

POV PipingPortaal

een publicatie
van de POV Piping

inhoudsopgave

DISCLAIMER

Niets uit deze specificaties / drukwerken mag worden gereproduceerd en / of gepubliceerd door middel van druk, fotokopie, microfilm of op enige andere wijze, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van HaskoningDHV Nederland B.V.; noch mogen ze zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor andere doeleinden dan waarvoor ze zijn geproduceerd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor deze specificaties / drukwerk ten opzichte van een andere partij dan de personen door wie het werd opgedragen en zoals gesloten onder die overeenkomst. Het geïntegreerde QHSE-beheersysteem van HaskoningDHV Nederland B.V. is gecertificeerd in overeenstemming met ISO 9001: 2015, ISO 14001: 2015 en OHSAS 18001: 2007.

Voorwoord	3	6.5 Relevantie en waarschijnlijkheid	41
1 Vernieuwingen in aanpak piping	4	6.6 Meenemen van stijghoogtemetingen in schematisering	42
1.1 Doel	4	6.7 Parameters: heterogeniteit en anisotropie	43
1.2 POV biedt handvat aan dijkbeheerder voor moderne aanpak piping	4	7 Rekenen	46
1.3 Overzicht van op piping gerichte handreikingen	5	7.1 Deelmechanismen	46
1.4 Totstandkoming	6	7.2 Aanpak en detailniveau van rekenen	47
2 Piping is een zaak voor de hele beheercyclus	7	7.3 Rekenen met voorlandweerstand	48
2.1 Voor adviseurs en rekenaars maar ook voor bestuurder en beleid	7	7.4 Rekenen met anisotropie en meerlaagse aquifers	49
2.2 Effectiviteit van beslissingen rondom piping is niet vanzelfsprekend	7	7.5 Regionale modellen	50
2.3 Proactieve opzet van informatievergaring	9	7.6 Tijdsafhankelijk rekenen	52
2.4 Werkplaatsen: procesmatige verbinding van theorie en praktijk	11	7.7 Keuze rekenmodellen	52
2.5 Systeemkennis, onderzoek en alternatieve oplossingen	13	8 Evalueren uitkomsten pipinganalyse	54
3 Werkwijze pipinganalyse	16	8.1 Keuzemogelijkheden	54
3.1 Algemeen	16	8.2 Gedetailleerder schematiseren	54
4 Bureaustudie en onderzoeksstrategie	19	8.3 Fysieke maatregel uitstellen	54
4.1 Doel en aanpak	19	9 Versterkingsmaatregelen	59
4.2 Inventariseren gegevens	20	9.1 Algemeen	59
4.3 Karakteriseren van ondergrondopbouw	22	9.2 Ontwerpinstrumentarium en onderliggende documenten	60
4.4 Karakteriseren van geohydrologisch systeem	24	9.3 Horizontale kwelwegverlenging	60
4.5 Voorlopige vakindeling	28	9.4 Pipingsschermen	61
4.6 Gevoeligheidsanalyse	29	9.5 Drainageoplossingen	62
4.7 Inventariseren van oplossingsrichtingen	29	9.6 Filteroplossingen	65
4.8 Onderzoeksstrategie	30	10 Dagelijks beheer na de realisatiefase	69
5 Onderzoeken	32	10.1 Datamanagement	69
5.1 Onderzoeksmethoden	32	10.2 Kennisoverdracht tussen geo-disciplines	69
5.2 Geofysische en lekdetectie technieken	33	10.3 Onderzoeksverplichting bij uitstel maatregelen	69
5.3 Geotechnische technieken	35	10.4 Gedrag nieuwe pipingmaatregelen	69
5.4 Geohydrologische technieken	35	10.5 Delen ervaringen	69
6 Geotechnisch schematiseren	38	Slotwoord	71
6.1 Doel en aanpak	38	11 Literatuurlijst	72
6.2 Lengteprofiel en vakindeling	40	11.1 Algemeen	72
6.3 Maatgevend dwarsprofiel	40	11.2 Synthesedocumenten	73
6.4 Beschouwing scenario's	40	11.3 Verkenningen POV Piping	73



Voorwoord

Beste Lezer,

Met ontzettend veel plezier hebben wij de afgelopen jaren aan de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-piping) gewerkt. Het is één van de innovatieprojecten binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Het was ook de eerste van een reeks POV's. De POV piping is in het leven geroepen op initiatief van waterschappen om praktische invulling te geven aan onderzoek, rekenen en maatregelen ten aanzien van piping. De POV Piping heeft in de afgelopen jaren belangrijke inzichten opgeleverd.

Het was een feestje om met alle zeer betrokken deskundigen inzichten op te doen en stap voor stap belangrijke resultaten te boeken. Zowel in het op een nieuwe manier in beeld krijgen van piping, het vertalen van het beeld naar de opgave, als het zoeken naar vernieuwende versterkingstechnieken hebben we belangrijke stappen gezet.

De meest in het oog springende zijn het stimuleren van verbeterde samenwerking op verschillende vlakken:

- Over expertises heen met de geodriehoek: geologen, geohydrologen en geotechnici,
- Over rollen heen met werkplaatsen: alle betrokken kennis bij elkaar brengen op alle niveaus, van omwonende tot bestuurder en van dijkbeheerder tot adviseur,
- Tussen overheidsorganisaties onderling: waterschappen, HWBP, Rijkswaterstaat en ministerie,
- In de interactie tussen projecten en beheerafdeling door middel van de beslisboom,
- Tussen markt en overheid, o.a. met het proces 'innovatie uit de markt',
- En tussen beheerders onderling door het opzetten van de centrale registratie van zandvoerende wellen.

Het meest tastbare zijn de ontwikkelde nieuwe technieken, o.a.:

- Nieuwe grondonderzoekstechnieken zoals de doorlatendheidsonderingen,
- Nieuwe dijkverbeteringstechnieken zoals filterschermen (verticaal zanddicht geotextiel en grofzand barrière) en de herontdekking van drainagetechnieken als oplossing voor piping.

Deze resultaten kunnen kostbare dijkversterkingen voorkomen, uitstellen of verkleinen. Bovendien kunnen ze zowel bij de beoordeling als bij het ontwerp meerwaarde opleveren.

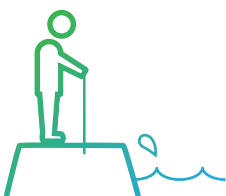
Zes jaar lang werden middels verschillende verkenningen bij beheerders en de POV binnen het HWBP nieuwe inzichten opgedaan. Naast de handreiking grondonderzoek en de handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping wordt in het Pipingportaal de nieuwe kennis gebundeld en de samenhang geborgd tussen de documenten.

Wij bedanken de initiatiefnemer en voormalig projectmanager Chris Griffioen voor al zijn inspanning. Daarnaast bedanken we onze opdrachtgevers: Jacob Knoops, Eric Jongmans en Jaap van der Veen. Wij danken het projectteam, de projectgroep, de stuurgroep en alle 'dijkwerkers' van de waterschappen, Rijkswaterstaat, marktpartijen en kennisinstellingen die allen aan dit pipingportaal van de POV-piping hebben bijgedragen. Ook veel dank aan de auteurs van dit document, Michel, Monique, Hans en vooral ook onze technisch manager Albert: het was een ingewikkelde klus om alle nieuwe inzichten in een overzichtelijk en samenhangend document te verwerken. We zijn erg blij dat dit zo goed is gelukt. Bij de afronding van dit document willen we ook even stilstaan bij het schokkende verlies van vier collega's gedurende de periode waarin we met dit project bezig waren. Zonder de inzet van Ger Peters, Ger Vergeer, Peter Damen en Herman Dijk zouden we niet zo ver zijn gekomen.

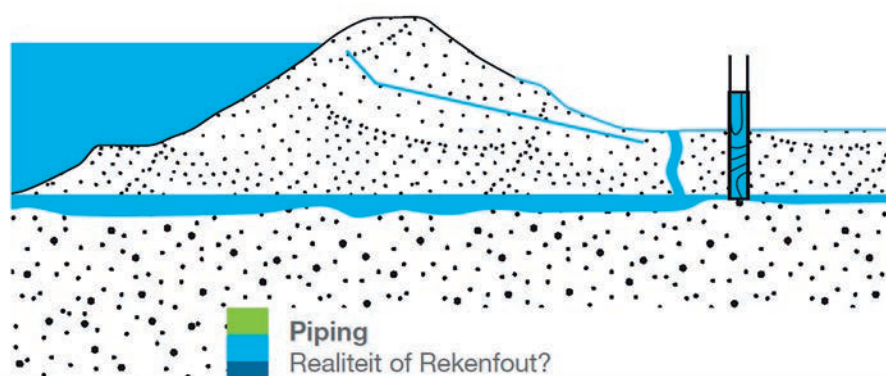
Het portaal geeft een overzicht van de ontwikkelde kennis in de afgelopen zes jaar. Verdere ontwikkeling staat niet stil: in diverse projecten wordt de ontwikkelde kennis al weer verder uitgewerkt. Het netwerk van pipingdeskundigen weet elkaar goed te vinden. Nu de POV piping stopt zal de regie over de verdere kennisontwikkeling voor dijkversterking op piping worden overgenomen door het team Kennis en Innovatie van de programmadirectie HWBP.

Wij wensen onze opvolgers veel succes, maar vooral ook veel plezier bij de ontwikkeling van verdere inzichten omtrent het intrigerende faalmechanisme piping.

Henk Weijers
Leonie de Jong



1. Vernieuwingen in aanpak piping



1.1 Doel

Piping is altijd een belangrijk en intrigerend faalmechanisme bij dijken geweest. In 2010 heeft het Expertisenetwerk Waterveiligheid (ENW) het document 'Piping – Realiteit of rekenfout' [27] gepresenteerd. Dit document analyseert onder andere gevallen van gevaarlijk optredende wellen en terugschrijdende erosie in de Verenigde Staten. Toepassing van de Nederlandse rekenregels in deze situatie zou een onjuiste en onveilige beoordeling of ontwerp hebben opgeleverd.

Hiermee kwam de ontwikkeling van het oordeel over de veiligheid van waterkeringen in relatie tot het verschijnsel 'piping' in een stroomversnelling. Dit heeft geleid tot vervolgonderzoek dat heeft geresulteerd in bijstelling van de berekeningswijze voor minimale kwelweglengtes voor dijken op pipinggevoelige ondergrond in het 'Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen' [22]. De rekenregel van Bligh (1935) is verlaten en de rekenregel van Sellmeijer aangepast en opgenomen in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) en Ontwerpinstrumentarium (OI) voor waterkeringen.

Dit leidt bij toetsing aan de norm bij dijken geregeld tot afkeuring en bij verbetering tot vaak onaanvaardbaar groot ruimtebeslag bij de gangbare oplossingen.

Hiermee blijft er een groot belang om onderzoek naar verdere verbetering voor de beoordeling van piping door te zetten. Rijkswaterstaat en de waterschappen hebben om die reden gezamenlijk via het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) een Projectoverstijgende Verkenning (pov Piping) opgezet met als oogmerk een doelmatigere en efficiëntere aanpak. Deze pov heeft daartoe een serie verkenningen naar verschillende (deel)aspecten uitgevoerd om de traditionele

verbetermaatregelen te verrijken met extra kennis en middelen om het faalmechanisme piping met een kleiner ruimtebeslag en tegen lagere kosten te kunnen beheersen. Daarnaast biedt de pov piping met de 'werkplaatsen' een nieuw handvat om theorie en praktijk te verbinden. Zonder afbreuk te doen aan de veelheid van reeds bestaande werkwijzers en handreikingen voor piping, voegt dit Piping Portaal, vanuit het perspectief van nu, inzichten toe die recht doen aan de doelstellingen van de pov Piping, namelijk: het dichten van het gat tussen praktijk en theorie. De pov Piping richt zich daarbij met name op dijken en niet op waterkerende constructies. De pov Piping doet geen fundamenteel onderzoek naar de rekenregel die het falen op piping beschrijft. Dit laatste hoort thuis bij de kennisagenda van de onderzoeksinstituten. In dit document zijn verwijzingen gemaakt naar documentatie waarin de achtergronden bij de theorie achter de pipingregels te vinden zijn.

1.2 pov biedt handvat aan dijkbeheerder voor moderne aanpak piping

Dit document verschaft inzicht in en ordening van alle nieuwste inzichten en onderzoeken die in de pov Piping zijn opgenomen en relateert dit aan de gebruikelijke beheer- en adviespraktijk. Het document biedt de gebruiker feitelijk een handvat met actuele kennis voor advisering, het maken van veiligheidsbeoordelingen en dijkversterkingsplannen, gericht op het faalmechanisme piping. Met piping bedoelen we hier het hele proces dat leidt tot piping: de inleidende verschijnselen van drukopbouw in het ondergrondse water, opbarsten van een weestand biedende toplaag en het ontstaan van geconcentreerde stroming, het omhoogvoeren van zandkorrels (heave) en het daadwerkelijk ontstaan van terugschrijdende erosie, de pijpvorming ofwel piping.

Dit document verschaft inzicht in het proces en de tussentijdse beslissingen die de doelgroep van beheerders met hun adviseurs, ontwerpers of rekenaars doorlopen en wat er aan informatie en berekening nodig en voorhanden is om een plan te maken voor doeltreffender keuzes. Dit document is opgesteld voor professionals met enige jaren ervaring. Hierbij richt hoofdstuk 2 zich meer op de betrokkenen die niet direct een echt technische-inhoudelijke rol vervullen: de beleidsadviseur, de beheerder, de bestuurder, de projectleider. Hoofdstuk 3 is vooral voor specialisten met enkele jaren ervaring op het gebied van piping. Voor het compleet toepassen van de aanwijzingen die in dit document worden gegeven is tevens de inbreng uit andere vakgebieden noodzakelijk. Vooral van specialisten op het gebied van de fysische geografie/geologie en geohydrologie.

Met de voorgestelde aanpak zal er meer vertrouwen ontstaan, geen onnodig maar wel voldoende onderzoek worden gedaan en op basis hiervan worden waterkeringen niet onnodig afgekeurd of worden geen onnodig grote en dure versterkingsmaatregelen getroffen.

Dit document benadert de moderne aanpak van piping vanuit een technische en een organisatorische invalshoek. Op het vlak van techniek worden nieuwe oplossingen beschreven maar wordt ook kritisch gekeken naar de gangbare werkwijze van onderzoeken en analyseren. Hierbij is aandacht voor de verkenningen op het vlak van observeren en meten, maar ook voor het beter benutten van alle soorten aan geografisch georiënteerde informatie waarmee de ondergrond en het geohydrologische systeem beter kunnen worden geschematiseerd. Dit document biedt eveneens een kritische kijk op de totstandkoming van beslissingen over de aanpak vanaf onderzoek tot aan het treffen van maatregelen. Het portaal is een hulpmiddel voor een waterkeringbeheerder om vanuit bestaande kennis, met toepassing van de bevindingen van de POV, de juiste beslissingen te kunnen nemen in alle fasen van de beheercyclus.

1.3 Overzicht van op piping gerichte handreikingen

Er bestaat een veelheid aan soorten handreikingen die allen waardevol zijn voor het toetsen, ontwerpen en beheren van pipinggevoelige waterkeringen. Figuur 1-1 geeft een overzicht van veel gebruikte basisdocumenten voor het beoordelen van en ontwerpen op piping. In het overzicht zijn geen verkenningen uit de POV Piping opgenomen. Het PipingPortaal is hier juist voor bedoeld. Dit document ontsluit ten eerste de opgedane kennis en ervaringen van de POV Piping. Daarbij geeft het de status aan van de verkenningen en hoe deze, naast het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) en het Ontwerpinstrumentarium (OI), kunnen worden toegepast voor het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen op piping.

document	Inhoud / type document
PipingPortaal (2019) diverse rapporten van verkenningen zie literatuurlijst Synthesedocumenten en Verkenningen	biedt concretere handvatten voor <ul style="list-style-type: none"> • verbeterde analyse pipingrisico • procesmatig aangepaste aanpak • gerichtere gegevensverwerking • analyse grondwaterstroming • ruimtebesparende oplossingen
Omgaan met piping (2015)	Handelingsperspectief vanuit de inhoud. Bedoeld voor zowel politici, bestuurder, beheerders, adviseurs en kenniswerkers
[13] OI2014 v4 (2017) [29] WBI2017 (2017) [33] Schematiseringshandleiding piping WBI 2017 (2017) (SH Piping) [32] Piping bij kunstwerken (2017)	Documenten voor de uitvoerende adviseur / beheerder A. SH Piping: aanwijzingen om de ondergrond op een juiste manier te schematiseren met voldoende gegevens, zodat een oordeel kan worden gegeven conform de Waterwet B. voorlopige handreiking ontwerppraktijk
[14] Handelingsperspectief geotechnisch onderzoek (2017) [S1] Synthesedocument Handreiking Grondonderzoek voor Piping (2019) [S2] Synthesedocument Handreiking Meetnet en Monitoringstechnieken	Methoden voor gegevensverzameling
[35] TR Grondmechanisch Schematiseren (2012) [22] Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen (2012) [36] TR Waterspanningen bij dijken (2004) [41] Werkwijzer piping (2014)	Rekenmethoden en schematiseringen voor beoordelingen en ontwerpen
[28] POV publicatie Drainagetechnieken (2018) [23] Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn DMC (2017) [24] Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Zanddicht geotextiel (2017)	Documenten ten behoeve van specifieke ontwerp-oplossingen piping
[27] Piping, realiteit of rekenfout (2010) [37] TR Zandmeevoerende wellen (1999) [34] TR Actuele sterkte (1996)	Achtergrondinformatie basismechanisme en theorie m.b.t. piping oude rekenregels, Bligh, Sellmeijer en Lane

Figuur 1-1: Overzicht van relevante informatie uit basisdocumenten voor beoordelen en ontwerpen op piping

1.4 Totstandkoming

Dit document is opgesteld door de projectgroep pov Piping. Er is gebruik gemaakt van informatie zoals beschreven in de eindrapportages van de verkenningen van de pov Piping.

Het pov PipingPortaal is opgesteld door:

Albert Wiggers	Royal HaskoningDHV, Auteur
Monique Sanders	Royal HaskoningDHV, Auteur
Michel Tonnejck	Royal HaskoningDHV, Auteur
Ron Stroet	Royal HaskoningDHV, Review geohydrologie
Anne Floor Timan	Royal HaskoningDHV, Illustraties
Hans Roos	Royal HaskoningDHV, Illustraties

De pov Piping hecht er veel waarde aan dat het pov PipingPortaal een breed gedragen document is in de sector. Om dat te borgen heeft de pov Piping een begeleidingsgroep samengesteld.

De volgende personen zaten in de begeleidingsgroep:

Hans Niemeijer	pov Piping, Arcadis
Peter Blommaart	Hogeschool Rotterdam/ ENW Techniek
Jan Blinde	Deltares
Jan Jaap Heerema	Rijkswaterstaat
Bas Berbee	Fugro
Laura Taal	Waterschap Rivierenland

De volgende personen zijn voor dit document geïnterviewd:

Chris Griffioen	Waterschap Drentse en Overijsselse Delta
Govert Geldof	Geldof c.s.
Hans van der Sande	Waterschap Scheldestromen
Kees Jan Leuvenink	Waterschap Aa en Maas
Laura Taal	Waterschap Rivierenland
Rimmer Koopmans	Arcadis
Merijn Bas	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Bart Pastor	Hoogwaterbeschermingsprogramma
Joyce Hoed	Hoogwaterbeschermingsprogramma
Wouter Zomer	BZ Innovatiemanagement
Bert Koster	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Henk Senhorst	Rijkswaterstaat
Caspar ter Brake	BZ Innovatiemanagement
Hendrik Meeuwse	Witteveen en Bos
Harry Bos	Volker Wessels
Henk Wieling	DMC
Maurits van Dijk	Waterschap Drents Overijsselse Delta

2. Piping is een zaak voor de hele beheercyclus

2.1 Voor adviseurs en rekenaars maar ook voor bestuurder en beleid

De ontwikkelingen ten aanzien van het faalmechanisme piping brengen vrij grote onzekerheden aan het licht. Om niet al deze onzekerheden in overmatig strenge eisen voor waterkeringen te hoeven opnemen is de juiste kennis van de opbouw en het gedrag van de ondergrond nodig. Dit hoofdstuk vormt feitelijk één groot pleidooi om te zorgen dat deze juiste kennis ook daadwerkelijk verworven wordt in een beheer-, beoordelings- en versterkingsproces, waar dit niet vanzelfsprekend is.

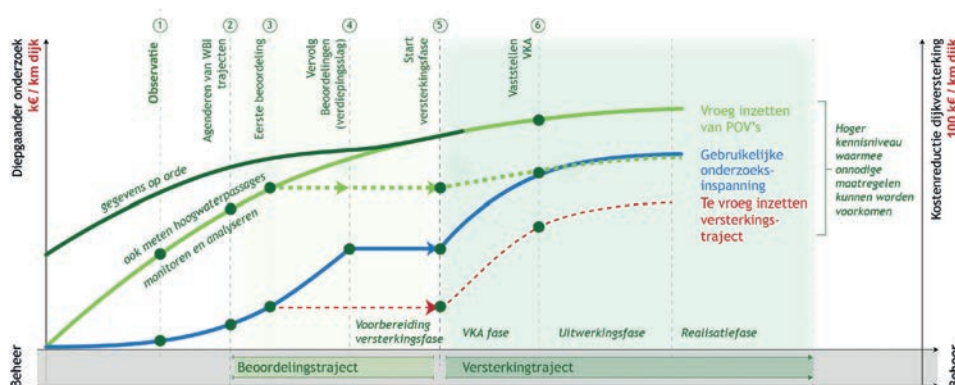
Het gezamenlijke doel van de beheerder, de adviseur, de bewoner, de bestuurder is om een veilige dijk te hebben tegen aanvaardbare kosten en passend in zijn omgeving. De adviseur levert een technisch inhoudelijk juist advies over veiligheid en kosten, waarbij hij/zij zich moet baseren op technisch juiste informatie. De aanvaardbaarheid van de kosten en de inpassing in de omgeving bepalen daarnaast in sterke mate de kwaliteit van het uiteindelijke advies. Met andere woorden, de inbreng van bestuurders, beleidsmakers en belanghebbenden is nodig om te toetsen of het technische advies passend is. Dit hoofdstuk biedt handvatten om vanuit verschillende perspectieven, elkaar zodanig te verstaan dat het optimale niveau van informatie kan worden bereikt om een dijk te krijgen die voldoende veilig is.

2.2 Effectiviteit van beslissingen rondom piping is niet vanzelfsprekend

Een dijkbeheerder komt in verschillende fasen in zijn beheer op verschillende manieren in aanraking met piping. In elk van deze fasen komt hij voor beslissingen te staan die hem uiteindelijk in staat stellen het faalmechanisme beter te beheren en te beheersen.

LEGENDA

- Vroeg inzetten van pov's
- - - POV-p toepassingen
- - - Langdurig meten (hoog water)
- Gebruikelijke onderzoeksinspanning
- - - Te vroeg inzetten versterkingstraject
- Beslismomenten



Figuur 2-1 Onderzoeksinspanning gedurende beheercyclus en corresponderende kostenreductie versterkingsopgave (Bron: Royal HaskoningDHV)

Bovenstaand figuur representeert het nut van tijdige monitoring, onderzoek en analyse voor verschillende beslismomenten (groene stippen) in de beheercyclus. Deze momenten triggeren het genereren van informatie: een observatie (bijvoorbeeld zandmeevoerende wel, een 'calamiteit'), een beoordeling en opneming van een afgekeurd traject op de verbeteringsagenda, de planvormingsfase. Hierdoor ontstaat verbetering van inzicht in de lokale pipingproblematiek en effectiviteit in besparing van ruimte en kosten voor maatregelen om piping te beheersen. In enkele gevallen kunnen maatregelen zelfs worden vermeden.

Het is steeds de uitdaging om een beslissing voor monitoring of nader onderzoek daadwerkelijk tijdig te nemen (lichtgroene lijn, waarin monitoring tijdig op orde wordt gebracht of al is (donkergroen)). In de praktijk blijken financiële of planningsoverwegingen sterker dan de technisch-inhoudelijke overweging ter verkrijging van noodzakelijke gegevens om besparing op aanlegkosten of ruimtebeslag te verkrijgen of een hogere betrouwbaarheid van het veiligheidsniveau.

De blauwe lijn in Figuur 2-1 met informatiesprongen komt veel voor. In de beheerfase (grijze balk) is er normaal gesproken ruim de tijd voor onderzoek ter voorbereiding op toetsing (veiligheidsbeoordeling) en eventueel versterking. In deze fase drukken potentiële onderzoeks-financiën hard op de relatief beperkte beheerbegroting en zou het goed zijn om met de juiste motivering financiën uit de beoordelings- of versterkingsfase naar voren te kunnen halen. Er is een ontwikkeling aan de gang, waarbij ook in de beheerfase meer aandacht voor de waterveiligheid wordt ingezet. De Zorgplicht is daarbij een centraal thema.

Tijdens hoogwater informatie vergaren is in dezen van groot belang. Juist dan is er de mogelijkheid om het gedrag van de kering beter te leren kennen en om de schematiseringen en berekeningen die bij de beoordeling en/of versterking zijn gedaan te verifiëren. Dit is noodzakelijk om in volgende beoordelingsronde goed beslagen ten ijs te komen en helpt bij het opstellen van een efficiënte verbetering waar nodig.

In een *beoordelingsfase* zijn er goede mogelijkheden om de planning een ondergeschikte rol te laten spelen en met een goede motivering financiën vrij te maken voor nader onderzoek om aan te tonen dat de dijk langer meekan bij de gestelde norm (duurzaamheid) of met betere informatie naar de versterkingsfase doorschuift.

In een *versterkingsfase* is er normaal gesproken behoorlijke financiële ruimte voor onderzoek. De planning is dan echter sterk leidend, maar de behoefte aan goede gegevens ook. Dit is een bekend fenomeen en deze ervaring kunnen beslissers en adviseurs uitstekend gebruiken in de beheerfase en beoordelingsfase om vroegtijdig onderzoek te motiveren.

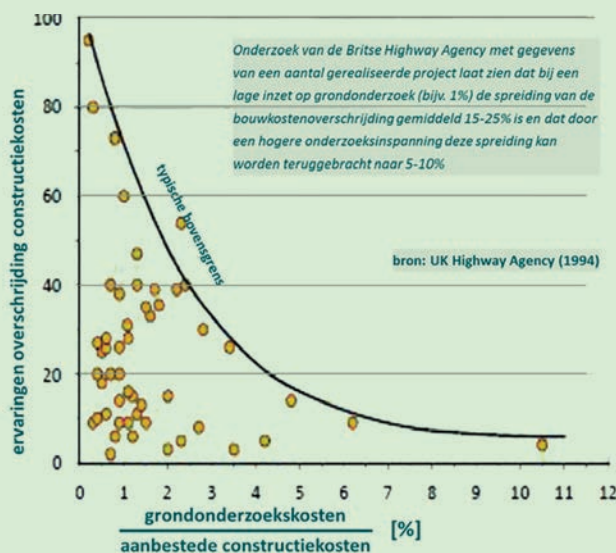
Tegelijk blijft het algemene inzicht gelden dat elke goed bestede euro voor onderzoek een veelvoud aan maatschappelijke kostenbesparing oplevert. Kwantificering daarvan kan goed helpen om in bovengenoemde gevallen de juiste beslissing te bewerkstelligen (zie kadertekst).

Risicogestuurd grondonderzoek

Gericht bestede euro's voor onderzoek leveren een besparing op ruimte of aanlegkosten en een beperking van risico's (of meer zekerheid). Het is nog niet makkelijk om aan te tonen hoeveel een euro onderzoek oplevert in besparing op ruimte, goedkopere of veiliger aanleg. Er is geen vuistregel in de zin van 1 euro onderzoek levert vijfmaal zoveel op. Er zal ook sprake zijn van afnemende meerwaarde van vervolgonderzoek.

De Britse Highway Agency heeft in 1994 een analyse uitgevoerd en daarin kostenoverschrijdingen van hun constructies gerelateerd aan de gepleegde hoeveelheid geotechnisch onderzoek. Daaruit blijkt dat elke procent extra grondonderzoek (ten opzichte van de bouwkosten) het bouwkostenrisico in geld uitgedrukt met een kwart kan reduceren [7].

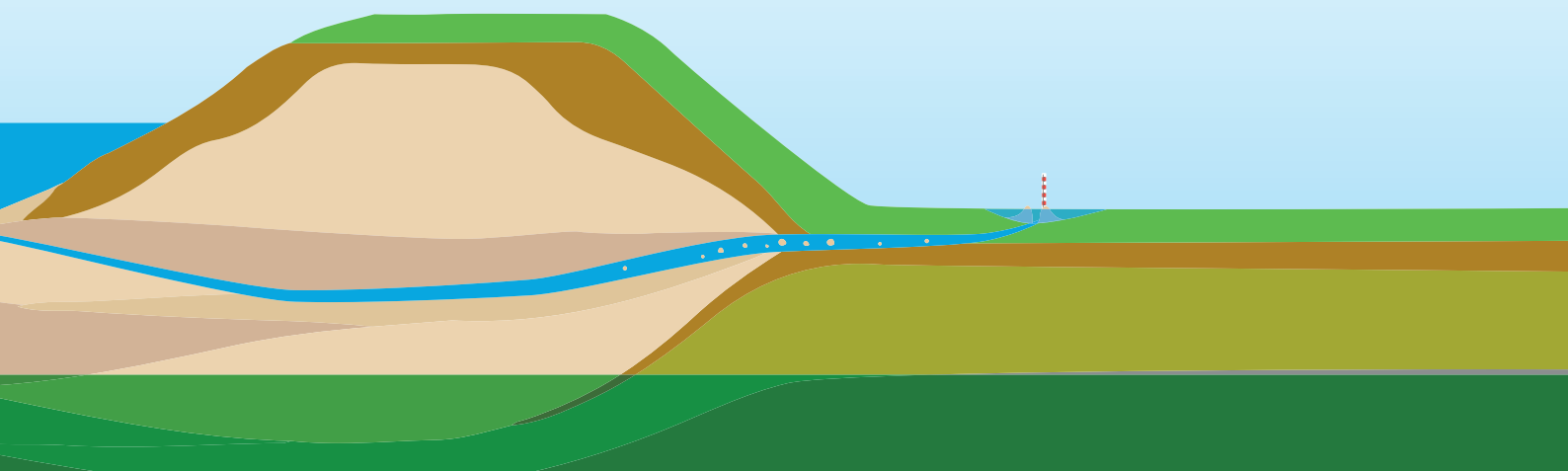
Figuur 2-2: Effect van onderzoeksinspanning op spreiding bouwkostenoverschrijding (bron: UK Highway Agency, 1994)



In het Technische Rapport Actuele Sterkte (1996) [34] heeft de TAW in Annex 1.7 een theoretische onderbouwing gegeven voor de kans op kostenbesparing in relatie tot doorgezet grondonderzoek voor verkleining van de onzekerheid over de schuifsterkte van de ondergrond. Met een groter aantal monsters en metingen kan de schuifsterkte nauwkeuriger worden vastgesteld, waardoor bij een gelijke rekenkundige veiligheid met een kortere of lichtere binnenberm kan worden volstaan. Bij minder onzekerheid kan men immers volstaan met een kleinere veiligheidsmarge. Voor pipingmaatregelen kan een analoge werkwijze worden opgesteld.

