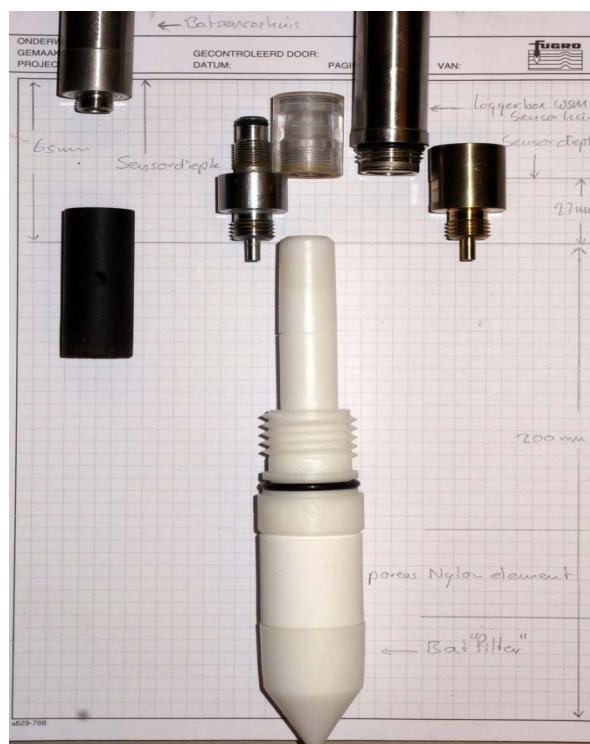
- N. Zet de waterspanningsmeter met de punt omhoog in een standaard,
- Draai de punt los en haal desnoods het oude filter van de waterspanningsmeter af. Een oud kunststof filter moet weggegooid worden.
  - Schuif op de waterspanningsmeter een condoom (teruggeslagen) en plaats een nieuw filter.
- O. Schuif het condoom zodanig omhoog dat het over het filter zit.
- Giet nu in de ontstane ruimte een klein beetje glycerol/wateroplossing of siliconenolie of ontgast water en schroef de punt er stevig op.
- P. Schuif nu het condoom definitief op zijn plaats, zodanig dat het filter volledig is afgesloten.
- Q. Vlak voor plaatsen moet het zaadreservoir van de condoom worden geknipt.

### Waterspanningsmeterbehuizing type BAT

- Uitgangspunt is dat de filtermodules in verzadigde toestand (vacuüm behandeling) onder water in een reservoir liggen,
  - Zuig voorafgaand aan de mobilisatie met een vacuüm cilinder de waterkamer van de filtermodule vol met ontgast water,
- R. Plaats onder water een condoom over de filtermodule en plaats ze eventueel in een emmer water of harington met water,
- S. Plaats de filtermodule op het verloop naar de gewenste stang,
- T. Vlak voor plaatsen moet het zaadreservoir van de condoom worden geknipt.



Figuur 3, Componenten Geokon waterspanningsmeter.



Figuur32, Componenten BAT waterspanningsmeter en sampler.

### **Prepareren waterspanningsmeter in het veld.**

#### **De werkzaamheden zoals hierboven omschreven kunnen ook in het veld worden uitgevoerd zolang:**

- U. Verontreiniging van de vulvloeistof kan worden voorkomen,
- V. Blootstelling van ontgaste instrumenten aan lucht wordt vermeden door direct na vullen een condoom te plaatsen en het zaadreservoir af te knippen.

#### **Hulpmiddelen:**

- W. Injectiespuit 20ml/60ml,
- X. Emmer water,
- Y. 2x Ridgid tang en schroevendraaier set,
- Z. Voorraad (10 liter) recent ontgast of gekookt en afgekoeld water,
- AA. Sleutels of speciaal gereedschap,
- BB. Reserveonderdelen,
- CC. Reserve nummermateriaal/watervaste stift,
- DD. Condooms zonder vet glijmiddel,
- EE. Sortester,
- FF. Reserve filters in ontgaste toestand in vloeistof
- GG. Aansluitstukken sondeerstangen en gasbuizen

