



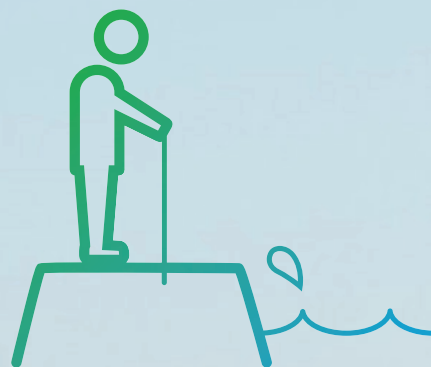
rapportage

Handreiking Meetnetten en Grondwatermonitoring voor Piping

inhoudsopgave



Voorwoord	3
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Piping	5
1.3 Doel	6
1.4 Werkwijze	7
1.5 Leeswijzer	7
2 Voorbereiden	9
2.1 Monitoringsdoel	9
2.2 Karakteriseren van geohydrologisch systeem	10
2.3 Monitoringstechniek	13
2.4 Monitoringsplan	16
3 Inrichten	18
3.1 Grondwatermeetnet	18
3.2 Pompproef	22
4 Onderhouden	25
4.1 Grondwatermeetnet	25
4.2 Pompproef	26
5 Analyseren	27
5.1 Technieken en hulpmiddelen	27
5.2 Valideren monitoringsgegevens	27
5.3 Doorlatendheid (pompproef)	28
5.4 Stijghoogtebepaling	28
5.5 Opbarsten en heave	29
5.6 Terugschrijdende erosie	30
6 Afronden	33
Referenties	34
Bijlagen	
Bijlage A stroomschema monitoringsplan	35
ENW-advies	36
Colofon	39



Voorwoord

Binnen de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-P) worden onderzoeken uitgevoerd om kennis en innovatie te ontwikkelen over het faalmechanisme piping. Deze kennis en innovatie levert een positieve bijdrage in kwaliteit, efficiëntie en kosten aan de ontwerpogave van de versterkingen binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

Deze handreiking is een 'synthesedocument' van de POV Piping waarin bevindingen uit diverse verkenningen zijn samengebracht om deze beter toegankelijk te maken voor de adviespraktijk en de doelgroep: specialisten die meetnetten inrichten, beheren en monitoringsgegevens verwerken en analyseren. De handreiking vormt samen met de andere syntheserapporten, ontwerp- en beoordelingsrichtlijnen en de consequentie-analyse het eindproduct van de POV Piping.

Deze handreiking is tot stand gekomen door een samenwerking tussen Waterschap Rivierenland, Arcadis en de POV Piping. Hiervoor zijn onderzoekers van enkele in deze handreiking gebruikte onderzoeksrapporten geïnterviewd:

- Sieger Burger (Acacia Water)
- Maurits van Dijk (Waterschap Drents Overijsselse Delta)
- André Koelewijn (Deltares)
- Rimmer Koopmans (Arcadis)
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen)

In de interviews zijn praktische ervaringen en aandachtspunten naar voren gekomen die niet in de onderzoeksrapporten zijn opgenomen (de interviewverslagen zijn op aanvraag beschikbaar).

Deze handreiking is door de volgende personen vanuit de POV Piping gereviewd:

- Laura Taal (Waterschap Rivierenland)
- Hans Niemeijer (Arcadis)
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen)
- Henk Weijers (Hoogheemraadschap van Rijnland & programmamanager POV Piping)
- Albert Wiggers (Royal HaskoningDHV & technisch manager voor de POV Piping)

De handreiking is door het Expertise Netwerk Waterveiligheid werkgroep Techniek (ENW-Techniek) beoordeeld, besproken en van commentaar en advies voorzien. De adviezen van ENW-T zijn in deze publicatie verwerkt.

Met de onderzoeken en interviews van de specialisten, de reviews vanuit de POV Piping en het ENW-Techniek, is de inhoud van deze handreiking afkomstig uit een breed werkveld van de sector.

De handreiking is geschreven door Robbert van Montfoort (hoofdauteur; Arcadis) en Albert Wiggers (co-auteur; Royal HaskoningDHV).

Wij bedanken iedereen die heeft bijgedragen aan de totstandkoming van deze handreiking.

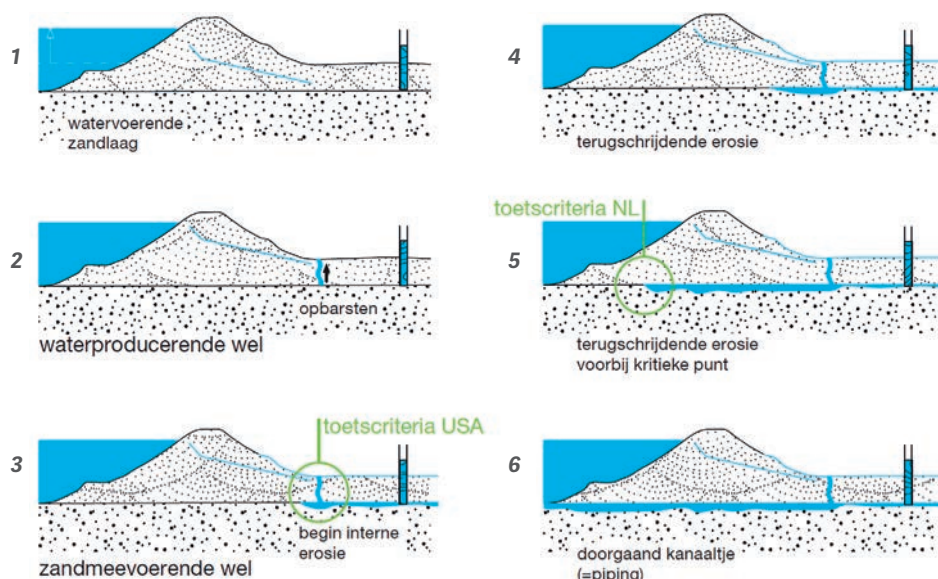


1. Inleiding

In het dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping (POV Piping). Hierin wordt de piping problematiek inclusief oplossingsrichtingen op een landelijk niveau onder de loep genomen. Eén van de aspecten is vergroting van de kennis over de bodem en eigenschappen van grondlagen en in het bijzonder de kennis van het geohydrologisch systeem. De verwachting is dat hierdoor op termijn de benodigde maatregelen om piping te voorkomen, ingeperkt kunnen worden. De vergroting van de kennis wordt binnen de POV Piping bewerkstelligd door verkenningen uit te voeren.

In deze verkenningen worden veldonderzoeken en monitoring uitgevoerd die gebruikt kunnen worden om meer inzicht te krijgen in het geohydrologisch systeem en daarmee in de aandrijvende kracht voor het ontstaan van piping. Met de monitoring kunnen parameterwaarden bepaald worden voor berekeningen, zoals geohydrologische modelberekeningen en analytische of numerieke pipinganalyses, om aan piping gerelateerde vraagstukken te beantwoorden. De theoretische overwegingen en praktische ervaringen van deze verkenningen zijn door de betrokken onderzoekers beschreven in rapportages. De inzichten uit deze verkenningen zijn gebundeld in het **PipingPortaal [20]** en de synthesedocumenten 'Handreiking Grond Onderzoek voor Piping' [19] en het voorliggende synthesedocument 'Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping'. Deze POV-publicaties zijn een aanvulling en deels ook een actualisatie van de beschreven richtlijnen in het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TRWD; [24]). Uit de POV Piping is naar voren gekomen dat samen met geohydrologen een betere systeemanalyse en schematisering tot stand wordt gebracht.

Vanuit de POV Piping is er behoefte aan een praktische handreiking over meetnetten en monitoring gericht op piping. Deze handreiking is tot stand gekomen door een samenwerking tussen Waterschap Rivierenland, Arcadis en de POV Piping.



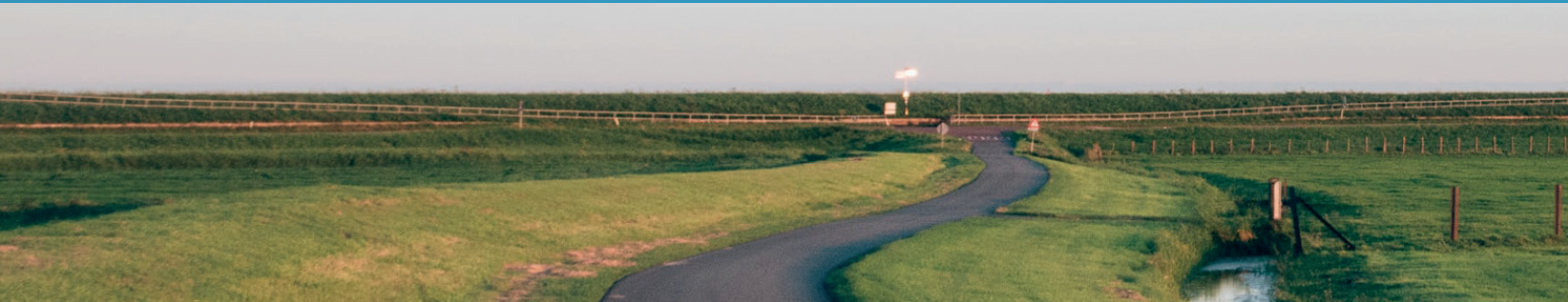
Figuur 1: Verschillende fasen bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie ten aanzien van de ondergrondopbouw bij een dijk [10]

1.2 Piping

Piping is een faalmechanisme bij dijken. Bij hoge buitendijkse waterstanden kan de waterdruk in zandlagen, die in verbinding staan met de rivier of getijdegebied, zo hoog oplopen dat het water binnendijs omhoogkomt ('kwel'). Als de waterdruk groter is dan het gewicht van de deklaag dan zal deze 'opbarsten', waarbij een wel kan ontstaan. Bij voldoende opwaartse druk kan het water zandkorrels vanuit de zandlaag omhoogstuw en op het maaiveld afzetten. Dit wordt 'heave' genoemd. Als er voldoende zandkorrels vanuit de zandlaag worden meegevoerd zal er door (terugschrijdende) erosie onder de deklaag en onder de dijk een kanaal ontstaan, een 'pipe'.

De pipe kan mettertijd in lengte en omvang toenemen waardoor er een verbinding ontstaat tussen het buitenwater (rivier of getijde) en het achterland (binnendijs). Als er geen maatregelen getroffen worden zal de dijk door de erosie kunnen bezwijken (zie Figuur 1).

De beoordeling van de gevoeligheid van dijken voor piping wordt in Nederland volgens de rekenregel van Sellmeijer uit 2011 uitgevoerd [28]. Om de rekenregel van Sellmeijer uit 2011 toe te passen zijn geometrische-, bodemparameters en hydraulische randvoorwaarden nodig, zoals de kwelweglengte, de weerstand in het voorland, de deklaagdikte, reken-



waarden voor zandgrofheid (d_{70} ; korreldiameter) en doorlatendheid (k) en het waterpeil ter plaatse van het uittredepunt van de kwelweg. Deze zogenaamde sleutelparameters hebben directe invloed op het berekeningsresultaat [2].

Veldonderzoek [19] en monitoring worden gebruikt om de parameters te bepalen. Wanneer parameters worden bepaald uit monitoring bij relatief kortdurend hoogwater dan is tijdsafhankelijke monitoring noodzakelijk. Met tijdsafhankelijke monitoring wordt in deze handreiking bedoeld het minimaal ieder uur herhalen en vastleggen van een meting voor een langdurige periode groter dan enkele weken, maanden tot zelfs jaren.

Een belangrijke afgeleide parameter die in de geotechniek en geohydrologie gebruikt wordt om het invloedsgebied van een effect, bijvoorbeeld een hoogwatersituatie of grondwateronttrekking, op de stijghoogte te bepalen is de spreidingslengte of lekfactor (in meter) [24]. Daardoor is de spreidingslengte een bruikbare maat voor het inrichten van een meetnet voor piping. Monitoring buiten het invloedsgebied is namelijk niet zinvol. De spreidingslengte kan vooraf ingeschat worden op basis van geohydrologische materiaaleigenschappen. Als het meetnet eenmaal is ingericht kan vervolgens de spreidingslengte worden vastgesteld uit de stijghoogtemetingen in de peilbuizen [24].

Het karakteriseren of schematiseren van het geohydrologisch systeem aan de hand van de optredende processen en randvoorwaarden, maakt inzichtelijk hoe het meetnet ingericht moet worden om het monitoringsdoel te bereiken. Daarnaast is de keuze van een geschikte rekenmethode (analytische- of numerieke modellen) voor piping-analyse afhankelijk van het geohydrologisch systeem en beschikbare informatie. De randvoorwaarden (invoer parameters), eisen en limitatie van de verschillende rekenmethoden moeten bekend zijn en nageleefd worden door de specialisten die de berekeningen uitvoeren.

1.3 Doel

Het doel van deze handreiking is om de theoretische en praktische overwegingen die een rol spelen bij meetnetten en monitoring van piping in een beknopt document te beschrijven, dat toegankelijk is voor een breed publiek.

De doelgroep van deze handreiking zijn specialisten die tijdsafhankelijke meetnetten inrichten, beheren en monitoringsgegevens verwerken en analyseren. Bijvoorbeeld meetnetbeheerders en specialisten die pipinganalyses uitvoeren in het rivieren- en getijdgebied, zoals veldwerkers, geotechnici/specialisten waterkeringen en geohydrologen van waterschappen, Rijkswaterstaat en/of veldwerk- en adviesbureaus.

Scope

Tijdens het opstellen van deze handreiking is het inzicht ontstaan dat voornamelijk een praktische handreiking voor tijdsafhankelijke monitoring en meetnetten én inzicht in het analyseren van de meetgegevens gewenst is. Veldonderzoeken en (momentane) veldwaarnemingen zijn voor het doel van deze monitoring buiten beschouwing gelaten. Dit staat beschreven in de 'Handreiking voor het opstellen van een monitoringsplan t.b.v. piping' [6] en 'Handreiking voor een meetnet gerelateerd aan piping' [8] opgesteld door Deltares.

De scope van deze handreiking zijn meetnetten en monitoring gericht op pipinganalyse vanuit het (geo)hydrologische werkveld en invalshoek uit de 'geodriehoek' van POV Piping. De 'geodriehoek', waarbij de kennis, ervaring en inzichten van een geotechnicus/adviseur waterveiligheid, geoloog/fysisch geograaf en geohydroloog worden samengebracht voor het doelgericht bepalen van de onderzoeksstrategie, is beschreven in het **PipingPortaal** [20].

Binnen de scope van deze handreiking zijn de volgende monitorings-technieken onderzocht en beschreven:

1. **Automatische drukopnemers in peilbuizen¹ en piëzometers²;**
Drukopnemers worden in peilbuizen en piëzometers geplaatst voor het meten van de verandering in freatische grondwaterstand, stijghoogte en oppervlaktewaterstand. Hiermee wordt de weerstand of demping/berging in het voorland bepaald.
2. **Pompproeven³**
Bij pompproeven wordt de doorlatendheid (k) van de bodem afgeleid, die gebruikt wordt bij de bepaling van de gevoeligheid van dijken voor piping volgens de rekenregel van Sellmeijer [21].

De freatische grondwaterstand wordt ook het freatisch vlak genoemd. Voor de leesbaarheid van deze handreiking wordt met de grondwaterstand de freatische grondwaterstand, oftewel het freatisch vlak bedoeld.

¹ Peilbuizen: 'Dit zijn ondiepe peilbuizen die een stijghoogte meten die weinig van de freatische grondwaterstand afwijkt' [23]

² Piëzometers: 'Dit zijn peilbuizen die de stijghoogte meten in diepere bodemlagen' [23]

³ Voor pompproeven wordt een meetnet opgesteld waarbij de grondwaterstand en stijghoogte over een periode van 1 tot 2 weken wordt gemonitord. Vanwege de relatief langdurige monitoringsperiode is veldonderzoek door pompproeven binnen de scope van deze handreiking opgenomen.



Overige meettechnieken (niet in deze handreiking)

Voor overige meettechnieken die, vanuit de doelstelling, niet in deze handreiking zijn beschreven wordt verwezen naar de uitgebreide basisdocumenten op pov-piping.nl, de verkenningen in het **POV PipingPortaal [20]** en de referentielijst achter in dit rapport (zie 'Referenties'). In het geohydrologische werkveld van de pov Piping zijn in de onderzoeksrapporten en interviews voor deze handreiking te weinig informatie en aanvullende aandachtspunten naar voren gekomen om de volgende overige technieken te beschrijven:

- **Waterspanningsmeter**

Vanuit het geotechnische werkveld worden waterspanningsmeters ingezet voor stabiliteitsmetingen en stabiliteitsmonitoring. Waterspanningsmeters zijn een minder kostbaar alternatief voor peilbuizen en piëzometers. In het geohydrologische werkveld zijn waterspanningsmeters minder gebruikelijk. Een bezwaar is dat controle metingen niet mogelijk zijn. Meer informatie is onder andere beschreven in [\[6\]](#) [\[8\]](#).