Makkelijker toegankelijk is het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. Dit behandelt de onderbouwing van aanvullend onderzoek in sectie 6.4.4 op blz. 149 e.v. Hier staan voorbeelden voor een afweging van kosten voor aanvullend grondonderzoek en mogelijke besparingen.

Het is aan de adviseur om steeds een degelijke onderbouwde afweging te maken wat aanvullend onderzoek oplevert in termen van geld, ruimte of draagvlak, risicobeperking. De POV heeft nog geen directe verkenning uitgevoerd om hiervoor een wat algemenere aanpak te genereren. Risicogestuurd geotechnisch onderzoek staat onder andere goed beschreven in de 'Richtlijn risicogestuurd grondonderzoek' [30]. Deze is tot stand gekomen in het programma Geo-impuls. Hierbij moet worden bedacht dat risicogestuurd onderzoek ook kansgericht onderzoek kan zijn.



Het is aan de adviseur en de rekenaar om beslissingen op de juiste wijze te helpen motiveren. Als het inzicht in potentieel maatschappelijk voordeel dan zo evident is, dan is het aan dijkbeheerders en hun adviseurs om dat maatschappelijk voordeel bij elke beslissing tot wel of niet doen van extra onderzoek op de juiste wijze te motiveren. De resultaten van de POV Piping bieden houvast om deze beslissingen doelmatig te onderbouwen. Beslissers zouden hierin naar de juiste argumenten moeten vragen, adviseurs dienen met de juiste argumenten te komen, bij voorkeur gekwantificeerd op basis van bijvoorbeeld een gevoeligheidsanalyse.

In onderstaande paragrafen bieden wij handvatten voor de dijkbeheerder om op de juiste momenten te zorgen voor voldoende inzet tijdens vooronderzoek, voor beheersing van het pipingprobleem in de operationele fase tijdens voorkomende hoogwaters, voor de beoordeling/toetsing en voor een eventueel versterkingsontwerp.

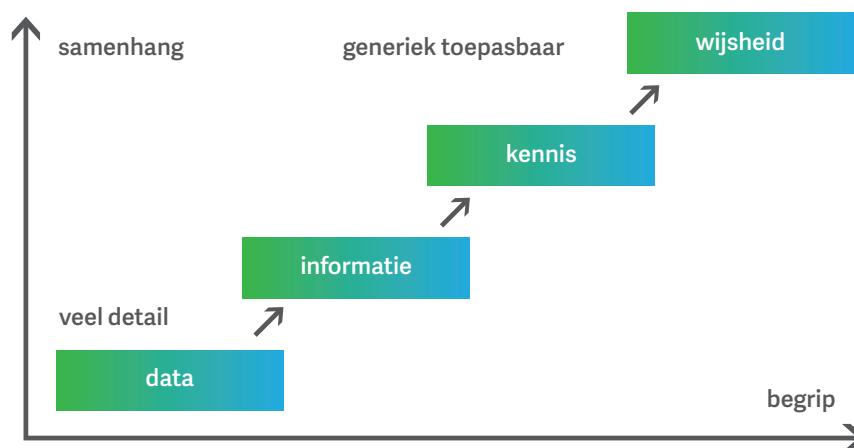
2.3 Proactieve opzet van informatievergaring

2.3.1 Perspectief op informatievergaring vanuit zorgplicht

De zorgplicht van een dijkbeheerder gaat over heel veel verschillende zaken. In de context van dit document over piping lichten we daar een beperkt aantal zaken uit. Goede en onderbouwde kennis van de waterkering biedt de beheerder de mogelijkheid om te allen tijde wijze beslissingen te nemen ten aanzien van beheer, onderhoud en verbeterings- en noodmaatregelen (zie figuur 2-3). Hoe passen de uitdagingen in relatie tot piping in de integrale zorgplicht voor waterkeringen? Heel kort samengevat gaat dat over de volgende punten:

1. de beheerder kent alle ins en outs van de actuele toestand van de dijk;
2. daar waar kennis over de dijk ontbreekt, spant de dijkbeheerder zich optimaal in om deze kennis tijdig te vergaren in het licht van 'gesteld te staan voor noodmaatregelen, periodieke beoordeling of versterkingsplannen;
3. de beheerder kent de veiligheidstoestand van de dijk in relatie tot de norm;
4. de beheerder weet waar tijdelijke of structurele maatregelen nodig zijn om de veiligheid onder alle omstandigheden zo goed mogelijk te realiseren.

Bovenstaande duidt er op dat alle noodzakelijke gegevens vergaard moeten zijn, goed toegankelijk en goed geanalyseerd.



Figuur 2-3: Generieke voorstelling van benodigde informatieniveaus om juiste beslissingen te nemen.

2.3.2 Wisselwerking adviseur en beslisser

Zoals hierboven benoemd is het aan de adviseur om de onderzoeksopzet zo goed mogelijk te motiveren. Technisch inhoudelijke argumenten zijn daarin heel belangrijk. Maar in de totale context van de beheercyclus, met daarin een beoordelings- en ontwerpversterkingsfase, horen daar andere argumenten bij. De kostenbatenverhouding in allerlei vormen (tijd, geld, ruimte, draagvlak) behoren net zo goed tot de motivering voor het doen van – nader – onderzoek als het betrouwbaar invullen van de rekenparameters in de pipingberekeningen.

Daartoe kan de volgende reeks vragen vanuit de adviseur/specialist behulpzaam zijn:

1. Welke informatie heb ik als adviseur/rekenaar standaard nodig?
2. Waar kan ik met betere informatie of een andere benadering voorstellen bieden voor dijkbeheerder en andere belanghebbenden (ruimtwinst, betere inpassing, behoud waardevolle elementen, kostenvoordeel)?
3. Welke informatie heb ik dan idealiter nodig?
4. Wanneer wordt deze informatie idealiter ingewonnen; vooral, heb ik langdurige, meerjarige waarnemingen nodig?
5. Welke hindernissen ervaar ik om de gewenste informatie compleet te krijgen?
6. Welke niet-technische argumenten moet ik bespreekbaar maken om voldoende informatie te vergaren?

Vanuit de projectleiding en beslissers over informatie-inwinning kunnen de volgende vragen helpen:

1. Op welk moment in de beheercyclus moet ik meer specialistisch advies voor piping inschakelen?
2. Waar zitten kenmerkende problemen en waar zitten kansen om deze op te lossen? Wat levert mij nader onderzoek op in termen van:
 - A. beperking ruimtebeslag en andere maatschappelijke baten, draagvlak?
 - B. kostenwinst (hoe waarschijnlijk)?
 - C. projectoverstijgende voordelen, voordelen werken ook door bij andere dijkvakken of zelfs andere waterkeringbeheerders.
3. Welke risico's zijn er?
 - A. mogelijke consequenties als nader onderzoek niet wordt verricht;
 - B. consequenties voor andere dijkvakken, het grotere geheel;
 - C. consequenties voor tijdspad in vooral beoordelings- en ontwerpversterkingsfase.



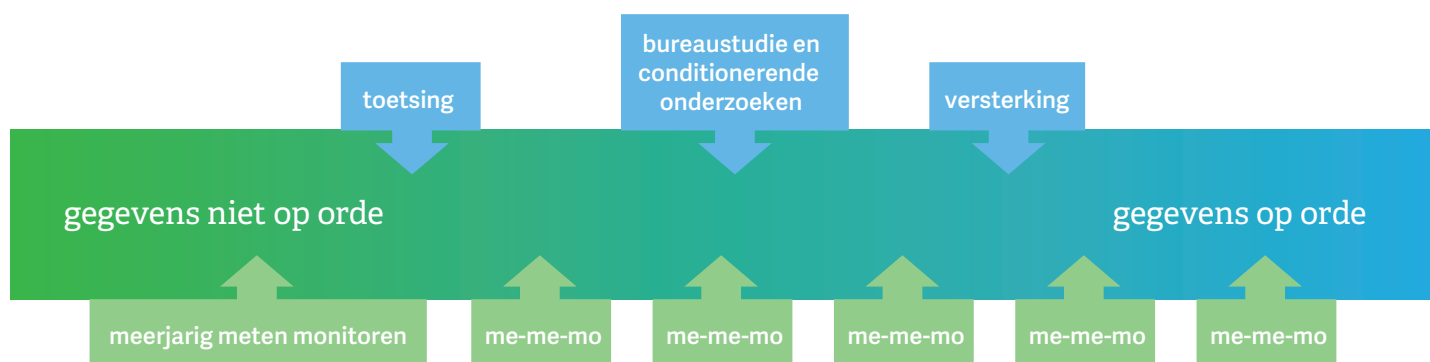
Langjarige informatie

Observaties en registratie van wellen en kwel is een belangrijke taak van de dijkwacht en het dagelijks beheer in het veld. De koppeling 'veldwaarnemingen – dijkbeoordeling – maatregel' heeft de neiging binnen de groep van daadwerkelijk dijkbeheer te blijven en gericht op calamiteiten: reactief. Deze informatie is echter ook van belang voor adviseurs om (rekenkundig) uitspraken te doen over de gevoeligheid van de dijkondergrond voor piping. Systematisch meten van het tijdsafhankelijke gedrag van waterspanningen in de ondergrond met als doel om de dijkveiligheid scherper te kunnen beoordelen en daarmee dure en ingrijpende maatregelen te voorkomen is een spoor dat sinds enige tijd al bewandeld wordt door enkele waterschappen. De winst die hiermee kan worden geboekt is enorm, vooral langs de kust, rond het IJsselmeer en in het benedenrivierengebied maar ook in de andere delen van het Nederlandse rivierengebied. Het is dan wel zaak om ervoor gesteld te staan de wat minder vaak voorkomende hoogwaters langs de grote rivieren in de meetreeks mee te krijgen.

2.3.3 Bureaustudies en conditionerende onderzoeken

De praktijk is dat in de loop der jaren steeds meer gegevens over een waterkering worden verzameld. De vraag is of een dijkbeheerder dit planmatig aanpakt met een langetermijnstrategie. Veelal wordt het totale gegevensbestand tijdens belangrijke fasen in de hele beheercyclus als veiligheidsbeoordeling en planvorming versterking aangevuld. Planmatigheid voor informatievergarig op langere termijn ver-

dient daarin de voorkeur. Een aantal dijkbeheerders ruimt voorafgaand aan de planvorming al een fase in met zogenaamde conditionerende onderzoeken om een goede start te kunnen maken in de planvormingsfase, wanneer de planning voor een belangrijk gedeelte ook door andere dan technische zaken wordt bepaald. Met het toenemen van de hoeveelheid gegevens en de grotere behoefte aan de toegankelijkheid



Figuur 2-4: Belang van planmatige aanpak en langetermijnstrategie voor ordenen van gegevens (Bron: Royal HaskoningDHV)

van gegevens, worden traceerbaarheid en format eveneens steeds belangrijker. Hiervoor bestaat geen blauwdruk. Gedeeltelijk is informatie over waterkeringen al behoorlijk gestandaardiseerd in leggers. Onderliggende technische informatie is opgebouwd in decennia van toetsing, planvorming en dijkversterking met steeds wisselende eisen aan formats. Met de beoordeling volgens de nieuwe normering en het rekeninstrumentarium WBI wordt de behoefte aan dat nog verder uitgebreid en wordt de behoefte aan standaardisering nog groter.

Figuur 2-4 laat zien dat in de loop der tijd de gegevens voor een dijk, mits goed bewaard en toegankelijk, op orde komen. Het vereist een planmatige aanpak en langetermijnstrategie om de gegevens op de juiste momenten beschikbaar te hebben. Voorafgaande aan de versterkingsfase moeten de gegevens eigenlijk al op orde zijn en vooronderzoek is dan een belangrijke stap. Langjarige monitoring, juist om hoogwatersituaties te 'vangen', biedt veel meerwaarde.

2.4 Werkplaatsen: procesmatige verbinding van theorie en praktijk

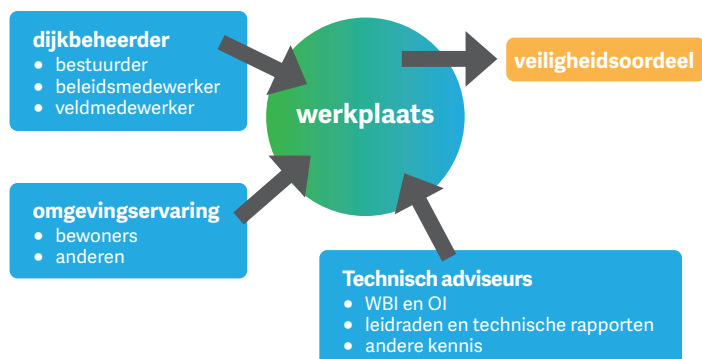
2.4.1 Introductie Werkplaatsen

De pov Piping heeft met het begrip 'werkplaats' een werktuig geïntroduceerd dat een interactieve bijeenkomst behelst tussen verschillende actoren, rollen die bij een dijkbeoordeling of -versterking zijn betrokken: adviseurs/specialisten, dagelijks beheerders, bestuurders, communicatiemensen en lokaal belanghebbenden wisselen hun kijk op de pipingproblematiek uit in één gemeenschappelijke bijeenkomst op locatie. Alles bij elkaar nemen de mogelijkheden om piping effectief aan te pakken toe en daarmee de kansen op baten in de vorm van draagvlak, ruimtewinst en kostenreductie. Daarmee zijn echter wel extra tijd, doorlooptijd en kosten gemoeid. In de pov Piping is wel gebleken hoe belangrijk het is om de normale gang van zaken in het beoordelingsproces en ontwerpproces nader te beschouwen en waar mogelijk op dit proces variatiemogelijkheden aan te bieden. Hiermee kunnen effecten op de planning (en planvormingskosten) expliciet gerechtvaardigd worden. De aanpak van 'werkplaatsen' biedt een zelfgecreëerd beslismoment waarop beslisser en adviseur de argumenten hebben uitgewisseld om met vertrouwen af te kijken van het gebaande pad.

2.4.2 Grote verantwoordelijkheid bij beoordelaars/ontwerpers

Bij het beoordelen van de veiligheid is goede toepassing van theoretische rekenmodellen dominant. De volledige verantwoordelijkheid ligt – vaak onbewust – bij de toetsers/beoordelaar en de technisch ontwerper. Afgezien van de technisch-inhoudelijke kwaliteitsborging van zijn werk, veelal uitgevoerd door andere beoordelaars en ontwerpers, staat deze verantwoordelijke hierin nogal alleen. Alle rekenparameters hebben een bandbreedte en de ervaring leert dat in veel gevallen keuzes worden gemaakt die nog onvoldoende zijn onderbouwd. Vooral als sprake is van een zogenaamde kantoortoets op afstand, waarbij vaak onvoldoende feitelijke informatie voorhanden is en niet of nauwelijks het veld in wordt gegaan. De ervaring is dat dan vaak juist geen veilige keuzes worden gemaakt omdat kritieke locaties onvoldoende in beeld zijn gekomen door te weinig onderzoek. De specialist heeft onvoldoende inzicht om de situatie goed in te kunnen schatten en is niet goed in staat om het risico te kunnen minimaliseren. Een ander risico is dat de specialist de risico's dusdanig minimaliseert door het kiezen van onrealistisch veilige uitgangspunten, dat de uiteindelijke beoordeling geen recht meer doet aan de lokale situatie.

De verkenning 'De ontmoeting tussen theorie en praktijk' heeft geresulteerd in het document 'De balans tussen praktijk en theorie' (Geldof et al, 2015). Dit document geeft handvatten voor het interpreteren en onderbouwen van het veiligheidsoordeel en de definitieve beoordeling in een bredere context dan techniek alleen.



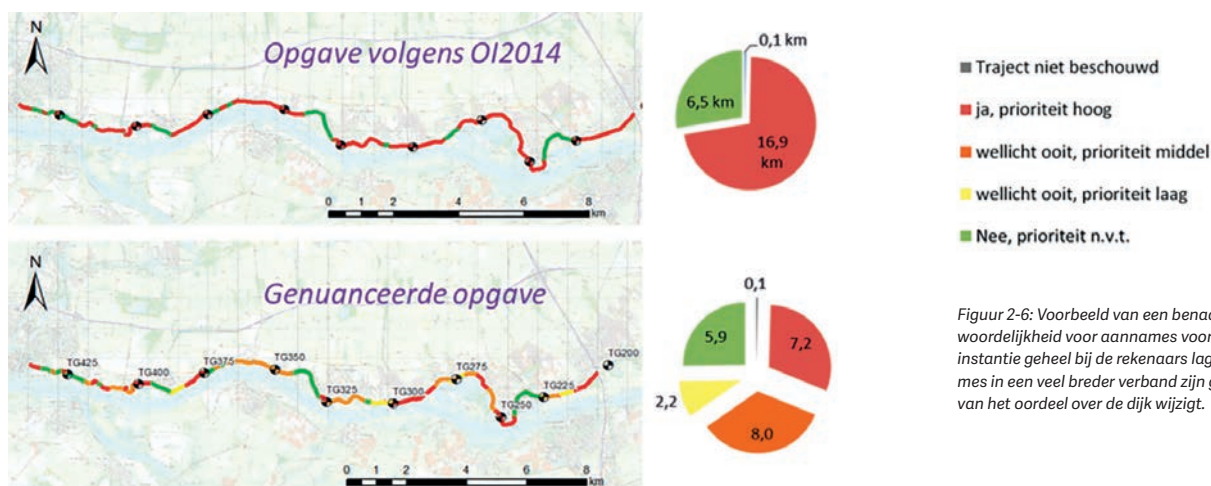
Figuur 2-5: Werkplaats: koppelen van kennis adviseurs aan lokale ervaring (Bron: Geldof et al, 2015)

Balans tussen praktijk, theorie en menselijk handelen (meting → model → mens)

De werkwijze die we voorstaan is schematisch weergegeven in bovenstaande figuur. De werkwijze begint hier met het kennen van de waterkering en weten wat er in de praktijk speelt (de meting door apparatuur of menselijke waarneming). Daarbij gaat het niet alleen om de kennis van mensen in het veld, maar ook om die van bestuurders, beleidsmedewerkers en anderen in de omgeving van de dijk. De adviseur past op de dijk de theorie toe, de rekenmodellen die hij beschikbaar heeft, de bestuurder zijn beslismodel, de beheerder zijn beheermodel. Als de mens (beheerder, beslisser, adviseur) op goede wijze invulling geeft aan de wederzijds verkregen informatie ontstaat een gezamenlijk gedragen beeld voor een veilige waterkering.

Het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium WBI, maar ook het Ontwerpinstrumentarium OI, zijn producten waarin vele ervaringswerelden zijn samengebracht uit de toets- en ontwerppraktijk. WBI en OI dragen zorg voor rekenkundig aantoonbare verbinding met de wettelijke normen en levert de generieke bouwstenen voor een technische toets waarmee een zekere mate van objectiviteit wordt bereikt. Het heeft een belangrijke signalerende functie, want de wettelijke normen hebben betrekking op maatgevende situaties die in de meeste gevallen nog nooit zijn opgetreden. In een Werkplaats komen lokale praktijkkennis en technische kennis samen. Deze lokale praktijkkennis gaat niet alleen over de werkelijke fysieke toestand van de dijk 'in het veld', maar ook over – vermeende – uitgangspunten en randvoorwaarden van beslissers en bestuurders. De verwachting is dat op deze wijze de kwaliteit van veiligheidsoordelen toeneemt, risico's expliciet worden gemaakt en de kosten voor dijkversterking en dijkbeheer omlaag gaan. De contextgevoeligheid van praktijkkennis vertaalt zich in meer nuancering bij de toepassing van het wettelijk gehanteerde rekeninstrumentarium.





Figuur 2-6: Voorbeeld van een benadering waarin de verantwoordelijkheid voor aannames voor berekeningen in eerste instantie geheel bij de rekenaars lag en waarin later aannames in een veel breder verband zijn gedeeld en de uitkomst van het oordeel over de dijk wijzigt.

2.4.3 Ervaringskennis en gedeelde verantwoordelijkheid

De pov Piping brengt nieuwe ervaring in de procesgang met de zogenaamde 'werkplaatsen'. Het principe van de werkplaats is dat specialisten, bestuurders en beheerders kennis inbrengen, vanuit hun vakgebied en verantwoordelijkheid. Hiermee komen theorie en praktijkkennis bij elkaar.

In dialoog verscherpen de deelnemers de probleemstelling, brengen zij hun ervaring en kennis in en maken zij hun afwegingen gezamenlijk. Zo wordt alle relevante informatie gedeeld en de verantwoordelijkheden op weloverwogen wijze van 'beneden naar boven' gedeeld en overgedragen. De waterschapsbestuurders en de minister zijn eindverantwoordelijk. Deze methode is voor piping goed werkbaar, maar kan vanzelfsprekend uitstekend worden geïntegreerd met andere aspecten van een dijk.

De verkenning 'Werkplaats Gorinchem-Waardenburg' is een goed voorbeeld van het delen van ervaring en verantwoordelijkheden. Deze werkplaats werd door waterschap Rivierenland georganiseerd en de deelnemende partijen waren bestuurders, beleidsmedewerkers, medewerkers uit de beheerafdeling, calamiteitenteams en technische adviseurs van verschillende disciplines. Tijdens de werkplaats werden belangrijke stappen gezet in de ontwikkeling van een breder gedragen beslisschema of 'beslisboom' waarmee vervolgstappen na een piping-analyse objectief kunnen worden afgewogen. Voor nadere toelichting over de beslisboom wordt verwezen naar paragraaf 2.4.4 en 8.3 van dit PipingPortaal.

2.4.4 Nieuwe ontwikkelingen

Het resultaat van één van de werkplaatsen was een 'beslisboom'. Hierin wordt op basis van verwachte ontwikkelingen en ervaringen de prioritering van maatregelen opnieuw beschouwd. In paragraaf 8.3 wordt een voorbeeld van een dergelijke beslisboom beschreven. Een andere ontwikkeling komt uit de Verenigde staten: pipingbeoordeling 'American

Style'. In deze methode schatten experts de kans van optreden van de verschillende deelgebeurtenissen in het faalmechanisme piping. Hierbij wordt de lokale situatie, ervaringsgegevens en de expertkennis ingezet. De Werkplaatsen, Beslisboom en beoordeling American Style vertonen overlap en vullen elkaar aan. Momenteel wordt er in Nederland praktijkervaring opgedaan met het toepassen van deze methoden.

2.5 Systemkennis, onderzoek en alternatieve oplossingen

2.5.1 Overzicht

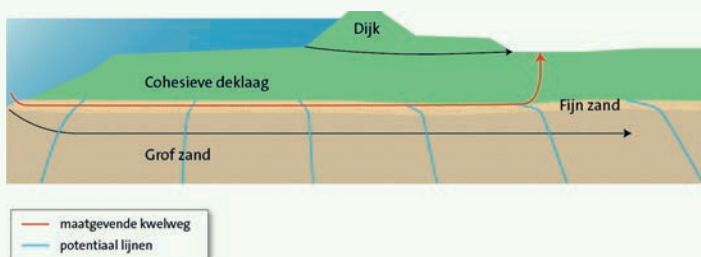
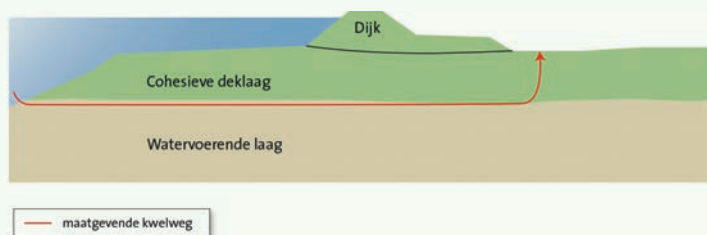
De pov Piping heeft verkenningen specifiek gericht op een grondiger beschouwing vanuit verschillende invalshoeken:

1. systeemkennis van de opbouw van de ondergrond en de eigenschappen van de ondergrond, evenals het gedrag van grond en grondwater onder invloed van stijgend buitenwater.
2. reken- en onderzoekstechnieken om op betrouwbare wijze het systeemgedrag te kwantificeren en de weerstand tegen piping te bepalen.
3. oplossingen: traditionele en nieuwe technieken om piping te voorkomen gericht op beperking van de daadwerkelijke fysieke ruimte voor de oplossing (beperkingen aan rivier- of landzijde van de waterkering), de effectiviteit van een oplossing in het grotere systeem of zelfs de tijdelijkheid van toepassing (duurzaam structureel verbeteren of tijdelijke beheer- of noodmaatregelen in afwachting van een permanente oplossing, waarbij de kostoverwegingen natuurlijk ook een rol spelen);
4. het proces waarin maatregelen tegen piping tot stand komen speelt vaak een dominante rol naast bovenstaande vooral technisch-inhoudelijke benadering. De pov heeft de context beschouwd waarin de verschillende actoren invloed uitoefenen op dit proces. Dit is al beschreven in sectie 2.4 over de 'werkplaatsen'.

2.5.2 Het fysieke systeem van een pipinggevoelige waterkering

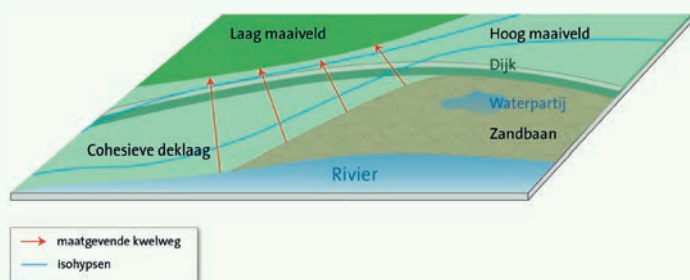
Traditioneel wordt het verschijnsel opbarsten, heave en piping in een strak tweedimensionaal geotechnisch schema beoordeeld. Een aanpak die, het hele grond(water)systeem beschouwend, een realistischer beeld van de situatie biedt ten aanzien van het pipingverschijnsel. Figuur 2-7 toont in een notendop het systeem van een pipinggevoelige waterkering in Nederlandse situaties. Niet voor elke situatie behoeven alle aspecten van het systeem te worden uitgezocht. Echter, er kunnen ingrepen noodzakelijk lijken die problemen geven met maatschappelijk onaanvaardbare kosten, verloren ruimte, verloren cultuurhistorische, landschappelijke of natuurwaarden verminderde beleving, of onvoldoende veiligheid. Dat kan aanleiding vormen voor een verdergaande systeemanalyse om de impact van de ingrepen te verkleinen of zelfs ingrepen – veilig – achterwege te laten.

De kennis van de geotechnisch adviseur van het systeem van een waterkering en het faalmechanisme piping, is sterk gericht op een mogelijke kwelweg onder het dijklichaam door het meevoeren van zand. Dit is op zich terecht. Ook in een modernere aanpak zal deze benadering dominant blijven. De belangrijkste beperking van deze benadering is dat er, letterlijk, te weinig links en rechts wordt gekeken. Het optreden van een geconcentreerde waterspanning nabij een mogelijk uittredepunt voor zand is ook sterk afhankelijk van het grondwatergedrag onder invloed van hoge buitenwaterstanden op grotere schaal. Hierbij spelen geomorfologie, (in)homogeniteit en tijd een rol waarvoor andere disciplines en mensen nodig zijn om hier betrouwbaar in te kunnen adviseren: geologen, fysisch geografen, geohydrologen. De geotechnisch adviseur moet op zoek gaan naar locaties met het grootste uittreeverhang.



A. In de standaardbenadering voor piping volgt water de kortste weg tussen in- en uittredepunt. In de eenvoudigste schematisering wordt slechts 1 watervoerende laag beschouwd. Voor deze geïdealiseerde situatie worden standaard rekenregels (vooral Sellmeijer, WBI, 2017) gebruikt. Voorland wordt meegenomen als effectieve voorlandlengte.

B. Een eerste toevoeging is een beschouwing van een maatgevende doorsnede met meerdere watervoerende lagen met ieder verschillende eigenschappen. De pipinganalyse wordt uitgevoerd op basis van een grondwaterstromingsberekening, uittreeverhang en 'pipe'.



C. Het effect van een hoogwater op het ruimtelijke stromingsbeeld nabij een waterkering wordt feitelijk bepaald door een veel groter regionaal systeem dan een doorsnede loodrecht op de dijk. Maaiveldverschillen, wielen, nabijgelegen hoge gronden, ruimtelijke variaties in laagopbouw en verbindingen tussen watervoerende lagen kunnen een belangrijke rol spelen bij piping, zowel versterkend als verzwakend. Een beschrijving van het geohydrologische systeem kan uitsluitel geven of deze effecten een dominante rol kunnen spelen. Op deze schaal kan een geohydroloog een betere inschatting maken van randvoorwaarden en parameters en is een koppeling met meetnetten mogelijk. Daarna is weer vertaling nodig naar een dwarsdoorsnede.