#### **TOELICHTING: VOORKOMEN LEEGLOPEN VLOEISTOFKAMER TIJDENS PLAATSING**

*Totdat de sensor in de water-verzadigde grond zit bestaat de kans dat zorgvuldig voorbereide sensoren ineens toch water verliezen en luchtballen toeschieten. Om problemen met gasballen te voorkomen wordt het water ontgast en wordt de sensor na vulling direct geplaatst om gastoetreding te beperken. Het grondfilter is daarbij zeer belangrijk. Sommige waterspanningsmeters hebben grondfilters met een lage luchtintrede-waarde wat als nadeel heeft dat door een abrupte beweging water uit de sensor kan worden gezwiept. Verder dient rekening gehouden te worden met de volgende fenomenen. Door een nat grondfilteroppervlak bloot te stellen aan droge lucht kan het filter oppervlak snel uitdrogen, de lucht in de poriën van het grondfilter kunnen het functioneren van de wsm negatief beïnvloeden. Door de sensor schuin te houden kan een afstromende druppel ontstaan die door hevelen voldoende hard zuigt om de luchtintrede waarde te overschrijden. Vloeistof kan dan uit de vloeistofkamer stromen en gas kan deze ruimte opvullen. Dit leidt direct tot hysteresis, verder kan het gas in de vloeistofkamer na verloop van tijd een meetreeks volledig verstoren.*

*Speciale aandacht moet uitgaan naar de plaatsingsomstandigheden om dit waterverlies te voorkomen. Vooral bij voorgenomen plaatsing middels sonderen is een dikke water-onverzadigde zone riskant tav het leeglopen van een wsm. In de praktijk is gebleken dat de luchtintrede waarde van grove grondfilters snel stijgt als kleilagen of venige kleilagen worden gepasseerd. Deze verhoging van de hoge luchtintrede waarde door versmering is gunstig.*

*Toepassing van een condoom tijdens het vullen met ontgast water voorkomt de meeste problemen. Een condoom zorgt ervoor dat tijdens het inbrengen in een voorgeboord gat en bij het eerste contact tussen het natte grondfilter en droge grond niet gelijk water wordt afgezogen en ballen de vrijgekomen ruimte innemen. Om dit contact met droge grond te vermijden moet worden voorgeboord tot het grondwaterniveau of althans een beperkte afstand daarboven.*

*Condooms breken over het algemeen op de punt zodra de wsm verder de grond ingedrukt wordt. Een risico is dat de condoom kan blijven zitten. In zeer slappe onrijpe klei of slap veen kan het zijn dat de condoom onvoldoende wrijving ondervindt om te breken. De kans hierop wordt minimaal als het zaadreservoir van de condoom af wordt geknipt. Er is dan maar weinig wrijving nodig.*

*Indien een condoom niet breekt leidt dat tot een totale ongevoeligheid voor drukveranderingen in de ondergrond. Dit kan vrij snel worden vastgesteld door direct na plaatsing in het boorgat een hoeveelheid water te storten dat kortdurend leidt tot een lokaal hogere waterspanning. Dit werkt alleen bij ondiepe plaatsing in een boorgat. Een diep geplaatste wsm waarvan de condoom niet is gebroken verraadt zich door een zeer lage barometrische efficiency. Er blijft dan dus luchtdruksignaal over in de tijdreeks, en dat is vaak makkelijk visueel te herkennen aan de reeks. Een alternatief is om een verticale drukkracht op de stang uit te oefenen na plaatsing en te zien of een normale drukpiek optreedt. Indien de waterspanningsmeter grond verdringend wordt aangebracht is het niet breken van een condoom tijdens het aanbrenge eenvoudig vast te stellen op basis van de registratie van de waterdruk tijdens het aanbrenge.*

*Het is vrijwel uitgesloten dat een condoom tot dieper dan een meter over de wsm kan blijven zitten. In een voorkomend geval zal de wsm moeten worden getrokken en na verwijdering van de condoom direct weer in hetzelfde gat worden gedrukt.*



## Bijlage E

(informatief)

### Plaatsen Geopoint waterspanningsmeters en loggerkasten

#### Sensoren

Veel gebruikte sensoren zijn van de 21Yserie van Geopoint Systems bv. De sensoren worden standaard geleverd in 200/500/1000 kPa. De 200 kPa is een “absolute” sensor en de 500 en 1000 kPa’s zijn “relatieve” sensoren. Onder relatief wordt hier verstaan: gecompenseerd voor 1000 mbar druk. Dit houdt in dat de sensor bij een omgevingsdruk van 1000 mbar: 0 V meet. In onderstaande tabel staan de gegevens van deze sensoren aangegeven. Op verzoek kunnen sensoren met een ander drukbereik geleverd worden. In onderstaande tabel staan de specificaties weergegeven. De uitvoer van dit type sensor (spanning, Volt) is afhankelijk van de hele weerstandsketen (kabels, etc.) en is dus niet onafhankelijk van bijvoorbeeld de gebruikte kabellengte.