- **Temperatuur- en geleidbaarheidsmeting** Temperatuur en geleidbaarheid kan continu gemeten worden in automatische drukopnemers en temperatuur met glasvezelkabels. Wanneer continu kwel optreedt variëren de temperatuur en de geleidbaarheid nauwelijks. Daar waar soms sprake is van kwel en soms sprake is van inzijging van regenwater, is de variatie in temperatuur en geleidbaarheid van het grondwater veel groter [\[1\]](#). Hiermee kan meer inzicht verkregen worden in de grondwaterstroming en het detecteren van wellen. Meer informatie is onder andere beschreven in [\[1\]](#) [\[6\]](#).

- **Infiltrometer**

Voor geotechnische en geofysische metingen en het uitvoeren van infiltrometerproeven voor het lokaal meten van de weerstand van de deklaag wordt verwezen naar [\[19\]](#).

- **HPT-Sondering & MPT-mini-pompproeven**⁴ Sommige veldonderzoeksbureaus voeren HPT-sonderingen (Hydraulic Profiling Tool) en (A)MPT-mini-pompproeven (Anisotrope Mini-Pumping Test) uit. Hiermee kunnen de relatieve doorlatendheid (HPT), doorlatendheidsanisotropie, absolute doorlatendheid en specifieke bergingscoëfficiënt worden berekend (AMPT of MPT). Dit zijn (momentane) veldwaarnemingen die voor het doel van deze monitoring buiten beschouwing zijn gelaten. Voor meer informatie wordt verwezen naar [\[19\]](#) en de 'Verkenning doorlatendheid'⁵.

1.4 Werkwijze

Deze handreiking is opgesteld aan de hand van beschikbare informatie uit de onderzoeken en rapporten die zijn opgenomen in de referentielijst (zie 'Referenties'). Daarnaast zijn interviews uitgevoerd met enkele onderzoekers om aanvullende parate kennis te verzamelen. De vorm en inhoud van deze handreiking is gebaseerd op het proces dat doorlopen wordt bij het opstellen van een meetnet:

1. Voorbereiden
2. Inrichten
3. Onderhouden
4. Analyseren
5. Afronden

In het 'Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen' [\[23\]](#) is door Stowa een beschrijving van beschikbare technieken en methoden voor grondwatermonitoring gegeven. In deze handreiking is ervan uitgegaan dat deze informatie bekend is bij de lezer. Deze handreiking is dan ook vooral gericht op aanvullende aandachtspunten en technieken die ingezet worden voor monitoring van piping en voor piping-onderzoek.

1.5 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport volgt de hierboven beschreven stappen. Bij het opstellen van deze handreiking is ernaar gestreefd om een compleet en leesbaar rapport op te stellen voor een breed publiek. Hierbij is vooral aandacht gegeven aan de praktische aspecten van de onderwerpen. Voor meer detail en een nadere toelichting verwijzen we allereerst naar de uitgebreide basisdocumenten op pov-piping.nl, de verkenningen in het **POV PipingPortaal [20]** en de referentielijst achter in dit rapport (zie 'Referenties').

⁴ www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/hpt-sondering-met-mpt-mini276830

⁵ www.pov-piping.nl/content/tussentijdse-resultaten-verkenning-doorlatendheid.html



2. Voorbereiden

Bij het voorbereiden van het opzetten van een meetnet gericht op monitoring voor piping is het belangrijk om het monitoringsdoel en -strategie vast te leggen [6] [8]. Voordat een meetnet ingericht kan worden moeten geohydrologische randvoorwaarden opgesteld worden. In een bureaustudie (systeemanalyse) kan veelal gebruik gemaakt worden van bestaande informatie voor het karakteriseren van het geohydrologisch systeem. Hieruit volgt welke monitoringstechniek geschikt is om antwoord te geven op het monitoringsdoel. Door deze informatie vast te leggen in een monitoringsplan zijn de uitgangspunten helder en kan het meetnet doelmatig ingericht, onderhouden en eventueel bijgesteld worden.

2.1 Monitoringsdoel

Het monitoringsdoel bepaalt de randvoorwaarden waaraan een meetnet moet voldoen. Maak het monitoringsdoel helder en concreet en bepaal de benodigde betrouwbaarheid en nauwkeurigheid. Voor pipinggerelateerde vraagstukken zijn de volgende monitoringsdoelen gangbaar:

1. Parameterbepaling voor het bepalen van de piping gevoeligheid

De sleutelparameters voor de rekenregel van Sellmeijer [21] die door (geo)hydrologische monitoring zijn af te leiden zijn de kwelweglengte⁶, de doorlatendheid van het watervoerend zandpakket en de grondwaterstand/stijghoogte/polderpeil.

2. Nader inzicht in geohydrologisch systeem

Monitoring draagt bij aan kennis, inzicht en begrip van optredende processen en de werking van het geohydrologisch systeem. Bijvoorbeeld rondom het functioneren van wellen, het aanwezig zijn of ontbreken van een deklaagweerstand [1], de introdeweerstand van het voorland [3] [5] en het effect van tijdsafhankelijkheid op de stijghoogte in het watervoerend pakket in getijdegebied [25].

3. Waarschuwingssysteem voor piping

Monitoring maakt ook deel uit van het controlesysteem van pipingmaatregelen zoals filter- en drainagetechnieken. Dit is o.a. beschreven in referenties [6] [8] [21] en [26]. De controlesystemen voor dergelijke technieken zijn nog in ontwikkeling. Een beschrijving van monitoring voor dit specifieke doel is buiten beschouwing van de handrei-

king gelaten.

Afhankelijk van het monitoringsdoel zijn verschillende monitoringsstrategieën mogelijk [6] [8]. Voor parameterbepaling kan veelal volstaan worden met een kortere monitoringsperiode. Bijvoorbeeld 1-4 weken bij een pomp-proef [2] [4] of tot 1-2 maanden voor het vaststellen van verhoogde gemiddelde waterstand in getijdegebieden [25]. Voor effectmonitoring tijdens hoogwater is doorgaans een langere monitoringsperiode van meerdere maanden of zelfs jaren vereist, omdat de hoogwatersituatie moeilijk is te voorspellen. Ook is het inrichten van een meetnet voorafgaand of tijdens een hoogwatersituatie niet mogelijk en 'te laat' voor het monitoringsdoel.

Als het geohydrologisch systeem onvoldoende in beeld is te brengen met bestaande informatie, is aanvullend onderzoek nodig. De benodigde betrouwbaarheid en nauwkeurigheid maar ook de complexiteit of eenvoud van het geohydrologisch systeem bepaalt het aantal meetpuntlocaties. Door het goed beschrijven en in beeld brengen van de geohydrologische situatie, kan beoordeeld worden of piping onderzoek (nog) nodig is. In paragraaf 2.2 is nader ingegaan op het karakteriseren van het geohydrologisch systeem op basis van reeds beschikbare informatie.

In Hoofdstuk 3 is beschreven hoe meetnetten ingericht moeten worden, daar is ook een aanbeveling gedaan voor het aantal meetlocaties in een meetraai.

Waarschuwingssysteem voor piping (niet in deze handreiking)

Dijktracés die gevoelig zijn voor piping kunnen uitgerust worden met een meetnet die waarschuwen als een signaalwaarde of kritische grenstoestand wordt bereikt [8]. Het waarschuwingssysteem alarmeert een persoon die vooraf vastgestelde maatregelen treft. De grenswaarden, maatregelen, terugvalscenario (noodmaatregel) en bijbehorende tijden/planning worden vastgelegd in een monitoringsplan. De controlesystemen voor dergelijke technieken zijn nog in ontwikkeling.

Omdat piping een zeer lokaal fenomeen is, is deze monitoring vooralsnog gericht op een bestaande wel in het achterland [1]. Ook werkt Waterschap Rijn en IJssel aan een duurzaamheidsonderzoek met meetnetten om de werking van een Vertikaal Zanddicht Geotechniek op langere tijd te controleren. Ook bij het uitstellen van fysieke pipingmaatregelen (zie paragraaf 8.3 in het **PipingPortaal** [20]), kan het inrichten van een goed meetnet van belang zijn om de pipingveiligheid bij een hoogwaterpassage goed te kunnen vaststellen. Ter ondersteuning van de tijdsafhankelijke monitoring kunnen driedimensionale modellen op termijn ingezet gaan worden bij een waarschuwingssysteem voor piping.

De interpretatie hiervan behoort tot het vakgebied van de geohydroloog of de geotechnicus met specialisatie in grondwaterstromingsmodellen [20].

⁶ Op basis van stijghoogtemeting in meetraaien bij hoogwaterpassages is een weerstand van het voorland en achterland af te leiden.

Bij het schrijven van deze handreiking is te weinig praktische informatie beschikbaar voor een doelmatige beschrijving van langdurige tijdsafhankelijke monitoring als waarschuwingssysteem voor piping. De praktische toepasbaarheid van een waarschuwingssignaal op basis van 'hightech' monitoring (bijv. temperatuur of waterspanningsmetingen) is vooralsnog van een beperkte meerwaarde beoordeeld [6]. Voorbeelden van tijdsafhankelijke monitoring voor een waarschuwingssysteem voor piping zijn:

- **Temperatuur en geleidbaarheid**

Op basis van continue temperatuur- en geleidbaarheidsmetingen kan een eventuele verandering van kwelwater gedetecteerd worden [1], wat op zijn beurt weer kan wijzen op de ontwikkeling van piping. Temperatuur en geleidbaarheid kan continu gemeten worden in automatische drukopnemers en temperatuur met glasvezelkabels.

- **Grondwaterstand en stijghoogte**

Op basis van vooraf bepaalde grenswaarden voor de buitenwaterstand, grondwaterstanden en/of stijghoogten kan een waarschuwingssysteem ingericht worden.

2.2 Karakteriseren van geo-hydrologisch systeem

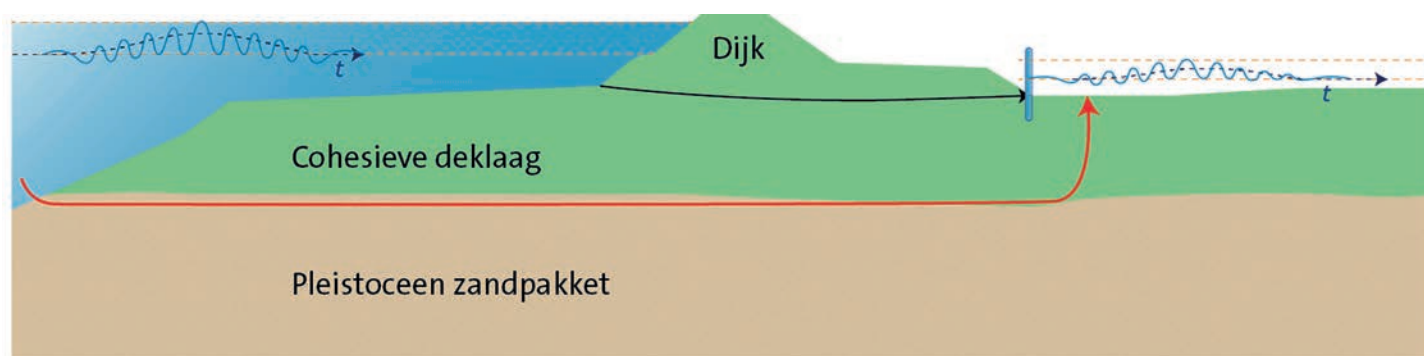
De eerste stap om te komen tot een onderzoeksstrategie voor het inrichten van meetnetten is het uitvoeren van een bureaustudie/systeemanalyse waarin informatie wordt verzameld over het geohydrologisch systeem. Het gaat hierbij om de werking van het (grond)watersysteem en de interactie tussen het oppervlaktewater en grondwater. Dit kan op verschillende detailniveaus waarbij alle relevante (geo)hydrologische karakteristieken worden benoemd. In het **PipingPortaal [20]** is beschreven welke aspecten in deze bureau-

studie moeten worden onderzocht voor het mechanisme piping. Bij het karakteriseren worden de optredende processen en randvoorwaarden inzichtelijk die van belang zijn om het monitoringsdoel te bereiken en het meetnet in te richten. In eerste instantie kan gebruik worden gemaakt van veelal openbare bronnen (Tabel 1). In Nederland zijn veel regionale (geohydrologische) modellen beschikbaar waarin veel informatie is verwerkt. Het raadplegen van (lokale) deskundigen zoals een (geo)hydroloog, geotechnicus en fysisch geograaf is essentieel.

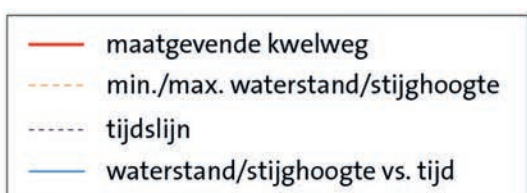
Karakteristiek	Toelichting	Bronnen (niet uitputtend)
Maaiveld en landgebruik	Maaiveldhoogtes, topografie en landgebruik geven inzicht in het type terrein en ruimtegebruik.	www.ahn.nl ; www.topotijdreis.nl , www.kadaster.nl , www.pdok.nl , www.atlasleefomgeving.nl , www.nationaalgeoregister.nl ,
Bodem en ondergrond	Boringen, sonderingen en ondergrondmodellen geven inzicht in de bodemopbouw, deklaag, watervoerende en waterscheidende lagen en indicatieve parameterwaarden.	www.dinoloket.nl , www.nhi.nu , WBI-SOS (D-Soil Model), www.bodemdata.nl , www.bodemenondergrond.nl
Grondwater	Gemeten grondwaterstanden en stijghoogten geven inzicht in de grondwaterdynamiek en eventuele samenhang met oppervlaktewaterstanden/getijde.	www.dinoloket.nl , www.grondwatertools.nl , www.vitens.lizard.net , waterschappen/hogheemraadschappen
Oppervlaktewater en getijde	Waterpeilen en getijde zijn de stressfactoren van piping. Historische en maatgevende waterstanden, in combinatie met maaiveldhoogte geven inzicht in locaties waar de meetinstrumenten veilig geplaatst kunnen worden.	www.rijkswaterstaat.nl/water , waterschappen/hogheemraadschappen

Tabel 1: Open bronnen voor karakteriseren van het geohydrologisch systeem





Figuur 2: Geohydrologische dwarsdoorsnede en tijdsafhankelijke waterstanden/stijghoogten [20].



De resultaten van deze bureaustudie en de daaruit volgende onderzoeksstrategie worden vastgelegd in een document, dit kan op verschillende detailniveaus. De bureaustudie kan worden vastgelegd in een aantekening, een 'factsheet'/memo of monitoringsplan, een geografisch informatiesysteem (GIS-omgeving) of zelfs in een 3D-modelomgeving. De precieze uitwerking hiervan is sterk afhankelijk van het schaalniveau dat het monitoringsdoel vraagt. De bureaustudie van het geohydrologisch systeem geeft inzicht in:

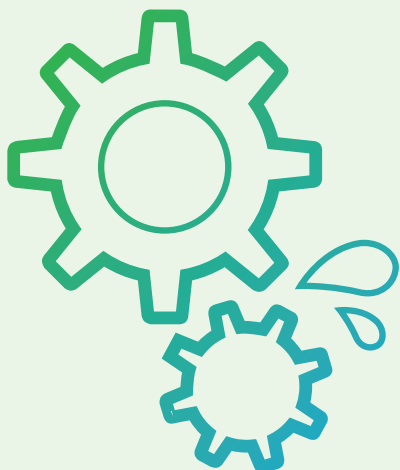
- **Het maaiveldverloop** vanaf het voorland (buitendijks), het dijklichaam en het achterland (binnendijks). Met de optredende rivierwaterstanden/getijde en grondwaterstanden/stijghoogten ten opzichte van het maaiveld wordt afgeleid onder welke omstandigheden kwel en infiltratie optreedt (zie o.a. [1]).
- **De topografie, fysische geografie en geologie van het landschap** waaronder het landgebruik en ontstaansgeschiedenis. De historische topografie en fysische geografie geven inzicht in de vorming van het landschap. Hiermee kunnen bijvoorbeeld oude rivierbeddingen en afzettingen in beeld gebracht worden. De huidige topografie geven inzicht in het landgebruik en de begroeiing. Het raadplegen en betrekken van een fysisch geograaf en geoloog bij de bureaustudie geeft extra inzicht in de ontstaansgeschiedenis van het landschap en levert belangrijke aandachtspunten op voor de inrichting van het meetnet (zie o.a. [1][2][6][8][19][20][25]).
- **De geohydrologische bodemopbouw** ter plaatse van de onderzoekslocatie. Voor monitoring van piping is de locatie en het aantal meetpunten sterk afhankelijk van de bodemopbouw. Bij een homogene bodemopbouw kan doorgaans volstaan worden met minder meetpunten dan bij een sterk heterogene bodemopbouw. Bij voorkeur wordt de bodemopbouw inzichtelijk gemaakt met lokale boringen en/of sonderingen. Ondergrondmodellen zijn doorgaans

voor regionale doeleinden opgesteld. Piping is een lokaal proces. Ondergrondmodellen worden bij voorkeur alleen ter ondersteuning van de bureaustudie gebruikt in combinatie met lokale boringen en/of sondeergegevens. In de beschrijving van de bodemopbouw moet vooral aandacht gegeven worden aan de aanwezigheid van:

- een weerstand biedende deklaag in het voorland;
- het watervoerend pakket dat het voorland met het achterland verbindt;
- de piping-gevoelige zandlaag/zandlagen, en;
- de deklaag in het achterland.