D. Aan dit totaal kan een vierde dimensie – tijd – worden toegevoegd. Tijd kan op verschillende manieren in de pipinganalyse terugkomen:

- gebruik maken van stijghoogtemetingen bij een hoogwaterpassage of tijdens stormopzet
- tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekening
- beheermaatregel met een tijdelijke werking, terwijl meer kennis van de ondergrond en/of het mechanisme wordt vergaard om een structurele maatregel te ontwerpen

2.5.3 Rekenmethoden passend bij verschillende analyses

De standaardaanpak voor het pipingprobleem richtte zich sterk op de rekenregels van Bligh c.q. Sellmeijer en op die van Lane in het geval van harde constructies met verticale kwelwegdelen. Met de aanpassing van de regel van Sellmeijer (2013) is de regel van Bligh voor dijken vervallen. In veel gevallen leveren de uitkomsten van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer problemen op voor inpassing van kwelwegverlengende maatregelen. Dit heeft niet geleid tot nieuwe rekentechnieken, terwijl er wel wordt geadviseerd om in voorkomende gevallen een ontwerp te maken dat onafhankelijk is van de kwelweg, en zo het gebruik van de regel te vermijden (Omgaan met piping [21])

De rekenregel van Lane heeft vergelijkbare empirische onderbouwing als die van Bligh, maar is nog niet verlaten omdat er nog geen alternatieve rekenregel is voor sommige configuraties bij kunstwerken. Met behulp van eindige-elementenmodellen voor grondwaterstroming kan al wel een schatting gemaakt worden van het lokaal uittreeverhang en dus van het risico op het ontstaan van heave. Dit is alleen van toepassing bij een verticale uitstroom. Voor de dimensionering kan gebruik gemaakt worden van eenvoudige modellen of van numeriek grondwaterstromingsmodellen.

De gegevensvergaring voor het probleem piping is gericht op toepassing van de rekenregel. Het 'anders omgaan met piping', de scherpere focus op het hele systeem en het zoeken naar kwelwegaafhankelijke oplossingen betekent dat onderzoeksmethoden ook veel meer daarop worden toegesneden. Hieronder wordt in algemene bewoordingen iets over anders gerichte (anders dan specifiek op de rekenregel) informatievergaring gezegd. In de volgende hoofdstukken komt dit nader aan de orde.

1. Het grotere belang dat gegeven moet worden aan de grondwatersituatie uit zich in een behoefte aan betere kennis van de grondpakketten onder de dijk in termen van:
 - A. (on)doorlatendheid van het hele pakket onder de dijk in de dwarsdoorsnede
 - B. (on)doorlatendheid van het hele pakket onder de dijk ook in zijdelingse richting
 - C. de (in)homogeniteit van de ondergrond
 - D. het verloop in de tijd van de verhoogde grondwaterspanningen.
2. In veel gevallen zijn er wel of niet overleefde situaties uit het verleden. Het verdient de aanbeveling om overleefde situaties te toetsen aan de rekenregel van Sellmeijer om uit te vinden hoe gevoelig het gebruik van de rekenregel is in een bepaalde situatie.
 - A. de POV biedt handvatten voor meer inzicht in historische situaties om te weten te komen in hoeverre een situatie daadwerkelijk is overleefd o.a. de POV-verkenningen 8 en 16 (wellenonderzoek);
 - B. de POV beveelt monitoring aan tijdens hoogwater, waaruit meer inzicht in doorlatendheid en pipinggevoeligheid wordt ontwikkeld. Dit met als optie om bepaalde versterkingsmaatregelen te kunnen uitstellen wanneer daarvan voordelen worden verwacht (zie ook paragraaf 8.3).

3. De grotere acceptatie van kwelwegaafhankelijke, vernieuwende en hernieuwde technische oplossingen leidt ook tot gericht onderzoek naar de betrouwbare toepassing ervan. Voor een deel vindt dat onderzoek los van een dijkvak, project of dijkbeheerder plaats. Tegelijk kan een dijkbeheerder groot belang hebben bij een succesvolle realisatie ervan en het onderzoek steunen door het te faciliteren met gegevens, proefvakken en pilots.
4. Onderzoek naar beheermaatregelen als overbrugging naar permanente maatregelen. Deze beheermaatregelen gaan bij voorkeur gepaard aan bovenstaande monitoringsmaatregelen om de noodzaak van een fysieke versterkingsmaatregel vast te stellen.

Alles bij elkaar nemen de mogelijkheden om piping effectief aan te pakken toe en daarmee de kansen op baten in de vorm van draagvlak, ruimtewinst en kostenreductie. Daarmee zijn echter wel extra tijd, doorlooptijd en kosten gemoeid. Deze benadering vermindert de druk op de werkzaamheden in de ontwerp-versterkingsfase, waarin veelal de planning leidend is.

Verdergaande kennis ontwikkeling noodzakelijk

Kennisontwikkeling rond het mechanisme piping is van groot belang. Er is nog steeds een groot verschil tussen ingenieursgevoel bij geotechnisch adviseurs en waterkeringsbeheerders enerzijds en de uitkomsten van rekenregels anderzijds. Deze kennisontwikkeling is in de huidige verkenningen nog wat onderbelicht. Deze kennisbehoefte vraagt om nieuwe verkenningen en fundamentele onderzoeken.

2.5.4 Traditionele oplossingen en vernieuwende oplossingen

De ruimte die de traditionele pipingberm als oplossing vergt of de hoge kosten van de traditionele damwandoplossing hebben ertoe geleid dat alternatieve, vernieuwende oplossingen meer terrein winnen. Ook de POV Piping draagt daaraan bij.

Belangrijkste kenmerken van de alternatieve of vernieuwende oplossingen zijn dat zij er vooral van uitgaan dat de pipingberm een te groot ruimtebeslag heeft. Een ander belangrijk punt is dat er gezocht wordt naar mogelijkheden om de grondwaterspanning weg te nemen (dat leidt tot een zeker waterbezwaar) en de uitstroming van zand wordt verhinderd. Deze vernieuwing wordt steeds gezocht in de werkingsprincipes van drainering en filters of in het gebruik van nieuwe materialen.

3. Werkwijze pipinganalyse

3.1 Algemeen

3.1.1 Hoofddij

Uit de verkenningen, praktijkproeven, studies en gevoeligheidsanalyses die afgelopen jaren op het gebied van piping zijn uitgevoerd komen een aantal hoofdthema's terug die de rode draad vormen voor het werk van de POV Piping:

- Belang van inzet van meerdere specialismen, naast geotechniek;
- Beschouwing van het systeem als geheel;
- Beschouwing van de dijk in zijn omgeving;
- Meting en monitoring;
- Gevoeligheidsberekeningen om het systeem te doorgronden;
- Tijdige afweging van nader onderzoek en keuze voor een type verbetermaatregel;
- Durven uitstellen van preventieve pipingmaatregel.

De nieuwe werkwijze is zowel voor beoordelen als voor ontwerpen bedoeld en moet gezien worden als een aanvulling op de bestaande technische leidraden. De bedoeling is dat de werkwijze wordt ingebed in het beheer en onderhoud. Pas dan wordt een optimale werking verkregen.

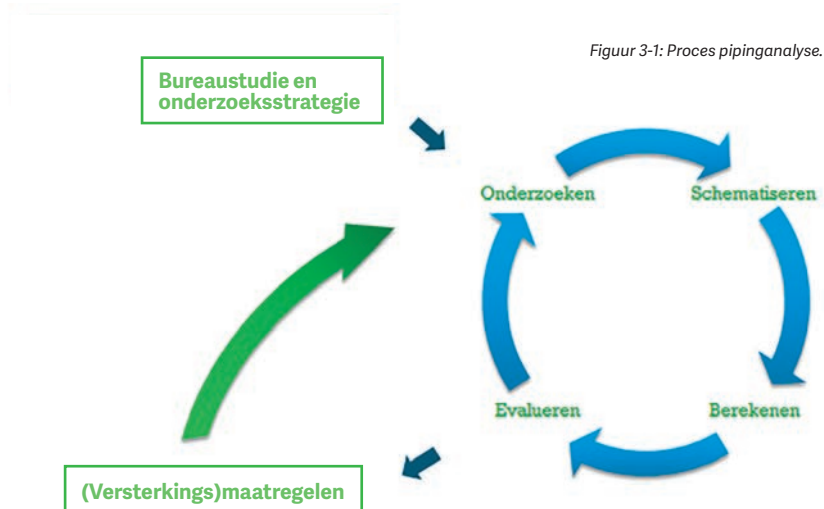
3.1.2 Proces pipinganalyse

In vele handreikingen en leidraden is het proces van het schematiseren beschreven. Figuur 3-1 geeft een algemene beschrijving van het cyclische schematiseringsproces dat bij het beoordelen van en ontwerpen op piping 'anno 2019' wordt doorlopen:

1. Uitvoeren van een bureaustudie en vaststellen van de onderzoeksstrategie (hoofdstuk 4).
2. Uitvoeren van onderzoeken: verzamelen van aanvullende gegevens uit veldwerk en monitoring (hoofdstuk 5).
3. Opstellen van een schematisering op voldoende detailniveau om berekeningen te kunnen uitvoeren (hoofdstuk 6).
4. Uitvoeren van pipingberekeningen voor het beoordelen van de huidige veiligheid of voor het ontwerp van maatregelen (hoofdstuk 7).

5. Evalueren van de uitkomsten. Dit is een keuzemoment: uitstel van maatregelen en verder onderzoeken of uitkomst accepteren en een versterkings- of beheermaatregel gaan uitwerken (hoofdstuk 8).
6. Maatregelen uitvoeren. Dit kunnen versterkingsmaatregelen zijn of beheermaatregelen in combinatie met monitoring (hoofdstuk 9).

Ten opzichte van de Schematiseringshandleiding Piping bij het WBI 2017 [33] en de Werkwijzer bij Piping [41] is in dit PipingPortaal bijzondere aandacht voor de stappen 'Bureaustudie en vaststellen van de onderzoeksstrategie' (hoofdstuk 4) en 'Evalueren van de uitkomsten' (hoofdstuk 8). Meerdere verkenningen die binnen POV Piping zijn uitgevoerd laten zien dat juist in deze stappen cruciale beslissingen worden genomen die bepalend zijn voor de uiteindelijke beoordeling op piping en voor de vervolgstappen.



Het figuur benadrukt dat het schematiseren een iteratief proces is. Vanaf het begin van de eerste veiligheidsanalyse tot aan de realisatie van een dijkversterking zal de cyclus meerdere keren worden doorlopen. De bureaustudie en de onderzoeksstrategie zullen dus iedere keer bijgesteld moeten worden afhankelijk van de fase en urgentie van het beoordelings- en versterkingstraject. Enkele voorbeelden. Voor het uitvoeren van een eerste beoordeling van de pipingveiligheid ligt het voor de hand dat de bureaustudie en de onderzoeksstrategie zich meer zullen richten op het vaststellen van de omvang van het veiligheidsprobleem en minder op het onderzoeken van mogelijke versterkingsvarianten. Wanneer men een eind verder is in het proces van beoordelen en versterken, bijvoorbeeld aan het begin van een dijkversterkingstraject, dan zal de focus van de bureaustudie en de onderzoeksstrategie zich verleggen naar het verzamelen van informatie en het uitvoeren van onderzoek voor het bepalen van het voorkeursalternatief (VKA). Op het moment dat men de cyclus 'instapt' moet men het doel dus goed voor ogen houden. Hierbij wordt een belangrijke waarschuwing gegeven: let op dat er niet te vroeg keuzes worden gemaakt op basis van (te) weinig informatie, waardoor benaderingen en oplossingen uitgesloten worden die op grond van meer informatie meer aandacht zouden verdienen. Kijk daarom goed door naar de volgende fasen en beschouw aan het begin van iedere cyclus de positie binnen de gehele beheercyclus van de waterkering (zie ook hoofdstuk 2).

De verkenningen die binnen pov Piping zijn uitgevoerd geven concrete voorbeelden van toepassingen en geven soms inzicht in wat een verdieping kan opleveren. Opgemerkt wordt dat er bij het uitbrengen van het Piping-Portaal nog gewerkt wordt aan achtergrond-documenten van enkele verkenningen.

De schematiseringshandleiding piping bij het WBI2017 [33] en de Handreiking ontwerpen met overstromingskansen OI2014 [13] geven richting in het detailniveau van benodigde gegevens in het beoordelingstraject per toetsfase en het eventuele versterkingstraject dat daarop kan volgen. Voor het versterkingstraject is er op hoofdlijnen een scheiding aan te brengen tussen detailniveau dat hoort bij een verkenningsfase welke eindigt met een Voorkeursalternatief (VKA), een planuitwerkingsfase welke eindigt met een uitgewerkt ontwerp van het VKA (projectplan) en de realisatiefase waarbij het projectplan verder worden uitgewerkt als voorbereiding op de realisatie.

Naast bovenstaande procesmatige aspecten zal de diepgang per cyclus ook sterk afhankelijk zijn van:

- beschikbare gegevens en de fysische complexiteit van het gebied;
- omgevingsimpact van maatregelen;
- mogelijke besparingen op de versterkingsopgave door nader onderzoek en analyse;
- bestuurlijke overwegingen.

¹ Het WBI 2017 onderscheidt drie toetsfasen: de eenvoudige toets, de gedetailleerd toets en de toets op maat

² De Waterwet schrijft voor dat er in de Planuitwerkingsfase een Projectplan wordt opgesteld waarin de te nemen dijkversterkingsmaatregelen worden vastgelegd. Aspecten als ruimtebeslag van de versterkingsopgave en omgevingsimpact krijgen hier definitief gestalte.

3.1.3 Meerdere invalshoeken

In het eerste deel van het PipingPortaal is benadrukt dat het belangrijk is om vanuit meerdere invalshoeken en vanuit meerdere disciplines naar piping te kijken en dat het daarbij van belang is om hier tijdig mee te beginnen. In het vervolg van dit hoofdstuk zal concreet worden aangegeven om welke soort kennis en activiteiten dit gaat. Het samenbrengen van de inzichten van een geotechnicus, geoloog, fysisch geograaf, geohydroloog en andere relevante disciplines zorgt ervoor dat er een doelgericht onderzoek uitgevoerd kan worden waarbij nut en noodzaak vroegtijdig onderscheiden worden. Dit is van groot belang voor het bepalen van de onderzoeksstrategie.

Een kwartair geoloog (een geoloog met specialisatie in de ondiepe geologie van Nederland, globaal de bovenste 60 m) of een fysisch geograaf zal bij de schematisering van de ondergrond vooral de ontstaansgeschiedenis als logisch vertrekpunt nemen. Dit sluit erg goed aan op de werkwijze die bij het beoordelen volgens het WBI wordt gevolgd. Namelijk het werken met het Stochastisch Ondergrond Schematiseren (SOS) als het vertrekpunt bij het schematiseren (zie uitgelicht). Een geoloog of fysisch geograaf is via kennis van geologische ontstaansgeschiedenis en afzettingscondities goed in staat om SOS-eenheden te kunnen onderscheiden. Daar waar een geotechnicus of adviseur waterkeringen

traditioneel in doorsneden denkt, kijkt de geoloog en geofysisch geograaf meer ruimtelijk en naar het grotere systeem.

Een geohydroloog kan relatief snel inzicht geven in de verwachte lokale en regionale grondwaterstroming en de invloed hiervan op de stijghoogtes en het watervoerende pakket. De geohydroloog is vanuit zijn/haar vakgebied geneigd uit te zoomen om zo het gehele geohydrologische systeem in kaart te brengen.

De geotechnicus of de adviseur waterkeringen kan vanuit zijn/haar kennis en ervaring van grondgedrag en faalmechanismen snel inzicht geven in de mogelijkheden en beperkingen van



Figuur 3-2: De 'geodriehoek' – Schemateren vanuit meerdere invalshoeken (Bron: Henk Weijers)

de toepassing van rekenmodellen en oplossingen. Vragen als: 'Welke ruimte heb ik voor de versterking beschikbaar?' en 'welk type oplossingen zouden in de specifieke situatie beschouwd kunnen worden?' spelen mee bij het detailniveau waarop het schematiseren van de ondergrond wordt opgezet.

Deze vragen zullen sturing geven aan de hoeveelheid en type informatie die in de bureau-studie verzameld wordt om de karakterisering van de omgeving, ondergrond en geohydrologie te kunnen uitvoeren.

Gebruik van SOS (Stochastisch Ondergrond Schematiseren) bij beoordelen en ontwerpen

In het SOS worden scenario's met mogelijke bodemprofielen gegeven en worden de grondlagen per profiel met SOS-eenheden beschreven. De scenario's worden in eerste instantie op segmentniveau (trajecten van meerdere kilometers in lengte) beschreven. Het werken op segmentniveau is erg globaal en nadere verfijning naar dijkvakken is dan nodig voor een gedetailleerde toets of een toets-op-maat. Voor een versterkingsontwerp is altijd nadere verfijning nodig. Waar mogelijk worden SOS-scenario's uitgesloten op basis van grondonderzoek, monitoring en andere gegevensbronnen. Het werken met de SOS-eenheden kan echter wel in alle fasen worden voortgezet.

De Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS [12] geeft veel nuttige aanwijzingen voor het gebruik van SOS-eenheden in combinatie met (lokaal) grondonderzoek.



4. Bureaustudie en onderzoeksstrategie

4.1 Doel en aanpak

In de bureaustudie wordt alle beschikbare informatie bij elkaar gebracht, bij voorkeur in een Geografisch Informatie Systeem (GIS). Op basis van de verzamelde informatie kan geïnventariseerd worden welke relevante informatie nog ontbreekt voor het schematiseren van de waterkering en ondergrond ten behoeve van de berekeningen en analyse.

Kennis uit verschillende geo-disciplines moet worden gebruikt om te beslissen in welke mate nader onderzoek nodig en nuttig is. Hierbij is in de eerste plaats een goed inzicht in de karakterisering van de ondergrond en in het geohydrologisch systeem van belang: Welke SOS-eenheden kunnen er in dit gebied worden verwacht? Hoe gevarieerd is de ondergrond? Wat zijn de dominante randvoorwaarden van het geohydrologisch systeem? Op basis van deze eerste karakterisering wordt nagegaan of piping voor het beschouwde gebied een potentieel probleem kan zijn en zo ja, welke gegevens nog missen of onvoldoende duidelijk

zijn om een gerichte pipinganalyse te kunnen uitvoeren. In deze stap worden gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de onderzoeksstrategie te bepalen. De onderzoeksstrategie resulteert uiteindelijk in een onderzoeksplan.

In de stap 'Bureaustudie en onderzoeksstrategie' worden ten minste de volgende activiteiten uitgevoerd:

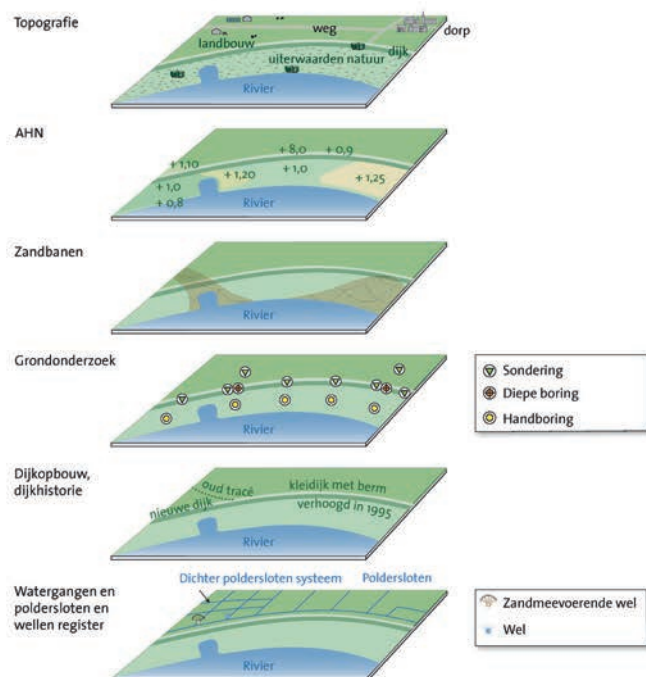
- Inventariseren gegevens;
- Karakteriseren van ondergrond;
- Karakteriseren van geohydrologisch systeem;

- Voorlopige vakindeling;
- Indicatieve gevoeligheidsanalyse;
- Inventariseren van oplossingsrichtingen;
- Onderzoeksstrategie.

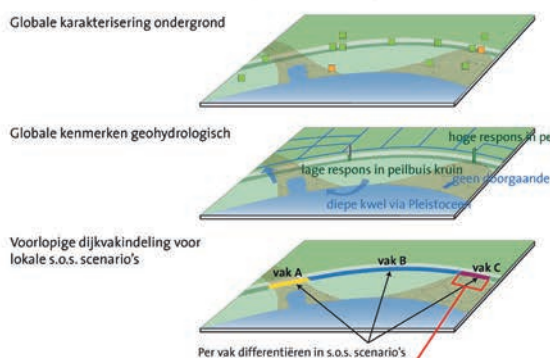
In de volgende paragrafen wordt verder op deze activiteiten ingegaan. In de Schematiseringshandleiding Piping WBI 2017 [33] zijn deze activiteiten uitvoeriger beschreven.

In Figuur 4-1 is een illustratie gegeven van de stappen uit de bureaustudie.

Inventariseren: overlay informatie in GIS



Karakteriseren en voorlopige vakindeling



Onderzoeksstrategie: bijv. uitkarteren van een zandbaan



Figuur 4-1: Schetsmatig voorbeeld van de activiteiten 'Inventariseren', 'Karakteriseren van ondergrond', 'Geohydrologisch karakteriseren', 'Voorlopige vakindeling', 'Onderzoeksstrategie' (bron: Royal HaskoningDHV)

4.2 Inventariseren gegevens

Het inventariseren en ordenen van informatie die van belang kan zijn voor een pipinganalyse is een belangrijke en vaak ook omvangrijke activiteit. De Schematiseringshandleiding Piping bij het WBI2017 [33] en bijlage 1 uit de Werkwijzer Piping [41] geven voorbeelden van uitvoerige checklists die gebruikt kunnen worden bij deze activiteit. Hieronder is een overzicht uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [37] overgenomen. De checklist is aangevuld met enkele informatiebronnen en suggesties.

Voorbeeld van een overzicht van bronnen die gebruikt kunnen worden voor de bureaustudie:

- Topografie (voorland, schaaldijk, binnen- en buitendijkse waterpartijen, tracé van dijk, landgebruik etc.).
- Geometrie van de waterkering (hoogte, taluds, berm, overige aanpassingen grondlichaam) op basis van recente metingen.
- Hoogtekaarten: Actueel Hoogtebestand Nederland.
- Informatie over oude dijkdoorbraken, wielen en kolken, overslaggronden (duiden op oude dijkdoorbraak), vroegere dijk tracés, kleiwinputten. Historische gegevens kunnen ingewonnen worden via historisch kaartmateriaal of via een quick-scan door een archeoloog of historisch geograaf. Er is ook een groot aantal historische studies met informatie over stormvloed en rivieroverstromingen.
- Informatie over oude vergravingen en aanvullingen. Hiervoor zou een waterkeringsbeheerder, met ruime gebiedskennis die het gebied al lange tijd kent, kunnen worden benaderd. Een andere optie is het inschakelen van een archeoloog. Informatie zoals vergravingen, al dan niet aangevuld, sloten, waterpartijen, grondverbeteringen maar ook verlaten drainageleidingen, leiding- of kabelbedden zijn vaak de zwakste locaties.
- Informatiebronnen en uitgangspunten uit eerdere beoordelingen en versterkingen uit archief van het waterschap, zoals: oude bestekken voor de bouw en latere verhogingen of versterking; dijkvakindelingen die zijn gehanteerd bij vorige versterkingen.
- Satellietbeelden en luchtfoto's.
- Grondopbouwscenario's uit het landelijke systeem Stochastische OndergrondSchematisatie (SOS).
- Informatie uit eerder nabij de waterkering uitgevoerd geotechnisch en geofysisch onderzoek met grondonderzoekgegevens (boor- en sondeerstaten, laboratoriumbepalingen op monsters).
- Overige geo-databanken zoals DINO-loket en REGIS.
- Geologische en fysisch geografische kaarten (ondergrondkaarten, bodemkaarten, zandbanenkaarten, kaart met niveau van de bovenkant van het Pleistoceen).
- VNK2-database en resultaten.
- Ervaringen van de beheerder over onderhoudsingenrepen en geobserveerd gedrag bij hoge waterstanden in het recente verleden (decennia), zoals schadebeelden en zandmeevoerende wellen. Interviews met ervaren beheerder en inspectierapporten kunnen erg zinvol zijn.
- Register wellen en zandmeevoerende wellen.
- Peilkaarten met peilvakken en zomer- en winterpeilen.
- Aanwezigheid en meetgegevens waterpeilen, stijghoogtes in ondergrond en andere monitoringsresultaten.

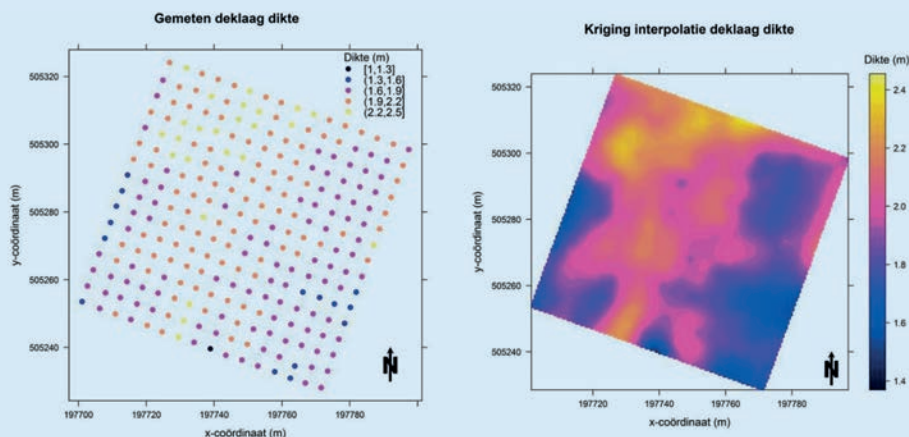
Veel van bovenstaande informatie is geografisch gepositioneerd. Het gebruik van een Geografisch Informatie Systeem (GIS) is een must bij het ordenen en over elkaar leggen van informatiebronnen.

De pov Piping heeft voor een drietal locaties gedetailleerde gebiedsinformatie verzameld voor het uitvoeren van een pipinganalyse waarbij gebruik wordt gemaakt van ver-

schillende verkenningen. De bevindingen van deze analyses zijn opgenomen in drie afzonderlijke rapportages, zie [8] en [9] en [10]. Verder geeft ook de Werkwijzer Piping bij Dijken [41] voorbeelden van hoe deze inventarisatie voor concrete situaties kan uitpakken. In dit document zijn 3 cases uitgewerkt: de Zwolse dijk bij Hasselt; de Waaldijk bij Hurwenen en de Zeedijk Molenpolder.

Bij het uitvoeren van de activiteit 'Inventariseren gegevens' is het van belang dat de onderzoeker het belang van de in te winnen informatie kan interpreteren en beoordelen zodat hij of zij kan afwegen of piping een probleem kan zijn en hoe dit doorwerkt in de pipinganalyse. Het is daarom aan te bevelen om deze activiteit vanuit de drie hoekpunten van de geodriehoek, figuur 3-2, uit te voeren. Deze activiteit kan erg omvangrijk worden en het risico is aanwezig dat er veel inspanning wordt geleverd aan het completeren van informatie terwijl moeilijk te verzamelen aanvullende informatie voor het einddoel minder relevant is. Het is daarom van belang dat de geotechnicus een leidende rol krijgt om de focus op de pipinganalyse te bewaken.

In de verkenning Proeftuin Mastenbroek [V2] is een historisch onderzoek uitgevoerd door een archeoloog gebruikt om de verstoringen in de ondergrond door dijkdoorbraken of menselijke activiteiten in beeld te brengen. In het geval van Mastenbroek heeft het historisch onderzoek vooral algemene informatie opgeleverd die gebruikt kan worden bij het karakteriseren van de ondergrond. De verkenning Mastenbroek geeft ook aan dat met historisch onderzoek niet altijd het gewenste detailniveau kan worden gevonden en daarvoor zeker niet als een op-zichzelf-staande bron kan worden gebruikt.



Figuur 4-2: Gemeten en de geïnterpoleerde waarden van D_{70} over de gehele proeftuin (bron: 'Proeftuin Mastenbroek' Duiding pipinggevoeligheid en toepasbaarheid. Arcadis)

Verkenning 'Proeftuin Mastenbroek' [V2]

In proeftuin Mastenbroek is gedetailleerd onderzoek gedaan naar de korrelgrootte en doorlatendheid van een typische zandondergrond in het benedenrivierengebied van de Gelderse IJssel bij Zwolle. De verkenning heeft bestaan uit drie onderzoekssporen: grondonderzoek (boringen en korrelverdelingen), grondradar (aangevuld met gammaspectrometer) en een historisch onderzoek. Dit onderzoek is vergelijkbaar met het gedetailleerde onderzoek dat in de verkenning bij IJzendoorn [V3] is gedaan. De variatie in de eigenschappen van het zand bleek bij Mastenbroek aanzienlijk minder groot dan langs de Waal bij IJzendoorn. De oorzaak hiervoor is gevonden in de geomorfologische ontstaansgeschiedenis. Bij Mastenbroek is sprake van eolische dekzanden, die relatief weinig heterogeniteit kennen. Een voorlopige conclusie die hieruit getrokken kan worden, is dat de benodigde intensiteit van grondonderzoek afhankelijk moet zijn van de geomorfologische ontstaansgeschiedenis.