Tabel 1.1 specificaties waterspanningsmeters

Sensor	Analoge waterspanningsmeter
Type	21 Y van Geopoint systems
Meetbereik	200/500/1000kPa (0-10V)
Meetprincipe	Absoluut (200 kPa) / relatief (500/1000 kPa)
Resolutie (ruisniveau)	nb
Offset nauwkeurigheid	nvt
Temperatuur compensatie	gecompenseerd
Opslag gebruikstemperatuur	-20 ... 80 °C

Tabel 1.2 bedrading waterspanningsmeters type 21Y

Kleur	Functie	Symbool	Bereik
Rood	Voeding	+VCC (+V <sub>supply</sub> )	12-28 V
Wit	Sensorsignaal	VDC (V <sub>out</sub> )	0-10 V
Zwart	Aarde	GND (Ground)	-

Door een spanning groter dan >10 V op de sensor te zetten en de uitgangsspanning middels de signaaldraad weer op te vangen in (V) kan de druk in (mbar) berekend worden. De doorgelaten spanning is afhankelijk van de weerstand die de sensor ondervindt.

De berekening is als volgt

200 kPa sensor: druk P(mbar) = 200 x uitgangsspanning U (V) + nulpuntsafwijking;

500 kPa sensor: druk P(mbar) = 500 x uitgangsspanning U (V) + 1000 + nulpuntsafwijking;

1000 kPa sensor: druk P(mbar) = 1000 x uitgangsspanning U (V) + 1000 + nulpuntsafwijking.

Let op: indien de nulpuntsafwijking positief is wordt deze er vanaf getrokken, als deze negatief is wordt die er bij opgeteld.

De sensor wordt standaard met 10 m kabel geleverd, maar is variabel te kiezen. Daarbij moet rekening worden gehouden dat de meting onnauwkeuriger wordt naarmate de kabel langer wordt. De maximale kabellengte is

niet eenduidig aan te geven. Op basis van ervaring van de leverancier kan deze maximaal 130 m bedragen. Hoe langer de kabel is hoe minder nauwkeurig de meting wordt. Dit komt doordat de kabel ten eerste zelf een weerstand is en ten tweede omdat deze als een soort antenne werkt en daardoor altijd nadelige invloed heeft van signalen buitenaf. Door de kabel bijvoorbeeld door een stalen buis te trekken is die minder gevoelig voor storingen van buitenaf. Mocht je hem ingraven zal hij dus mogelijk net wat beter functioneren. Nadeel daarvan is dat mocht deze langs een zware 30 kV kabel door lopen dit nadelige invloed heeft. Indien kabels worden ingegraven dan het maaiveld markeren en foto's van maken.

Voorwaarde voor de tinsense is wel dat de regel: Exvolt in de settings op 2 staat, dan geeft deze 16 V. Mocht je hem op 3 zetten dan zou die 24 V leveren maar dat is niet nodig tot 130 m. De Ecosense kasten staan standaard op 16 V.

#### **Vooraf testen WSM's**

Vooraf kunnen de WSM's getest te worden in een drukvat. Hierin kunnen gelijktijdig 5 waterspanningsmeters worden geplaatst + 1 referentie drukopnemer. Het drukvat is voorzien van een ventiel. De sensoren worden aangesloten op een loggerkast / meetrek. De druk wordt in stappen opgebouwd. Gelijktijdig wordt de druk middels de referentie drukopnemer en de overige sensoren gemeten en met elkaar vergeleken. Wat over het algemeen opvalt is dat de onderlinge verschillen met elke drukverhoging niet geheel gelijk is. Dit als gevolg van de vooraf ingevoerde kalibratiewaarden.

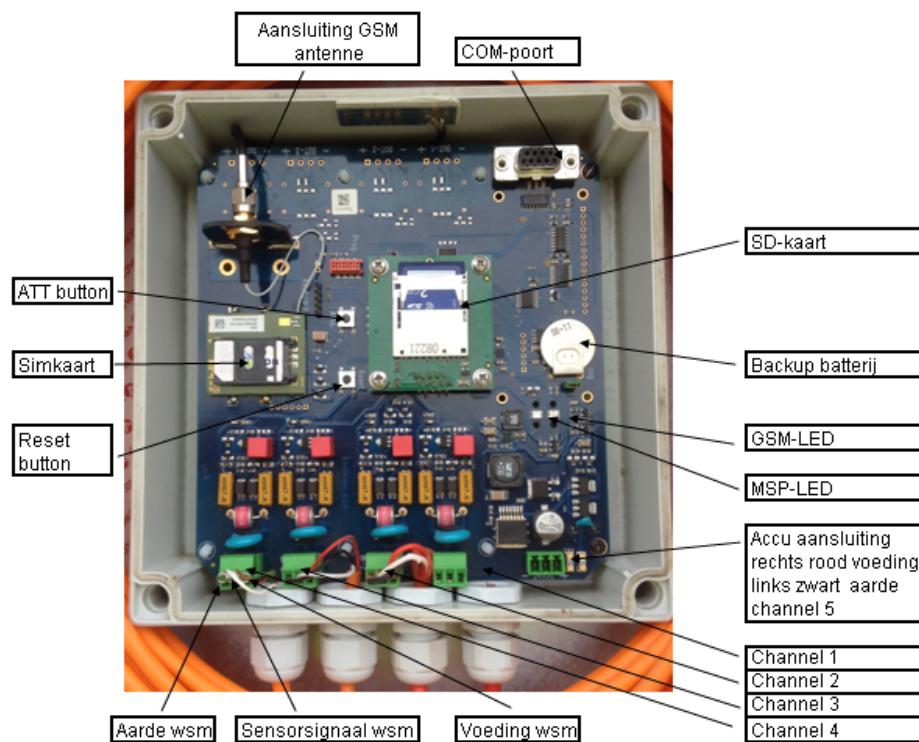
Het testen van de drukopnemers vindt nu alleen plaats voor specifieke projecten waar er om gevraagd is en in het geval waterspanningsmeters zijn terug gewonnen.