Om de situatie goed in beeld te brengen kunnen meerdere representatieve geohydrologische dwarsprofielen en geotechnische lengteprofielen opgesteld worden (zie Figuur 2). Bij een hoge heterogeniteit van de ondergrond/bodem en/of variatie in het landschap, bijvoorbeeld in een bocht van een rivier, kunnen 3D-modellen van meerwaarde zijn.

- **Het type oppervlaktewatersysteem.** Bijvoorbeeld rivier- of getijdegebied buitendijks en polder- of vrij afwaterend gebied binnendijks. Ook bermsloten en overige ontwateringssysteem zoals (buis)drainage hebben invloed op de grondwaterstand en/of stijghoogte in het achterland.
- **De beschikbare monitoring en hoe het oppervlakte- en grondwatersysteem reageren** onder verschillende omstandigheden (rivier/getijde en neerslag/verdamping). Dit is belangrijk om te bepalen hoe de monitoring van piping ingericht moet worden. Bijvoorbeeld de boven- en ondergrens van de meetwaarden zodat de meetinstrumenten daarop ingesteld kunnen worden [8][25].



Aanvullend veldonderzoek

Afhankelijk van het monitoringsdoel, de beschikbare gegevens en informatie en de complexiteit van het (grond)watersysteem kan met aanvullend veldwerk de systeembekendheid worden vergroot om het meetnet correct in te richten. Sonderingen zijn een kosteneffectieve onderzoeksmethode om de bodemopbouw beter in beeld te brengen. In de POV publicatie 'Handreiking Grondonderzoek voor piping' [19] worden concrete aanbevelingen gedaan voor een bij piping passend grondonderzoek. Voor aanvullend geohydrologisch onderzoek kunnen de volgende tussenafstanden ten opzichte van de kruin worden gebruikt [25]:

- Buitenberm : 100 m (alleen als buitenwaartse stabiliteit een issue is)
- Kruin: 50 m (in geval van zand op zand situatie 50 m anders 100 meter)
- Binnenteen: 100 m (als opbarsten relevant is dan 50 meter)
- Achterland: 100 m (indien mogelijk)

Bovengenoemde tussenafstanden zijn bepaald voor het getijdgebied maar kunnen ook in het rivierengebied gehanteerd worden. Als alternatief kunnen ook de aangegeven afstanden in paragraaf 3.1 (Tabel 2) aangehouden worden.

Ondergrondgegevens en ondergrondmodellen

Bij de bureaustudie wordt gebruik gemaakt van bestaande ondergrondgegevens en -modellen. Deze databases en modellen zijn afhankelijk van aanvullingen, eventuele correcties en toelieferingen door derden. Het aanvullen, corrigeren en toelieveren van aanvullende gegevens en informatie wordt veel over het hoofd gezien. In Hoofdstuk 6 is deze stap als aandachtspunt opgenomen bij de afronding van de monitoringsopgave.

Aandachtspunten bij de bureaustudie

- De heterogeniteit van de ondergrond/ bodem kun je nooit volledig in kaart brengen. Maak daarom zo veel als mogelijk gebruik van bandbreedtes. Wees pragmatisch.
- Veel bestaande peilbuizen en monitoringsgegevens zijn soms niet openbaar beschikbaar of bekend. Doe dan ook altijd, indien van toepassing, navraag bij overige instanties zoals gemeenten, provincies, waterschappen, Rijkswaterstaat, ProRail, drinkwaterbedrijven.
- Laat altijd een sondering uitvoeren op de locatie waar een peilbuis geplaatst gaat worden. Hierdoor weet je hoe diep je moet boren en welke filterstelling je moet inrichten. Tijdens een boring is dit veel lastiger vast te stellen. In Hoofdstuk 3 zijn voorbeelden gegeven van te hanteren peilbuislocaties.



2.3 Monitoringstechniek

Voor de monitoring van piping worden veel meettechnieken ingezet, zie onder andere [8]. Vanuit de doelstelling van deze handreiking zijn in deze paragraaf aandachtspunten voor (langdurige) geohydrologische monitoringstechnieken voor piping beschreven. Dit zijn:

- **Grondwatermeetnet*** voor het monitoren van de grondwaterstand, stijghoogte, oppervlaktewaterpeil en temperatuur;
- **Pompproef** voor het bepalen van bodemdoorlatendheden ('sleutel parameters') en bergingsparameters (voor modelberekeningen [5]).

* grondwaterstanden, stijghoogten en oppervlaktewaterpeil kunnen automatisch en handmatig gemeten worden. Voor langdurige monitoring voor piping is handmatige monitoring niet geschikt vanwege de hoge meetfrequentie die vereist is. Handmatige metingen zijn wel nodig voor de verwerking en validatie van de automatisch geregistreerde metingen door drukopnemers.

Technieksheets

In referentie [19] en in de bibliotheek van de Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit zijn technieksheets⁷ opgenomen waarin algemene- en gebruikersinformatie van deze (en andere) monitoringstechnieken overzichtelijk zijn weergegeven.

Telemetrie

Voor de monitoring van een grondwatermeetnet en een pompproef kunnen de meetgegevens vanuit het veld via telecommunicatie verzonden worden naar een database die online te raadplegen is. Het voornaamste voordeel van een telemetrisch meetnet is dat de monitoringsgegevens extern (buiten het veld) worden opgeslagen waardoor verlies van data beperkt wordt (back-up). Ook kan met automatische validatie en periodieke controle van de verzonden data eventuele defecten tijdig opgemerkt worden. Een belangrijk aandachtspunt bij het gebruiken van telemetrische systemen is dat een persoon verantwoordelijk is voor het periodiek raadplegen, controleren en valideren van de meetreeksen. Dit wordt vastgelegd in het monitoringsplan. Om goede werking te garanderen dient een telemetrische locatie even frequent bezocht te worden als een niet-telemetrische locatie [23]. Vooral bij langere monitoringsperiode (rivieren-gebied) en pompproeven is telemetrie van meerwaarde. Uit kostenoverweging kan besloten worden om een meetnet deels met telemetrie uit te rusten.



⁷ www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken

Grondwatermeetnet

Een grondwatermeetnet bestaat uit peilbuizen die uitgerust zijn met automatische drukopnemers. Drukopnemers zijn dataloggers⁸ die de (water)druk boven een sensor registreren en de verandering in waterdruk boven deze sensor per tijdseenheid (monitoringsfrequentie) vastlegt. De monitoringsfrequentie voor piping is afhankelijk van het monitoringsdoel. Bij de te kiezen frequentie moet niet alleen rekening gehouden worden met de frequentie benodigd voor de analyse, maar ook de frequentie die nodig is om eventuele storingen/fouten op te sporen. Op basis van de ervaringen uit piping-onderzoek zijn de volgende frequenties als vuistregel aan te houden:

- 1 tot 5 minuten bij pompproeven [3][4] en 10 minuten bij piping monitoring in getijdengebied [25]. Door de hoogfrequente verandering van de waterdruk bij getijdeveranderingen en pompproeven is een hogere monitoringsfrequentie aanbevolen. Door de relatief kortere monitoringsperiode van deze piping onderzoeken (< 1 jaar) is de data-opslag van de drukopnemers bij deze frequentie meer dan voldoende;
- 30 minuten bij piping monitoring in het rivierengebied van de waterdruk en temperatuur bij een maximale monitoringsperiode van circa 1 jaar;
- 60 minuten bij piping monitoring in het rivierengebied van de waterdruk, temperatuur en eventueel geleidbaarheid bij een maximale monitoringsperiode van circa 2 jaar.

Drukopnemers worden in peilbuizen en piëzometers geplaatst voor het meten van de verandering in grondwater-, stijghoogte- en oppervlaktewaterdruk. Om een betrouwbare⁹ verandering in waterdruk die een drukopnemer registreert te verkrijgen moet een compensatie voor de luchtdruk worden uitgevoerd. Hiervoor kunnen de volgende methoden gebruikt worden:

- Plaatsing van een drukopnemer op een veilige plek ('hoog en droog') in de buitenlucht voor het registreren van de luchtdruk (barometrische druk);
- Dataloggers uitgerust met een luchtdruk sensor ('luchtdruk gecompenseerde drukopnemer') maken een aparte datalogger voor de luchtdruk meting overbodig;
- Gebruik van luchtdrukmetingen van KNMI-meteostations.

Voor piping-onderzoeken zijn dataloggers uitgerust met een luchtdruk sensor vaak minder geschikt omdat de peilbuislocatie bij hoogwater kan overstromen. Hierdoor is dit type drukopnemer gevoeliger voor storingen en fouten in de monitoring.

Aandachtspunten bij automatische drukopnemers

- Zorg tijdig voor toestemming voor betreding van de meetpuntlocaties
- Voer altijd een proefboring en/of sondering uit op de plek van het beoogde watervoerend pakket om eventuele filterstellingen van peilbuizen te bepalen.
- De automatische drukopnemers moeten voor plaatsing gekalibreerd en ontlucht worden. Hierdoor wordt voorkomen dat verkeerde metingen gebruikt worden voor de interpretatie en analyse.
- Luchtdichte afwerking van de peilbuis om eventuele hogere grondwaterstanden/stijghoogten te kunnen registreren. Dit kan door peilbuizen af te doppen met een schroefdop.
- Hou bij voorkeur minimaal 2 m zandvang aan. De lengte van de zandvang is afhankelijk van de voorziene levensduur en onderhoudsfrequentie van de peilbuis.
- Raadpleeg altijd de handleiding en specificaties van de automatische drukopnemers voor een juiste toepassing. Hou hierbij ook rekening met de maximale opslagcapaciteit en het meetbereik (waterdruk) waar de

datalogger over beschikt. Raadpleeg ook of de drukopnemer geschikt is voor brak/zout water en eventuele verontreinigingen.

- Het risico op ontoereikende monitoring voor piping is bij riviermetingen groter dan bij getijde monitoring. Dit is omdat bij monitoring langs rivieren de periode niet ieder jaar een sterk verhoogde rivier afvoer optreedt waarbij de uiterwaarden onderlopen (seizoenen, jaren). Daarom moet er in het rivierengebied bij voorkeur ook direct aan de rivier worden gemeten.
- Vooraf bepalen op welke manier de meetgegevens gecompenseerd worden voorkomt problemen bij de verwerking en interpretatie van de monitoring. Bij het gebruik maken van een aparte luchtdrukmeting (aparte datalogger of KNMI-meting) is er een 2x zo groot risico op meet-afwijkingen [23]. Bij luchtdruk gecompenseerde drukopnemers moet de diepte waarop de drukopnemer wordt gehangen vooraf bekend zijn vanwege de vaste kabellengte, en mag de luchtdruksensor niet onder water komen te staan.

⁸ www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/datalogger

⁹ Om veranderingen (trends) te meten is een compensatie voor de luchtdruk niet noodzakelijk. Zonder compensatie van de luchtdruk bevat de meetreeks 'ruis' die de toepasbaarheid beperkt en de interpretatie bemoeilijkt en foutgevoelig maakt. Compensatie van de meetreeks voor de luchtdruk wordt daarom sterk aanbevolen.

Pompproef

Bij pompproeven¹⁰ wordt grondwater uit het watervoerend pakket onttrokken. Het uitvoeren van een pompproef staat beschreven in NEN-EN-ISO 22282-4:2012¹¹. Het onttrokken debiet in relatie tot de reactie van de stijghoogte in het watervoerend pakket geeft de mogelijkheid om een doorlatendheid en bergingscapaciteit af te leiden. De doorlatendheid van de bodem is een 'sleutelparameter' in de berekening van piping. Een nauwkeurige registratie van het onttrokken debiet per tijdseenheid en de verandering in grondwaterstand/stijghoogte is hiervoor noodzakelijk.

Bij een pompproef zijn meer dan 5 meetpunten en meer dan 1 raai noodzakelijk voor een goede interpretatie van de pompproef. Monitoring van de pompproef vindt plaats in peilbuizen uitgerust met automatische drukopnemers (zie hierboven) en een debietmeter bij de pomp. Voor een goede interpretatie van de pompproef is een representatieve meting van de buitenwaterstand nodig. Hiervoor moet eventueel ook een meetpunt voor het meten van de buitenwaterstand ingericht worden. De aanbevolen monitoringsfrequentie is minimaal 1 meting per minuut of per 5 minuten en de monitoringsperiode van een pompproef is circa 2 weken. Een pompproef bestaat uit drie fasen:

1. Vaststellen van een referentiegrondwaterstand en stijghoogte.
2. De pompproef door grondwater te onttrekken en de verandering in grondwaterstand en stijghoogte te monitoren in combinatie met het onttrokken debiet. Dit kan volgens een 'variabel debiet' en een 'vast debiet' (NEN-EN-ISO 22282-4:2012). Een pompproef met variabel debiet wordt doorgaans gebruikt om het maximale debiet te bepalen voor de pompproef (vast debiet) zonder dat de pompput en meetnet 'droogvalt'.
3. De 'stopproef' ('recovery') waarbij de onttrekking wordt beëindigd en het herstel van de grondwaterstand en stijghoogte wordt gemonitord.

Van elke fase moet worden gecontroleerd of de monitoring de juiste resultaten oplevert om de pompproef te analyseren. Richt bij voorkeur enkele meetpunten uit met telemetrie zodat de grondwaterstand/stijghoogte tussentijds beoordeeld kan worden tijdens de proef, zonder dat daarvoor de automatische drukopnemers uit de peilbuis/piëzometer hoeven te worden gehaald. Hierdoor kunnen eventuele fouten/defecten in de monitoring sneller opgemerkt worden. Door de drukopnemers niet tussentijds te verwijderen wordt de monitoringsreeks niet onderbroken.

Aandachtspunten bij pompproeven

- Zie ook aandachtspunten voor automatische drukopnemers
- Zorg tijdig voor toestemming voor betreding van de pompproeflocatie en eventuele onttrekkings- en lozingsvergunningen bij het waterschap, hoogheemraadschap en/of Rijkswaterstaat.
- Voer altijd een proefboring en/of sondering uit op de plek van het beoogde watervoerend pakket om eventuele filterstellingen van pompputten en peilbuizen te bepalen.
- De debietmeter moet vooraf gekalibreerd zijn. Ook bij een vast pompdebiet van de pomp kan het debiet variëren vanwege de watertoevoer vanuit het watervoerend pakket.
- Zorg voor een beschikbare reserve (gekalibreerde) debietmeter. Bij een defecte debietmeter tijdens de monitoring moet de (gekalibreerde) debietmeter zo snel mogelijk vervangen worden. De oude en nieuwe debietmeterstanden moeten nauwkeurig geregistreerd worden.
- Voor de pomp moet voldoende brandstof beschikbaar zijn tussen de controlemomenten van de proef.
- Zorg voor een beschikbare reserve pomp. Bij het vervangen van een eventuele defecte pomp, moet de vervangende pomp identiek zijn aan de defecte pomp. Hierdoor kan de proef onder gelijke omstandigheden worden voortgezet.
- Registratie van calamiteiten/defecten en uitzonderlijke kenmerken moeten vastgelegd worden in een logboek zodat hiermee bij de interpretatie en analyse van de pompproef rekening kan worden gehouden. Hierdoor wordt voorkomen dat verkeerde conclusies worden getrokken.
- Zorg voor een voldoende ervaren geohydroloog die de pompproef begeleid, mede uitvoert en uitwerkt.

¹⁰ www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/putproef-en-pompproef


¹¹ NEN-EN-ISO 22282-4:2012: Geotechnisch onderzoek en beproeving - Geohydrologische beproeving - Deel 4: Pompproef

2.4 Monitoringsplan

Voor de inhoud van het monitoringsplan kan gebruik gemaakt worden van de onderwerpen, informatie en hoofdstukindeling die in deze handreiking zijn opgesteld. Met het monitoringsplan kan ook een kostenraming opgesteld worden (zie ook [23]). Ook kunnen met het monitoringsplan offertes aangevraagd worden als de werkzaamheden van de monitoring uitbesteed moeten worden.