De conclusie met betrekking tot grondradar is dat het een continu beeld van de ondiepe ondergrond oplevert, maar dat het zijn beperkingen kent. Het toepassen van de techniek is vooral nuttig voor het bepalen van de aanwezigheid en dikte van de bovenste 2m van de deklaag in het voorland en het achterland. Grondradar is niet goed toepasbaar in gronden met hoge grondwaterstand (vanwege sterke geleidbaarheid). Verder wordt geconcludeerd dat een combinatie met boringen en andersoortig geofysisch onderzoek van belang is voor een goede interpretatie van de metingen.

Met betrekking tot het historisch onderzoek op deze locatie is geconcludeerd dat historisch onderzoek een nuttige aanvulling is waarmee grondonderzoek efficiënter en gericht kan worden opgezet.

Waarschuwing bij gebruik van 'zachte data' en indirecte metingen

Geen enkele bron mag op-zich-zelf-staand worden gebruikt. De data uit de ene waarneming (meting of bron) dient altijd door enkele andere waarnemingen te worden bevestigd. Dit geldt specifiek voor interpretatie van zachte of context-gevoelige data (historisch, zandbanen, REGIS info) maar ook indirecte methoden waarbij parameters worden bepaald op basis van correlatie met in-situ metingen (zoals sonderingen).

Enkele andere voorbeelden van verificatie via verschillende bronnen:

Wanneer parameters worden bepaald op basis van correlaties, zoals het bepalen van de doorlatendheid uit korrelverdelingen, dan dient deze waarde altijd met REGIS-informatie of een mini-pompproef te worden geverifieerd. Vaak wordt de bodemopbouw bepaald met gebruik van informatie uit het sondeonderzoek. Hierbij worden grondsoorten geclassificeerd op basis van de combinatie van gemeten conusweerstand en wrijvingsgetal³. Een op deze wijze bepaalde bodemopbouw dient altijd met boringen te worden geverifieerd.

³ Vaak worden deze meetwaarden genormaliseerd naar referentie korrelspanning en gecorrigeerd voor gemeten wateroverspanning.

4.3 Karakteriseren van ondergrondopbouw

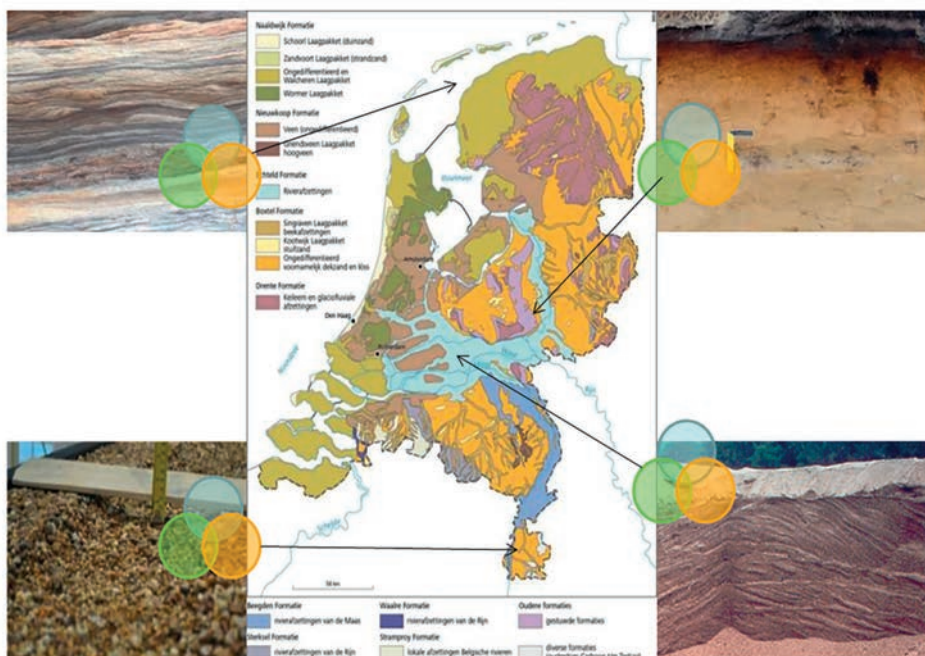
Nu informatie is geordend, al dan niet via een GIS, kunnen mogelijk patronen worden herkend en kunnen geologische afzettingen worden geïdentificeerd die mogelijk van belang zijn voor piping. Denk hierbij aan aanwezigheid van zandbanen, zandlichamen, kleilenzen, grindbanken enzovoorts. In de Schematiseringshandleiding Piping bij het WBI2017 [33] en de Handreiking lokaal schematiseren met SOS-WTI [12] is uitgebreid ingegaan op het gebruik van het SOS bij het karakteriseren van de ondergrond. De begrippen heterogeniteit en anisotropie spelen een belangrijke rol bij het karakteriseren van de ondergrondopbouw. Verderop in deze paragraaf zijn deze begrippen toegelicht in een tekstblok.

Vragen die bij het karakteriseren van de ondergrond moeten worden gesteld en beantwoord, zijn:

- Welke geologische afzettingen en SOS-eenheden die relevant zijn voor piping kunnen worden geïdentificeerd?
- Hoe is de heterogeniteit van het gebied te karakteriseren op basis van ontstaansgeschiedenis? Het gebruik van de zandbanenkaart, indien beschikbaar, is hierbij cruciaal;
- Wat zeggen de geomorfologische kenmerken over de mate van heterogeniteit en anisotropie?

Bij voorkeur zijn de patronen en kenmerken concreet gemaakt door middel van het over elkaar leggen van GIS-kaarten. Deze patronen kunnen als basis dienen voor het bepalen van de geohydrologische systeemkenmerken (volgende activiteit).

Bij de activiteit 'Karakteriseren van de ondergrond' is het sterk aan te raden om een fysisch geograaf of een kwartairgeoloog te raadplegen. Traditioneel werd deze activiteit vrij globaal en vaak zonder geoloog of fysisch geograaf uitgevoerd. Het gevaar hiervan is dat er bij de ondergrondschematisering voor



Figuur 4-3: Differentie naar afzettingstype op landelijke schaal (Bron: Vera van Beek, Deltares)

piping te snel wordt geschematiseerd in een dwarsprofiel met homogene bodemlagen. Dit is onterecht. Bodemlagen hebben een zekere mate van heterogeniteit en anisotropie als gevolg van geomorfologische ontstaansgeschiedenis. Een kwartairgeoloog maakt een onmiddellijke koppeling tussen bodemeigenschappen en variatieschalen. Denk bijvoorbeeld aan fining-upward binnen een geulafzetting in het rivierengebied of een sterk gelaagde afzetting in een getijdengebied.

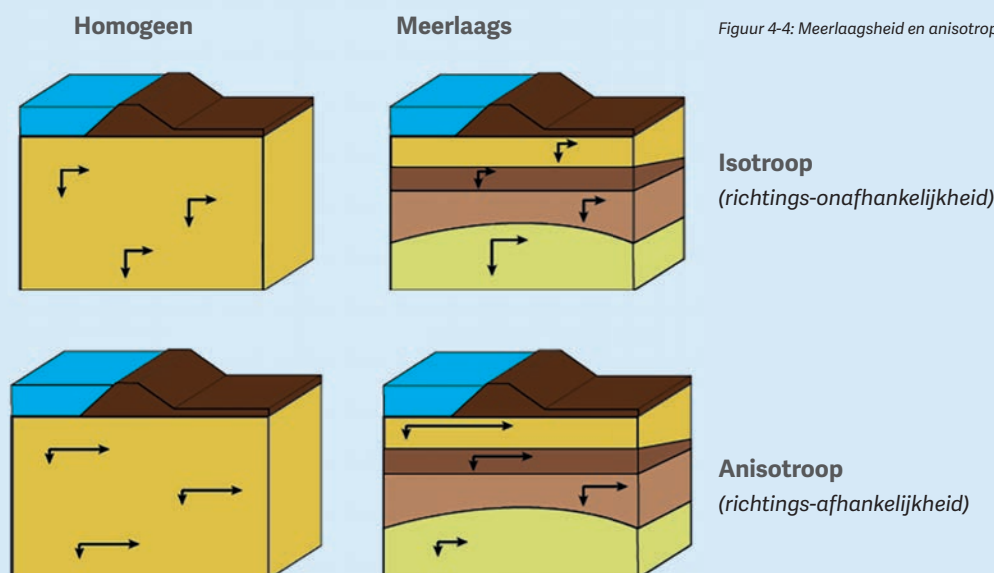
Het is in deze stap van belang dat deze kenmerken worden geïdentificeerd zodat in de volgende stappen nagegaan kan worden of het zinvol is om deze aspecten verder te kwantificeren door veldonderzoek te doen en/of mee te nemen in het rekenmodel dat voor de pipinganalyse wordt gebruikt.

De begrippen heterogeniteit en anisotropie komen terug in verschillende verkenningen, zoals: verkenning Heterogeniteit [V20] en in de verkenningen die zijn uitgevoerd in de proeftuinen Mastenbroek [V2] en IJendoorn [V3]. De begrippen heterogeniteit en anisotropie zijn sterk verwant en worden daarom vaak

samen behandeld. Om begripsverwarring te voorkomen is in de tekstblok een definitie van beide begrippen gegeven.

Het rapport Anisotropie in doorlatendheid [2] bevat een literatuurstudie naar anisotropie en bevat ook typische anisotropie factoren die zijn gevonden in verschillende onderzoeken in Nederland.

Het vroegtijdig identificeren van heterogeniteit en anisotropie is van belang voor een passende opzet van het onderzoeksplan en voor latere uitwerking zoals het definiëren van ondergrond scenario's en het bepalen van parameters. Dit wordt bij Geotechnisch Schematiseren (hoofdstuk 6) verder toegelicht.



Figuur 4-4: Meerlaagsheid en anisotropie (Bron: Fugro)

Begrippen: Heterogeniteit en Anisotropie

Heterogeniteit

Heterogeniteit duidt op ongelijksoortigheid en variatie. Bij het beschrijven van de ondergrond wordt heterogeniteit vaak in verband gebracht met ruimtelijke variabiliteit. Het gaat daarbij om variaties in laagopbouw en laageigenschappen. Er is een sterke link tussen heterogeniteit en geologische ontstaansgeschiedenis. De heterogeniteit kan op verschillende schalen worden beschouwd:

- Heterogeniteit op macroschaal: gaat het om ruimtelijke variaties op de schaal van tientallen tot enkele honderden meters zoals voorkomens van zandbanen.
- Heterogeniteit op microschaal: in dat geval wordt gekeken naar variaties op een schaal van decimeters tot enkele meters, zoals ruimtelijke variaties in korrelgrootteverdeling.

Het synthese document 'Grondonderzoek voor piping' [51] geeft meer informatie en achtergronden over ruimtelijke variatie in relatie met grondonderzoek. Verdere achtergronden kunnen worden gevonden in het proefschrift 'The weakest link' [43] en de afstudeerscriptie 'Zebra's en Damborden' [42].

Anisotropie en meerlaagsheid

Anisotropie heeft betrekking op richtingsafhankelijkheid. Bij pipingvraagstukken richt anisotropie zich vooral op geohydrologische parameters en dan in feite op het effect van richtingsafhankelijkheid in doorlatendheid. Daarbij gaat het vooral om verschillen tussen horizontale en verticale doorlatendheid, maar ook in de horizontaal kan er sprake zijn van anisotropie.

Anisotropie kan op verschillende schalen aanwezig zijn:

- Anisotropie op regionale schaal of meerlaagsheid. Het gaat hier bijvoorbeeld om een afwisseling van overwegend horizontaal gelegen watervoerende en waterremmende lagen, meestal overeenkomstig met een bepaalde formatie. Schaal indicatie: lagen met typische dikte van > 5 m.
- Anisotropie op meso-schaal: Verschillende overwegend horizontale zandlagen binnen een watervoerende zandlaag (één formatie). Schaal indicatie: lagen met typische dikte van 0,5 m a 5 m.
- Anisotropie op micro-schaal. Het gaat hierbij om subgelaagdheid met grovere en fijnere lagen en/of korrels met een voorkeursoriëntatie binnen individuele lagen. Hierbij valt te denken aan variaties in stroomsnelheid als gevolg van lokale morfologie (duintjes, ribbels) of stroom-/windsnelheid. De laagjes/variaties hebben een typische dikte van 1 mm a 50 mm en deze zijn niet over langere afstanden te volgen. Anisotropie op microschaal betreft een bulkeigenschap van het materiaal.

Voor nadere achtergronden wordt verwezen naar 'Toelichting anisotropie en gelaagdheid' [38].

4.4 Karakteriseren van geohydrologisch systeem

Op basis van de geïdentificeerde geologische kenmerken kan het geohydrologisch systeem in kaart worden gebracht. De geohydrologische systeemkenmerken zijn bijvoorbeeld: afmetingen van watervoerende zandige en grindige lagen; aanwezigheid van watervoerende zandbanen binnen de deklaag; waarschijnlijkheid van contact tussen ondiepe en diepe watervoerende lagen; binnen- en buitendijkse openwater systemen met aanzienlijke invloed op het stromingsbeeld en het isohypsenpatroon⁴, deze openwatersystemen kunnen als randvoorwaarden worden gezien van een geohydrologisch model; weerstand van de deklaag in voor- en achterland; weerstanden rond een waterloop, zoals intrede- en uittredeweerstanden, radiale, verticale en horizontale stromingsweerstand.

Het ligt voor de hand dat deze activiteit door een geohydroloog wordt uitgevoerd. Een geohydroloog zal van nature naar het grotere systeem kijken en zal daarbij gebruik maken van ervaring met regionale geohydrologische modellen, metingen en andere lokale gebiedskennis. Toch is voor deze activiteit ook de kennis van de geotechnicus of adviseur waterkeringen van belang om de relevante onderzoeksvragen te formuleren zodat uiteindelijk een vertaling kan worden gemaakt naar een geotechnische schematisering voor het uitvoeren van de pipinganalyse. Mogelijke onderzoeksvragen zijn:

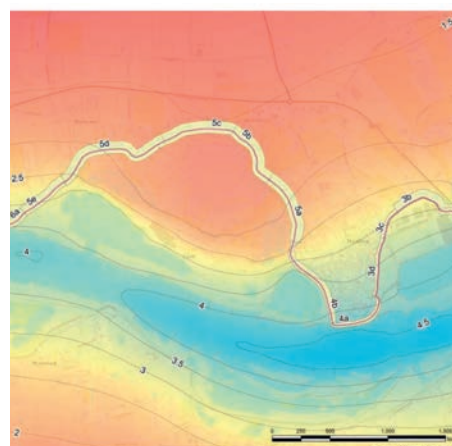
- Is het noodzakelijk om gebruik te maken van regionale modellen om een realistischer beeld te verkrijgen van de werkelijkheid of kan het geohydrologisch systeem worden 'plat geslagen' naar een analyse op dijkdoorsnede-niveau?
- Welke openwater systemen moeten hierbij expliciet in de schematering worden meegenomen?

Het is mogelijk dat er voor het beschouwde gebied al een regionaal geohydrologisch model beschikbaar is. Een dergelijk regionaal model kan gebruikt worden voor het karakteriseren van het geohydrologisch systeem, met een duidelijke kanttekening dat de gebruikelijke schaal van regionale modellen te grof is om een nauwkeurige voorspelling te geven van het stijghoogteverloop op dijkdoorsnede-niveau bij norm- of ontwerpcndities. Ook is het voor dit doel van groot belang dat het te gebruiken regionaal geohydrologisch model is

geijkt met peilbuis meetnetten rond de dijk. In paragraaf 7.5 wordt nader ingegaan op de beperkingen van het gebruik van de gebruikelijke regionale modellen voor directe toepassing in de pipinganalyse. Hierbij wordt ook een voorbeeld gegeven van een verkenning waar nadere verfijning van het regionale model is toegepast (verkenning 'Intredeweerstand' [V1]).

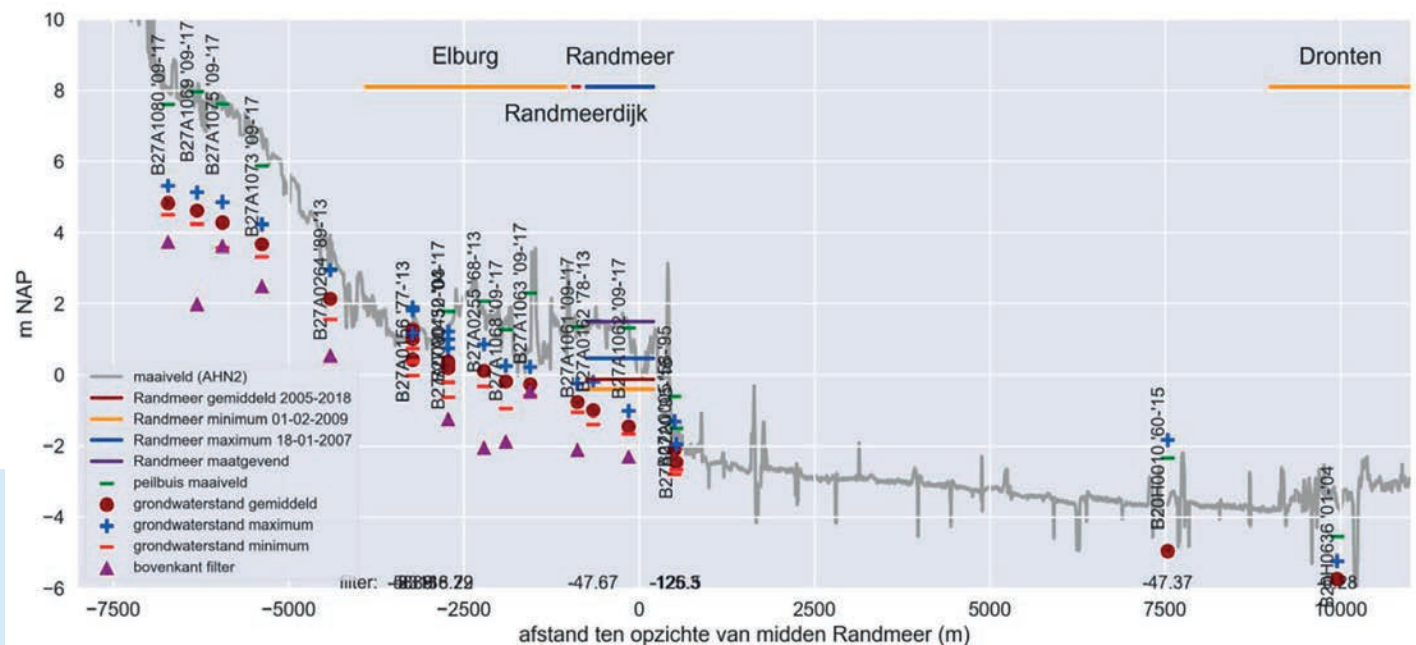
Vaak zullen geohydrologisch systeemkenmerken op een gedetailleerde schaal grillig en daardoor lastig te lokaliseren zijn, zoals dunne en smalle zandige lagen in een overwegend kleiige deklaag. De vraag is of de beschikbare informatie toereikend is om dergelijke gedetailleerde systeemkenmerken in kaart te kunnen brengen. Met additioneel grondonderzoek (bijvoorbeeld metingen van waterspanningen) kan dan geprobeerd worden wel een eenduidig(er) beeld te verkrijgen maar de vraag is in hoeverre dit haalbaar is. Ook dan kunnen verschillende mogelijkheden overblijven die dan als scenario's met bijbehorende kansinschatting verder kunnen worden meegenomen in het schematiseringproces (zie paragraaf 6.4 en 6.5).

Veel informatie over het geohydrologisch systeem wordt verkregen uit metingen onder normale omstandigheden. De verkenning Noordelijke randmeerdijk [V21] onderstreept het belang van een geohydrologische systeemanalyse waarbij veel inzicht wordt verkregen uit metingen bij normale omstandigheden (zie uitgelicht).



Figuur 4-5: Boven: regionale isohypsenpatroon (isolijnen met gelijke stijghoogte in m t.o.v. NAP) voor een herhalings-tijd van 10 jaar bepaald met een regionaal model MORIA. Onder: detail isohypsenpatroon uit zelfde model (Bron: Royal HaskoningDHV)

De verkenning 'Monitoring zandmeevoerende wellen' [V16] geeft een systematisch overzicht van verschillende geohydrologische systemen in het rivierengebied.



Figuur 4-6: Doorsnede dwars op Noordelijke randmeer. Links hoge grond van Veluwe, rechts de Flevopolder bij Dronten. (Bron: Witteveen+Bos)

Verkenning 'Noordelijke randmeerdijken' [V21]

Deze verkenning is uitgevoerd door Waterschap Vallei en Veluwe en Witteveen en Bos. Op basis van peilbuismeetnetten is inzicht verkregen in het geohydrologische systeem rond het Noordelijke randmeer.

Uit de peilmetingen onder normale omstandigheden en tijdens de storm van januari 2018 bleek de sterke invloed van grote systemen rond het meer, zoals de hoge gronden van de Veluwe en de diepe Flevopolder. Op basis van metingen kon een inschatting worden gemaakt van de demping als gevolg van hydraulische weerstand op de bodem van het randmeer.

Daarnaast zijn HPT-sonderingen uitgevoerd om de horizontale doorlatendheden beter te kunnen inschatten voor de piping analyse. Op basis van deze sonderingen is geconcludeerd dat de horizontale doorlatendheid van het zandpakket lager is dan werd aangenomen in de voorverkenning.

Door deze bevindingen is de pipingopgave ter plaatse van de dijk en bij 6 kunstwerken sterk gereduceerd.



Verkenning 'Monitoren zandmeevoerende wellen' [V16]

Deze verkenning, uitgevoerd door WSRL en Acacia Water, gaat over geohydrologische monitoring ter plaatse van een wel. Het doel is om te bepalen of met een combinatie van veldwaarnemingen, geochemische analyses en geohydrologische berekeningen kan worden vastgesteld in welke mate er bij een zandmeevoerende wel al sprake is van piping.

Voor de verkenning zijn 11 locaties geselecteerd: 3 langs de Neder-Rijn/Lek en 8 langs de Waal. Op deze locaties is geohydrologische monitoringsapparatuur geïnstalleerd, waarmee druk, geleidbaarheid en temperatuur van het grondwater onder de wel is gemeten. Tevens zijn watermonsters genomen voor geochemische monitoring. Gedurende het project hebben 3 wellen zand meegevoerd, hiervan zijn zandmonsters genomen en geanalyseerd. Daarnaast zijn geohydrologische modellen gebruikt om de monitoringsresultaten in het juiste kader te kunnen plaatsen. Tijdens de verkenning heeft zich geen significant hoogwater voorgedaan.

De verkenning heeft het volgende inzicht opgeleverd:

- In de onderzochte regio is de respons van de stijghoogte op normale variaties in buitenwaterstand erg verschillend. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in het geohydrologisch systeem, zoals gebieden een inzijgende rivier met kwel en wellen

in het achterland en gebieden met een drainerende rivier en inzijgend regenwater in het achterland. Met temperatuur- en geleidbaarheidsmetingen nabij wellen kan worden waargenomen of wellen permanent lopen (weinig variatie in meetwaarden) of tijdelijk bij hoge rivierwaterstanden optreden (grotere variatie in meetwaarden). De metingen zijn consistent met het beeld dat wordt verwacht op basis van de geohydrologische systeemkenmerken.

- Camera inspectie van 3 wellen heeft een beeld gegeven van de pipe onder de deklaag. Er zijn meerdere kleine openingen waargenomen van waaruit water stroomde.
- De geochemische samenstelling van het grondwater is een goede tracer om de verblijftijd van het water te bepalen. Dit zou iets kunnen vertellen over de snelheid van pipegroei. Het vinden van de juiste tracer was echter niet makkelijk en van vele factoren afhankelijk. Dus is deze techniek nu nog minder geschikt voor monitoring van piping.
- In de verkenning zijn ook 2D en 3D model-

berekeningen gemaakt van de grondwaterstroming rond een wel. De 3D berekeningen beschrijven de realiteit het best. Het stromingsbeeld uit de 3D berekening wijkt duidelijk af van de 2D berekening die ten grondslag ligt aan de momenteel gebruikte pipinganalyse. De 3D berekeningen laten zien dat de stroomsnelheden toenemen in de directe nabijheid van de wel. Indien door sterke cohesie van het bodemmateriaal van de deklaag de diameter van de pijp in de grond klein blijft, kan het debiet maar zeer beperkt toenemen. De wel ontwikkelt zich een holte of caverne onder de deklaag. Deze bevinding lijkt te worden gestaafd door praktijkwaarnemingen.

Het onderzoek heeft laten zien dat metingen en model onderzoek potentie hebben om het gedrag van welvorming en piping beter te kunnen begrijpen. Daarom wordt aanbevolen om verder te meten (met name bij hoogwater) en het model voor 3D grondwatergedrag rond de wel verder te ontwikkelen.

Bij hoge gronden in het achterland, zoals op enkele plekken langs de Neder-Rijn, de Waal, de IJssel, de Maas en de randmeren tussen Veluwe en Flevopolder, is er zelfs sprake van een regionaal complexer beeld. In deze situaties kan er bij normale, en mogelijk zelfs bij maatgevende, buitenwaterstanden, sprake zijn van positieve kwel onder de dijk door (dat wil zeggen een kwelstroom richting de rivier). Deze grondwaterstroming kan zelfs onder de rivier door gaan. Vergelijkbare situaties treden op bij diepe polders achter de waterkering. Dergelijke regionale grondwaterstromen kunnen zandmeevoerende wellen op grote afstand van de dijk veroorzaken, waarbij niet altijd duidelijk is of dit schadelijk is voor de dijk. Ook kan de lokale grondwaterstroming onder de dijk worden versterkt, waardoor het gevaar op piping groter zou kunnen worden. Regionale randvoorwaarden kunnen daarnaast een ongunstig effect hebben op de stijghoogte bij hoogwater en dus op opbarsten van het achterland. Een voorbeeld van een locatie waar hoge gronden de geohydrologische toestand rondom de dijk bepalen is de situatie bij de Grebbedijk en de achterliggende hoge gronden rond de Grebbeberg. In verkenning 'Regionale kwelstroom – case Grebbedijk' [V4] is dit effect onderzocht. Een voorbeeld van diepe polders achter een waterkering is de Zuidplaspolder bij de Hollandse IJssel in Zuid-Holland.

Andere verkenningen die sterke raakvlakken hebben met geohydrologische karakterisering zijn:

- Verkenning 'Intreeweerstand' [V1] (zie paragraaf 7.5);
- Verkenning 'Effect tijdsafhankelijkheid op stijghoogte bij getijdewateren' [V15] (zie paragraaf 6.6)

Verkenning 'Regionale kwelstroom – case Gebbedijk' [V4]

In deze verkenning is onderzocht of regionale grondwaterstroming van hoge gronden zoals de Veluwe naar de rivier toe de lokale grondwaterstroming onder de dijk dusdanig kan beïnvloeden dat er een significant effect is op piping.

De conclusie van de verkenning is dat de aanwezigheid van de regionale kwelstroom het risico op piping niet verlaagt. Dit is beschouwd via de verschillende fases die tot het faalmechanisme piping leiden: het opbarsten van een deklaag, het ontlastende effect van een wel en het erosie patroon.

- Het opbarsten van de deklaag is sterk afhankelijk van de dikte en het gewicht van de deklaag, de locatie is bepalend voor het risico op piping. Bij een hoge regionale kwelstroom zal de druk onder de deklaag

toenemen, waardoor mogelijk een groter deel van het achterland gevoelig is voor opbarsten. De toename in druk is belangrijk, maar de onzekerheid in de dikte van de deklaag heeft een grotere invloed op de bepaling van de opbarstlocatie.

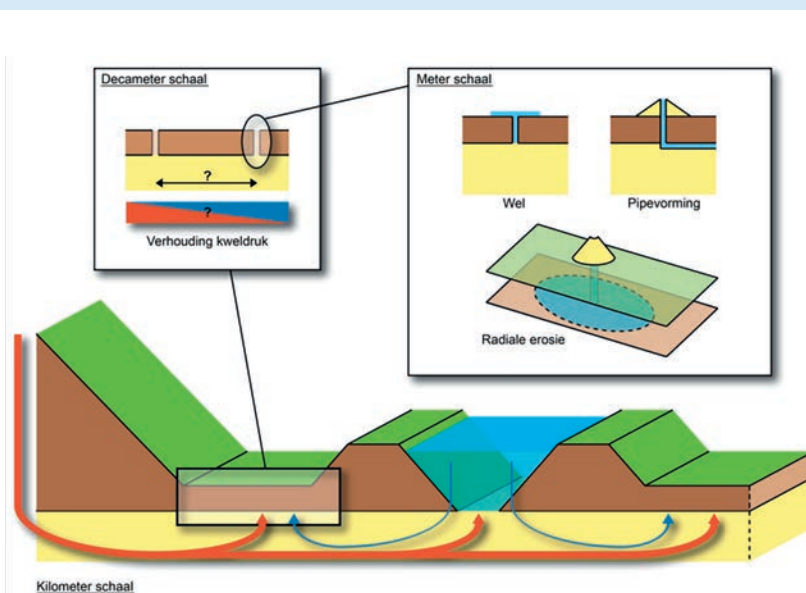
- Onderzoek heeft aangetoond dat de ontlastende functie van een wel beperkt is en ondergeschikt is aan de variatie in de dikte van de deklaag. Voor de beheerder is het daarom belangrijk om te weten waar in het veld de grens ligt waarbinnen wellen moge-

lijk een gevaar vormen voor de stabiliteit van de waterkering. Specifiek voor beheerders wordt deze conclusie beschreven in een artikel dat ter publicatie wordt aangeboden aan een vakblad.