#### **Selecteren meetbereik sensoren**

Dit is mede afhankelijk van wijze van plaatsen (handmatig of met sondeerwagen), diepte waarop deze moeten worden aangebracht, maximale ophoging die er op komt. De 2 bars absolute sensoren hebben de voorkeur. Indien een waterdruk van maar dan 10 m wordt verwacht (op basis van bovenstaande gegevens) dan wordt gekozen voor een 5 bars drukopnemer.

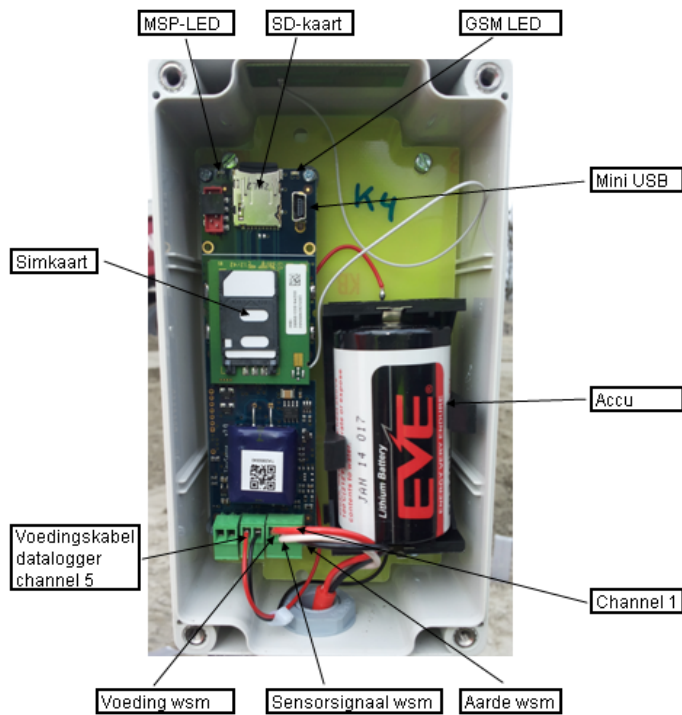
#### **Loggerkast GPE (Geopoint)**

De GPE (Geopoint Ecosense) is geschikt om maximaal vier waterspanningsmeters op aan te sluiten. In onderstaande afbeelding is weergegeven waar de diverse onderdelen voor dienen.



### GPT (Geopoint)

De GPT (Geopoint Tiny Sense) is geschikt om één waterspanningsmeter op aan te sluiten. In onderstaande afbeelding is schematisch weergegeven waar de diverse onderdelen voor dienen.



Na het plaatsen worden foto's van de aansluiting gemaakt waarop labelnummer, kastnummer en aansluiting te zien is, wanneer er geen metingen binnenkomen kan er aan de hand van de foto een aantal zaken afgevinkt worden. Indien 0 V wordt gemeten betekent dit dat er kabelbreuk is of 1 van de kabels niet goed aangesloten is. Bij 10V zijn de kabels verwisseld of is er kortsluiting tussen de kabels. Daarbij dient opgemerkt te worden dat voor de aansluitvolgorde in principe de kleuren volgorde van de batterij kan worden aangehouden. Let goed op met kabels zonder tin laagje. Zorg ervoor dat de koperdraden geen uitsteeksels hebben zodat deze niet in contact kunnen komen met andere kabels).

De N.A.P. hoogte wordt altijd vooraf ingemeten. Aan de hand daarvan wordt de plaatsingsdiepte bepaald. Daarvoor wordt de kabel uitgemeten en gemarkeerd op de benodigde diepte.