In de 'Handreiking voor het opstellen van een monitoringsplan t.b.v. piping' [6] is beschreven hoe een monitoringsplan voor piping opgesteld kan worden. In Bijlage A is het stroomschema opgenomen dat specifiek voor monitoring voor piping is gemaakt. Aanvullend hierop zijn de voornaamste aandachtspunten voor een monitoringsplan (meetplan):

- Een heldere en concrete beschrijving van het monitoringsdoel en de vereiste betrouwbaarheid en nauwkeurigheid.
- Een (beknopte)systeemanalyse/bureaustudie en eventueel een plan voor aanvullend veldwerk.
 - De resultaten van aanvullend veldwerk moeten aan de systeem-beschrijving toegevoegd worden.
- Hoe het meetnet moet worden ingericht.
 - Aan de hand van de systeemanalyse en monitoringsdoel worden de (globale) locaties en aantallen van peilbuizen/filterstellingen en pompputten vastgelegd en weergegeven op kaart.
- Welke ruimtelijke ontwikkelingen (bodempopbouw/topografie) kunnen zich of gaan zich tijdens de monitoringsperiode voordoen?
 - Tussen het moment van meten en het beoogde moment waar de berekening betrekking op heeft kunnen de geohydrologische karakteristieken binnen het meetnet wijzigen. Bijvoorbeeld uiterwaardvergravingen, erosie en sedimentatie van sliblagen op de rivierbodem en voorland tijdens extreem hoogwater of erosie door golven in benedenrivieren/kustgebied. Als het om een ontwerp gaat met lange monitoringsperiode, moet een inschatting gemaakt worden van eventuele veranderingen in het voorland, binnen de monitoringsperiode. Op zijn minst een inventarisatie van bestaande plannen en processen.
- Wie draagt de verantwoordelijkheid van het meetnet en voor welke periode?
 - Het monitoringsplan behoort de gehele levenscyclus van het meetnet of de pompproef te beschrijven en de daarbij behorende verantwoordelijkheden gedurende de gehele levenscyclus.
- Welk beheer en onderhoud nodig is en wie dit op welke momenten uitvoert.
 - Bijvoorbeeld het controleren van de zandvang, controlemetingen van peilbuizen, stroomvoorziening/batterijduur van telemetrie, controle van de pompproef (benzine voor de pomp), etc. Dit kan volgens een regulier onderhoudsschema of op basis van automatische meldingen (telemetrie).
- Welke analyse(s) is/zijn voorzien en op welk(e) moment(en) en door wie dit wordt gedaan.
 - Begin met meten onder normale omstandigheden, analyseer de gegevens en beoordeel of een aanpassing van het meetplan en aantal meetpunten nodig is.
- Op welk tijdstip antwoord geven wordt op het monitoringsdoel.
 - In getijdegebieden kan bijvoorbeeld na enkele weken tot maanden voldoende gegevens zijn verkregen om de analyse uit te voeren. In het rivierengebied is dit doorgaans na een bepaalde gebeurtenis (hoogwatersituatie) of monitoring van meerdere seizoenen om de seizoensafhankelijke variatie vast te leggen.
- Een evaluatie van het monitoringsnetwerk
 - Tijdens de monitoringsperiode en uit de monitoring kunnen nieuwe inzichten naar voren komen die een bijstelling van het meetnet noodzakelijk of wenselijk maken. Bijvoorbeeld het aantal meetlocaties, meetfrequentie of aanvullende monitoring. Hiervoor kan bijvoorbeeld de PDCA-cyclus (Plan-Do-Check-Act) toegepast worden.
- Ook wordt in het monitoringsplan vastgelegd hoe het meetnet na de monitoringsperiode wordt afgerond.
 - Bijvoorbeeld of deze wordt beëindigd en opgeruimd of (deels) wordt overgedragen aan anderen. Een meetnet kan eventueel stapsgewijs aangelegd worden.



‘Uit de monitoring kunnen nieuwe inzichten naar voren komen die een bijstelling van het meetnet noodzakelijk of wenselijk maken.’

3. Inrichten

Het inrichten/opzetten van het monitoringsnetwerk/meetnet wordt uitgevoerd aan de hand van het monitoringsplan (zie paragraaf 2.4). Omdat de veldsituatie kan afwijken van de vooraf ingewonnen situatie, is een ervaren uitvoerder van de werkzaamheden vereist. Als de uitvoerder niet of beperkt bekend is met monitoring voor piping is het noodzakelijk dat een piping-specialist de veldwerkzaamheden begeleid.

3.1 Grondwatermeetnet

In het 'Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen' [23] is een praktische beschrijving van inrichten van een grondwatermeetnet en plaatsen van peilbuizen/piëzometers gegeven. In deze handreiking is ervan uitgegaan dat de informatie uit het handboek bekend is bij de lezer.

Locatie en filterstelling

Bij de locatiekeuze voor de monitoring wordt gebruik gemaakt van de systeembeschrijving. Bij grondwatermonitoring voor piping zijn drie primaire locaties te onderscheiden waarover de peilbuizen in een raai¹² op de grondwaterstroming geplaatst moeten worden:

1. Voor de dijk in het voorland

De monitoringslocatie voor de dijk moet zo gekozen worden dat de grondwaterstand/stijghoogte in het watervoerend zandpakket onder het voorland wordt gemonitord.

Bij een afwezigheid van een voorland (bijvoorbeeld in getijdegebied) kan dit meetpunt niet ingericht worden. De afstand tot de buitenteen van de dijk kan gekozen worden tussen de 50 en 100 m [3];

2. Onder de dijk in het watervoerend zandpakket

De stijghoogte in het watervoerend zandpakket wordt bij voorkeur onder de dijk, of in getijdegebied waar een voorland ontbreekt, zo dicht mogelijk bij de buitenteen van de dijk gekozen [25].

3. Achter de dijk in het achterland

De monitoringslocatie achter de dijk moet zo dicht mogelijk bij het (vermoedelijke) uittredepunt gekozen worden. Hiervoor kan een afstand van 50 m uit de binnenteen aangehouden worden [3]. Bij aanwezigheid van een bermsloot aan de binnenteen en bij piping monitoring in getijdegebied kan volstaan worden met een peilbuis aan de bovenkant van het watervoerend zandpakket bij de binnenteen [25].

Een peilbuis plaatsen nabij de zomerdijk kan grote meerwaarde opleveren om het effect van de rivierwaterstand op de grondwaterstand onder 'normale omstandigheden' te monitoren. In de uiterwaarde wordt deze relatie vaak beïnvloed door geulen en de weerstand van een eventueel voorland.

Daarnaast kan het noodzakelijk zijn om de buitenwaterstand van de rivier of getijde te meten als er geen representatief bestaand meetpunt in de nabijheid van de monitoringslocatie is gelegen. Hetzelfde geldt ook voor eventueel oppervlaktewater direct achter de dijk (achterland). Bij de toetsing op piping wordt doorgaans als uitgangspunt gehanteerd dat het polderpeil gelijk is aan het winterpeil uit het peilbesluit. Bij een hoogwater is vanuit beheer bekend dat dit polderpeil niet te handhaven is [26]. Door het polderpeil/slootpeil te monitoren wordt meer zekerheid verkregen in stijghoogteverschillen die optreden.

Spreadingslengte of lekfactor (λ)

De afstand tussen deze drie primaire meetpuntlocaties moeten zo groot mogelijk worden gekozen, zodat het stijghoogteverloop binnen de spreadingslengte (of lekfactor; λ) kan worden vastgesteld (van rivier of getijdewater tot het achterland). Hierdoor worden de verschillen in de metingen beter meetbaar. De spreadingslengte is een maat om het invloedsgebied van een effect, bijvoorbeeld een hoogwatersituatie of grondwateronttrekking, op de stijghoogte te bepalen. Daardoor is de spreadingslengte een bruikbare maat voor het inrichten van een meetnet voor piping. Monitoring buiten het invloedsgebied is namelijk niet zinvol. De spreadingslengte kan vooraf ingeschat worden op basis van geo-hydrologische materiaaleigenschappen [24].

$$\lambda = \sqrt{kDD'/k'}$$

waarin:

k= horizontale doorlatendheid (m/d) van het watervoerend pakket (Pleistoceen)

D= dikte (m) van het watervoerend pakket (Pleistoceen)

k'= verticale doorlatendheid (m/d) van de deklaag (Holoceen)

D'= dikte (m) van de deklaag (Holoceen)

De spreadingslengte kan ook voor het voorland en achterland afzonderlijk bepaald worden. Als het meetnet eenmaal is ingericht kan vervolgens de spreadingslengte worden vastgesteld uit de stijghoogtemetingen in de peilbuizen [24] (zie Paragraaf 5.4).

¹² In sommige situaties, bijvoorbeeld voor de kalibratie van 3D-modellen, is het raadzaam om een netwerk van representatieve peilbuislocaties in te richten. Hiervoor zijn doorgaans meer peilbuizen vereist.

De filters worden bij voorkeur aan de bovenkant van het watervoerend pakket geplaatst. Bij grondwaterstandmetingen in het achterland zonder bermsloot is dit ten minste onder de gemiddeld laagste grondwaterstand, of ook aan de bovenkant van het watervoerend pakket.

Op basis van projecten, verkennende onderzoeken en interviews zijn voor piping-onderzoek diverse afstanden bepaald ('vuistregel'; zie Tabel 2). De afstanden zijn opgesteld met de randvoorwaarde dat er 2 peilbuizen voor de dijk en 2 peilbuizen achter de dijk geplaatst kunnen worden, en optioneel 1 extra meetpunt ter plaatse van het 'kantelpunt' (bij de dijk) zodat dit niet berekend hoeft te worden uit de metingen. Bij getijdewateren is onder de buitenberm doorgaans de meest zeewaarts mogelijke positie. Kennis van de te verwachten respons bij hoogwater-/stormomstandigheden en verwachte spreidingslengte [24] is essentieel om vooraf een goede inschatting te maken.

Locatie	Afstand***	Voorbeeld
'Voor de dijk' **		
Voorland (bij 1 peilbuis*)	<ul style="list-style-type: none"> • halverwege de voorlandlengte 	<ul style="list-style-type: none"> • 75 m
Voorland (bij 2 peilbuizen*)	<ul style="list-style-type: none"> • Op 1/3e afstand van de voorlandlengte • Op 2/3e afstand van de voorlandlengte of maximale afstand tot aan de zomerkade 	<ul style="list-style-type: none"> • 50 m • 100 m
'Onder de dijk'		
Buitenteen (bij 1 peilbuis)	nabij de buitenteen van de dijk of onder de dijk ('kantelpunt')	<ul style="list-style-type: none"> • 0 m
'Achter de dijk'		
Binnenteen (bij 1 peilbuis*)	<ul style="list-style-type: none"> • nabij de binnenteen van de dijk 	<ul style="list-style-type: none"> • 0 m
Achterland (bij 2 peilbuizen*)	<ul style="list-style-type: none"> • nabij de binnenteen van de dijk • halverwege de achterlandlengte 	<ul style="list-style-type: none"> • 0 m • 75 m
<p>* indien mogelijk ** bij getijdewateren is onder de buitenberm doorgaans de meest zeewaarts mogelijke positie. *** de aan te nemen afstand is afhankelijk van de beschikbare ruimte in het voorland, bij de dijk, achterland en de spreidingslengte. Als de spreidingslengte kleiner is dan de afstand van het voorland/achterland, dan kan beter uitgegaan worden van de spreidingslengte. Richting de maximale spreidingslengte wordt het hoogwater-effect dat waargenomen kan worden in de monitoring namelijk steeds kleiner tot nihil.</p>		

Tabel 2: Vuistregels voor plaatsing van peilbuizen voor piping onderzoek ten opzichte van de dijk ('haaks op de dijk'). Als voorbeeld is een situatie gegeven met een voorland en achterlandlengte van 150 m.



Na analyse van de peilbuismetingen kan het nodig zijn om alsnog de tussenafstand te verkleinen of het aantal meetpunten te verhogen [25]. De hoeveelheid meetpunten heeft vooral te maken met de complexiteit van het gebied (voorland, deklaag, achterland, heterogeniteit in de ondergrond). In Figuur 3 is een voorbeeld van een meetnet gegeven.

Meerdere raaien per locatie

Over het algemeen kan in piping-onderzoeken volstaan worden met 1 raai per locatie. Zandbanen en geulen in de uiterwaarden kunnen de monitoringsresultaten sterk beïnvloeden. In modelstudies naar de intredeweerstand zijn meerdere dwarsraaien op de dijk per onderzoekslocatie gebruikt [3] [5]. Hierdoor wordt de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de modellen tijdens de kalibratie verbeterd.

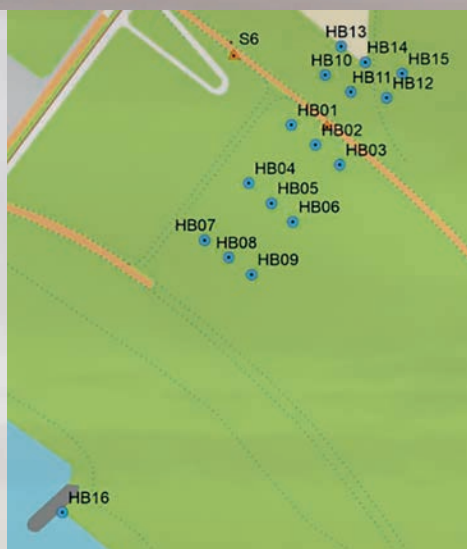
Meerdere piping-gevoelige zandlagen

Over het algemeen kan in piping-onderzoeken volstaan worden met een filter aan de bovenkant van de piping-gevoelige zandlaag

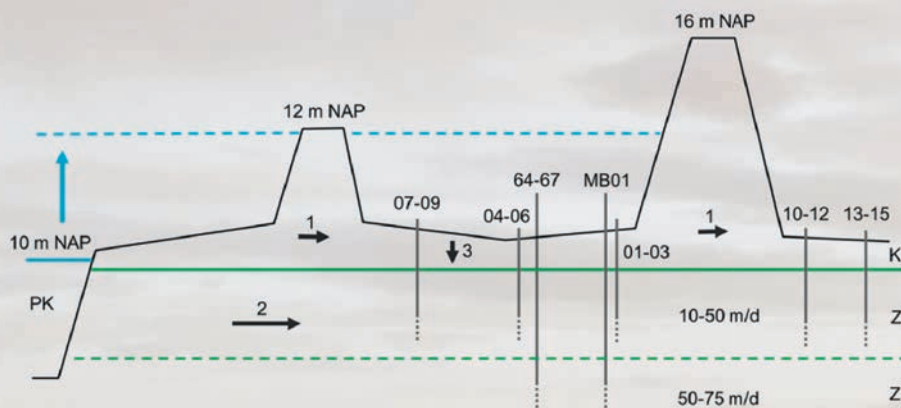
(Pleistocene zandlaag/watervoerend pakket). In sommige gebieden kan het voorkomen dat er meerdere piping-gevoelige zandlagen over de diepte voorkomen [4] [26]. De grote diversiteit in zandlagen bemoeilijkt het determineren van de piping gevoelige laag. Ook kunnen wellen voorkomen op plaatsen waar geen duidelijke deklaag aanwezig is. De verschillen in cohesiviteit wordt veelal veroorzaakt door compacte/cohesieve zandlagen, oerlagen en gelaagde afzettingen. Hierdoor kan het noodzakelijk zijn meerdere filters per dieptetraject te plaatsen.

Grondwaterstand in de deklaag

Als in de deklaag een grondwaterstand is vast te stellen, zoals een deklaag van zand of veen, is het aan te bevelen om ook peilbuisfilters in de deklaag te plaatsen. Dit kan in hetzelfde boorgat van de (diepe) peilbuis in de piping-gevoelige zandlaag. Als er een risico bestaat dat de afdichting tussen de peilbuizen niet voldoende gerealiseerd kan worden, is het aan te bevelen om de peilbuizen in afzonderlijke boorgaten te plaatsen.



Figuur 3: Meetnet bij Westervoort langs het Pannerdens Kanaal [5]. Links een bovenaanzicht van 3 dwarsraaien op de dijk met 5 meetpuntlocaties per raai. Rechts een dwarsdoorsnede van het meetnet waarbij de zwarte lijn: maaiveld, zwarte pijlen: stromingsrichting bij hoogwater, grijze lijnen: peilbuizen, groene lijn: onderkant kleilaag, groene stippellijn: scheiding tussen zandlagen, blauwe lijn: waterlijn bij 10 m NAP, blauwe stippellijn: maximaal gemeten waterpeil bij het meetpunt IJsselkop.



Aandachtspunten bij het inrichten van een grondwatermeetnet

- Schrijf altijd op wat je afleest! Hiermee voorkom je dat je in het veld verkeerde interpretaties maakt die later niet meer te herleiden zijn. Controleer of je veldwaarneming plausibel is door bijvoorbeeld de gemeten grondwaterstand ten opzichte van maaiveld/bovenkant peilbuis om te rekenen naar een verwachte grondwaterstand op basis van je bureaustudie.
- Bereikbaarheid van de meetlocatie tijdens (normaal) hoogwater. De hydrologisch optimale plek is niet altijd ook de omgevingstechnisch optimale plek. Hou er rekening mee dat je de resultaten ook moet kunnen uitlezen onder verschillende omstandigheden en dat je meet-apparatuur op een veilige plek staat.
- Bij gebruik van telemetrie, de zendkast en watergevoelige elektra buiten inundatiegebied plaatsen. Zorg bij 'kritische monitoring' zoals hoogwatergebeurtenissen voor een back-up systeem.
- Luchtdichte afwerking van de peilbuis om eventuele hogere grondwaterstanden/stijghoogten te kunnen registreren. Dit kan door peilbuizen af te doppen met een schroefdop.
- Houd rekening met ruimtelijke restricties en vergunningen zoals private gronden en boringvrije zones.
- Door de peilbuizen ter hoogte van dijkpalen te plaatsen, een witte streep op het weg te plaatsen en de afstand van de weg tot de peilbuis vast te leggen, is een peilbuis bijna altijd terug te vinden. Meet de afstand uit de dijkpaal en noteer dit bij de registratie. Inmeten van de peilbuizen via GPS of landmeting blijft nodig voor een juiste verwerking in databases.
- Houd rekening met de nauwkeurigheid van de GPS-meting en leg dit vast in het monitoringsplan. Vooral de hoogtemeting (z-richting) kan vaak over grotere afstanden en metingen in de tijd variëren door het gebruiken van verschillende satellieten.
- 'Ouderwets' inmeten van de meetpunten op basis van een 'vast punt' heeft de voorkeur. Helaas is dit steeds minder de standaard omdat dit tijdrovender en daardoor duurder is. Voor piping-berekeningen waarbij de delta H van belang is in berekeningen is een goede referentiehoogte t.o.v. de verschillende meetpunten erg belangrijk voor de betrouwbaarheid van de analyse.
- Zorg bij ondiepe filters ('hoge peilbuizen') dat het filter zo diep mogelijk geplaatst is om een grondwaterstand/stijghoogtemeting bij lage waterstanden ook te kunnen registreren.