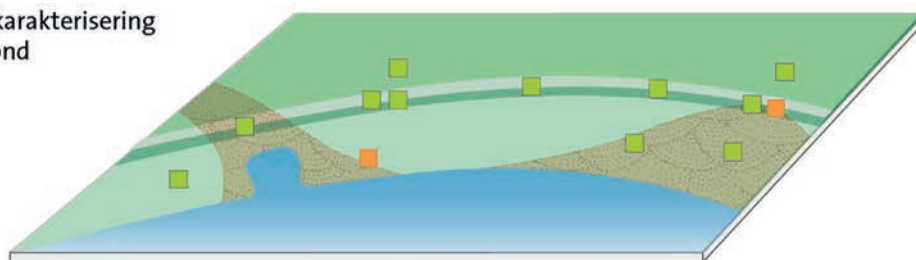
- Een zandmeevoerende wel is een gevaar voor de waterkering wanneer het kritische verhang wordt overschreden. In dat geval zal de pipe door blijven groeien tot aan de rivier. Dit wijzigt niet tijdens maatgevende omstandigheden door de regionale kwelstroom.

Uit deze verkenning zijn verschillende documenten voortgekomen zoals: [de werkwijzer schematiseren regionale kwelstroming en een stappenplan voor een beheerdersoordeel](#).

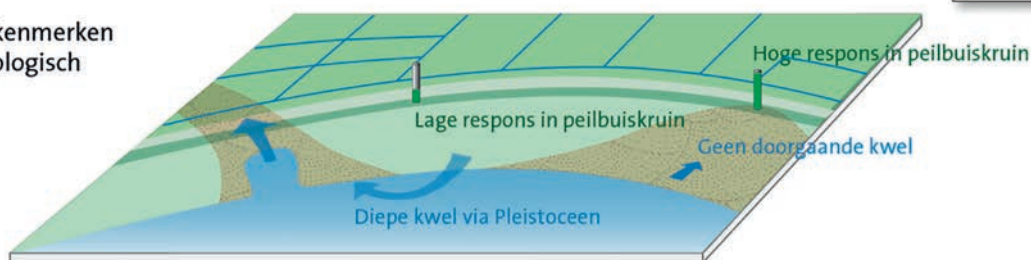
Figuur 4-7: Schematische weergave regionale kwelstroom
(bron: 'Werkwijzer schematiseren regionale kwelstroom', Witteveen+Bos, waterschap Vallei en Eem)



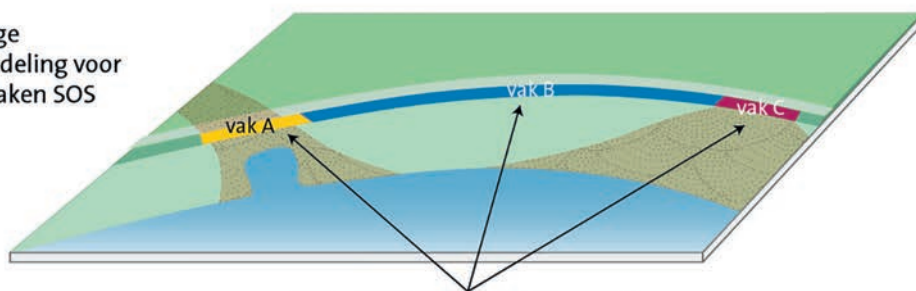
Globale karakterisering ondergrond



Globale kenmerken geohydrologisch



Voorlopige dijkvakindeling voor lokaal maken SOS



Per vak differentiëren in s.o.s. scenario's

- Zandbaan
- Onderzoek consistent met zandbaan
- Onderzoek niet consistent met zandbaan
- Slecht doorlatende cohesieve lagen

Figuur 4-8: Sterk vereenvoudigd voorbeeld van de samenhang tussen de activiteiten 'Karakteriseren ondergrond', 'Geohydrologisch karakteriseren' en 'Voorlopige vakindeling' (Bron: Royal HaskoningDHV)

4.5 Voorlopige vakindeling

Figuur 4-8 laat een voorbeeld zien van de samenhang tussen de activiteiten inventariseren en karakteriseren van de bodem en het geohydrologische systeem rond de dijk. Uit deze karakterisering volgt welke informatie bepalend is voor grondwaterstroming, stijghoogtes en opbarsten. Er is inzicht in de te verwachten SOS-eenheden per segment of per deelgebied binnen een segment. Samen met andere kenmerken die van belang zijn voor de pipinganalyse zoals poldersloten en het maaiveldniveau van het achterland, kan een voorlopige vakindeling worden gemaakt. In de praktijk zal naast deze indeling op technische kenmerken ook een indeling worden gemaakt op omgevingskenmerken. Het is praktisch om deze beide indelingen (techniek en omgeving) parallel te maken. Na het samenvoegen ontstaat dan een dijkvakindeling die breder toegepast kan worden.

In de Schematiseringshandleiding Piping bij het WBI2017 [30] is een opsomming gegeven van kenmerken die een vakindeling kunnen bepalen. Deze eerste voorlopige vakindeling zal nog globaal van opzet zijn, na beschikbaar komen van nader onderzoek (volgende stap), kan de vakindeling worden verfijnd en zullen vakgrenzen strakker worden gedefinieerd op basis van het aanvullende onderzoek. Zie onder Geotechnische schematiseren (6).

Het samengevoegde beeld van dominante basisinformatie over ondergrond en geohydrologie vormt de basis voor het bepalen van de onderzoeksstrategie.

4.6 Gevoeligheidsanalyse

Voordat de onderzoeksstrategie wordt uitgewerkt, is het erg zinvol om een eerste indicatie te verkrijgen van de pipingrisico's in het beschouwde gebied. Het is goed mogelijk dat er reeds een verkennende veiligheidsanalyse is uitgevoerd. Dit kan bijvoorbeeld zijn gedaan in een vorige veiligheidsbeoordeling. Zonder verkenning van de omvang van het piping-probleem zal het zeer lastig zijn om een goede onderzoekstrategie op te stellen omdat dan geen goede afweging kan worden gemaakt van de meeropbrengsten van het aanvullende grondonderzoek.

Met een ruwe opzet van het ondergrondmodel en het geohydrologisch systeem kunnen indicatieve piping berekeningen worden uitgevoerd op basis van een range aan geschatte parameters (bijvoorbeeld een range aan waarden uit de landelijke SOS-database). Deze berekeningen hebben dus nog een sterk indicatief karakter. De activiteit 'gevoeligheidsanalyse' is uitsluitend ten dienste van het bepalen van de onderzoeksstrategie en nog niet als het doorlopen van een eerste cyclus in het proces van schematiseren en analyseren. Het is namelijk gevaarlijk om in dit stadium al conclusies te trekken en te snel door te kijken naar verbetermaatregelen. Hierdoor ontstaat er een risico dat de onderzoeksstrategie te snel focust op een onvoldoende onderbouwde oplossingsrichting, omdat er te vroeg oplossingen zijn weggeschreven. Denk hierbij aan het wegschrijven van een voorlandverbetering omdat er een sloot in het voorland aanwezig is. Uit een goede afweging van alternatieven zou bijvoorbeeld kunnen blijken dat voorlandverbetering wel een haalbare oplossing zou kunnen zijn wanneer de sloot wordt gedempt en verlegd.

In het 'Handelingsperspectief grondonderzoek' [14] worden voorbeelden gegeven en suggesties gedaan voor het opzetten van een risicogestuurd grondonderzoek. Daarbij is er ook aandacht voor het uitvoeren van verkennende gevoeligheidsanalyses.

4.7 Inventariseren van oplossingsrichtingen

De onderzoeksstrategie bij een pipinganalyse in een versterkingstraject zal zich vooral richten op de kansrijke versterkingsvarianten. In een verkenningsfase van een dijkversterkingstraject wordt vaak een proces doorlopen van inventariseren van mogelijke varianten naar kansrijke varianten naar alternatieven tot aan het bepalen van het Voorkeursalternatief (VKA). Vanwege projectrandvoorwaarden zal de onderzoeksstrategie dikwijls in een vroeg stadium van de verkenningsfase moeten worden vastgesteld. Mogelijk al wanneer nog niet alle kansrijke alternatieven zijn vastgesteld. Dit geeft een risico voor het project. Het helpt om de diverse oplossingsrichtingen in te delen in 'families':

- Verlengen (horizontale) kwelweglengte;
- Heavescherm;
- Drainageconstructie;
- Filter.

Indien daarbij ook de voor- en nadelen (inclusief kosten) en de synergie met andere faalmechanismen in kaart worden gebracht, geven die een goede eerste filtering van de opties.

Risicogestuurd handelen is dan van groot belang. Het 'Handelingsperspectief grondonderzoek' [14] geeft een leidraad voor het risicogestuurd handelen bij het opstellen van de onderzoeksstrategie.

4.8 Onderzoeksstrategie

De bureaustudie eindigt met een onderzoeksstrategie. In de onderzoeksstrategie staat beschreven welke aanvullende informatie er nodig is, voor welk doel, hoe en op welk moment de informatie verzameld dient te worden. De onderzoeksstrategie legt in belangrijke mate de basis voor het detailniveau dat bereikt kan worden bij het geotechnisch schematiseren, beoordelen en ontwerpen. Afhankelijk van het type project en het afgesproken proces tussen de adviseur en beheerder, kan een onderzoeksplan onderdeel zijn van de onderzoeksstrategie.

De omvang van een aanvullend grondonderzoek is sterk afhankelijk van de gewenste mate van detail van beoordeling of ontwerp.

De vraag die hier steeds gesteld moet worden is: 'Wat is de toegevoegde waarde van het aanvullend onderzoek?', op dit moment maar ook in de toekomst (rekening houdend met 'het belang van eerder weten' en de inpasbaarheid van onderzoekstrajecten in vervolgfases van het project, zie hoofdstuk 2).

De mate waarin men de heterogeniteit van de bodem in kaart wil en kan brengen is een belangrijk aspect bij het gewenste detailniveau van de onderzoeksopzet. Het uitkarteren van zandbanen kan worden uitgevoerd door het uitvoeren van puntmetingen (boringen of sonderingen) op relatief korte onderlinge afstanden of door combinaties van puntmetingen, geofysische continu-metingen en peilbuismetingen.

Er zijn verschillende handreikingen die kunnen worden geraadpleegd voor het opstellen van een onderzoeksplan, zoals:

- Het Handelingsperspectief grondonderzoek **[14]**. Deze handreiking geeft handvatten om voor HWBP-projecten benodigd geotechnisch onderzoek te bepalen en uit te zetten volgens een in de praktijk bewezen risicogestuurde aanpak. Naast dat het document voor HWBP-projecten is geschreven, geeft het de principes zodanig goed weer dat het voor iedere fase van de beheercyclus te gebruiken is;

- Het Synthesedocument grondonderzoek voor piping **[S1]**, behorend bij de verkenning Heterogeniteit. Dit document geeft voorbeelden van afstanden tussen onderzoekspunten en hoeveelheden grondonderzoek. Ook worden voorbeelden gegeven van de fasering bij eenvoudig onderzoek naar piping (bureaustudie gevolgd door geotechnisch veldwerk) en een gedetailleerd onderzoek (bureaustudie, vlakdekkend geofysisch onderzoek, veldwerk, onderzoek naar doorlatendheid). In dit document wordt de link gelegd tussen geologische karakterisering en geostatistiek naar praktische handvatten voor het opzetten van een grondonderzoeksplan, rekening houdend met ruimtelijke variabiliteit;
- De 'Handreiking voor een meetnet gerelateerd aan piping' **[V5]**. Deze handreiking geeft een stappenplan voor het opstellen, realiseren en benutten van een efficiënt en doelmatig meetnet, gerelateerd aan het faalmechanisme piping.

De verkenning Heterogeniteit **[V20]** en de Schematiseringshandleiding Piping bij het WBI **[30]** geven concreet de samenhang weer tussen onderlinge afstanden van puntmetingen en het detailniveau van ondergrondmodellering. Over onderlinge afstanden van puntmetingen zegt **[30]** het volgende:

- Meetlocatie afstanden van 200 m geven een indruk van de grondopbouw in algemene zin en van het voorkomen van zandpakketten met een grotere omvang.
- Meetlocatie afstanden van 100 m geven een gedetailleerde indruk van het mogelijk voorkomen van relevante zandpakketten langs een dijkvak.
- Met meetlocatie afstanden van 50 m worden alle mogelijk relevante zandpakketten in de ondergrond in een dijkvak aangetroffen en kan de grootschalige opbouw van zandpakketten worden vastgesteld.
- De interne variatie van grondeigenschappen binnen de grootschalige onderdelen is groot. Met een meetlocatie afstand van 25 m kan deze variatie nog niet voldoende gevat worden. Indien het dus gewenst is



om naast elkaar liggende zandpakketten te begrenzen, is een zeer dicht net van waarnemingen nodig. In de meeste gevallen minder dan 25 m onderlinge afstand langs de dijk.

- De ligging van een dijklichaam boven een horizontale begrenzing van een zandpakket is van belang voor de beoordeling voor piping en heave. Vastgesteld moet worden of de binnenteen van de dijk of de berm mogelijk gelegen is binnen een dergelijk begrenzing. Indien dat het geval is kan met een meetlocatie afstand van minder dan 25 m de beoordeling geoptimaliseerd worden voor zulke dijkvakken.

In de praktijk zal niet altijd voor een dergelijke dicht meetnet gekozen worden. Het gebruik van de combinatie van puntmetingen en andere metingen zoals geofysische metingen of zandbanenkaarten die zijn gebaseerd op een groter grid van boringen in de wijdere omgeving, is een goed alternatief.

Wel moet de betrouwbaarheid van deze bronnen worden geverifieerd. Informatie over geofysische technieken kan gevonden worden in verkenning Geofysische karteringstechnieken [V13]. Informatie over toegevoegde waarde en beperkingen van dergelijke informatie kan gevonden worden in de verkenning Mastenbroek [V2]. Ook kan het opzetten van een meetnet met peilbuizen inzicht verschaffen in het mogelijk contact tussen ondiepe zandbanen en diepere zandpakketten.

Hier volgen enkele voorbeelden van situaties waarbij het zeer zinvol is om de heterogeniteit van de bodem nader in kaart te brengen.

In een gebied met veel zandbanen en geulopvullingen met sterk uiteenlopende afmetingen kan overwogen worden om vakgrenzen op geulniveau vast te stellen. Het uitkarteren van iedere geul en zandbaan, groot en klein, vereist onderzoeksinspanning. De omvang van het onderzoek zal in relatie moeten staan de fase waarin een project zich bevindt. Bij het plannen van een onderzoek in het kader van een bepaalde projectfase moet ook een doorkijk worden gemaakt naar de volgende projectfase, rekening houdend met 'het belang van eerder weten'. In de praktijk blijkt dat de kosten van dit aanvullend grondonderzoek vooral in de planuitwerkingsfase snel worden terugverdiend. Een voorbeeld van een situatie waar het nuttig is om het verloop van een zandbaan nader uit te karteren in een beoordelingsfase is een zandbaan die de dijk lijkt te 'schampen' (Figuur 6-1). In dit geval lijkt het zinvol om na te gaan of de tussenzandlaag ook tot voorbij de binnenberm doorloopt. Het is dan dus zinvol om de zandbaan lokaal uit te karteren.

In een versterkingstraject kunnen andere keuzes in de onderzoeksstrategie worden gemaakt dan bij een eerste veiligheidsanalyse. Bij bepaalde specifieke inpassingskwesaties in bebouwd gebied kan gedetailleerd onderzoek en uitkarteren van zandbanen eerder lonend zijn dan in minder complexe omgeving.

5. Onderzoeken

5.1 Onderzoeksmethoden

Het resultaat van een bureaustudie is dat er meestal aanvullende informatie verzameld moet worden om het systeem te kunnen schematiseren en passende berekeningen uit te kunnen voeren. Als in de bureaustudie nog geen onderzoeksplan is opgesteld, is dit de eerstvolgende stap die genomen moet worden om daarna de informatie daadwerkelijk met specifieke onderzoekstechnieken te verzamelen.

In hoofdlijnen zijn er 3 typen onderzoekstechnieken te onderscheiden die in de volgende paragrafen verder zullen worden toegelicht:

- Geofysische en aanverwante technieken, zoals:
 - Elektromagnetische meetmethoden
 - Elektrische methoden
 - Infrarood meeting (lekdetectie techniek)
- Geotechnische technieken, zoals:
 - Boringen
 - Sonderingen
 - Zeefanalyses
 - Bepalingen van de volumieke massa
- Geohydrologische technieken, zoals:
 - Monitoringstechnieken
 - Doorlatendheidsonderzoeken

Naast het toepassen van onderzoekstechnieken is het van meerwaarde om ook deskundigen en derden te raadplegen om inzicht te krijgen in de eigenschappen van een gebied en ondergrond en deze kennis te gebruiken bij het opzetten en uitvoeren van onderzoekstechnieken.

In het Synthesedocument Handreiking Grondonderzoek voor Piping [S1] is aangegeven welke onderzoekstechnieken gebruikt kunnen worden per piping-parameter, welke de voorkeursmethode is per parameter en of de parameter alleen indirect met de methode is vast te stellen. Daarnaast zijn ook, in relatieve zin, de kosten per techniek weergege-

ven. In [S1] worden alle beschikbare onderzoekstechnieken beschreven met de voor- en nadelen. Er is niet ingegaan op de doorlooptijden van onderzoekstechnieken in relatie tot een projectplanning. Als aanvulling op [S1] is het van belang om te benoemen dat de technieken goed in de tijd gepositioneerd moeten worden om ze effectief te laten zijn voor beoordelings- of ontwerpactiviteiten. Voor de effectiviteit is het belangrijk om in het onderzoeksplan stil te staan bij de doorlooptijd van onderzoekstechnieken en te controleren of deze doorlooptijd past in de fase van de beoordeling, versterking of realisatie. Het gebruik van lekdetectie en peilbuizen vereist bijvoorbeeld veel doorlooptijd om een goede dataset te kunnen verkrijgen en het gebruik van grondradar is seizoen afhankelijk. Planning van een project of fase kan daarmee sturend worden bij de keuze van onderzoekstechnieken. Anderzijds kan doorlooptijden van onderzoekstechnieken de planning van een fase of project dicteren. Het handelingsperspectief geotechnisch onderzoek [14] geeft handvatten voor doorlooptijden.

In het Synthesedocument Handreiking meetnetten grondwatermonitoring voor piping [S2] wordt specifiek ingegaan op het meten van de stijghoogte met behulp van een meetnet van peilbuizen bij een hoogwaterpassage en hoe deze informatie kan worden gebruikt in een pipinganalyse.

5.2 Geofysische en lekdetectie technieken

Met geofysisch onderzoek wordt op een niet-destructieve wijze informatie van de ondiepe ondergrond in kaart gebracht. De mate en het type informatie is afhankelijk van de techniek.

Vanuit het verleden is het gebruik van geofysisch onderzoek bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen niet gebruikelijk, terwijl sommige geofysische technieken weldegelijk inzicht kunnen geven in de gelaagdheid van de ondergrond, de aanwezigheid van een deklaag in voor- en achterland en het risico op piping. Geofysische technieken zijn inzetbaar om de ruimte tussen puntmetingen (sonderingen, boringen) goed onderbouwd in te vullen. Dit ten behoeve van een 3D ondergrondmodel en geotechnische langs- en dwarsprofielen. Het toepassen van geofysische technieken moet echter altijd gecombineerd worden met informatie uit puntmetingen (boringen en/of sonderingen) om de informatie te kunnen interpreteren en verifiëren en te kunnen vertalen naar grondlagen met geotechnische karakteristieken.

Binnen de pov Piping is de haalbaarheid van de volgende geofysische technieken en aanverwante technieken onderzocht en beschreven. Zie rapport Haalbaarheid geofysische karteringstechnieken [11]:

- Electromagnetische methoden, zoals Frequentie Domein Elektromagnetisme (FDEM) en Grondradar (GPR);
- Elektrische methoden, zoals de Verticale elektrische sondering (VES) en Elektrische weerstand tomografie (ERT) en spontane potentiaal methode (SP);
- Seismiek;
- Toplaagmetingen, zoals Gammastralingssensor en passieve microgolf radiometrie;
- Niet-geofysische methoden, zoals infrarood (lekdetectie techniek) en glasvezel.

In het Synthesedocument Handreiking grondonderzoek voor piping [S1] zijn alleen de geofysische technieken beschreven die voor piping momenteel als meest kansrijk worden gezien. Dit betreffen electromagnetische methoden (FDEM en GPR) en de elektrische weerstand tomografie (ERT).

De ontwikkelingen rond toepassing van geofysische technieken bij de advisering rond waterkeringen is volop in beweging.

Het Netwerk Dijkmonitoring organiseert bijeenkomsten waarin ontwikkelaars en kennisvragers informatie uitwisselen. Ook binnen de pov Macrostabielheid wordt naar de toepassing van geofysische meettechnieken gekeken. In het rapport Visie op meten en monitoren voor waterkeringen [40] is gekeken welke ontwikkelingsporen nog doorlopen moeten worden om de betrouwbaarheid van deze technieken bij toepassing op advisering rond waterkeringen te verhogen.

Hieronder worden de bevindingen vanuit de verkenningen binnen de pov Piping beschreven.

De elektromagnetische meting, grondradar en elektrische weerstandsmeting kunnen de dikte van de deklaag meten, evenals de locatie van discontinuïteiten in de ondergrond, zoals zandbanen, leidingen en andere objecten. De elektrische weerstandsmeting kan ook de opbouw van de deklaag en dikte van zandlagen metingen, waarbij ook hier geldt dat de opbouw gecontroleerd dient te worden met boringen en/of sonderingen.

In de verkenning Proeftuin Mastenbroek [V2] is ervaring opgedaan met grondradar en de gamma-spectrometer of gammastralingssensor. In de rapportage van de verkenning is een overzicht opgenomen van aanbevolen combinaties van deze en ook andere geofysische technieken bij verschillende typen bodemopbouw en in relatie tot het dieptebereik. Het dieptebereik van de gamma-spectrometer is beperkt tot 50 cm en de grondradar tot ca. 2 m afhankelijk van het bodemtype. In gronden met een hoge elektrische geleidbaarheid (veen/klei met hoge grondwaterstand en zout/brakwater) is grondradar slecht tot niet toepasbaar. Dit komt doordat de elektromagnetische puls zich op de grondwaterspiegel verspreidt.

Aanwezigheid van objecten in de ondergrond geven veel verstoringen op de meetresultaten van elektromagnetische metingen en elektrische weerstandsmetingen. Bij elektromagnetische metingen geven kabels en leidingen en perceelafscheidings in de vorm van bijvoorbeeld prikkeldraad of schrikdraad verstoring van het meetsignaal. Ook de aanwezigheid van lokale afwijkingen in samenstelling van grondwater (bv. stortplaatsen, lokale zout kwel) heeft invloed op de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van metingen. Bij grootschalige afwijkingen (bijvoorbeeld zoutgehalte) kunnen metingen evt. met behulp van een lokaal kalibratieschema worden gecorrigeerd voor afwijkende grondwatersamenstelling.



Verkenning 'Geofysische karteringstechnieken' [V13c]

In deze verkenning is de toepasbaarheid van verschillende geofysische karteringstechnieken voor dijken verkend. De werking en het toepassingsgebied van verschillende geofysische technieken voor piping is beschreven, alsmede de voor- en nadelen. Ook zijn aanbevelingen gedaan voor verbetering.

Er wordt geconcludeerd dat toepassing van geofysische technieken veelbelovend is, met duidelijke voordelen voor het snel en compleet in beeld brengen van de ondergrond. Tegelijkertijd blijken de resultaten bij feitelijke toepassing wisselvallig. Deels is dit terug te voeren op onbekendheid van de technieken, maar ook de onvolledigheid in de vraagstelling en verwachtingen vooraf spelen mee. Dit staat grootschaligere toepassing vooralsnog in de weg.

Er wordt aanbevolen de inzet van geofysische karteringstechnieken steeds vooraf goed te doordenken met een duidelijke informatievraag en realistische verwachtingen ten aanzien van de resultaten, aan de hand van een informatiestrategie. Dit draagt bij aan versterkt begrip tussen kennisdragers (aanbieders) en eindgebruikers (beheerders).

Ook wordt aanbevolen om tot een completere beschrijving van praktijkvoorbeelden en vastlegging van omstandigheden te komen. Dit vanuit het perspectief van de beheerder. Hiermee wordt ook de ontwikkeling van een productwijzer haalbaar en nuttig geacht.

De bevindingen van deze verkenning zijn samengevat in het rapport Haalbaarheid geofysische karteringstechnieken [11].

Lekdetectietechnieken leveren geen pipingparameters op maar geven wel inzicht in kwalitatieve informatie over grondwaterstromingsverschillen.

Met infraroodmetingen kunnen temperatuurverschillen zeer nauwkeurig en vlakdekkend aan het oppervlak van de waterkering of in de teensloot gemeten worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van geavanceerde infraroodsensoren die temperatuurverschillen kunnen waarnemen van 0,05 °C. Met deze nauwkeurige meting van temperatuurverschillen kunnen kwelplekken in kaart worden gebracht, doordat plekken waar overmatige kwel of lekkage plaatsvindt een andere temperatuur hebben dan hun omgeving. Deze technieken kunnen vooral helpen om grondonderzoek gericht uit te kunnen voeren. Gedacht kan worden aan specifieke toepassingen zoals onderloopsheid bij kunstwerken.



Figuur 5-1: Infraroodmeting Gouda: Infraroodbeelden laten zien dat natte plekken bij hoogwater (onder) groter zijn geworden en dat de grond aanzienlijk drassiger is geworden dan bij laagwater (boven). Dit was met blote oog niet waarneembaar (bron: VOF DijkMonitoring Nederland)

Verkenning 'Infrarood meting' [V13a]

Door de VOF Dijkmonitoring, een samenwerking van verschillende marktpartijen en de Stichting FloodControl IJkdijk, is onderzoek gedaan naar infraroodtechnologie (IR) voor het inspecteren en monitoren van waterkeringen. In de afgelopen jaren is deze techniek op verschillende waterkeringen toegepast waarmee kwellocaties in kaart zijn gebracht. Uit het onderzoek is gebleken dat met IR potentieel problematische kwellocaties, die soms zelfs met het blote oog eenvoudig zouden worden gemist, snel en efficiënt in kaart kunnen worden gebracht. Het onderzoek stelt dat:

- IR kan worden gebruikt bij de grondonderzoeksstrategie voor een veiligheidsanalyse;
- IR een goede aanvullende vlakdekkende informatiebron is die kan worden gebruikt om lokale zwakke plekken (kwellocaties) nader te onderzoeken om zo de lokale geohydrologische situatie beter in beeld te krijgen voor een nadere veiligheidsanalyse;

- IR kan worden gebruikt als hulpmiddel bij inspecties en uitvoeringscontrole.
- Aanbevolen wordt om een meetcampagne uit te werken waarbij IR op grotere schaal kan worden toegepast bij nieuwe dijkversterkingen en als controle bij bestaande dijken. Verder wordt aanbevolen om de techniek op te nemen in richtlijnen betreffende het opzetten van onderzoeksstrategieën voor waterkeringen.

Figuur 5-1: Infraroodmeting Gouda: Infraroodbeelden laten zien dat natte plekken bij hoogwater (rechts) groter zijn geworden en dat de grond aanzienlijk drassiger is geworden dan bij laagwater (links). Dit was met blote oog niet waarneembaar (bron: VOF DijkMonitoring Nederland).



5.3 Geotechnische technieken

Geotechnische technieken bestaan uit puntmetingen en worden ingezet om de ondergrond te karakteriseren en de sterkte- en stijfheidsparameters van de verschillende grondlagen te meten. Het Synthesedocument Handreiking Grondonderzoek voor Piping [S1] geeft een uiteenzetting van verschillende typen geotechnisch onderzoek. In het document is een beschrijving van de eigenschappen opgenomen, samen met de voor- en nadelen specifiek voor grondonderzoek, bedoeld voor pipinganalyses. Hierin is ook ingegaan op hoe de omvang en de afstanden van grondonderzoek bepaald kunnen worden, zodat het passend is voor het detailniveau van de pipinganalyses.

In de POV Piping zijn geen specifieke verkenningen uitgevoerd met betrekking tot algemeen geotechnisch onderzoek.

5.4 Geohydrologische technieken

Bij geohydrologische technieken wordt onderscheid gemaakt tussen momentane en langdurige metingen. Een voorbeeld van een momentane meting is de meting van de waterspanning bij de uitvoering van een sondering. Een voorbeeld van een langdurige meting is het periodiek uitlezen van een peilbuis. Onder monitoring wordt langdurig meten verstaan.

5.4.1 Monitoringstechnieken

Monitoringstechnieken kunnen ingezet worden om inzicht te verkrijgen in de grondwaterstromingen en stijghoogtes in de watervoerende lagen, voordat met beoordelings- en ontwerpactiviteiten wordt begonnen. Daarnaast kunnen monitoringstechnieken ook toegepast worden als beheermaatregel, om daarmee een eventuele versterkingsopgave verantwoord uit te stellen en als indicatie (signaalwaarde) voor het toepassen van (tijdelijke) beheermaatregelen. Het Synthesedocument 'Handreiking meetnetten grondwatermonitoring voor piping' [S2] geeft een uiteenzetting van verschillende typen monitoringstechnieken met een beschrijving van de eigenschappen en de voor- en nadelen.

Bij het toepassen van monitoringstechnieken is het van belang dat het doel van het monitoren heel helder is vastgelegd en dat men al een gevoel heeft bij de consequenties die 'het beter weten' heeft op een beoordeling of versterking. Om goede bruikbare gegevens te genereren is er over een langere periode (op zijn minst 1 hoogwaterseizoen) meetdata benodigd.

Vragen die men zichzelf moet stellen bij de afweging van het gebruik van monitoring zijn:

- Hoe is het geohydrologisch systeem gekarakteriseerd?
- Hoe wordt de stijghoogte in het watervoerende pakket beïnvloed?
- Welke invloed heeft 'het beter weten' van de stijghoogte op mijn beoordelings- of ontwerpresultaat?
- Is er voldoende tijd beschikbaar om de meetdata te kunnen inzetten in de beoordelings- en ontwerpwerkzaamheden?
- Op welke locaties moet ik (3D) meetdata verzamelen?
- Op welke diepte moet er gemeten worden om de meetdata goed te kunnen gebruiken voor de beoordelings- en ontwerpwerkzaamheden en de te gebruiken computermodellen?
- Welke gevoeligheden zitten in mijn systeem en in het model die van invloed zijn op de resultaten?