- Zorg bij diepe filters ('lage peilbuizen') dat het filter zo lang mogelijk is (binnen het gewenste pakket) zodat tussenzandlagen en kleilagen minder invloed hebben op je metingen. Onderkant filter minimaal 2 m in de zandlaag.
- De lengte van de zandvang is afhankelijk van de voorziene levensduur van de peilbuis. Hou bij voorkeur minimaal 2 m zandvang aan.
- Bij voorkeur de peilbuizen ondergronds afwerken en afschermen met een straatpot. Mantelbuizen zijn zeer kwetsbaar voor beschadiging door maaien, voertuigen en vee.
- Inrichting en uitlezen van een meetnet en monitoringsgegevens wordt bij voorkeur uitgevoerd door de specialist die de data gaat/ moet verwerken en interpreteren.
- Pas op met te kleine diameters van peilbuizen om het gewenste effect te meten. De afmeting van de peilbuis moet afgestemd zijn op het formaat drukopnemer (zodat deze niet blijft hangen).
 - drukopnemers kunnen prima vastgemaakt worden met een kroonsteentje. Hiermee kan de staalkabel meerdere keren doorgelust worden aan de drukopnemer.
 - het zwakste punt is waarschijnlijk het oog aan de binnenkant van de peilbuisdop, doordat dit een gebogen 'haakje' is waarin bij kracht dit verbogen kan worden en de staalkabel kan losraken
 - als de drukopnemer vasthangt, nooit kracht uitoefenen. Vaak werkt het door met het zinkloodje en meetlint de drukopnemer los te tikken.
- Meerdere peilbuizen in een boorgat is doorgaans geen probleem
 - wel aandacht houden voor grote drukverschillen. Dan zijn afzonderlijke boorgaten wel aan te bevelen.
 - afdichting met bentoniet moet wel plaats kunnen vinden onder vochtige/natte omstandigheden. Dus als de grondwaterstand/ stijghoogte/rivierwaterstand laag staat en daardoor de bentoniet-afdichting niet kan laten 'zwellen' is het verstandig om een andere afdichting te kiezen.



3.2 Pompproef

Het uitvoeren van een pompproef staat onder andere beschreven in Kruseman en de Ridder [15] en de NEN-EN-ISO 22282-4:2012¹³. In deze handreiking is ervan uitgegaan dat het uitvoeren van een pompproef bekend is bij de lezer.

Locatie en filterstelling

Bij de locatiekeuze voor de pompproefopstelling wordt gebruik gemaakt van de systeembeschrijving, een eventueel bestaand of gepland grondwatermeetnet. Bijvoorbeeld als een deel van het grondwatermeetnet na beëindiging van de pompproef in stand wordt gehouden. Ook de bereikbaarheid en toestemming om met een booropstelling de locatie te betreden bepaald de locatie. In de geraadpleegde onderzoeken zijn zeer beperkte beschrijvingen opgenomen over de locatie en filterstellingen die gehanteerd zijn voor de pompproeven. Hiervoor zijn de werkplannen en analyserapporten van de pompproeven aanvullend geraadpleegd. De hierna beschreven informatie berust voornamelijk op de aandachtspunten die in de (achtergrond)rapporten¹⁴ en interviews naar voren zijn gekomen [2][3][4][5].

Voor een goede interpretatie van de pompproef zijn meer dan 5 meetpunten en meer dan 1 raai noodzakelijk. De voornaamste reden hiervoor is dat bij een pompproef rekening gehouden moet worden met 4-dimensies: x, y, z en tijd. Het doel van een pompproef is om de doorlatendheid, specifieke bergingscoëfficiënt en eventueel de weerstand van de deklaag te bepalen. Dit wordt bereikt door de reactie/verandering van grondwaterstanden en stijghoogten te monitoren bij een 'stress' die aan het watervoerend pakket wordt opgelegd, het onttrekken van grondwater via een pompput/onttrekkingsbron. Een pompproef bestaat uit fasen:

1. vastleggen van de referentiesituatie;
2. de pompproef, en;
3. de stopproef (zie ook paragraaf 2.3).

Pompproeven voor piping-onderzoek worden uitgevoerd naast rivierengebied of getijdegebied. Dit zijn regionale systemen die de grondwaterstanden en stijghoogten met decimeters tot meters en tot op grote afstand kunnen beïnvloeden. Dit bemoeilijkt de interpretatie van een pompproef. Voor het effect van de rivier of getijdegebied op de grondwaterstand/stijghoogte moet rekening gehouden worden met:

- **Tijdstip van de pompproef.** Bij voorkeur wordt de pompproef uitgevoerd onder verhoogde waterstandcondities. Tenminste waarbij de grondwaterstand/stijghoogte tot in de piping-gevoelige zandlaag reikt. Dit is tenslotte de laag waarvan de 'sleutelparameters' gewenst zijn.
- **De locatie van de pompproef.** Bij verhoogde waterstandcondities is het uitvoeren van de pompproef in het voorland risicovol (inundatie). Ook is er niet altijd een voorland beschikbaar. Om de resultaten

van pompproeven voor piping zo uniform mogelijk te bepalen wordt geadviseerd om dit bij voorkeur in het achterland uit te voeren.

- **De plaatsing van de onttrekkingsbron en monitoringsfilters.** Om de invloed van de rivier/getijde op de pompproef en stopproef ('recovery') te minimaliseren wordt aangeraden om de onttrekkingsbron tussen het pompproefmeetnet en de rivier/getijde te plaatsen (zie hieronder).
- **Het verwerken en interpreteren van de pompproef.** Om de invloed van de rivier/getijde op de gemeten grondwaterstand/stijghoogte te bepalen, kan gebruik gemaakt worden van regressie-/tijdreeksanalyses, tijdreeksmodellen en numerieke modellen. Hiermee kan de verandering van de grondwaterstand/stijghoogte tijdens de pompproef/stopproef gecorrigeerd worden door de invloed van de rivier/getijde.

Als er in de nabijheid van de pompproef andere grote oppervlaktewateren gelegen zijn die een invloed hebben op de grondwaterstand/stijghoogte, zoals plassen en boezems, kan het noodzakelijk om ook van die waterlichamen de waterstand te monitoren voor een juiste interpretatie van de pompproef.

In aanvulling op een grondwatermeetnet voor piping (paragraaf 3.1) kan de volgende opstelling als vuistregel gehanteerd worden:

- **Pompput:** Op circa 25 m afstand van het meetpunt in het achterland en minimaal 50 m van de binnentoe van de dijk
- **Meetnet 1:** Een grondwatermeetnet voor de monitoring van piping (paragraaf 3.1)
- **Meetnet 2:** Een grondwatermeetnet voor de pompproef (wordt hier nader beschreven)

Meetnet 2: grondwatermeetnet voor de pompproef

In het verlengde van meetnet 1 worden minimaal 5-6 aanvullende meetpunten ingericht in het achterland. Voor de afstanden richting het achterland tot de bron kan het volgende als vuistregel gehanteerd worden:

- Meetpunt naast de bron (voor het meten van de maximale verlaging)
- Meetpunt op 15 m van de bron
- Meetpunt op 25 m van de bron
- Meetpunt op 50 m van de bron
- Meetpunt op 100 m van de bron
- Meetpunt op 200 m van de bron (voor het meten van geen verlaging/het maximale invloedgebied)

Afhankelijk van het ingeschatte doorlaatvermogen van het watervoerend pakket kunnen bovenstaande aantallen en afstanden vergroot of verkleind worden.

Hierdoor ontstaat 1 meetraai dat meerdere doelen heeft (zie Figuur 4). Meetnet 1 is eventueel al voorzien voor (langdurige) monitoring voor piping-onderzoek voor- of nadat de pompproef is/wordt uitgevoerd. Voor de pompproef heeft dit meetnet vooral als doel om de invloed van de rivier of getijde in de monitoringsgegevens te kwantificeren (identificeren). Meetnet 2 heeft als doel om de pompproef te analyseren en de parameters af te leiden. Doordat de pompput tussen het meetnet en de rivier/getijdegebied staat, wordt de invloed hiervan op de pompproef verminderd.

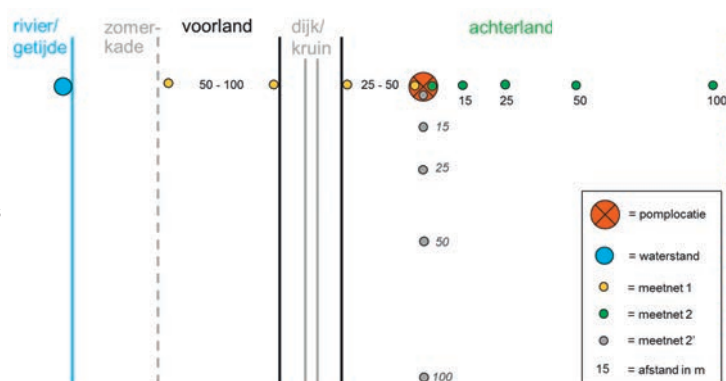
Deze opstelling is alleen toe te passen als in het achterland voldoende ruimte is en toegang verleend wordt voor de pompproef en als het watervoerend pakket vergelijkbare eigenschappen/bodemopbouw heeft als het watervoerend pakket onder de dijk.

Het filter van de pompput wordt bij voorkeur over het gehele watervoerend pakket geplaatst ('volkomen filter'). Als de doorlatendheid van een bepaald dieptetraject van het watervoerend pakket onderzocht moet worden of een groot deel van het watervoerend pakket niet bijdraagt aan het fenomeen piping, is het raadzaam om een maximale filterlengte¹⁵ te hanteren over het bovenste deel van het watervoerend pakket ('onvolkomen filter').

Meerdere raaien per locatie

Als er geen ruimte is of toegang verkregen kan worden voor meetnet 2 in het achterland, kan deze parallel aan het dijktracé aangelegd worden (meetnet 2' in Figuur 4). Ook hiervoor gelden dezelfde voorwaarden als bij meetnet 2 (ruimte, toegang en watervoerend pakket). De invloed van de rivier/getijde op de pompproef is hierbij groter. Dit kan de interpretatie van de pompproef bemoeilijken.

¹⁵ De maximale filterlengte of effectieve filterlengte is een praktische afweging tussen het beoogde watervoerend pakket waarop de proef uitgevoerd wordt, het verwachte doorlaatvermogen van dit pakket, het benodigde onttrekkingsdebiet en de minimaal benodigde brondiameter en maximaal beschikbare boordiameter. Een hulpmiddel hierbij is de systeemanalyse en de formule van Sichert.



Figuur 4: Schematisatie van een pompproef- en meetnetopstelling aan een rivier-/getijdegebied. Het meetpunt voor het meten van het maximale invloedgebied/geen verlaging (circa 200 m) is niet in de afbeelding opgenomen.

Meerdere piping-gevoelige zandlagen

In het onderzoek naar de 'Invloed van maasklei en grindlagen' [4] zijn pompproeven uitgevoerd over meerdere piping-gevoelige zand- en grindlagen. Het onttrekkingsfilter is voornamelijk ingericht op de grofzandige grindafzettingen van de Formatie van Beegden. Hiervoor is boven de grindige afzettingen van het watervoerend pakket een dichte buis toegepast ('blinde' buis).

Grondwaterstand in de deklaag

Het afleiden van een deklaagweerstand uit pompproeven voor piping (zoals vermeld in [19]), zijn in de geraadpleegde onderzoeken en interviews niet beschreven of naar voren gekomen.

Aandachtspunten bij het inrichten en uitvoeren van een pompproef

- Zie ook aandachtspunten voor grondwatermeetnet (paragraaf 3.1)
- Schijf altijd op wat je afleest! Hiermee voorkom je dat je in het veld verkeerde interpretaties maakt die later niet meer te herleiden zijn. Controleer of je registratie plausibel is door bijvoorbeeld de waarden op de debietmeter om te rekenen naar een debiet per tijdseenheid en dit te vergelijken met de pompcapaciteit.
- Hou rekening met de bereikbaarheid van de meetlocatie tijdens (normaal) hoogwater.
- Pomp, aggregaat en bij gebruik van telemetrie, de zendkast en watergevoelige elektra buiten inundatiegebied plaatsen.
- Luchtdichte afwerking van de peilbuis om eventuele hogere grondwaterstanden/stijghoogten te kunnen registreren. Dit kan door peilbuizen af te doppen met een schroefdop.
- Hou rekening met stroomvoorziening en brandstof. Bij stroomstoringen en/of te weinig brandstof in de tank van de pomp zal deze uitvallen waardoor de pompproef opnieuw moet plaatsvinden.
- Hou aandacht voor benodigde vergunningen zoals een lozingsvergunning (waterschap binnendijs én Rijkswaterstaat buitendijs) en toegang tot private gronden.
- In het aanbestedingstraject kan een onervaren team de logistieke operatie onderschatten (boren/pulsen, plaatsing putten, peilbuizen en pompcapaciteit, afvoerleidingen, vergunningen, elektra, diesel, etc.)
- Buisdiameter en capaciteit van de put en pomp goed inschatten in relatie tot de kosten en het benodigde waterbezwaar om voldoende stress op het watervoerend pakket uit te oefenen om een betrouwbare doorlatendheid uit de pompproef af te leiden.
- Zorg altijd voor een paar zeefanalyses om de werkelijke heterogeniteit van de bodemlagen te bepalen (geen mengmonsters over verschillende boringen en dieptetrajecten!).

Aandachtspunten bij het onderhouden van een grondwatermeetnet

- Schijf altijd op wat je afleest! Hiermee voorkom je dat je in het veld verkeerde interpretaties maakt die later niet meer te herleiden zijn.
- De herkomst van het grondwater kan worden vastgesteld uit in-situ (pH, zuurstof) en chemische analyses (ijzer, fosfaat, nitraat, calcium, bicarbonaat, chloride, etc.) van het grondwater. De monsternamen kan doorgaans eenvoudig plaatsvinden bij controlemetingen of het periodiek uitlezen van de automatische drukopnemers.
- Periodieke controle bij langdurige tijdsafhankelijke monitoring voorkomt dat data en gegevens verloren gaan (defect in meetinstrument), of dat verkeerde metingen worden gebruikt. Hierbij moet een persoon of 2 personen de verantwoordelijkheid hebben om regelmatig de monitoring te controleren. Telemetrie is een efficiënte ontwikkeling in de automatisering van monitoring en meetnetten. Maar als niemand controleert of de metingen plaatsvinden en plausibel zijn, kan alsnog verlies van data of analyse met onbetrouwbare data plaatsvinden.
- Het onderhoud, uitlezen en de validatie van een meetnet en monitoringsgegevens wordt bij voorkeur uitgevoerd door de specialist die de data gaat/moet verwerken en interpreteren. Hierdoor worden eventuele afwijkingen 'uit eerste hand' vastgesteld.
- Als de grondwaterstand/stijghoogte bij hoogwater boven de bovenkant van peilbuis komt, kan bij het uitlezen gebruik gemaakt worden van een verlengstuk. Hou er rekening mee dat de grondwaterstand/stijghoogte zich eerst in de verlengde peilbuis moet instellen.
- De verantwoordelijkheid van meerjarige monitoring ligt bij voorkeur bij een overheidspartij. Een overheid is doorgaans beter in staat om de continuïteit van het meetnet te garanderen.
- Zandvang van de peilbuis moet bij langdurige monitoring of in-gebruikname van de peilbuislocatie periodiek geïnspecteerd worden. Een volle zandvang kan leiden tot een verstopping van het filter waardoor de respons minder goed of niet gemonitord wordt in de peilbuis.
- Hou bij de periodieke controle rekening met hoe snel een datalogger vervangen is of een alternatief meetpunt is ingericht. Hierdoor wordt voorkomen dat je het monitoringsdoel mist.
- Als in een drukopnemer een langzaam verloop in signaal wordt vastgesteld, is deze stuk (aan het gaan). De kortdurende fluctuaties worden doorgaans veel langer correct geregistreerd. Vervang uit voorzorg de drukopnemer en controleer/kalibreer de 'defecte' drukopnemer alvorens deze eventueel weer in gebruik te nemen.
- Voor langduriger of herhaalde metingen is het zinvol het systeem periodiek te herzien [8]. Hiervoor kan bijvoorbeeld de PDCA-cyclus (Plan-Do-Check-Act) toegepast worden.

4. Onderhouden

Voor een goed en betrouwbaar meetnet is regulier onderhoud noodzakelijk. Peilbuizen, automatische drukopnemers, onttrekkingsbronnen, pompen en de locatie zijn onderhevig aan verval. In het Stowa-Handboek [23] is onderhoud aan peilbuizen beschreven. Onderhoud tijdens pompproeven is slechts summier beschreven in NEN-EN-ISO 22282-4:2012. In dit hoofdstuk zijn specifieke aandachtspunten voor onderhoud bij piping-onderzoek opgenomen.

4.1 Grondwatermeetnet

Peilbuizen en piëzometers hebben regulier onderhoud nodig. Dit wordt doorgaans gecombineerd met validatiemetingen (handmatige waterstand-/stijghoogtemetingen) en het eventueel uitlezen van de drukopnemers. Periodieke controle inspectie van de meetpunten en monitoringsgegevens zijn cruciaal. Voor de werking/verlies van data, maar ook om lokale gebeurtenissen waar te nemen. Bijvoorbeeld tijdelijke grond-, weg en waterwerken langs het meetnet of afwijkend peilbeheer zoals peilopzet/inundaties in de bollenstreek. Bij het valideren/uitlezen van de drukopnemers moet de volgende volgorde gehanteerd worden:

1. waterstand meten (handmeting), hiermee kan de tijdreeks van de drukopnemer gevalideerd en eventueel gecorrigeerd worden;
2. drukopnemer uitlezen, controleren of deze nog correct functioneert of vervangen moet worden;
3. peilbuis/zanddiepte meten, hiermee wordt gecontroleerd of de zandvang eventueel vol zit en bij meerdere peilbuizen in een boorgat is het een controle of de juist peilbuis wordt gemeten;
4. hoogte van de peilbuis t.a.v. mantel c.q. straatpotje meten, hiermee wordt gecontroleerd of de peilbuis nog op de juiste diepte staat (door verzakking of opstuwing van de peilbuis);
5. hoogte van de mantelbuis t.o.v. maaiveld meten, idem #4.

Bepaal steekproefsgewijs in het veld of je meting plausibel is. Bijvoorbeeld door je meting te vergelijken met het veldwerkrapport van plaatsing of door gebruik te maken van een controleberekening (spreadsheet).

Frequentie van onderhoud

Het meetnet moet minimaal 1x per jaar onderworpen worden aan fysiek onderhoud en controle. Doe dit bij voorkeur binnen/voorafgaand aan de periode van het monitoringsdoel. Bij gebruik van telemetrie kunnen tussentijdse controles geautomatiseerd worden of met een hogere frequentie vanaf kantoor door een specialist uitgevoerd worden. Een meetnet zonder telemetrie wordt bij voorkeur meer dan 1x per jaar gecontroleerd:

- Bij waterstanden die buiten het normale bereik liggen. Bijvoorbeeld controleren of bij lage waterstanden de drukopnemer nog een grondwaterstand/stijghoogte registreert.
- Een meetnet dat is ingericht om een hoogwatersituatie in het rivierengebied vast te leggen moet voorafgaand aan deze periode gecontroleerd worden. Tussen de jaarlijkse periodieke controle en de hoogwatersituatie kan de drukopnemer of peilbuis defect raken waardoor het monitoringsdoel gemist niet geregistreerd wordt.



4.2 Pompproef

Bij het onderhouden van het meetnet en de pompput/onttrekkingsbron van een pompproef moeten dezelfde controles uitgevoerd worden als bij een grondwatermeetnet (paragraaf 4.1). Bij een pompproef moet naast het grondwatermeetnet ook de pompinrichting periodiek gecontroleerd worden. De frequentie van onderhoud is vanwege de kortere meetperiode hoger.

Frequentie van onderhoud

Het grondwatermeetnet moet voorafgaand aan iedere fase (zie paragraaf 2.3) en aan het einde van de pompproef gecontroleerd worden. Bij gebruik van telemetrie kunnen tussentijdse controles geautomatiseerd worden of met een hogere frequentie vanaf kantoor door een specialist uitgevoerd worden. Voor de pompinrichting kan de volgende frequentie als vuistregel gehanteerd worden:

- **Fase 1: Vaststellen van een referentiegrondwaterstand en -stijghoogte**
 - Als de referentiegrondwaterstand en -stijghoogte goed zijn vastgelegd kan overgegaan worden tot de pompproef. Zo niet dan moet de monitoring van de referentiesituatie opnieuw uitgevoerd worden.
- **Fase 2: De pompproef grondwateronttrekking**
 - Dag 1 van de pompproef wordt bij voorkeur volledig begeleid door de specialist totdat een stationair debiet wordt bereikt.
 - Als na 24 uur de pompproef nog volgens ontwerp functioneert kan de frequentie van controle beperkt worden. Als de pompproef binnen 24 uur onderbroken is of niet naar behoren functioneert moet deze opnieuw gestart worden. Hiervoor moeten eventuele defecten of tekortkomingen aan het grondwatermeetnet ('meetnet 2', zie paragraaf 3.2) verholpen worden. Voordat de pompproef herstart wordt moeten ook de grondwaterstanden en stijghoogten weer hersteld zijn (normaal peil).

- Bij het uitvoeren van een pompproef met 'variabel debiet' voorafgaand aan een pompproef met 'vast debiet' moet voldoende tijd genomen worden om de grondwaterstanden en stijghoogten weer te laten herstellen richting normaal peil.
- Een dagelijkse controle wordt sterk aanbevolen om defecten en problemen snel te verhelpen. Bij gebruik van telemetrie kan dit ook op afstand plaatsvinden. Bij gebruik van brandstof voor de pompinrichting moet de frequentie afgestemd worden op het verbruik van de pomp.

- **Fase 3: De 'stopproef' ('recovery') geen onttrekking**

- Na beëindiging van de pompproef is de frequentie van controle afhankelijk van de snelheid waarmee de grondwaterstanden en stijghoogten zich herstellen. Doorgaans is dit binnen een dag. Bij continuering van de monitoring kan de frequentie van onderhoud van een grondwatermeetnet aangehouden worden.

Aandachtspunten bij het onderhouden en controleren van een pompproef

- Schijf altijd op wat je afleest! Hiermee voorkom je dat je in het veld verkeerde interpretaties maakt die later niet meer te herleiden zijn.
- Hou rekening met stroomvoorziening en brandstof. Bij stroomstoringen en/of te weinig brandstof in de tank van de pomp zal deze uitvallen waardoor de pompproef opnieuw moet plaatsvinden.
- Voer een pompproef met variabel debiet uit om het maximale debiet voor de pompproef te bepalen. Door het droogvallen van de pompput en eventuele monitoringsfilters levert de pompproef geen betrouwbare parameters op.



5. Analyseren

Uitvoerige rapportages voor het analyseren van een grondwatermeetnet en pompproeven voor piping-onderzoek zijn te raadplegen in de basisdocumenten op pov-piping.nl, de verkenningen in het **pov PipingPortaal [20]** en de referentielijst achter in dit rapport (zie 'Referenties'). Voor het doel van deze handreiking is het volledig beschrijven van deze analysetechnieken te omvangrijk.

Tabel 3: Analyses voor piping-onderzoek.

Analyse	Toelichting
Parameterbepaling voor het bepalen van de piping gevoeligheid	<p>Bij de bepaling van de gevoeligheid van dijken voor piping zijn zogenaamde 'sleutelparameters' nodig om de rekenregel van Sellmeijer toe te kunnen passen. De doorlatendheid, specifieke bergingscoëfficiënt en eventueel de weerstand van de deklaag kunnen worden afgeleid uit tijdsafhankelijke monitoring.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Responstijden uit grondwatermeetnet¹⁶ • Pompproeven [2] [3] [4] [5] • Modelstudies [1] [2] [3] [4] [5] [25]
Nader inzicht in geo-hydrologisch systeem	<p>Tijdsafhankelijke monitoring van grondwaterstanden, stijghoogten en waterstanden buitendijks en binnendijks geven inzicht in de werking van het (grond)watersysteem. Zoals het optreden van kwel of wegzijging en hoe de grondwaterstanden en stijghoogten reageren op de buitenwaterstand. Op basis van de gemeten stijghoogte en maaiveldniveau bij de wel kan worden afgeleid of deze tijdelijk of permanent watervoerend is. De meest voorkomende analysetechnieken beschreven in de onderzoeken zijn:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hysteresegrafieken [1] • Regressieanalyse [4] [25] • Tijdreeksanalyses [2] [3] [4] [5] • Debietmetingen en 3D-berekeningen van watervoerende wellen [1] • Responstijden uit grondwatermeetnet

Dit hoofdstuk is een actuele aanvulling op de beschreven eisen, rekenmethodes, en formules uit de schematiseringshandleiding van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI; [28]) en Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TRWD; [24]). Parameters die rechtstreeks uit stijghoogtemetingen zijn af te leiden, zijn nader toegelicht. De analyse van tijdsafhankelijke monitoring voor piping, tijdens waterstand bij de norm (WBN), is beschreven in een memo opgesteld door Jan Blinde van Deltares [9]. Deze informatie, aangevuld met informatie uit andere referenties, is beschreven in paragrafen 5.4, 5.5 en 5.6.

5.1 Technieken en hulpmiddelen

Voor de analyse van de monitoringsgegevens wordt gebruik gemaakt van hulpmiddelen/tools zoals eenvoudige spreadsheets, analytische en numerieke modellen. In Tabel 3 is een beknopt overzicht opgenomen van de verschillende analysetechnieken voor piping-onderzoek.

5.2 Valideren monitoringsgegevens

De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van gemeten grondwaterstanden en stijghoogten worden doorgaans beoordeeld en gecontroleerd (gevalideerd) in programma's die zijn ontwikkeld voor de automatische drukopnemers.

Spreadsheetprogramma's worden vooral gebruikt voor de analyse van responstijden, (eenvoudige) regressieanalyses, hysteresegrafieken en in mindere mate tijdreeksanalyses. Voor tijdreeksanalyses is het programma Menyanthes¹⁷ in meerdere piping-onderzoeken [2] [3] [5] ingezet. Hiermee kunnen ook de monitoringsgegevens gevalideerd worden en tijdreeksmodellen opgesteld worden om de tijdreeksen te verlengen en/of om de verklaarbare variatie voor de grondwaterstand en stijghoogte te bepalen. Dit geeft inzicht in de werking van het (grond)watersysteem en kan gebruikt worden bij de interpretatie van monitoring bij pompproeven.

Uit de pipingonderzoeken is gebleken dat het inzetten van numerieke grondwatermodellen de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de analyse van pompproeven verbeterd. Vooral om de invloed van de rivieren en getijdewaterstanden op de grondwaterstanden en stijghoogten correct in de berekening mee te nemen.

¹⁶ Analysetechnieken op basis van responstijden zijn bij het schrijven van deze handreiking geen voorbeelden in de onderzoeken aangetroffen.

¹⁷ Menyanthes: www.kwrwater.nl/tools-producten/menyanthes

5.3 Doorlatendheid (pompproef)

Een goede beschrijving voor analyse van een pompproef is vastgelegd in Kruseman en de Ridder (1994¹⁸). Voor de bepaling van de doorlatendheid uit pompproeven zijn zowel analytische berekeningen als numerieke modellen beschikbaar:

- MLU for Windows (www.microfem.nl/products/mlu.html)
- AQTESOLV (www.aqtesolv.com)
- MODFLOW (<https://water.usgs.gov/ogw/modflow/>)

Een goede geohydrologische systeemkennis en geotechnische mechaniekennis is nodig bij de gebruiker van deze instrumenten.

Door de complexiteit van de processen die optreden in een rivier- en getijdengebied zijn numerieke driedimensionale modellen beter geschikt om de parameters te bepalen, en/of om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid te vergroten.

In het onderzoek 'Invloed Maasklei en grindlagen' [4] zijn meerdere analysetechnieken voor de pompproeven uitgevoerd om de betrouwbaarheid en bandbreedte van de analysetechniek op de afgeleide parameters te beoordelen.

5.4 Stijghoogtebepaling

Als er geen opbarsting of heave ontstaat zal er geen (terugschrijdende) erosie plaatsvinden en dus geen piping ontstaan. Voor een betrouwbare berekening van opbarsting, heave en terugschrijdende erosie moet de monitoring van grondwaterstanden en stijghoogten aan de volgende randvoorwaarden voldoen:

- De duur (lengte) van de monitoring moet voldoende lang zijn zodat de grondwaterstanden en stijghoogten die gemeten worden representatief zijn voor de gemiddelde situatie (nul-situatie) en hoogwatersituatie;
- De gemeten gemiddelde situatie moet representatief zijn voor een gemiddelde rivier- of getijdewaterstand.
- De gemeten hoogwatersituatie moet representatief zijn voor een hoge rivier- of getijdewaterstand, idealiter een waterstand bij norm (WBN).
- Bij de aanwezigheid van een voorland, dat bijdraagt aan de kwelweglengte, moet deze tijdens de monitoring van de hoogwatersituatie onder water staan.

De grondwaterstand en/of stijghoogte in het achterland kunnen voor de nul-situatie ook afgeleid worden uit een meetpunt dat buiten de invloed van de rivier- of getijdewaterstand staat. Doorgaans zijn deze meetpunten niet representatief voor de bodemopbouw waar piping kan optreden, waardoor de betrouwbaarheid/buikbaarheid voor piping-analyse onvoldoende is.

Spreidingslengte of lekfactor (λ) en kantelpunt

De spreidingslengte is een maat om het invloedsgebied van een effect, bijvoorbeeld een hoogwatersituatie of grondwateronttrekking, op de stijghoogte te bepalen. De spreidingslengte kan vooraf ingeschat worden op basis van geohydrologische materiaaleigenschappen (zie ook Paragraaf 3.1). Als het meetnet eenmaal is ingericht kan vervolgens de spreidingslengte worden vastgesteld uit de stijghoogtemetingen in de peilbuizen.

De spreidingslengte kan voor het voorland en achterland afzonderlijk bepaald worden. Dit wordt ook wel de effectieve voorlandlengte en effectieve achterlandlengte genoemd. Hiermee kan de positie van én de stijghoogte bij het 'kantelpunt' afgeleid worden. Het kantelpunt is de plaats in de dijk kern waar inzijging (buitendijks) overgaat in kwel (binnendijks) [24] (Figuur 5).

Als de effectieve voorlandlengte en achterlandlengte zijn bepaald, kan bij een monitoringsopstelling volgens Figuur 5, waarbij het meetpunt in de dijk bij het kantelpunt ontbreekt, toch het verloop van stijghoogte in beeld worden gebracht.

Demping

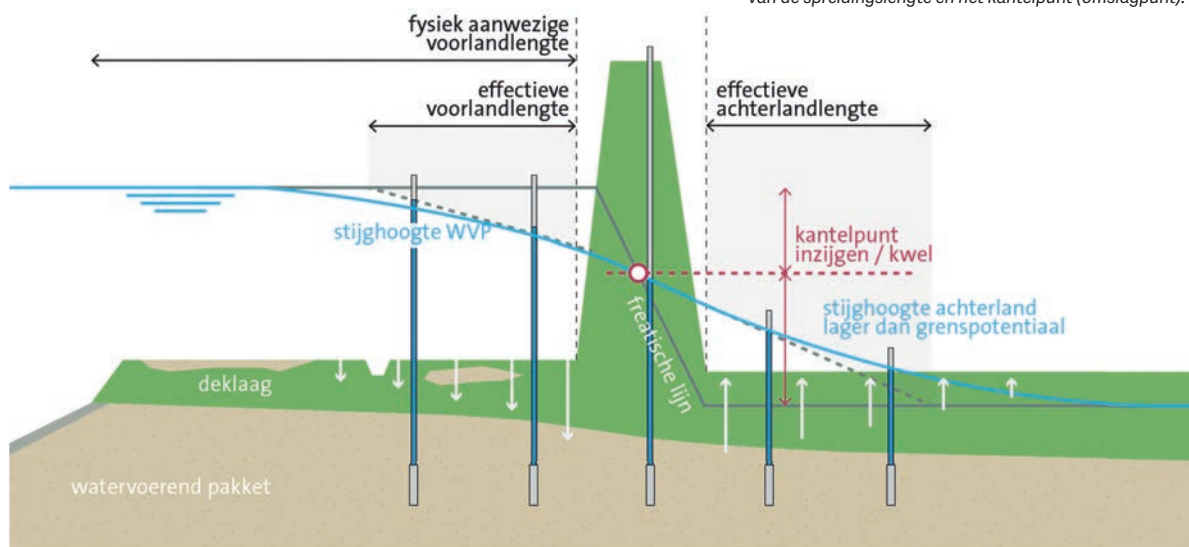
Bij een meetopstelling zonder peilbuizen in het voorland, kan alleen het stijghoogteverloop in het achterland in beeld worden gebracht. In deze meetopstelling kan de demping van het voorland op de stijghoogte afgeleid worden (Figuur 6). De demping vindt plaats door berging in extra poriënvolume van de bodem. De demping kan aan de hand van de stijghoogtemetingen met analytische- en numerieke modellen worden bepaald, zoals:

- MLU for Windows (www.microfem.nl/products/mlu.html)
- AQTESOLV (www.aqtesolv.com)
- MODFLOW (<https://water.usgs.gov/ogw/modflow/>)

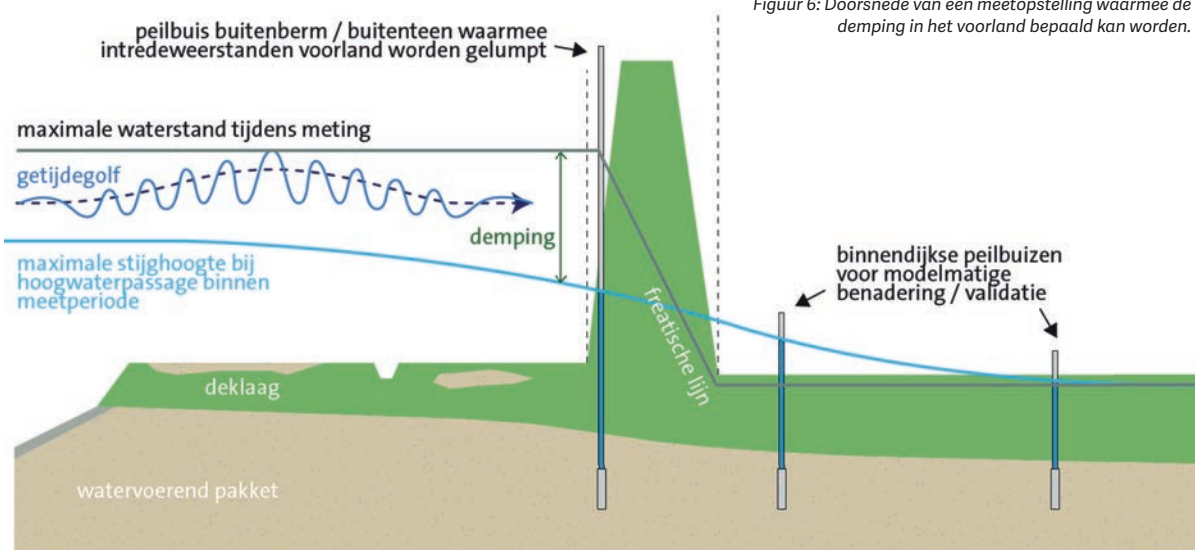
Een goede geohydrologische systeemkennis en geotechnische mechaniekennis is nodig bij de gebruiker van deze instrumenten.