Voor meer detail over monitoring en toepassing ervan geven [S2], [V5] en [15] meer inzicht.

5.4.2 Doorlatendheidsonderzoek

Doorlatendheidstechnieken worden ingezet om de doorlatendheid van de watervoerende grondlagen te meten en te bepalen voor beoordelings- en ontwerpactiviteiten.

In [S1] zijn de beschikbare typen doorlatendheidsonderzoeken beschreven, de voor- en nadelen uiteengezet en de kosten voor een project met enkele kilometers dijk lengte in 'relatief goedkoop' of 'relatief duur', uitgedrukt.

De volgende doorlatendheidsonderzoeken/technieken zijn beschikbaar en beschreven in [S1]:

- Doorlatendheidsmeting in het laboratorium;
- Dissipatietest;
- HPT sondering;
- (A)MPT minipompproef;
- Infiltrometerproef;
- Pompproef.

Voor alle deze technieken geldt dat de resultaten uit de onderzoeken altijd geverifieerd dienen te worden met monitoringstechnieken of andere doorlatendheidstechnieken, voordat ze gebruikt worden in beoordelings- of ontwerpberoevingen.

In de verkenningen Proeftuin IJendoorn [V3], Toepassen nieuwe sondeertechniek HPT sondering [V7] en Toelichting anisotropie en gelaagdheid [38], wordt ingegaan op de doorlatendheidstechnieken die gebruikt kunnen worden in beoordeling en ontwerpen van waterkeringen, met de voor- en nadelen per situatie. In het Synthesedocument 'Handreiking meetnetten grondwatermonitoring voor piping' [S2] wordt ingegaan op doorlatendheidsbepaling door middel van een pompproef.

Verkenning 'Toepassen nieuwe in-situ doorlatendheidsmeting met HPT-sondering, de Minipompproef (MPT) en de Anisotrope minipompproef (AMPT) ' [V7]

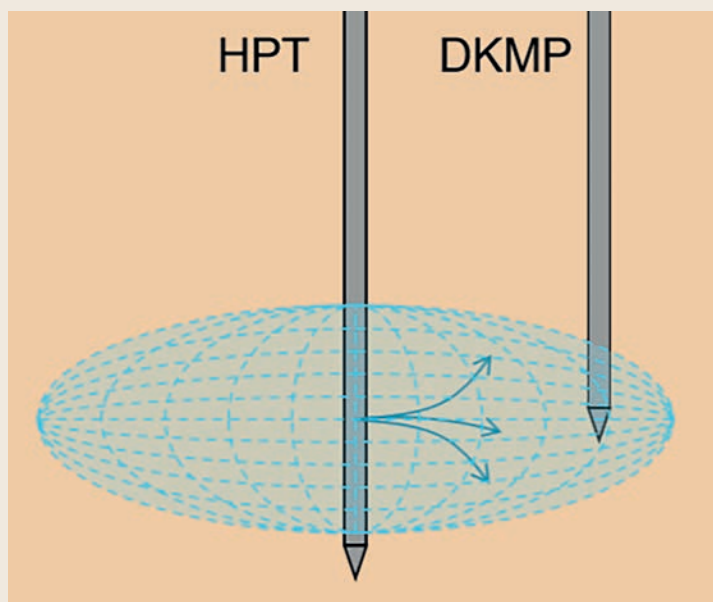
De verkenning richt zich voornamelijk op de in-situ bepaling van de doorlatendheid en doorlatendheidsverschillen van watervoerende lagen in de ondergrond door middel van de HPT-sondering, in combinatie met de (A)MPT-minipompproef. Hiermee kan om de 2 cm een meting van de doorlatendheid worden verkregen die vergelijkbaar is met een pompproefresultaat, alleen gedetailleerder (iedere zandlaag >2 cm wordt geregistreerd).

De eerste conclusie op basis van vier proeflocaties langs de Maas en de Rijn is dat de doorlatendheid goed in-situ kan worden bepaald wanneer de HPT-sondering wordt gecombineerd met de MPT-minipompproef. Dit maakt een scherper en meer doelmatige beoordeling van dijken en ontwerp van versterkingsmaatregelen mogelijk. In het onderzoek is een besparing van 50% op de berm lengte gevonden. Recentelijk zijn ook metingen verricht voor het bepalen van de anisotropie met de AMPT-minipompproef op verschillende locaties langs het Spui, Boven-Rijn en IJssel. In deze proef worden de HPT-sondering en waterspanningssondering gecombineerd. Zie figuur onder deze tekstbox.

De tweede conclusie is dat er ook in Nederland sprake is van een sterk schaaleffect in doorlatendheidsmetingen. Dit is ook internationaal bekend. Hoe groter de proefschaal, hoe hoger de doorlatendheid. Dit effect verloopt tot aan een bepaalde bovengrens in proefschaal. Voor piping zijn alleen proeven op of boven deze bovengrens betrouwbaar: dit zijn pompproeven, mini-pompproeven, peilbuismeetnetten en regionaal gekalibreerde grondwatermodellen. Kleinschalige proeven, waarvoor in het onderzoek is aangetoond dat deze voor piping onbetrouwbaar zijn, zijn laboratoriumproeven, dissipatietesten en slugtesten (of boorgatproeven). Dit geldt ook voor HPT-sonderingen die gekalibreerd worden op basis van slugtesten.

Deze methoden kunnen voor andere doeleinden dan voor piping echter wel geschikt zijn.

De derde conclusie was dat voor korrelverdelingen de doorlatendheid sterk varieert met de gekozen correlatiemethode (bv. Hazen, Terzaghi of Beijer/Den Rooijen). De bij waterkeringen veelvuldig gebruikte methode gaf een onderschatting van de formatie-doorlatendheid.



Figuur 5-2: Schematische weergave van het principe van de AMPT-minipompproef (Bron: Fugro)

Vragen die men zichzelf moet stellen bij de afweging van het gebruik van doorlatendheidsonderzoek zijn:

- Hoe is het geohydrologisch systeem gekarakteriseerd?
- Welke invloed kan de ondergrondopbouw hebben op een doorlatendheidsonderzoek?
- Is er sprake van heterogeniteit en/ of anisotropie en welke invloed heeft dit op de onderzoeksstrategie voor doorlatendheidsonderzoek?
- Hoe wordt de stijghoogte in het watervoerende pakket beïnvloed?
- Welke invloed heeft 'het beter weten' van de stijghoogte op mijn beoordelings- of ontwerpresultaat?
- Hoe wordt het onderzoeksresultaat geverifieerd en hoeveel tijd is beschikbaar voor een verificatiemethode?
- Op welke locaties in lengte- en breedterichting van de waterkering moet ik doorlatendheden bepalen?
- Op welke diepte moet er gemeten worden om de meetdata goed te kunnen gebruiken voor de beoordelings- en ontwerpwerkzaamheden en de te gebruiken computermodellen?

6. Geotechnisch schematiseren

6.1 Doel en aanpak

In een eerdere stap bij het karakteriseren van de ondergrond zijn bodemtypen gekarakteriseerd, al dan niet met gebruik van geologische en fysisch geografische gebiedskennis, maar op zijn minst op het niveau van SOS-eenheden. De verwachte kenmerken worden gekoppeld aan de aard van de afzetting.

In de stap Geotechnisch schematiseren wordt het beeld dat in de bureaustudie (zie hoofdstuk 4) globaal is neergezet, verder uitgewerkt, geverifieerd en verfijnd op basis van het uitgevoerde grond- en geofysisch onderzoek. Dit is vaak het werk van de geotechnicus. In deze stap wordt ook de schematisering gemaakt voor het bepalen van stijghoogtes bij hoogwater. Indien dit met geohydrologische modelberekeningen wordt uitgevoerd, is geohydrologische expertise vereist.

Het Geotechnisch schematiseren omvat vaak de volgende activiteiten:

- Het opstellen van geotechnische lengteprofielen⁵;
- Het maken van een vakindeling met per vak typerende en onderscheidende kenmerken. Dit betreft een verfijning van de voorlopige vakindeling (zie par. 4.5);
- Het bepalen van maatgevende dwarsprofielen voor de beschouwing van piping. Hierbij moeten ook hydraulische randvoorwaarden worden bepaald;
- Het bepalen van mogelijke ondergrond scenario's per vak⁶;

- Het schatten van de waarschijnlijkheid van de scenario's en van de relevantie van piping per geïdentificeerde bodemlaag (of per SOS-eenheid);
- Het opstellen van geotechnische dwarsprofielen;
- Het bepalen van de geotechnische en geohydrologische parameters van iedere bodemlaag die relevant kan zijn voor het pipingmechanisme;
- Het bepalen van stijghoogtes in goed doorlatende watervoerende grondlagen (meestal zand of grind) en van waterspanningen in slecht doorlatende grondlagen. In geval van tijdsafhankelijke analyses moet ook het verloop van de stijghoogtes en waterspanningen in de tijd meegenomen worden.

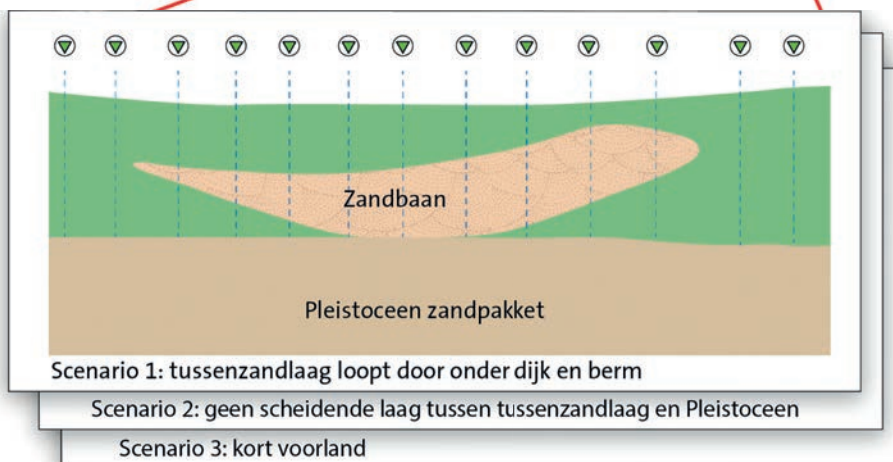
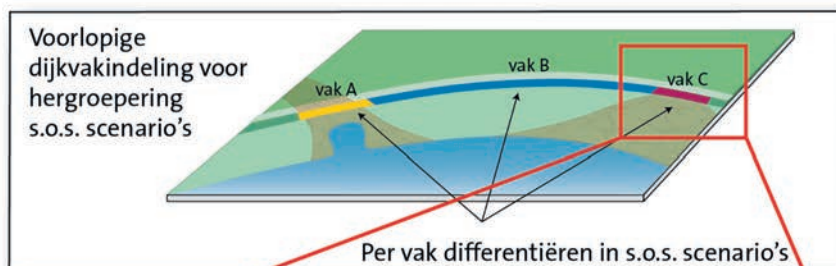
Het maximaal te behalen detailniveau bij het geotechnisch schematiseren hangt sterk samen met het detailniveau van het onderzoek op basis van historische, geologische en geohydrologische kenmerken, dat in de vorige stappen al is uitgezet.

De Geotechnische schematisering moet van een dusdanig detailniveau zijn, dat het alle informatie geeft voor het uitvoeren van een betrouwbare analyse. Deze is nodig om de veiligheid ten aanzien van piping vast te kunnen stellen. Deze berekeningen zijn bijvoorbeeld een grondwaterstromingsberekening of een extrapolatie van metingen en/of berekeningen om de weerstand tegen terugschrijdende erosie te bepalen (zoals een Sellmeijer berekening). De berekeningen worden behandeld in paragraaf 7.

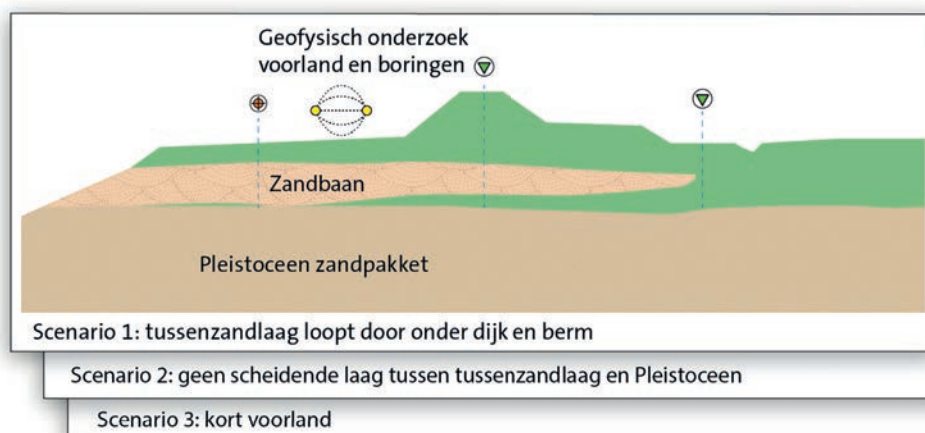
Figuur 6-1 illustreert schetsmatig de stap van 'karakteriseren' naar 'geotechnisch schematiseren'. Voor een nadere beschrijving van deze begrippen wordt verwezen naar paragraaf 4 en naar de Schematiseringshandreiking bij het WBI [33].

⁵ Voor een beoordeling kan ook met SOS en het D-Soil Model worden gewerkt in plaats van een geotechnisch lengteprofiel.

⁶ Bij het gebruik van het Ontwerp Instrumentarium [2] mag ook worden ontworpen op basis van een Basisschematisering en een bijbehorende schematiseringsfactor. Ook in dat geval dienen scenario's te worden gedefinieerd voor het vaststellen van de schematiseringsfactor.



▼ sondering



▼ sondering
 ⊕ diepe boring
 ⊕ geofysisch onderzoek

Figuur 6-1: Naar een geotechnische schematisering: van karakteriseren naar lengteprofielen en dwarsprofielen (Bron: Royal HaskoningDHV)

6.2 Lengteprofiel en vakindeling

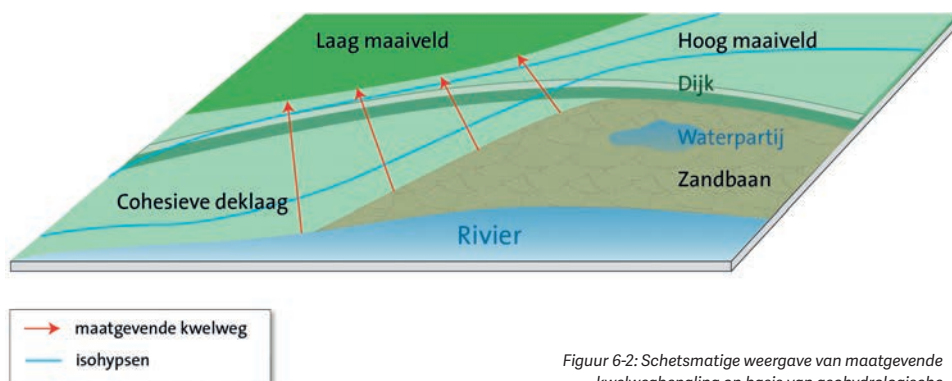
Op basis van al het beschikbare onderzoek en waarnemingen worden geotechnische lengteprofielen opgesteld. Er wordt nagegaan of de eerder geïdentificeerde in het gebied aanwezige geologische structuren en SOS-profielen en -eenheden, ook zijn aangetroffen in het onderzochte deeltraject. In het lengteprofiel worden de locaties van onderzoekspunten (of andere beschikbare informatie) aangegeven, waarmee lokaal de vereiste schematisering voor de analyse kan worden gemaakt.

Op basis van het aanvullende onderzoek zal de voorlopige vakindeling (par. 4.5) worden bijgesteld. In deze stap zal er een aanzienlijke verfijning in vakindeling kunnen worden gerealiseerd. Bij de verfijnde indeling zal het palet aan mogelijke SOS-profielen, dat in DSoil is gepresenteerd op segmentniveau, per vak verder worden uitgedund. Het verdient de aanbeveling om hierbij de Handreiking lokaal schematiseren met WTI-SOS [12] te raadplegen.

6.3 Maatgevend dwarsprofiel

Het is gebruikelijk om voor een pipinganalyse per dijkvak één of meerdere representatieve dwarsprofielen te kiezen op basis van geometrie, ondergrond en binnen- en buitenwaterstanden.

Een alternatief voor deze traditionele aanpak is de (quasi-) 3D aanpak, waarbij bijvoorbeeld gebruik wordt gemaakt van een geografisch informatiesysteem waarin kaartbladen met relevante geografische informatie over elkaar kunnen worden gelegd, zoals geometrie (AHN of DTM) en ondergrond (deklaagdikte en zandbanen). Geografische informatie zoals intredelijnen en sloten kunnen op deze wijze realistischer worden meegenomen. In feite gaat het hier om het bepalen van maatgevende kwelwegen, aan de hand van de kenmerken die voor piping bepalend zijn, zoals maaiveldniveau, poldersloten en zandbanen. Het werken volgens een quasi-3D aanpak is ook erg geschikt voor het meenemen van lokale, antropogene, afwijkingen.



Figuur 6-2: Schetsmatige weergave van maatgevende kwelwegbepaling op basis van geohydrologische systeemkenmerken (Bron: Royal HaskoningDHV)

Deze punt-, lijn- of vlakinformatie kan zo goed worden gerelateerd aan de andere informatie. Uiteindelijk moet de stap worden gemaakt naar een 2D dwarsprofiel want de rekenmodellen waarmee het proces van terugschrijdende erosie uiteindelijk wordt geanalyseerd blijven voorlopig nog 2D (paragraaf 7.7). Opgemerkt wordt dat het doorrekenen van een groot aantal dwarsprofielen in een bepaald gebied geen beperking hoeft te zijn. Ook het beoordelen van kwelwegen die niet per definitie loodrecht op de dijk lopen, is eveneens goed mogelijk op basis van een quasi-3D schematisering. In bepaalde situaties zullen dit de meest kritieke kwelwegen zijn.

6.4 Beschouwing scenario's

Zowel bij de methodiek van het WBI2017 [33] als het OI2014 [13] is het essentieel dat de onzekerheid in de ondergrond systematisch en expliciet wordt meegenomen in zowel de beoordeling van de bestaande situatie, als in het ontwerp van een verbeteringsmaatregel of nieuwe dijk. Voor een groot aantal variabelen die in de pipinganalyse worden gebruikt, is het vrijwel onmogelijk om een passende kansverdelingsfunctie op te stellen. Deze variabelen kunnen niet worden uitgedrukt in een stochast met een verwachtingswaarde en een spreiding of als rekenwaarde, terwijl de onzekerheid wel degelijk een belangrijke rol speelt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het wel of niet voorkomen van een ondiepe zandbaan onder de dijk. Het 'weg-engineeren' van deze onzekerheden door conservatieve aannamen (bijv. 'overall is een zandbaan aanwezig') heeft

een onevenredig groot effect op beoordeling of ontwerp. De onzekerheden in deze variabelen dienen daarom expliciet in de vorm van discrete variabelen te worden uitgedrukt, hier verder aangeduid met de term 'scenario's'. Per scenario wordt een inschatting gemaakt van de waarschijnlijkheid van optreden (paragraaf 6.5). In paragraaf 7.2.1 wordt verder ingegaan op de rekenkundige uitwerking van het meenemen van onzekerheden en de verschillende benaderingen die hierbij kunnen worden gevolgd, voor beoordelen en/of ontwerpen.

In de schematiseringshandreiking bij het WBI2017 [33] is een overzicht gegeven van typen variabelen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in:

- A. variabelen die als stochast met een verdelingsfunctie⁷ kunnen worden beschouwd;
- B. discrete variabelen. Bij de discrete variabelen wordt de onzekerheid beschreven in scenario's met bijbehorende inschatting van de kans van voorkomen. Bij het ontwerpen van piping maatregelen volgens het OI2014 [13] zijn twee benaderingen mogelijk: het werken met scenario's op vergelijkbare wijze als WBI of het werken met een basisschematisering en een schematiseringsfactor. Voor beide benaderingen geldt dat wordt gewerkt met scenario's en bijbehorende kans-inschatting.

Het overzicht uit het WBI geeft aan dat de volgende variabelen geen stochasten zijn, maar moeten worden beschouwd als discrete variabelen waarvan de onzekerheden alleen in scenario's kunnen worden uitgedrukt.

Dit betreffen het intredevlak/lijn en uittredevlak, het maaiveld, onderzijde cohesieve laag of bovenzijde watervoerende laag, dikte van de watervoerende laag en de waterspanningen in de watervoerende lagen. Deze variabelen hangen sterk samen met de kenmerken van ondergrond en geohydrologie. In de stap van het geotechnisch schematiseren worden deze scenario's vertaald in een set concrete dwarsprofielen met bodemscenario's (Figuur 6-1).

Voorbeelden van scenario's:

- Al dan niet in contact staan van verschillende watervoerende lagen;
- Wel of niet doorlopen van een 'schampende' zandbaan onder de volledige dijk door;
- De dikte van de deklaag;
- Opbouw en dikte van watervoerende lagen;
- Tussenzandlagen;
- Aanwezigheid van (dunne) waterafsluitende lagen.



Verkenning 'Leem & Grind' [V18]

De verkenning heeft 2 doelstellingen:

1. Invloed van (lokale) grindlagen op het piping mechanisme in kaart brengen;
2. Invloed van Maasklei/leem op het mechanisme piping in beeld brengen.

Uit de verkenning volgt dat de leemlaag op de onderzochte locaties in Noord-Limburg zandige klei is, welke bij kleine vervormingen enige cohesie bezit. De doorlatendheid ligt tussen de 0,1 en 1 m/dag. Het zand in de poriën van de grindlaag bepaalt voornamelijk de doorlatendheid van de grindlaag. De fijnste delen kunnen tijdens een hoogwater tussen de poriën uit spoelen, waardoor een 'vuile kwel' ontstaat.

De eindconclusie van de verkenning is dat er over het algemeen weinig gebundelde kennis over piping in de grindhoudende lagen beschikbaar is. Verdere kennisontwikkeling is zinvol.

6.5 Relevantie en waarschijnlijkheid

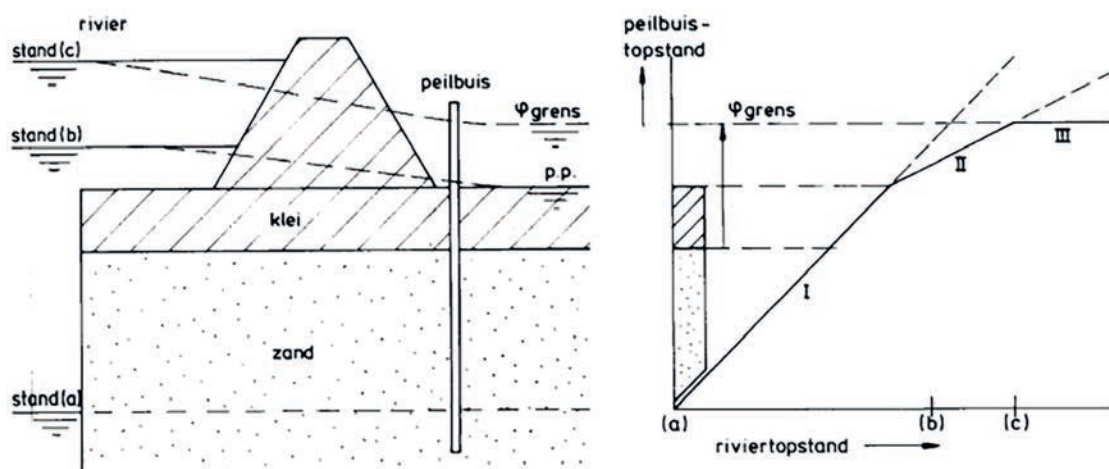
Van ieder scenario wordt een inschatting gegeven van de waarschijnlijkheid dat het scenario op het te beschouwen vak ook daadwerkelijk kan optreden. In het Technisch Rapport Grondmechanisch schematiseren [35] worden handreikingen gedaan voor het schatten van kansen op afwijkende scenario's. Bij het schatten van de waarschijnlijkheid van een scenario is ook fysische kennis omtrent pipinggevoeligheid van bepaalde afzettingen van belang. Recent is onderzoek gedaan naar twee specifieke afzettingen: de getijdenafzetting en het bodemprofiel Leem op Grind, wat in Limburg wordt aangetroffen.

Onderzoek heeft uitgewezen dat piping niet erg waarschijnlijk is in specifieke getijdenafzettingen. De memo 'Optreden van piping in getijdenafzettingen' [25] geeft de bevindingen en geeft in concreet aan welke getijdenafzettingen, uitgedrukt in SOS-eenheden, wel en welke niet pipinggevoelig zijn. De memo is ook opgenomen in een bijlage bij de Schematiseringshandleiding Piping bij het WBI [33].

De verkenning Leem & Grind [V18] is uitgevoerd omdat er het vermoeden bestond dat piping in typische Limburgse afzettingen van leem op grind, in veel gevallen niet zou kunnen optreden. De verkenning heeft uitgewezen dat dit genuanceerder ligt. De tekst box Verkenning 'Leem en Grind' geeft een samenvatting van de bevindingen.



De eindconclusie van de verkenning [V18] is dat er over het algemeen weinig gebundelde kennis over piping in de grindhoudende lagen beschikbaar is. **Verdere kennisontwikkeling is zinvol.**



Figuur 6-3: Extrapolatie uit gemeten momentane standen
(bron: Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken)

6.6 Meenemen van stijghoogte metingen in schematisering

Stijghoogtemetingen in de watervoerende laag op het voorland tijdens een hoogwaterpassage, kunnen direct informatie opleveren over de hydraulische weerstand van het voorland. In de bijlage van het Technisch rapport waterspanningen bij dijken [36] zijn analytische methoden beschreven waarmee de tijdsafhankelijke stijghoogterespons in een watervoerende laag kan worden bepaald. Ook zijn algemene handreikingen gedaan voor het extrapoleren van meetreeksen naar norm- of ontwerpcondities. Voor extrapolatie is het van belang dat er gebruik wordt gemaakt van metingen bij voldoende hoge rivierwaterstanden. Vaak heeft de grafiek 'peilbuismeting versus rivierwaterstand' een gebogen of geknikt verloop (zie Figuur 6-3).

Voorbeelden van knikpunten:

- Er wordt een situatie bereikt waarbij er geen kwelwater meer freatische kan worden geborgen in het achterland;
- Het oppervlak aan openwater neemt ineens toe doordat een uiterwaarde gaat onderlopen;
- De deklaag ter plaatse van een laaggelegen deel in het achterland barst op.

Stijghoogtemetingen in het voorland of ter plaatse van de buitenteen tijdens een hoogwater passage, zijn zeer waardevol. Wanneer dergelijke metingen beschikbaar zijn kan de invloed van hydraulische weerstand op het voorland als een bulkeigenschap worden meegenomen, waarbij zaken als de heterogene opbouw van de deklaag, intreeweestanden en lokale afwijkingen door ingravingen en sloten in het voorland, in één keer worden meegenomen. Zonder metingen is het moeilijk om met het grondwaterstromingsmodel op een realistische wijze rekening te houden met deze aspecten. Daarom wordt snel gekozen voor een sterk geïdealiseerde en conservatieve bodemopbouw met een horizontale uniforme deklaag en uniforme watervoerende lagen (zie paragraaf 7.5). In de Handreiking meetnetten grondwatermonitoring [S2] is aangegeven hoe deze gelumpte voorlandweerstand uit meetnetten met peilbuizen bij een hoogwaterpassage kan worden bepaald.

In Zeeland is het meten van de stijghoogte bij wisselende buitenwaterstanden gebruikelijk en wordt het tijdsafhankelijk effect ook expliciet meegenomen in de pipinganalyse. De verkenning getijdewateren [V15] geeft een goed beeld van deze werkwijze en geeft suggesties voor het meenemen van het tijdsafhankelijk effect in een pipinganalyse. De bevindingen hebben een breder toepassingsveld dan uitsluitend de waterkeringen in de Zeeuwse

estuaria. Vooral in gebieden met een hoogwaterkarakteristiek met een sterke korte duur component, zoals een stormopzet, levert het verrichten van tijdsafhankelijke metingen en het toepassen van de interpretatie-methodiek zoals beschreven in verkenning getijdewateren, vaak grote winst op.

In de verkenning getijdewateren is gebruik gemaakt van decompositie van korter en langer durende belastingen. Vervolgens is regressie-analyse toegepast en zijn metingen geëxtrapoleerd naar norm-condities. Naar aanleiding van de verkenning getijdewateren is de memo Regressieanalyse en reliability updating [30] opgesteld, waarin wordt ingegaan op de wiskundige spelregels bij een regressie-analyse. In de memo is een regressie-analyse uitgevoerd op de hoogste waarden uit de meetreeksen zonder decompositie in korte en lange duur belastingen. De verschillen waren voor deze specifieke case beperkt. Bij voldoende onafhankelijke hoogwatermetingen verdient deze laatste aanpak de voorkeur.

In paragraaf 4.8 is nader ingegaan op het bepalen van een onderzoeksstrategie en de noodzakelijke voorkennis van de ondergrondopbouw en het geohydrologisch systeem vooruitlopend op het opstellen van een meetplan.

Verkenning 'Tijdsafhankelijkheid van stijghoogte bij getijdewateren' [V15]

In deze verkenning is een methodiek beschreven die aangeeft hoe in een veiligheidsanalyse kan worden omgegaan met tijdsafhankelijkheid, op basis van stijghoogtemetingen bij getijdewateren. Waterschap Scheldestromen past deze methodiek al geruime tijd toe en heeft de ervaringen met monitoring en de gevolgde interpretatiemethodiek gebundeld in een document.