Figuur 5: Doorsnede van een meetopstelling met voorland en duiding van de spreidingslengte en het kantelpunt (omslagpunt).



Figuur 6: Doorsnede van een meetopstelling waarmee de demping in het voorland bepaald kan worden.



5.5 Opbarsten en heave

Opbarsten

Als de waterdruk in het watervoerend pakket groter is dan het gewicht (tegendruk) van de deklaag dan zal deze 'opbarsten'. Hierbij kan een wel kan ontstaan. Opbarsten kan ontstaan langs constructies zoals beschoeiingen of stabiliteitsschermen maar ook het gevolg zijn door menselijk handelen. Bijvoorbeeld door ontgravingen, getrokken funderingspalen en diepe grondboringen.

De freatische grondwaterstand is vereist om het nat volumiek gewicht van de deklaag te bepalen. Dit kan eventueel ook afgeleid worden uit het polderpeil gecorrigeerd voor eventuele opbolling door grondwateraanvulling (neerslag). Door op verschillende punten in het achterland de effectieve spanning op het grensvlak van de deklaag en de watervoerende zandlaag te vergelijken is vast te stellen of opbarsten te verwachten is. Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van WBI-software [28].

Als uit de stijghoogteanalyse is gebleken dat opbarsten niet kan worden uitgesloten is controle op heave en terugschrijdende erosie noodzakelijk.

Heave

Als opbarsten optreedt en er voldoende opwaartse druk aanwezig is kan het water zandkorrels vanuit de zandlaag omhoogstuw en op het maaiveld afzetten. Dit wordt 'heave' genoemd. Hiervoor moet de stroomsnelheid groter zijn dan het soortelijk gewicht van de zandkorrels.

De controle op heave wordt uitgevoerd door het verschil tussen de voor opbarsten gecorrigeerde stijghoogte en het niveau van het maaiveld te vergelijken met de dikte van de deklaag. Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van WBI-software [28].

Als uit de stijghoogteanalyse is gebleken dat opbarsten en heave niet kan worden uitgesloten is controle terugschrijdende erosie noodzakelijk.

5.6 Terugschrijdende erosie

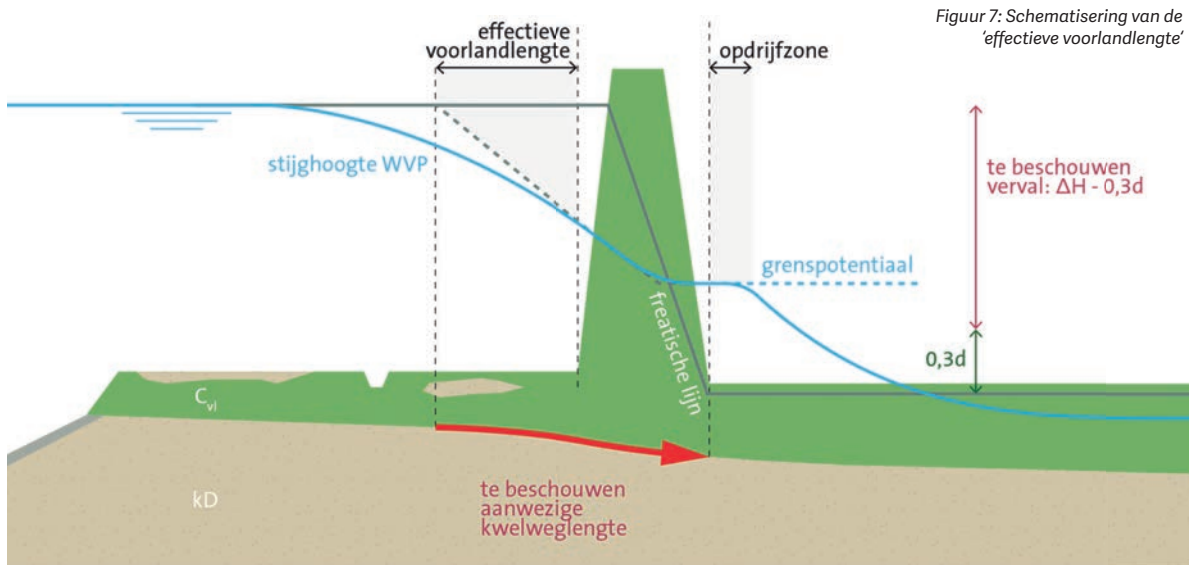
Als door opbarsten en heave voldoende zandkorrels vanuit het watervoerend pakket worden meegevoerd zal er door terugschrijdende

erosie onder de deklaag en onder de dijk een kanaal ontstaan, een 'pipe'. De pipe kan mettertijd in lengte en omvang toenemen waardoor er een verbinding ontstaat tussen het buitenwater (rivier of getijde) en het achterland (binnendijks). Dit is afhankelijk van geometrische-, bodemparameters en hydraulische randvoorwaarden zoals de stroomsnelheid en korrelgrootte van het zand.

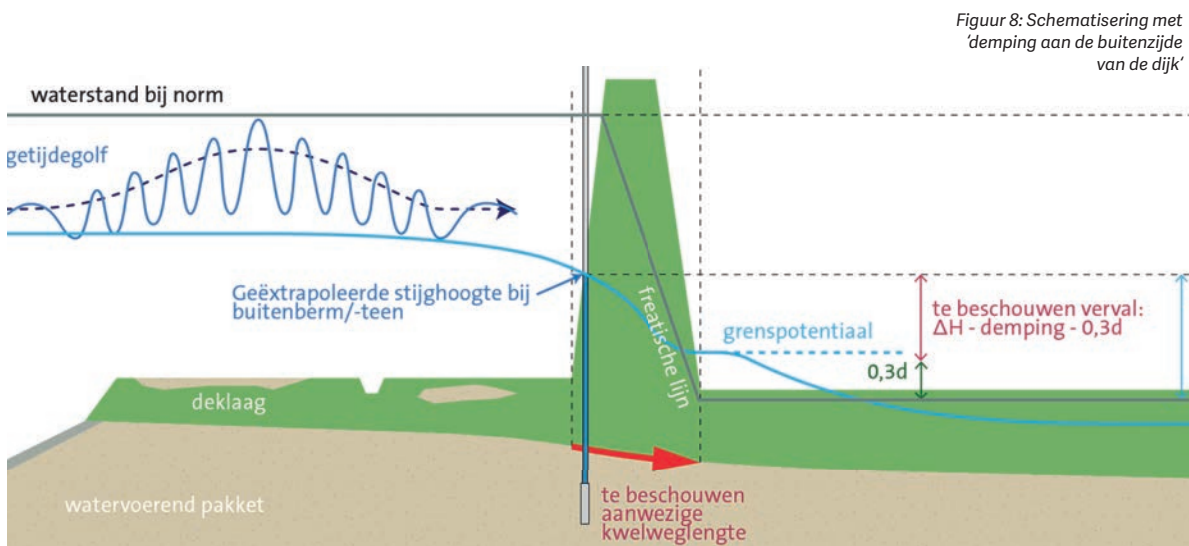
Als er geen maatregelen getroffen worden zal de dijk door de erosie kunnen bezwijken. Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van WBI-software [28].

Controle op terugschrijdende erosie met gebruikmaking van het voorland kan op twee manieren:

1. Met gebruikmaking van de 'effectieve voorlandlengte';
2. Met gebruikmaking van de demping ter plaatse van een bekend punt aan de buitenzijde van de dijk (b.v. de buiten teen of buiten berm).



Figuur 7: Schematisering van de 'effectieve voorlandlengte'



Figuur 8: Schematisering met 'demping aan de buitenzijde van de dijk'

1. Controle met 'effectieve voorlandlengte'

In de pipinganalyse kan de effectieve voorlandlengte worden meegenomen in de te beschouwen kwelweglengte (Figuur 7). Voor het beoordelen van piping in het kader van het WBI wordt geadviseerd een maximum te stellen aan de effectieve voorlandlengte [28]. Als het voorland onder water staat en geen water doorlaat is de te beschouwen kwelweglengte de afstand van de binnenteen van de dijk (opdrijfzone) tot aan de rand van het voorland. Als het voorland wel water doorlaat is de te beschouwen kwelweglengte de afstand van de opdrijfzone tot en met de effectieve voorlandlengte. De effectieve voorlandlengte wordt bepaald door de fysiek aanwezige voorlandlengte (L) en de spreidingslengte van het voorland (λ). Als de voorlandlengte (L) groter is dan de spreidingslengte van het voorland (λ), dan is λ leidend voor de te beschouwen kwelweglengte.

- Bij grote waarden van $L / \lambda (>2)$ is de effectieve voorlandlengte gelijk aan λ , en;
- Bij kleine waarden van $L / \lambda (<0,5)$ is de effectieve voorlandlengte gelijk aan L.

2. Controle met 'demping aan de buitenzijde van de dijk'

In de pipinganalyse kan de stijghoogte tijdens WBN ter plaatse van de buitenzijde van de dijk worden aangenomen als de buitenwaterstand [25]. Bij het extrapoleren van de demping tijdens de metingen naar de demping tijdens WBN rekening moet worden gehouden met het verschil in de duur van de waterstandsverandering tijdens de metingen en de duur van de waterstandsverandering tijdens WBN (Figuur 8). Bij het gebruiken van de demping in het voorland voor de controle op terugschrijdende erosie, wordt de stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk aangenomen ('fictieve buitenwaterstand'). De demping blijkt onder andere afhankelijk van de verhouding van de spreidingslengte van het voorland (λ) en de spreidingslengte van het achterland (λ'). Hiervoor geldt:

- Bij grote waarden van λ ten opzichte van λ' is de demping groot, en;
- Bij kleine waarden van λ ten opzichte van λ' is de demping klein.

Aandachtspunten bij het analyseren van monitoringsgegevens

- Hysterese grafieken zijn doorgaans erg complex en lastig te doorgronden. Dit zit er vooral in doordat je minimaal 2 processen in 1 grafiek probeert te doorgronden. Zoals de responstijd en het effect van de intredeweerstand of bodemdoorlatendheid hierop. In het 'wellen onderzoek' [1] is een bruikbare methode ontwikkeld voor het karakteriseren van wellen en piping bij waterkeringen.
- In het onderzoek naar het 'Effect van tijdsafhankelijkheid op stijghoogte bij getijdewateren' [25] is voor getijdengebieden een methode ontwikkeld om de stijghoogte bij waterstand bij norm (WBN; voorheen maatgevend hoogwater/MHW) te bepalen door monitoring van normale (gemiddelde) waterstanden. Dit kan alleen als de situatie bij dagelijks omstandigheden vergelijkbaar is met maatgevende omstandigheden. Achter een stormvloedkering is deze methode derhalve niet bruikbaar en moet de toe te passen gemiddelde waterstand bij maatgevende omstandigheden op een andere manier worden afgeleid (bijvoorbeeld in de Oosterschelde). De regressiecoëfficiënten die uit de grondwaterstandmetingen zijn afgeleid kunnen wel worden gebruikt.
- Bij het bepalen van de maximale stijghoogte onder maatgevende omstandigheden moet het volgende in ogenschouw worden genomen om vast te stellen of er nog aanpassingen nodig zijn op de regressie van de meting. De volgende aspecten spelen hierbij een rol
 - Is de intredeweerstand hetzelfde. Deze kan afnemen bij hogere stroomsnelheden en tijdelijk toenemen na baggeren.
 - Is de hoogwatersituatie vergelijkbaar met normale omstandigheden of is een sprake van een discontinuïteit zoals achter stormvloedkeringen.
- In het 'wellen onderzoek' [1] is geconcludeerd dat met 2D (grondwater)modellen piping mogelijk wordt overschat doordat piping en de radiale toestroming naar een wel een driedimensionaal fenomeen is.
- Een hoge meetdichtheid (meerdere raaien op korte afstand van elkaar) kan inzicht geven in grondwaterstroming parallel aan de dijk.

Resumé

Voor de analyse van de monitoringsgegevens voor piping zijn een goede karakterisering en schematisatie van het geohydrologisch systeem aan de hand van een bureaustudie, veldonderzoek en monitoring en een goede geohydrologische systeemkennis als geotechnische mechanismekennis een vereiste. Het is daarom aan te bevelen om de specialistische kennis, vaardigheden en activiteiten vast te leggen in én uit te voeren vanuit de drie hoekpunten van de 'geodriehoek'.



6. Afronden

Zodra het monitoringsdoel is behaald moeten de peilbuizen en eventuele onttrekkingsbronnen zorgvuldig worden afgesloten of opgeruimd¹⁹. Indien het meetnet in zijn geheel of gedeeltelijk voortgezet wordt, is een nieuw monitoringsplan of herziening van het (verouderde) monitoringsplan nodig. Als de meetpunten worden opgenomen in een bestaand meetnet, bijvoorbeeld reguliere monitoring door waterschappen, is een herziening van dat monitoringsplan nodig. Daarnaast zal in veel gevallen overdracht van werkplannen, monitoringsgegevens, en analyserapporten nodig zijn. Bij overdracht aan derden moet naast bovengenoemde ook het eigendom en verantwoordelijkheid worden overgedragen. De afronding en overdracht is bij voorkeur vooraf aan het opstellen van, en in het monitoringsplan vastgelegd en afgestemd.

In de onderzoeken naar piping is geconcludeerd dat de reguliere meetnetten en monitoring van en door waterschappen en hoogheemraadschappen onvoldoende langs dijken aanwezig zijn. Het overdragen van meetnetten uit piping-onderzoeken kan deze monitoringsleemte aanvullen.

Registratie, opslag en terugmelding in databases en modellen

Bij de bureaustudie wordt gebruik gemaakt van bestaande ondergrond- en monitoringsgegevens en modellen. Deze databases en modellen zijn afhankelijk van aanvullingen, eventuele correcties en toeleveringen door derden. Het aanvullen, corrigeren en toeleveren van gegevens en informatie wordt veel over het hoofd gezien. De systeembekendheid die bij het voorbereiden, inrichten, onderhouden en analyseren van de monitoring/meetnet wordt opgedaan mag niet verloren gaan.

- Het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) moet geactualiseerd en aangevuld worden met kennis en informatie, data en software.
- Vanuit de Wet op de Basisregistratie Ondergrond (BRO) hebben bestuursorganen (inclusief ZBO's) de wettelijke taak om gegevens²⁰ over de ondergrond te registreren.
- Voor piping-onderzoeken zijn het WBI-SOS en de BRO-database DINOLoket de meest aangewezen instrumenten voor de registratie, opslag en terugmelding van gegevens en modellen.

Pompproeven en modellen

De registratie, opslag en terugmelding van pompproeven en modellen is vooralsnog niet centraal geregeld in Nederland. Vooral de noodzaak om de bij pompproeven (én veldproeven) afgeleide parameters zoals de doorlatendheid, bergingscoëfficiënten en bodemweerstand te registreren is een grote kennisleemte. Ook lokale detailmodellen worden niet geregistreerd waardoor de kennis en informatie die is opgedaan met deze modellen niet optimaal worden benut.

Door de registratie, opslag en terugmelding wordt dubbel onderzoek beperkt en worden de budgetten van het HWBP, pov en waterschappen/hogheemraadschappen optimaal benut.