Het document laat zien welke stappen van belang zijn bij het extrapoleren van metingen naar ontwerp- of normcondities. De verkenning, gebaseerd op verschillende Zeeuwse situaties en toegespitst op de Kop van Ossensisse in Zeeuws-Vlaanderen, laat zien dat de lange duur amplitude van stijghoogte en buitenwaterstand (hier gelijkgesteld aan de gemiddelde waterstand over meerdere getijden) minder duidelijke correlatie vertoont en dat de korte duur amplitude van stijghoogte en buitenwater juist erg sterk gecorreleerd zijn. In de studie is het gemeten signaal opgesplitst in een lange duur en een korte duur amplitude. Vervolgens zijn meetwaarden geëxtrapoleerd naar norm-condities. In de verkenning is gebruik gemaakt van meetreeksen die zijn uitgevoerd rond hoogwateromstandigheden van de afgelopen 10 jaar. De stijghoogtemetingen zijn uitgevoerd in de dijk kern en in de zandondergrond, op meerdere plekken in het dwarsprofiel. Bij getijdewateren is een meetcampagne van twee maanden toereikend om een nauwkeurige inschatting te kunnen maken van de maximale stijghoogte in de peilbuis onder maatgevende omstandigheden.

De metingen kunnen worden gebruikt voor het beoordelen van meerdere mechanismen, zoals piping en stabiliteit. Voor piping en stabiliteit kunnen de geïnterpreteerde metingen worden toegepast bij het bepalen van de stijghoogte bij het uitredepunt, bij controle op opbarsten en heave maar ook bij het bepalen van de vervalreductie als gevolg van intredeweerstand op het voorland. De verkenning beschrijft ook een werkwijze waarbij de gemeten vervalreductie ter plaatse van het buitenbeloop (als gevolg van weerstand van in het voorland) direct kan worden meegenomen bij het beoordelen van het deelmechanisme terugschrijdende erosie volgens de Sellmeijer formule. Tenslotte kunnen geohydrologische parameters zoals weerstanden en doorlatendheden worden geverifieerd met een grondwaterstromingsmodel, op basis van de gemeten gradiënt in stijghoogte. Ook hier is decompositie van korte duur en kan lange duur amplitude toegepast omdat het lange duur effect wordt gedomineerd door andere randvoorwaarden van het geohydrologisch systeem dan de buitenwaterstand.

6.7 Parameters: heterogeniteit en anisotropie

De Schematiseringshandreiking bij het WBI [33] geeft een duidelijk overzicht van de piping-parameters. In dit overzicht is een omschrijving van de parameter aangegeven en is vermeld hoe de parameter kan worden bepaald.

De schematiseringshandreiking [33] beschrijft de standaard beoordelingswerkwijze bij een eenvoudige of gedetailleerde toetsstap, waarbij vaak gewerkt wordt met default variatiecoëfficiënten om de karakteristieke waarde van een parameter vast te stellen. Voor een toets op maat of een ontwerp van een verbetermaatregel, is vaak verdieping op basis van lokaal onderzoek gewenst. Hierin wordt nagegaan of de gekozen variatiecoëfficiënten overeenkomen met de karakteristieken van de afzetting. De intensiteit van het lokaal grondonderzoek wordt sterk bepaald door de ruimtelijke variatieschaal van de specifieke parameter. Deze is sterk afhankelijk van de geologische afzetting. Het is daarom raadzaam om tijdens het opzetten van het onderzoek een kwartairgeoloog of fysisch geograaf met

gebiedskennis te raadplegen voor een inschatting van de gebruikelijke variaties binnen de beschouwde afzetting.

In enkele verkenningen is naar deze verdieping gezocht door zeer lokaal te kijken naar heterogeniteit en gelaagdheid. De verkenningen 'Proeftuin IJzendoorn' [V3] en 'Proeftuin Mastenbroek' [V2], vooral het vergelijk van beide proeftuinen, hebben bevestigd dat de variatieschaal in grondeigenschappen een sterke relatie heeft met de geologie.

In de verkenning 'Heterogeniteit [V20] is onderzoek uitgevoerd naar de ruimtelijke variatie van de diverse geotechnische parameters, zoals doorlatendheid, korrelgrootte en deklaagdikte. De bevindingen van dit onderzoek zijn verwerkt in het Synthesedocument Grondonderzoek voor piping [S1]. Dit document brengt alle bevindingen samen tot een overzicht per parameter met aanbevelingen voor de diepgang van grondonderzoeksplannen. Ook in het doctoraal onderzoek 'The weakest link' [43] is onderzoek naar dit thema verricht.

In de verkenning 'Doorlatendheden en HPT Sondering' [V7] wordt uitgebreid ingegaan op het bepalen van doorlatendheden. Zie uitgelicht in de tekstbox over ISAC|Piping en in de tekstbox in paragraaf 5.4.2. Deze verkenning heeft uitgewezen dat de verschillen in doorlatendheid binnen een watervoerend pakket een aanzienlijk effect kunnen hebben op piping.



Verkenning 'Proeftuin IJzendoorn' [V3]

De verkenning heeft bestaan uit een zeer gedetailleerd grondonderzoek ter plaatse van een proefveld (75m bij 75 m) langs de Waalbandijk bij IJzendoorn. Deze locatie is mogelijk pipinggevoelig door de aanwezigheid van een ondiepe Holocene stroomgordelafzetting. Binnen het proefveld zijn boringen uitgevoerd in een 5m grid en is de doorlatendheid van de zandlagen bepaald met pompproeven.

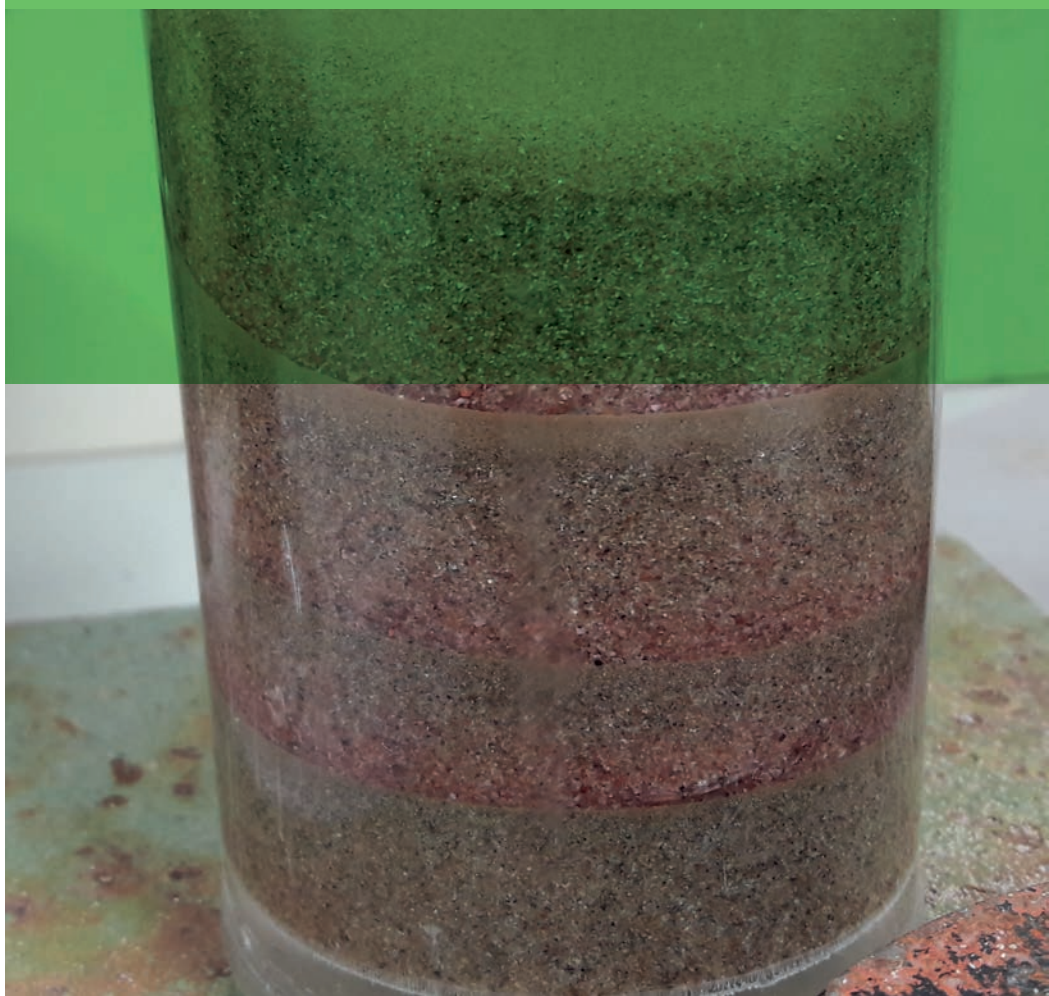
Uit het zeer lokale onderzoek bleek dat de heterogeniteit van de ondergrond veel groter was dan verwacht werd op basis van een globaler conventioneel grondonderzoek. Er is gekeken naar de variatie in zandgrofheid (d_{70}) van de top van het watervoerende pakket, de doorlatendheid (k) van de watervoerend pakket en de variatie in dikte van de deklaag.

Wanneer de sterke variatie in de uiteindelijke piping analyse wordt geïdealiseerd in een uniforme bodemlaag met ongunstige parameters,

dan heeft dit als gevolg dat de berekende weerstand tegen piping laag is. De verkenning suggereert echter dat de heterogeniteit in de zandlaag een positief effect zou moeten hebben op de weerstand tegen piping. In een interview met één van de trekkers van de verkenning werd dit beeldend uitgelegd door de heterogeniteit van de ondergrond te vergelijken met een 'dambordpatroon'.

De kwelstroom passeert achtereenvolgens vlakken met verschillende piping-eigenschappen. De eigenschap van het geheel wordt dan niet bepaald door de zwakste schakel. Wanneer de heterogeniteit echter meer 'een zebrapatroon' heeft met parallelle banen onder de dijk door, dan is wel sprake van een zwakste schakel: de baan met de slechtste eigenschappen.

De verkenning doet aanbeveling om een piping model te ontwikkelen waarmee heterogeniteit beter kan worden meegenomen.





'ISAC|Piping' binnen de verkenning 'Doorlatendheidsbepaling en HPT-sondering en MPT-minipompproef' [V7]

ISAC|Piping (ISAC staat voor 'In-Situ Aquifer Characterization'). Het beschrijft het hele proces vanaf doorlatendheidsmeting met HPT-sonderingen en minipomproeven, via 3D ondergrondmodellering naar een grondwaterstromingsberekening op een geselecteerde doorsnede, tot aan de uiteindelijke Sellmeijer-pipinganalyse met aangepaste doorlatendheidsparameter. Deze methode maakt het mogelijk om zaken als heterogeniteit en anisotrope van het watervoerend pakket mee te nemen in de pipinganalyse. Voor de pipinganalyse wordt uiteindelijk gebruik gemaakt van de rekenregel van Sellmeijer. De doorlatendheid die in de Sellmeijer formule wordt gebruikt is daarbij bepaald door de potentiaalgradiënt bij het uitstroompunt in een éénlaagsmodel (basis van Sellmeijer formule), te vergelijken met de uitstroomgradiënt bij het complexere en meer realistische ondergrondmodel. In de verkenning is voor deze vergelijking van uitstroomgradiënten het grondwaterstromingsmodel PlaxFlow (PLAXIS 2D) gebruikt. Deze aanpak is gebaseerd op de aanname dat de potentiaalgradiënten in het watervoerend pakket ter plaatse van het uitstroompunt, dominant zijn voor het mechanisme van interne erosie. Hierbij wordt verwezen naar het 'Technisch rapport voor de controle op het mechanisme piping bij rivierdijken' [38]. Uitkomsten van ISAC|Piping zijn recentelijk

vergeleken met een berekening met het grondwaterstromingsmodel D-Geo Flow en kwamen goed overeen.

De methode ISAC|Piping is toegepast binnen de verkenning 'Doorlatendheid en HPT Sondering'. Voor een locatie langs de Bergsche Maas, in het beheersgebied van Waterschap Aa en Maas, zijn verschillende methoden van doorlatendheidsbepaling met elkaar vergeleken:

- Doorlatendheid van het gehele watervoerende pakket op basis van regionale parameters (REGIS);
- Doorlatendheid van het gehele watervoerende pakket via correlatie met korrelverdelingen (Den Rooijen);
- Doorlatendheid van het gehele watervoerende pakket via peilbuismetingen bij hoogwater en eenvoudig model;
- Doorlatendheid per laag binnen het watervoerende pakket met de HPT-sondering en de MPT (minipompproef).

Het verschil in berekende 'bulk-doorlatendheid' (doorlatendheid van het gehele watervoerende pakket) is significant: ruim factor 6. In de verkenning wordt geconcludeerd dat de berekende doorlatendheid afhankelijk is van de schaal van de proef: des te kleiner het betrokken volume bij de proef, des te lager de berekende doorlatendheid.

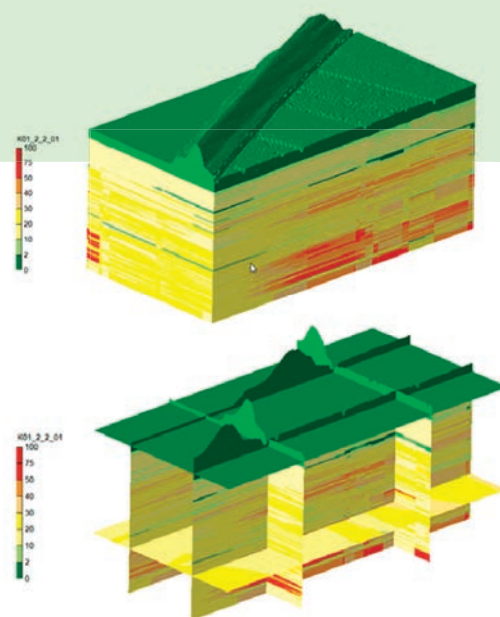
In de verkenning wordt geconcludeerd dat het meenemen van gelaagdheid in de pipinganalyse, zoals bij de ISAC|Piping methode waarbij de verschillende doorlatendheden binnen het watervoerende pakket worden gemeten met de HPT-sondering en de MPT proef, het best overeenkomen met de schaal waarop het pipingmechanisme optreedt. Voor de beschouwde situatie geeft ISAC|Piping ten opzichte van een conventionele Sellmeijer-berekening met één laag:

- een reductie in benodigde kwelweglengte wanneer de doorlatendheid in Sellmeijer is bepaald met regionale doorlatendheidsparameters (REGIS);
- een grotere benodigde kwelweglengte bij doorlatendheidsbepaling via correlatie met korrelverdelingen (zoals Den Rooijen).
- Bovenstaande bevindingen resulteren in een aanbeveling om terughoudend te zijn met het bepalen van de doorlatendheid via correlatie met korrelverdelingsdiagrammen, zoals voorheen gebruikelijk was.

De ISAC|Piping methode is zowel binnen de pov Piping als binnen enkele projecten toegepast maar moet nog op meerdere locaties toegepast gaan worden om de meerwaarde van de methode beter te kunnen vaststellen.

In geval van sterke gelaagdheid moet nagegaan worden of het zinvol is om de gelaagdheid en doorlatendheid-anisotropie (verschil in horizontale en verticale doorlatendheid) mee te nemen in een pipinganalyse. Dit bepaalt ook de keuze van het rekenmodel (paragraaf 7.7). Bij het in rekening brengen van heterogeniteit en anisotropie is de schaal van belang. Het document 'Toelichting anisotropie en gelaagdheid' [38] biedt handvatten voor het meenemen van deze effecten in een schematisering voor piping.

Figuur 6-4:
3D ondergrondmodel met ruimtelijke spreiding van de doorlatendheid (Fugro)





7. Rekenen

7.1 Deelmechanismen

Het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [22] geeft een uitvoerige beschrijving van de fenomenen die ten grondslag liggen aan het faalmechanisme piping en de rekenmodellen die in Nederland worden gebruikt voor de pipinganalyse. Ten behoeve van de leesbaarheid van dit hoofdstuk wordt hieronder kort ingegaan op de belangrijkste criteria die worden gehanteerd in de pipinganalyse.

In [22] is de volgende definitie opgenomen van het faalmechanisme piping: Piping (ook onderloopsheid genoemd) is gedefinieerd als het ontstaan van holle ruimten onder een waterkering (dijk, dam of kunstwerk), ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd. Onder de noemer piping vallen internationaal verschillende vormen van interne erosie.

Deze hebben alle gemeen dat erosie door grondwaterstroming wordt veroorzaakt waardoor één of meer kanalen in het grondlichaam kunnen ontstaan. De kanalen kunnen uitgroeien en uiteindelijk een kortsluiting vormen tussen de buitenzijde van de waterkering en het maaiveld of waterbodembodem aan de binnenzijde. Zodra er kortsluiting ontstaat, zal erosie van grond versneld plaatsvinden. In het geval van onderloopsheid (erosie van de ondergrond) leidt dit tot het verzakken van de waterkering en kan uiteindelijk tot een doorbraak leiden.

In de Nederlandse praktijk wordt ervan uitgegaan dat er bij het falen als gevolg van piping drie fenomenen achtereenvolgens optreden:

1. Er moet sprake zijn van geconcentreerde wateruitreding naar de oppervlakte. In de meeste gevallen is dit een wel die ontstaat door opbarsten van de deklaag. Dit wordt vaak kortweg aangeduid met de term 'opbarsten'.
2. Er moet sprake zijn van een dusdanige opwaartse grondwaterstromingsgradiënt dat zand vanuit de watervoerende laag naar het maaiveld kan worden getransporteerd. Dit fenomeen wordt ook wel 'heave' genoemd.
3. Er moet een dusdanig horizontaal verval over de waterkering staan dat er een doorgaande pipe kan ontstaan. Dit fenomeen is voor Nederlandse gronden te beschrijven als 'terugschrijdende erosie'.

De pipinganalyse richt zich op de drie afzonderlijke fenomenen of deelmechanismen: opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Falen als gevolg van piping kan worden uitgesloten wanneer één van deze deelmechanismen niet kan optreden. De kans op piping wordt daarom gedomineerd door het deelmechanisme met de laagste faalkans. De veiligheidsfilosofie en daartoe voortvloeiende toelaatbare faalkans en partiële factoren zijn beschreven in de Beoordelings- en Ontwerp Instrumentaria. Ten tijde van het schrij-

ven van deze publicatie zijn dat nog het WBI 2017 [29] en het OI 2014 [13]. Op den duur zullen deze instrumentaria samengaan tot het BOI. Binnen de POV Piping is er veel ervaring opgedaan met het rekenen aan piping en het meenemen van inzichten uit de verkenningen, zoals:

- Het meenemen van geohydrologische weerstand van de deklaag op het voorland;
- Het meenemen van doorlatendheidsanisotropie en meerlaagsheid van het watervoerendpakket;
- Het rekenen met D-Geo Flow.

Er zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd op dijktrajecten langs de Waal en IJssel binnen het beheersgebied van Waterschap Rijn en IJssel, Waterschap Drentse en Overijsselse Delta en Waterschap Rivierenland. In deze gebieden blijkt het fenomeen terugschrijdende erosie bepalend voor de kans op piping vanwege de relatief dunne deklaag in deze gebieden. Bij toenemende deklaagdikte zal de kans op opbarsten afnemen en zou dit deelmechanisme maatgevend kunnen worden. Het deelmechanisme heave is bij gronddijken zelden maatgevend.

7.2 Aanpak en detailniveau van rekenen

Het rekenen aan piping betreft zowel het rekenen aan de deelmechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie, als geohydrologische berekeningen. In het verleden werd de pipinganalyse vaak enkel uitgevoerd door de geotechnisch adviseur of de waterkeringsadviseur. Het toepassen van de POV Piping verkenningen rond geohydrologische schematisering hebben dit veranderd. Geohydrologische kennis is cruciaal gebleken bij het bepalen van parameters zoals dikte en doorlatendheid van de belangrijkste watervoerende zandlaag, de effectieve voorlandweerstand of een naar norm-omstandigheden geëxtrapoleerde stijghoogte ter plaatse van de buitenteen van de dijk bij getijdewateren. De link tussen de metingen en deze parameters is beschreven in de handreiking meetnetten en grondwatermonitoring bij piping [S2].

Een geotechnisch adviseur of waterkeringsadviseur zal voor aanvang van berekeningen het volgende nagaan:

- Wat is een passend detailniveau, rekening houdend informatiedichtheid en heterogeniteit van de ondergrond en het voorland?
- Hoe wordt omgegaan met onzekerheden? Het gaat hier om het inschatten van mogelijke afwijkende ondergrondscenario's.
- Hoe wordt de geohydroloog betrokken in de pipinganalyse? De betrokkenheid van de geohydroloog is sterk afhankelijk van de aspecten die in de pipinganalyse worden meegenomen worden en de mate van informatie die er vanuit meetnetten beschikbaar is.
- Welke aspecten uit de schematisering moeten worden meegenomen in het model, bijvoorbeeld:
 - (gelumpte) voorlandweerstand;
 - meerlagenmodel;
 - anisotropie van de doorlatendheid;
 - regionale grondwaterstroming in plaats van schematiseren op doorsnede niveau;
 - tijdsafhankelijkheid (getijdewateren en wellicht benedenrivierengebied).

Dit hoofdstuk gaat in op al deze aspecten en sluit af met een overzicht van beschikbare rekenmodellen voor een pipinganalyse en de mogelijkheden en beperkingen per model.

7.2.1 Omgaan met onzekerheden

Voor het beoordelen van de veiligheid op piping geeft de Schematiseringshandreiking Piping WBI2017 [33] aan hoe moet worden omgegaan met onzekerheden. Onzekerheden in grondeigenschappen worden meegenomen door te werken met veilige karakteristieke waarden en onzekerheden in de schematisering van waterspanningen en bodemopbouw. Deze worden verdisconteerd via scenario's (zie paragraaf 6.4). Bij het WBI wordt per scenario gekeken wat de kans is op zowel terugschrijdende erosie, opbarsten en heave. Daarna worden de kansen per scenario gecombineerd met de scenario-kansen tot één faalkans. Onzekerheden die gerelateerd zijn aan menselijk handelen, wanneer beheersmaatregelen deel uit maken van het maatregelenpakket, of onzekerheden die te maken hebben met het functioneren van pipingmaatregelen op langere termijn (zoals drainage- en filteroplossingen), kunnen worden afgedekt door adequate beheer- en onderhoudsmaatregelen.

Monitoring kan onzekerheden verkleinen of wegnemen. Een maatregel met permanente monitoring en veel aandacht voor beheer en onderhoud, zoals een drainageconstructie, kan op die manier betrouwbaarder worden dan een maatregel waarbij de schematisering en modellering niet door monitoring worden geverifieerd. Het is van belang om al in het ontwerp rekening te houden met de B&O aspecten.

Voor het ontwerpen van pipingmaatregelen kan het Ontwerpinstrumentarium OI2014 [13] worden toegepast. Voor het omgaan met onzekerheden in discrete stochasten geeft het OI2014 [13] twee mogelijkheden: de werkwijze waarbij faalkans van de scenario's afzonderlijk wordt berekend (analoog aan WBI-methode); of de werkwijze waarbij het ontwerp wordt bepaald op basis van een basisschematisering met een schematiseringsfactor. Bij deze laatste werkwijze wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij het effect van discrete afwijkingen (scenario's) op de basisschematisering wordt onderzocht. Op basis van de uitkomsten en een inschatting van de waarschijnlijkheid van scenario's, wordt de schematiseringsfactor bepaald. Voor de bepaling van de schematiseringfactor wordt verwezen naar rekenblokkjes die zijn te downloaden vanaf de site van de Helpdesk Water.

Bij geavanceerde rekentechnieken en bij het toepassen van verkenningen worden soms nieuwe parameters geïntroduceerd, zoals doorlatendheidsanisotropie of gemeten intredeweerstand in het voorland. Het is van belang dat afwijkingen en onzekerheden in parameters volgens hetzelfde raamwerk kunnen worden uitgedrukt in scenario's. Ten aanzien van het ontwerpen van versterkingstechnieken is het van belang dat ook het disfunctioneren van onderdelen van een versterkingstechniek en disfunctioneren van mensen worden meegenomen. Hiervoor kan een vergelijkbare methodiek worden gevolgd, maar er is ook een aanpak op basis van conditionele faalkansen mogelijk.

7.3 Rekenen met voorlandweerstand

De pov Piping benadrukt dat het zeer zinvol is om meetnetten met peilbuizen te plaatsen waarmee het effect van een hoogwaterpassage in het rivierengebied of een stormopzet bij getijdewateren of rond IJsselmeer, kan worden gemeten. Deze metingen kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de demping van de stijghoogte in de ondergrond tijdens hoogwater. Deze demping kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door voorlandweerstand in uiterwaarden of door het effect van berging bij kortdurend hoogwater op getijdewateren.

Het interpreteren van metingen en het opzetten van modellen om de meetwaarden te verklaren en te extrapoleren naar norm-omstandigheden, vereist inzicht in het vakgebied van de geohydrologie. In de handreiking meetnetten grondwatermonitoring is de link tussen metingen en parameters voor piping beschreven [S2].

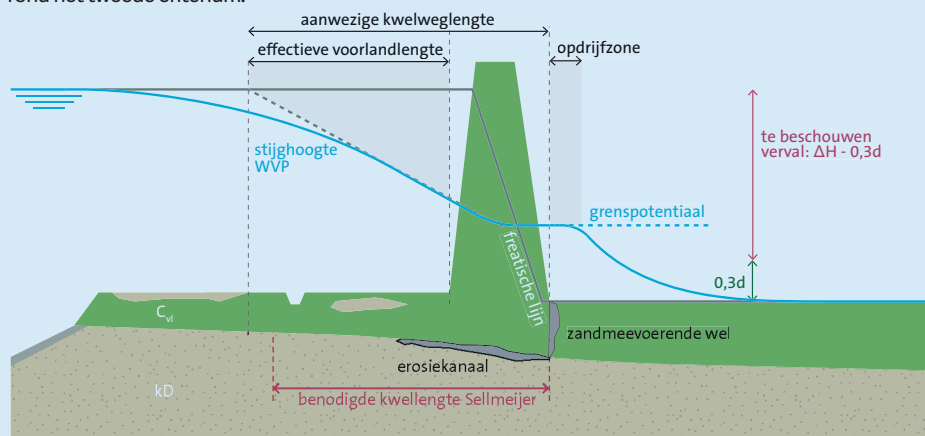
Uit de gevoeligheidsanalyses die binnen de pov Piping en de pov Voorlanden zijn uitgevoerd, blijkt dat het goed mogelijk is om meer geohydrologische weerstand aan de deklaag toe te kennen dan in het verleden gebruikelijk was (zie paragraaf 6.6). Wanneer deze voorland weerstand in rekening mag worden gebracht leidt dit tot een aanzienlijke afname van het verhang, dat kan worden vertaald in een toename van de aanwezige kwelweglengte en daarmee een grotere weerstand tegen het deelmechanisme terugschrijdende erosie. Bij het meenemen van een aanzienlijke kwelweglengte in het voorland is het wel mogelijk dat erosiekanaalen tot onder het voorland reiken. Dit kan pipingrisico's introduceren. Daarom zijn er twee criteria van toepassing op de analyse van het fenomeen terugschrijdende erosie (zie uitgelicht).

Twee criteria bij analyse van fenomeen terugschrijdende erosie

Voor het fenomeen terugschrijdende erosie gelden twee criteria:

1. Het optredende verval dient kleiner te zijn dan het kritieke verval. Het kritieke verval wordt in Nederland met de rekenregel van Sellmeijer berekend. Deze rekenregel staat het ontwikkelen van erosiekanaalen toe mits er een evenwichtssituatie kan worden gevonden tussen de stuwingskracht op de korrels in de pipe en de weerstand van deze korrels tegen zandtransport.
2. De erosiekanaalen mogen niet terugschrijden tot onder de deklaag op het voorland. Wanneer er wel een erosiekanaal onder de deklaag in het voorland aanwezig zou zijn, dan zou dit kanaal via de deklaag van bovenaf gevoed kunnen worden en zou er mogelijk zelfs kortsluiting kunnen ontstaan. De Sellmeijer formule gaat uit van een pipe onder een volledig dichte plaat en houdt dus geen rekening met voeding van bovenaf. Het WBI 2017 [29] en het OI 2014 [13] en de schematiseringshandreiking piping bij het WBI2017 [33] gaan er daarom veiligheidshalve vanuit dat pipegroei uitsluitend onder de dijkzate is toegestaan en dus niet onder de deklaag in het voorland mag optreden. Ook wordt ervan uit gegaan dat de pipegroei tot evenwicht komt op een afstand van minder dan de helft van de volgens Sellmeijer benodigde kwelweglengte. Opgemerkt moet worden dat dit criterium in het WBI en OI enigszins onderbelicht is gebleven maar dat dit criterium in de praktijk wel degelijk bepalend kan zijn voor de kans op piping. De pov Piping heeft een aanbeveling gedaan om dit criterium nader uit te werken en in te bedden in de veiligheidsfilosofie voor piping.

Onderstaande figuur illustreert dat bij een grote effectieve voorlandlengte het criterium 2 maatgevend kan worden: er is voldoende kwelweglengte aanwezig om verval te kunnen keren volgens de Sellmeijer formule, maar bij het maatgevende verval groeit de pipe door tot onder het voorland, uitgaande van de vuistregel dat pipegroei gelijk aan de helft van de benodigde kwelweglengte. Momenteel vindt bij dijkversterking Wolferen-Sprok (Waterschap Rivierenland) nader onderzoek plaats naar optimalisaties rond het tweede criterium.