¹⁹ Bij verwijderen van peilbuizen en onttrekkingsbronnen moet dit volgens NEN-EN-ISO 22475-1:2006, Geotechnisch onderzoek en beproeving - Methoden voor monsterneming en grondwatermeting - Deel 1: Technische grondslagen voor de uitvoering.

²⁰ De in piping-onderzoeken veel gebruikte ondergrondgegevens moeten in de BRO worden geregistreerd.

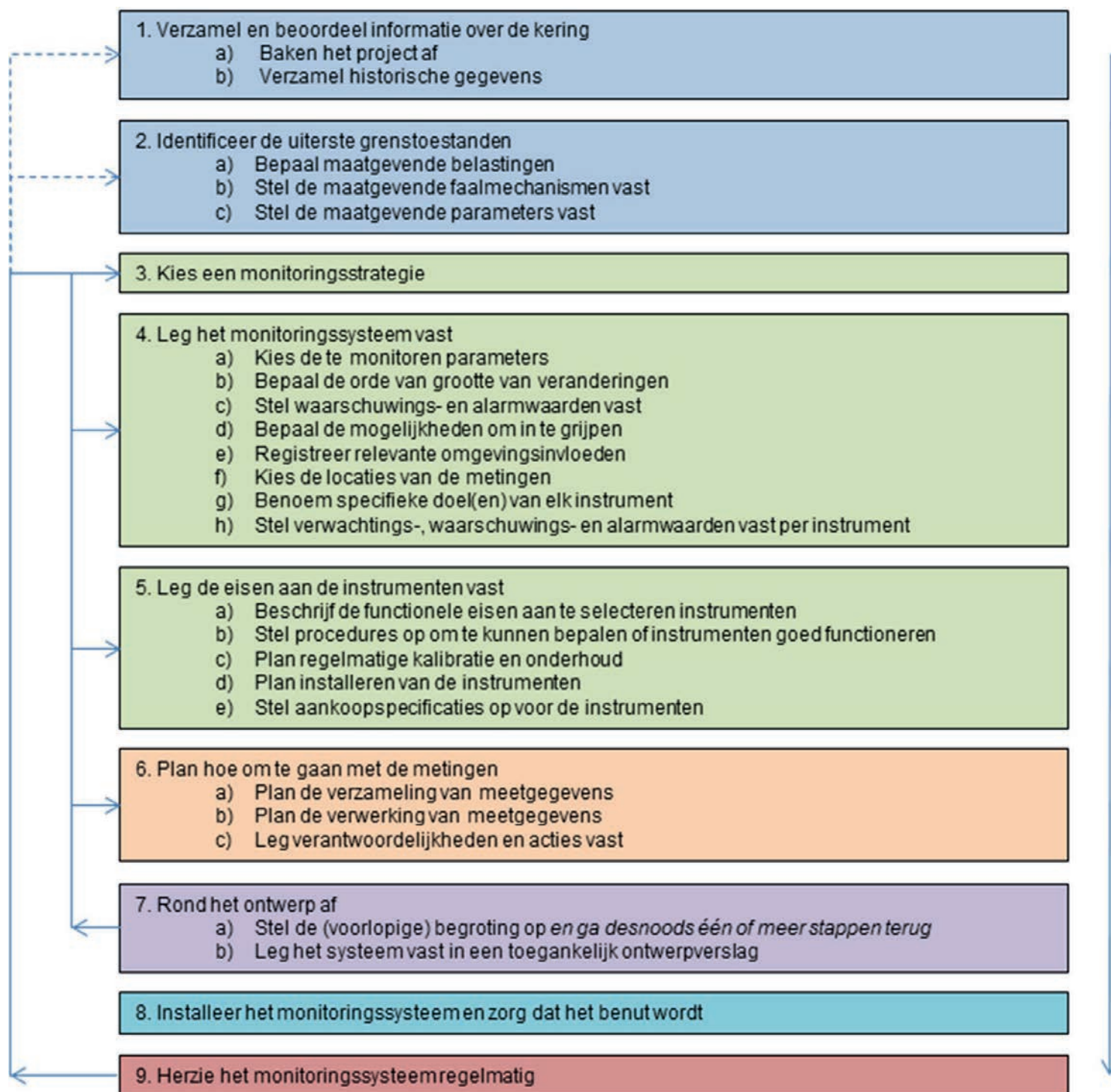
Dit zijn vooralsnog geotechnische sonderingsonderzoeken, grondwatermonitoringsputten en bodemkundige boormonster-profielen.

7. Referenties

- [1] Acacia Water, 2018. **pov Piping - Wellenonderzoek: Monitoren en karakteriseren van wellen & piping bij waterkeringen.** Referentie 160581, Gouda, 16 maart 2018
- [2] Arcadis, 2016. **pov Piping - Pipingonderzoek dijkkring 43, d70 en kd bepaling: Onderzoek naar de toepasbaarheid van de rekenregel van Sellmeijer 2011 ondersteund met veldwaarnemingen.** Referentie 078250239:D, Arnhem, 6 juni 2016.
- [3] Arcadis, 2017. **pov Piping - Intredeweerstand voorland Pannerdens Kanaal.** Referentie 078963646 B, Arnhem, 21 juli 2017.
- [4] Arcadis, 2017. **pov Piping - Invloed Maasklei en grindlagen.** Referentie 078784894 A, Arnhem, 22 september 2017.
- [5] Arcadis, 2018. **Modelstudie hoogwater Rijn januari 2018 - pov Piping: Intredeweerstand.** Referentie 079928246 0.1, Arnhem, 31 juli 2018.
- [6] Deltares, 2012. **Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.** I.o.v. RWS Waterdienst, Kenmerk 1202123-003, maart 2012
- [7] Deltares, 2017. **Handreiking voor het opstellen van een monitoringsplan t.b.v. piping.** 1221356-000-GEO-0010, Versie 2, 12 juni 2017, definitief.
- [8] Deltares, 2017. **Handreiking voor een meetnet gerelateerd aan piping - pov Piping pilot Duurzame Monitoring.** 11200131-002-GEO-0001, Versie 2, 15 augustus 2017, definitief.
- [9] Deltares, 2019. **Analyse grondwatermonitoring piping.** 26 april 2019.
- [10] Expertisenetwerk Waterveiligheid, 2010. **Piping - Realiteit of Rekenfout?** Expertisenetwerk Waterveiligheid (ENW), Utrecht, 2010.
- [11] Inpijn-Blokpoel, 2015. **pov Piping grind- en lemlagen: Werkplan onderzoek deellocatie 4: Thorn.** Documentnummer 02P005360-adv-01, Son en Breugel, 21 mei 2015.
- [12] Inpijn-Blokpoel, 2015. **pov Piping grind- en lemlagen: Werkplan onderzoek deellocatie 1 t/m 3: Well, Beesel, Buggenum.** Documentnummer 02P005360-adv-02, Son en Breugel, 7 augustus 2015.
- [13] Inpijn-Blokpoel, 2016. **pov Piping grind- en lemlagen: Analyse pompproef deellocatie 4: Thorn.** Documentnummer 02P005360-adv-03, Son en Breugel, 22 januari 2016.
- [14] Inpijn-Blokpoel, 2016. **pov Piping grind- en lemlagen: Analyse pompproef deellocatie 1 (Well) en 3 (Buggenum).** Documentnummer 02P005360-adv-04, Son en Breugel, 22 januari 2016.
- [15] Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A. 2000. **Analysis and Evaluation of Pumping Test Data.** 2nd Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement. www.hydrology.nl/key-publications/93-analysis-and-evaluation-of-pumping-test-data-1970.html
- [16] Multiconsult, 2015. **Bodemonderzoek ten behoeve van project 'pov Piping, intredeweerstand voorlanden' Pompproef Lobith nabij dijkpaal km 72 's Gravenwaardse dam.** 28 augustus 2015, Kenmerk: JS/BM150276-1/002254, versie 03 Definitief.
- [17] Multiconsult, 2015. **Bodemonderzoek ten behoeve van project 'pov Piping, intredeweerstand voorlanden' Pompproef Pannerden nabij dijkpaal km 149.** 27 augustus 2015, Kenmerk: JS/BM150276-2/002254, versie 02 Definitief.
- [18] Multiconsult, 2015. **Bodemonderzoek ten behoeve van project 'pov Piping, intredeweerstand voorlanden' Pompproef Westervoort nabij dijkpaal km 230.** 1 september 2015, Kenmerk: JS/BM150276-3/002254, versie 02 Definitief.
- [19] pov Piping, B.M. Berbee en F. Fennis. **pov publicatie Handreiking grondonderzoek voor Piping.** september 2019.
- [20] pov Piping, A.G. Wiggers, M. Sanders, H. Niemeijer en M. Tonneijck. **pov publicatie PipingPortaal: Systeem denken in de pipinganalyse.** november 2019.
- [21] pov Macrostabieliteit en pov Piping, 2018. **pov publicatie Technische Richtlijn Drainageconstructies,** Definitief 1 maart 2018.
- [22] Sellmeijer, J.B., 2006. **Numerical computation of seepage erosion below dams (piping).** In Proceedings Third International Conference on Scour and Erosion, 596-601, CURNET, Gouda, The Netherlands.
- [23] Stowa, 2012. **Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen.** STOWA-rapport 2012-50, Amersfoort, december 2012.
- [24] TAW, 2004. **Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken.** Werkgroep TAW-Techniek, Kenmerk: DWW-2004-057, 1 september 2004, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- [25] Waterschap Scheldestromen, 2018. **Project Overstijgende Verkenning piping: effect tijdsafhankelijkheid op stijghoogte bij getijdewateren uitgewerkt voor dijkkring 32 Zeeuws-Vlaanderen, kop van Ossensisse.** Versie 3.0, woensdag 30 augustus 2018.
- [26] Waterschap Rivierenland, 2017. **Ontwerp en Beoordelingsrichtlijn Vertikaal Zanddicht Geotextiel,** Groene versie 14 juni 2017.
- [27] Waterschap Drents Overijsselse Delta, 2018. **Nadere analyse veiligheidsprobleem Project 15Q HWBP Verkenning Zwolle-Olst: Bepaling van de veiligheidsopgave op basis van de nieuwe norm.** Kenmerk hwbp-1254, 2 november 2016.
- [28] WBI, 2017. **Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017.** www.helpdeskwater.nl/wbi2017.

Bijlage A

Stroomschema Monitoringsplan





College van dijkgraaf en heemraden
van Waterschap Rivierenland
Postbus 599
4000 AN Tiel

Onderwerp:	Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping	Ons kenmerk:	20-02
Datum:	16 maart 2020	Uw kenmerk:	2019134842/2019135081
Bijlagen:	1	Contactpersoon:	ir. M. Hazelhoff
Afschrift aan:	DGWB, Heij, WSRL, van der Veen, Weijers, de Jong	Functie:	Coördinator ENW
		E-mail:	marieke.hazelhoff@rws.nl
		Telefoon:	06-46935746

Geacht College,

Binnen de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-P) zijn veldonderzoeken en monitoring uitgevoerd. Inzichten die hieruit voortkwamen zijn gebundeld in onder andere de *Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping*. Deze handreiking is tot stand gekomen door een samenwerking tussen Waterschap Rivierenland, Arcadis en de POV-Piping. Het belangrijkste doel was om de drempel voor het opzetten van een meetnet te verlagen door praktische aanwijzingen en tips te geven.

In uw brief met kenmerk 2019134842/2019135081 vraagt u het ENW advies uit te brengen over de *Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping*.

Het ENW is positief over de handreiking. De algemene indruk is dat dit een gestructureerd, praktisch en toegankelijk rapport is geworden. Het is prettig leesbaar en toepassingsgericht. Het document geeft de beheerders van waterkeringen richting bij het opzetten van een meetcampagne voor piping en het is een goede aanvulling op het *Technisch rapport waterspanningen bij dijken*. Daarom beveelt het ENW beheerders aan om gebruik te gaan maken van deze handreiking. Het ENW wil benadrukken dat het wenselijk is om ook vóór projecten te monitoren, de meetnetten in stand te houden na afloop van het project en te zorgen voor een goede overdracht. Dit is ook in lijn met het advies *Beter leren keren* dat het ENW in 2017 heeft uitgebracht. Tot slot wil het ENW nog meegeven om in een volgende versie niet alleen handvatten op te nemen voor het opzetten van meet- en monitoringscampagnes voor piping, maar ook voor de andere mechanismen.

In de bijlage vindt u een overzicht van het verloop van de adviesvraag en wordt nader ingegaan op de deelvragen. Wij hopen u naar tevredenheid van advies te hebben voorzien.

Hoogachtend,

Dr.ir. G.M. van den Top
Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid



Bijlage Verloop adviesvraag en beantwoording deelvragen.

Verloop adviesvraag

In een brief gedateerd 31 oktober 2019, opgesteld door ir. J.B. van der Veen, vraagt u het ENW advies uit te brengen over de *Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping*. In de adviesvraag stelt u de volgende vragen aan het ENW:

1. Geeft deze handreiking voldoende richting aan de ervaren adviseur of technisch medewerker van een waterschap om een meetcampagne voor piping op te kunnen zetten?
2. Deze handreiking beoogt complementair te zijn aan het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken. Is de handreiking een nuttige aanvulling voor wat betreft monitoren van meetnetten voor piping-onderzoek?
3. Adviseert het ENW beheerders om met de Handreiking monitoring aan de slag te gaan?

Op 15 februari 2019 zijn Henk Wijers (POV-Piping) en Robbert Montfoort (Arcadis) aanwezig geweest bij de vergadering van de ENW-werkgroep Techniek om toelichting te geven op de handreiking.

Op 25 oktober 2019 heeft Henk Wijers samen met Albert Wiggers (RHDHV) nogmaals een presentatie gegeven en een adviesvraag gesteld. Opgemerkt wordt dat de opmerkingen die op 15 februari 2019 door de werkgroep zijn gemaakt grotendeels zijn verwerkt in de handreiking die op 25 oktober is besproken.

Beantwoording van de deelvragen uit de adviesvraag

De in het advies gestelde deelvragen worden hieronder beantwoord.

1. *Geeft deze handreiking voldoende richting aan de ervaren adviseur of technisch medewerker van een waterschap om een meetcampagne voor piping op te kunnen zetten?*

Ja, in combinatie met de documenten waar in de handreiking naar verwezen wordt. Voor de afronding van de handreiking geeft ENW nog vier aanbevelingen mee.

- Het ENW ziet dat bij het installeren en toepassen van peilbuizen veel fouten gemaakt worden. Tijdig beginnen en een validatie zijn daarom belangrijk. Het is goed om hierover een aanbeveling te doen in de handreiking. Ook is het ENW positief over de aanbeveling om het meetnet niet als standaard routine op te ruimen na de afronding van een project, maar (deels) over te dragen aan de keringbeheerder.
- Het ENW wil als aandachtspunt meegeven dat de duur van de belasting en de hoogte van de waterstand belangrijk zijn bij de extrapolatie van metingen. Bij verdrongen voorlanden ontstaat bijvoorbeeld een andere geohydrologische situatie dan op het moment waarop doorgaans de metingen worden uitgevoerd.
- Het mag explicieter benoemd worden dat de verantwoordelijkheden van de betrokken partijen in het monitoringsplan beschreven moeten zijn.
- Tot slot zitten er in de tekst kleine zaken die geactualiseerd moeten worden en kunnen er hyperlinks worden aangebracht naar *Handreiking Life Cycle Monitoring* en het *Protocol selectie en installatie waterspanningsmeters*. De detailopmerkingen zullen apart worden gedeeld met de POV-Piping.

2. *Deze handreiking beoogt complementair te zijn aan het Technisch rapport waterspanningen bij dijken. Is de handreiking een nuttige aanvulling voor wat betreft monitoren van meetnetten voor pipingonderzoek?*

Ja, de handreiking is een welkome aanvulling op het *Technisch rapport waterspanningen bij dijken*. Het geeft concrete aanwijzingen voor hoeveelheden, locaties en soorten peilbuizen.

3. *Adviseert het ENW beheerders om met de Handreiking monitoring aan de slag te gaan?*

Deze handreiking is een goed en praktisch document. Het ENW adviseert beheerders daarom om met de *Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping* aan de slag te gaan.

COLOFON

Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping.
Een praktische handreiking voor tijdsafhankelijke monitoring.

KLANT

Waterschap Rivierenland

AUTEUR

Robbert van Montfoort & Albert Wiggers

PROJECTNUMMER

C03091.000364

ONZE REFERENTIE

079982221 0.10

DATUM

22 januari 2020

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

Albert Wiggers, Technisch manager voor de pov Piping

VRIJGEGEVEN DOOR

Henk Weijers, Programmamanager pov Piping

VORMGEVING

No Concept No Glory, Zwolle

pov-piping.nl

januari 2020

Deze handreiking is opgesteld in het kader van de Project overstijgende Verkenning Piping, een innovatieproject van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). In de handreiking zijn de theoretische en praktische overwegingen die een rol spelen bij meetnetten en monitoring van piping beschreven, om dit beter toegankelijk te maken voor een breed publiek.

Waterschap Rivierenland
Blomboogerd 1
4003 BX Tiel

POV Piping is onderdeel van het
Hoogwaterbeschermingsprogramma