Figuur 7-1: Bij relatief grote aanwezige kwelweglengte kan pipegroei-criterium 2 maatgevend worden (Bron: Royal HaskoningDHV)

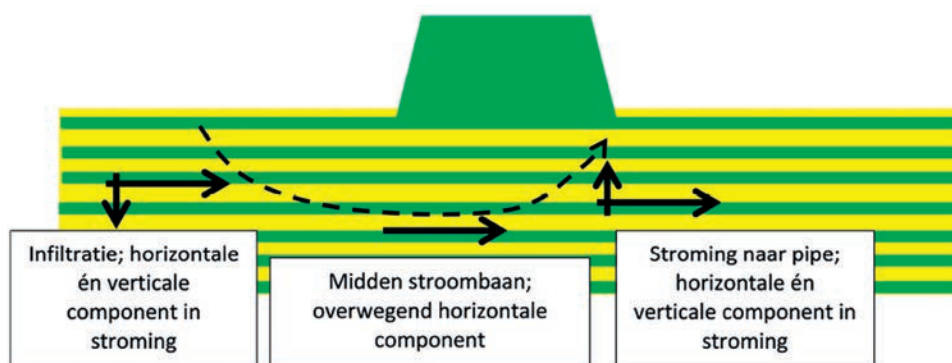
Juist vanwege de complexiteit van geohydrologische modellen is een samenwerking tussen de geotechnicus of waterkeringsadviseur en de geohydroloog essentieel om tot een pragmatische aanpak te komen. Tijdsverlies door modelberekeningen met een kleine potentiële opbrengst voor de uiteindelijke pipinganalyse moet voorkomen worden. Ook is afstemming met de beheerder van waterkering en voorland nodig, voor het thema rond beheer van voorlanden en zeggenschap. De huidige tendens is dat voorlandweerstand ook buiten de keurgrenzen mag worden onderzocht. De publicaties van de pov Voorlanden geven een breed overzicht van alle aspecten die rond voorlanden spelen, zie [17] en povvoorlanden.nl.

7.4 Rekenen met anisotropie en meerlaagse aquifers

De meeste niet analytische grondwaterstromingsmodellen faciliteren het gebruik van doorlatendheidsanisotropie. Op grotere schaal kan anisotropie worden meegenomen door het aanbrengen van meerdere lagen. Ook kunnen aquifers worden opgebouwd uit lagen van verschillende doorlatendheid. Hierdoor is het niet meer nodig om een equivalente doorlatendheid te bepalen van een heel pakket. Vooral bij sterke doorlatendheidscontrasten (zoals bij zand op grind) wordt het rekenen met één equivalente doorlatendheid van een heel pakket onnauwkeurig en zou met een meerlagenmodel moeten worden gecontroleerd of deze vereenvoudiging nog valide is.

Het document 'Anisotropie en gelaagdheid' [38] geeft richting voor het meenemen van anisotropie in grondwaterstromingsberekeningen en piping analyses. Er wordt een korte beschrijving gegeven van verschillende schaalniveaus van anisotropie en gelaagdheid (micro-, meso- en macroschaal) en de relatie met de geomorfologische karakterisering. Ook wordt hierin een beschrijving gegeven van het effect van anisotropie op de uitkomsten van de pipinganalyse en op het ontwerp van versterkingsmaatregelen.

Binnen de verkenning 'Doorlatendheid en HPT-sondering' [V7] is een vergelijking gemaakt tussen een pipinganalyse op basis van een eenlaagsmodel met een equivalente doorlatendheid en een pipinganalyse met de ISAC|Piping methode (zie uitgelicht in paragraaf 6.7). De verschillen kunnen aanzienlijk zijn en het is daarom van groot belang om stil te staan bij de fout die gemaakt kan worden bij een schematisering tot één laag.



Figuur 7-2: Effect van anisotropie op piping (bron: 'Toelichting Anisotropie en gelaagdheid', Berbee & van Goor, Fugro)

7.5 Regionale modellen

In bepaalde gevallen wordt de geohydrologische situatie sterk bepaald door grote ruimtelijke variaties in randvoorwaarden en andere geohydrologische systeemkenmerken. Deze situaties zijn geïdentificeerd bij de activiteit 'karakteriseren van het geohydrologisch systeem' (par. 4.4). In dit geval geeft een analyse in een doorsnede zonder verder uitzoemen naar het systeem rond de dijk, geen realistisch beeld van de werkelijkheid. Denk aan situaties waarbij een polder als een eiland tussen grote rivieren ligt of waar hoge gronden effect hebben op de stijghoogtes bij de dijk. In dergelijke gevallen kan overwogen worden om regionale quasi-3D modellen te gebruiken voor het bepalen van de stijghoogte bij hoogwater.

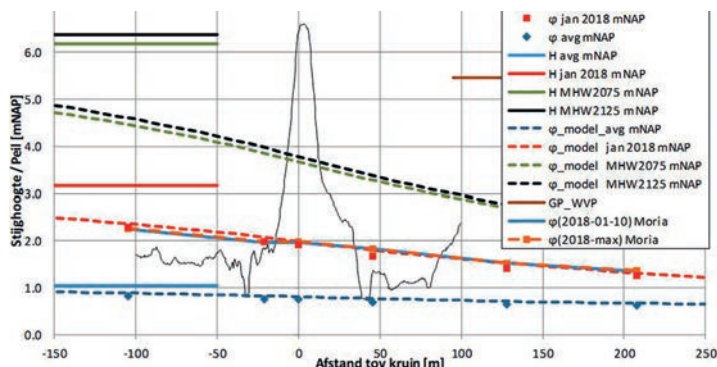
Enkele waterschappen, zoals Waterschap Aa en Maas en Waterschap Rivierenland, hebben een start gemaakt met het gebruik van regionale geohydrologische modellen in de piping-analyse. Een voorbeeld is het project Meanderende Maas waarbij de kans op opbarsten is bepaald op basis van berekende stijghoogtes bij opgetreden hoogwaterstanden. De resultaten sloten goed aan bij de waarnemingen.

Een stap verder is het bepalen van stijghoogtes bij norm-condities. Hierbij is het van groot belang dat men zich realiseert wat het normale toepassingsgebied is van het te gebruiken model. In de meeste gevallen worden regionale modellen gebruikt voor de analyse van jaarlijks voorkomende situaties. De range aan uitkomsten varieert hierbij tussen de extremen Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG) en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG), waarbij het gemiddelde van 3-jaarlijkse piekwaterstanden wordt gemiddeld over een meetbereik van 8 jaar. In deze geohydrologische analyse wordt naast de waterstanden op open water, ook de neerslag en evaporatie beschouwd. Wanneer regionale geohydrologische modellen worden gebruikt voor een waterveiligheidsbeschouwing van een waterkering dan is het van belang dat de gebruiker zich goed bewust is van de verschillen met het gangbare toepassingsgebied.

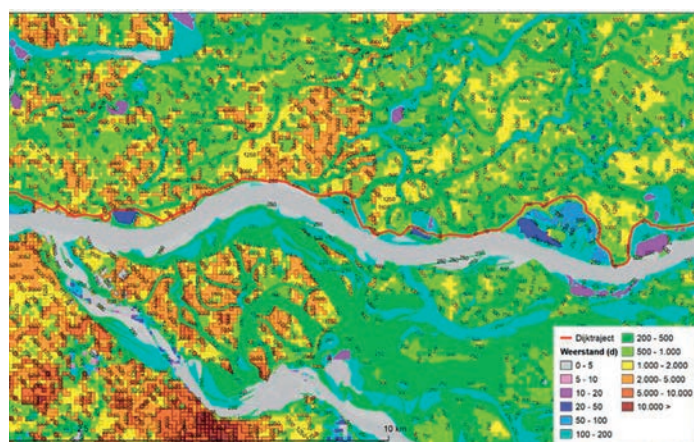
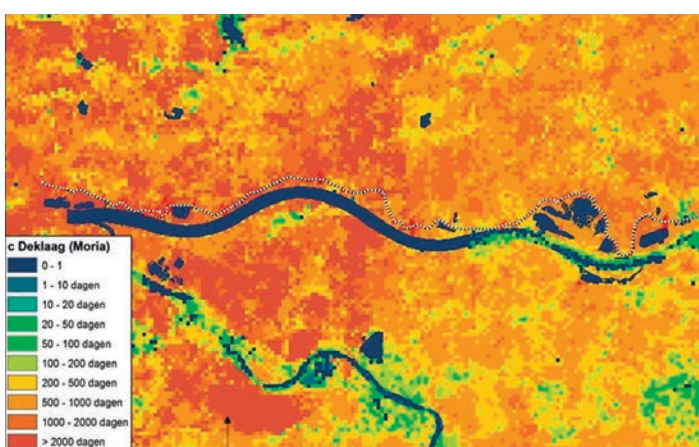
Hieronder drie belangrijke verschillen tussen een geohydrologisch model dat wordt gebruikt voor een veiligheidsbeschouwing en het gebruikelijke toepassingsgebied van regionale geohydrologische modellen:

1. **Tijdshorizon van extreme belastingen:** bij een veiligheidsbeschouwing wordt uitgegaan van rivierwaterstanden bij norm- of ontwerpcondities en niet van jaarlijkse piekwaterstanden. Hierdoor kunnen andere effecten bepalend worden en neemt de onzekerheid in voorspelling toe. Enkele concrete verschillen:
 - Onder norm- en ontwerpcondities kan het effect van opbarsten (aftoppen door bereiken van grenspotentiaal) een belangrijke rol gaan spelen terwijl dit bij de jaarlijkse piekwaterstanden veel minder het geval is. Opbarsten wordt niet meegenomen in de gebruikelijke regionale modellen;
 - De resultaten van een analyse bij norm- of ontwerpcondities kunnen niet worden gekalibreerd met metingen omdat deze zeer extreme situaties niet in het meetbereik zullen voorkomen. In het gebruikelijke toepassingsgebied van regionale modellen kan wel worden gekalibreerd omdat de beschouwde variaties veelal ook binnen het meetbereik liggen. Het meten bij een ondergelopen voorland is in veel gevallen een voorwaarde voor het uitvoeren van een juiste kalibratie van het regionale model. In Figuur 7-3 zijn gemeten waarden vergeleken met uitkomsten van het gekalibreerde model;
 - In een veiligheidsbeschouwing dient rekening te worden gehouden met eventuele toekomstige ontwikkelingen die kunnen optreden buiten het beheersgebied van de waterkeringsbeheerder. In sommige gevallen zal hier bij het bepalen van de systeemrandvoorwaarden rekening mee moeten worden gehouden. Denk aan ontwikkelingen in uiterwaarden.

2. **Schaal effect:** een veiligheidsanalyse richt zich op de zwakste schakel in een dijktraject en niet op een gebiedsgemiddelde. Enkele concrete verschillen:
 - Zandige geulen in de deklaag zijn belangrijk in een veiligheidsbeschouwing. In een gebruikelijk regionaal model zijn uitsluitend de grotere zandbanen verwerkt (zie linker plaatje Figuur 7-4). Gebruikelijke regionale modellen gaan uit van op het Pleistoceen gefundeerde zandbanen. Tussenzandlagen die gescheiden zijn van het Pleistocene pakket worden in gebruikelijke modellen dus niet meegenomen. Ook kleine zandige geulen die geïsoleerd zijn van het Pleistocene pakket worden vaak niet meegenomen. Juist dergelijke lagen kunnen een sterke respons geven op buitenwater. Uit het monitoren van peilbuizen in meetnetten langs de dijk blijkt vaak ook dat het meenemen van zandige geulen essentieel is voor het kalibratie van het regionale grondwaterstromingsmodel;
 - Lokale onderbrekingen in het voorland met aangepaste intreeweestand (zoals zandwinputten) worden vaak niet expliciet meegenomen in de gebruikelijke regionale modellen. In praktijk blijkt dat de gemeten lekfactor in voorland vaak kleiner is dan de lekfactor die met een gebruikelijk regionaal model wordt voorspeld;
 - Een veiligheidsanalyse richt zich op de situatie in, onder en direct rond de dijk. Gebruikelijke regionale modellen hebben een relatief grof grid (bijv. 25m). Dit grid is te grof om lokale gradiënten in stijghoogtes te analyseren rond de dijk.
3. **Veiligheidsbenadering.** Bij het gebruik en opstellen van een regionaal grondwaterstromingsmodel ligt de focus op het bepalen van gemiddelden van bijvoorbeeld kwelstromen en grondwaterstanden. Daarnaast worden ook extremere gebeurtenissen berekend, bijvoorbeeld voor de dimensionering van afvoer- en opvangcapaciteiten. Het gaat daarbij om



Figuur 7-3: Gemeten stijghoogte bij hoogwater (rode punten) en berekende stijghoogte (onderbroken rode lijn). De groene onderbroken lijnen presenteren de stijghoogte bij ontwerpcondities 2075 en 2125 (Bron: Ron Stroet, Royal HaskoningDHV)



Figuur 7-4: Links: ondergrondmodel weerstand deklag MORIA zonder kalibratie o.b.v. meetnetten langs dijk Rechts: ondergrondmodel weerstand deklag MORIA na kalibratie meetnetten langs dijk (Bron: Ron Stroet, Royal HaskoningDHV).

wateroverlast. Berekeningen voor primaire waterkeringen betreffen de veiligheid en hebben te maken met een heel andere betrouwbaarheidseis. Dit verschil moet bij het schematiseren en gebruik van een regionaal grondwaterstromingsmodel niet worden vergeten. Het kan worden verdisconteerd in een veiligere schematisering, maar dat kan ongewenste inhoudelijk bijeffecten hebben. Een andere mogelijkheid is het toepassen van veiligheidsfactoren op de uitkomsten, zoals gebruikelijk is.

De volgende verkenningen hebben sterke raakvlakken met het rekenen in meerdere dimensies:

- verkenning 'Intredeweerstand' [V1];
- verkenning 'Regionale kwelstroom – case Grebbedijk' [V4].

Verkenning 'Intredeweerstand' [V1]

In deze verkenning is onderzoek gedaan naar de invloed van dunne kleilagen in voorlanden op het grondwaterstromingspatroon in watervoerende lagen onder de dijk en daarmee op de kans op piping. Het doel was om een praktische methode af te leiden voor het in rekening brengen van deze voorlanden bij grondwaterstromingsberekeningen.

Het onderzoek heeft bestaan uit:

- het plaatsen van een dicht meetnet van peilbuizen op drie locaties om de stijghoogte te meten;
- lokale bepaling van de doorlatendheid van zandlagen onder de dijk (watervoerend pakket) met MPT-minipompproeven en HPT-sonderingen;
- interpretatie van de onderzoeksresultaten.

Het onderzoek heeft uitgewezen dat:

- de doorlatendheid van het totale watervoerend pakket hoog is, maar past binnen de bandbreedte van de verwachtingen;
- een gebruikelijk regionaal 3D grondwatermodel ongeschikt is om een pipingvraagstuk met hydrologische berekeningen te analyseren vanwege de grootte van het rooster (gridcel = 25 m x 25 m).

Een aanzienlijke verbetering in het voorspellen van intredeweerstand in het voorland is mogelijk op basis van lokale drie dimensionale (3D) grondwatermodellen en lange meetreeksen (± 10 jaar) met één of meerdere hoogwaterpassage.

7.6 Tijdsafhankelijk rekenen

In het Technisch rapport waterspanningen bij dijken [36] is een analytische formule gepresenteerd waarmee de respons van de stijghoogte bij een cyclisch buitenwaterstandsverloop kan worden bepaald voor een geïdealiseerde bodemopbouw. Er zijn verschillende numerieke modellen waarmee tijdsafhankelijk kan worden gerekend voor complexere ondergronden (zie Tabel 7-1). In numerieke grondwaterstromingsmodellen worden zaken als elastische en freatische berging meegenomen en modelranden kunnen op verschillende wijzen worden gedefinieerd. Het beginsel van superpositie kan worden toegepast bij het bepalen van de stijghoogte voor norm- of ontwerpcondities. Hierbij kan de stijghoogteverhoging ten opzichte van normale omstandigheden worden bepaald. Voordeel is dat stijghoogtes onder normale omstandigheden goed uit metingen kunnen worden bepaald. Er bestaat momenteel nog geen rekenmodel waarbij ook een tijdsafhankelijke beschrijving van de ontwikkeling van het erosieproces zelf is opgenomen.

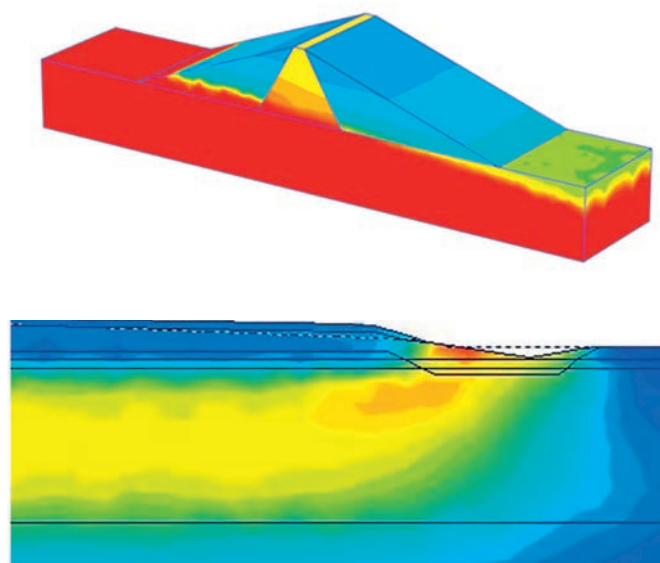
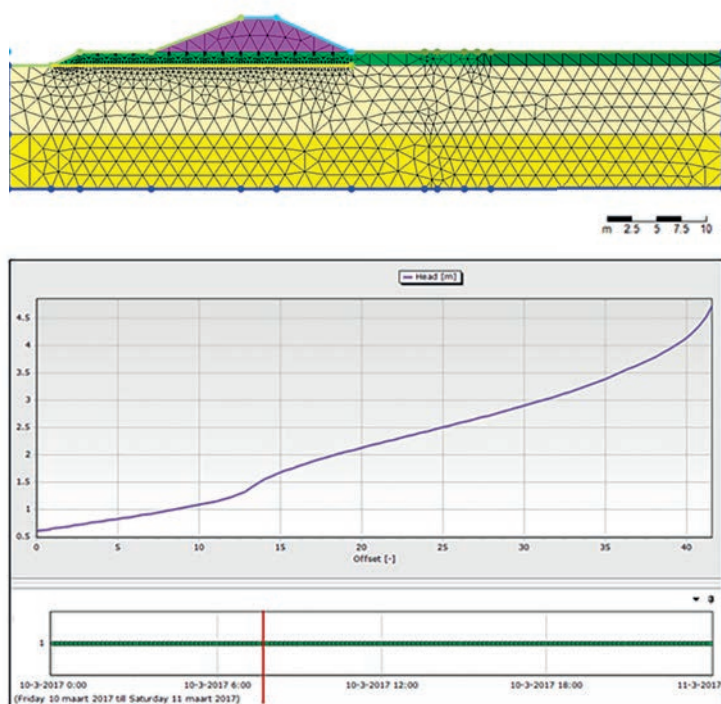
In de verkenning 'Tijdsafhankelijkheid van stijghoogte bij getijdewateren' [V15] wordt ingegaan op het extrapoleren van meetreeksen, hysteresis grafieken en het gebruik van rekenmodellen voor extrapolatie naar norm- en ontwerpcondities (zie uitgelicht in paragraaf 6.6).

In de handreiking meetnetten grondwatermonitoring voor piping [S2] is de link tussen meting en de parameters voor de pipinganalyse beschreven.

7.7 Keuze rekenmodellen

Er zijn verschillende modellen beschikbaar voor het controleren van de invloed van de deel mechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de meest gebruikelijke modellen op het vlak van piping, met een verwijzing naar achtergronddocumenten en verkenningen.

Naast Sellmeijer bestaan er andere modellen waarmee terugschrijdende erosie kan worden beoordeeld. Een voorbeeld is het Shields-Darcy model [1]. In de buitenlandse ontwerppraktijk worden andere erosiemodellen en piping-criteria gebruikt, [16] en [27]. Vaak wordt er een directe relatie gelegd met de gradiënt van de grondwaterstroming ter plaatse van het uittredepunt en wordt daarbij meer uitgegaan van het voorkomen van het begin van pipe-vorming.



Figuur 7-5: Voorbeelden van verschillende modellen.
 Linksboven: berekening met meerlaagse aquifer in D-Geo Flow; linksonder: berekende stijghoogte in kwelweg onder dijk net voor pipe 'evenwichtspunt' passeert in D-Geo Flow;
 rechtsboven: 3D grondwaterstromingsmodel in PLAXIS 3D – PlaxFlow;
 Rechtsonder: beschouwing lokale uittredegradiënten in PLAXIS 2D – PlaxFlow

Rekenmodel	Voorbeelden van tool / rekenschil en achtergronden	Rekenkern	Te gebruiken voor deel-mechanisme:	Model biedt mogelijkheid meenemen van:
Analytische pipingregels	ORZW [22]	Analytisch	Terugschrijdende erosie	2D - dwarsdoorsnede Enkellaagsmodel ¹
Analytische bepaling stijghoogte verloop	TRWD [36]	Analytisch	Opbarsten en heave	2D - dwarsdoorsnede Enkellaagsmodel ¹
2D EEM grondwaterstromings-model	PlaxFlow	PLAXIS 2D	Opbarsten en heave. (analyse van terugschrijdende erosie eventueel indirect4)	2D - dwarsdoorsnede Meer lagenmodel ² Doorlatendheids-anisotropie Tijdsafhankelijkheid Kwel- en heaveschermen
3D EEM grondwaterstromings-model	PlaxFlow	PLAXIS 3D	Opbarsten en heave	3D - lokaal Meer lagenmodel ² Doorlatendheidsanisotropie Tijdsafhankelijkheid Kwel- en heaveschermen
2D EEM grondwaterstromings-model met Sellmeijer piping module	D-Geo Flow	D-GFlow	Opbarsten, heave en terugschrijdende erosie	2D - dwarsdoorsnede Meer lagenmodel ² Doorlatendheidsanisotropie Tijdsafhankelijkheid Sellmeijer erosie model
Regionaal grondwaterstromings-model	IModflow, Triwaco GMS, Visual Modflow ³	MODFLOW, FLAIRS	Opbarsten en heave	Regionaal model, quasi 3D Meer lagenmodel Doorlatendheidsanisotropie Tijdsafhankelijkheid
Regionaal met lokale verfijning grondwaterstromings-model	IModflow, Triwaco GMS, Visual Modflow	MODFLOW, FLAIRS	Opbarsten en heave	Regionaal model, quasi 3D Meer lagenmodel ² Doorlatendheidsanisotropie Tijdsafhankelijkheid

1. Onder 'enkellaagsmodel' wordt hier verstaan: één watervoerend pakket, één uniforme deklaag.
2. Onder 'meerlagenmodel' wordt hier verstaan: één watervoerend pakket dat uit meerdere watervoerende grondlagen bestaat.
3. Door waterschappen/provincies zijn samen met adviesbureaus regionale modellen ontwikkeld die draaien via IModflow. Dit zijn modellen met verschillende namen zoals MIPWA, IBRAHYM, MORIA, AMIGO, HYDROMEDAH en AZURE. Voor het Rivierengebied is er bijvoorbeeld MORIA en voor Rijn en IJssel is er AMIGO. Ten slotte is er in Nederland ook nog MicroFEM, maar dat wordt zeer beperkt gebruikt.
4. In PlaxFlow (2D) kan op indirecte manier een analyse op terugschrijdende erosie worden uitgevoerd door het vergelijken van uitstroomgradiënten met een geïdealiseerd model dat hoort bij de Sellmeijer-formule (zie tekstbox ISAC|Piping paragraaf 6.7).

8. Evalueren uitkomsten pipinganalyse

8.1 Keuzemogelijkheden

De uitkomsten van de berekeningen zijn afhankelijk van de onzekerheden, het detailniveau van de schematisering en het gekozen rekenmodel. Voordat een eindoordeel wordt geveld is een kritische evaluatie van de uitkomsten essentieel. Wanneer niet tot goedkeuring kan worden gekomen zijn er meerdere vervolgsposen mogelijk:

1. De waterkering beoordelen, rekening houdend met berekende veiligheid en overleefde hoogwaters in het verleden;
2. Meer onderzoek doen om gedetailleerdere schematiseringen en berekeningen uit te kunnen voeren, waarbij er een reële kans bestaat dat de vereiste veiligheid op het faalmechanisme piping alsnog wordt aangetoond;
3. Programma van langdurige monitoring en onderzoek opzetten, gericht op het op termijn aantonen van de vereiste veiligheid. Deze aanpak is alleen mogelijk wanneer er een beheermaatregel kan worden getroffen tijdens hoogwater waarmee veiligheid kan worden gewaarborgd. Dit is tijdelijk dus een reactieve beheermaatregel die een extra inspanning vereist van de beheerorganisatie van de waterkeringsbeheerder;
4. Direct een versterkingsmaatregel te laten ontwerpen omdat de berekende veiligheid op piping zodanig ver van de vereiste veiligheid vandaan ligt, dat verwacht wordt dat deze niet met aanvullende kennis overbrugd kan worden.

Het maken van een keuze tussen deze mogelijke vervolgtrajecten is vaak complex vanwege factoren als beschikbare tijd en budget, impact op beheerorganisatie, kosten van versterkingsmaatregelen en de omgevingseffecten. Voor dit keuzemoment is het daarom sterk aan te bevelen om een werkplaats te organiseren met deelnemers

uit verschillende delen van de organisatie van het waterschap en daarbuiten.

De verkenningen 'Werkplaats GoWa' [V11] en 'Balans tussen praktijk en theorie' gaan in op het houden van werkplaatsen en de lessen die daaruit geleerd zijn (zie hoofdstuk 2 en paragraaf 8.3 waarin deze verkenningen zijn uitgelicht in tekstboxen).

In navolgende paragrafen wordt ingegaan op de technische aspecten rond de keuzemogelijkheden 2 en 3. Keuzemogelijkheid 4 wordt in hoofdstuk 9 toegelicht.

8.2 Gedetailleerder schematiseren

De aanvullende onderzoeken en de daaruit voortvloeiende kennis leiden veelal tot een kleinere onzekerheid en een scherper oordeel met betrekking tot het faalmechanisme piping.

Een voorbeeld van gedetailleerder schematiseren is het nauwkeuriger bepalen van lokale parameters zoals deklaagdikte, stijghoogte en het verval over de waterkering door het combineren van een 3D ondergrondmodel met 3D geometrie en een isohypsenkaart uit een gekalibreerd regionaal grondwaterstromingsmodel. Een voorbeeld van het nauwkeurig schematiseren van de ondergrond is het project Dijkversterking Salmsteke (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden) waar een 3D ondergrondmodel is opgesteld. Bij het koppelen van diverse 3D databronnen ligt een GIS georiënteerde aanpak voor de hand. Voorbeelden van een dergelijke koppeling zijn de projecten Meanderende Maas (Waterschap Aa en Maas) en Dijkversterking Gorinchem-Waardenburg (Waterschap Rivierenland). Uit deze voorbeelden blijkt dat het lokaal schematiseren een veel nauwkeuriger en herkenbaarder beeld geeft van de pipingveiligheid en de omvang van pipingmaatregelen dan op basis van een schematisering op dijkvakniveau.

De mate van meer kennis vergaren en gedetailleerder schematiseren is mede afhankelijk van de overbrugbaarheid van de berekende veiligheid ten opzichte van de vereiste veiligheid. Als de vereiste veiligheid ten opzichte van de berekende veiligheid onoverbrugbaar is, kan sneller gekozen worden voor een beheermaatregel of versterkingsmaatregel. Daarbij is het van belang dat de resultaten ook vergeleken worden met de verwachtingen op basis van de ervaringen van experts en beheerders. Wanneer een hoge faalkans of lage veiligheidsfactor wordt berekend maar er in de praktijk geen verschijnselen van piping worden waargenomen, dan is dat reden om de analyse nog eens kritisch te bekijken. Datzelfde geldt voor situaties waarbij wellen zijn waargenomen, maar een lage faalkans of hoge veiligheidsfactor wordt berekend.

8.3 Fysieke maatregel uitstellen

8.3.1 Alternatief voor zware preventieve maatregel

In 2010 heeft de ENW Piping commissie, naar aanleiding van het in Veiligheid Nederland in Kaart 2 (VNK2) geconstateerde tekort aan pipingveiligheid, gekeken naar alternatieven voor de zware preventieve maatregelen die nodig zouden zijn om het tekort aan pipingveiligheid terug te dringen. Er is in zijn algemeenheid gekeken naar het toepassen van repressieve maatregelen in plaats van nieuwe zware preventieve maatregelen. Ook is er een economische afweging gemaakt tussen het treffen van nieuwe preventieve maatregelen en het blijven handhaven van het destijds gebruikelijke ontwerpinstrumentarium met lager veiligheidsniveau. De commissie heeft destijds terughoudend geadviseerd over zowel het handhaven van de destijds vigerende toetsen ontwerpregels, als over het toepassen van repressieve maatregelen (zie ENW-rapport

'Piping Realiteit of Rekenfout' [27]). Belangrijkste reden was toen dat er nog weinig zicht was op nieuwe kennisontwikkeling waaruit zou blijken dat de uitkomsten van VNK2 onnodig conservatief zouden zijn. Er werd destijds getwijfeld aan de betrouwbaarheid van repressieve maatregelen. Uit een risico-afweging zou blijken dat de investering in nieuwe preventieve maatregelen ruim opwoog tegen de grotere overstromingschade bij het handhaven van de destijds gangbare deterministische aanpak (zonder lengte-effect met een vaste overall veiligheidsfactor).

Inmiddels is steeds duidelijker geworden dat het treffen van zware preventieve maatregelen op basis van de nieuwe veiligheidsfactoren en een nieuwe rekenregel kostbaarder is en een grotere impact heeft op de omgeving dan in 2010 was voorzien. Door de verkenningen die binnen de POV Piping zijn uitgevoerd, is steeds meer inzicht verkregen in mogelijke verborgen reserves in weerstand tegen piping, zoals het effect van de weerstand van het voorland in de uiterwaarden of het effect van doorlatendheidsanisotropie. Verder zijn waterschappen nu veel beter in staat om repressieve maatregelen gecontroleerd toe te passen door de ontwikkelingen in vastlegging van observaties en metingen.

Steeds meer waterschappen, zoals Waterschap Rivierenland en Waterschap Limburg, kijken of fysieke pipingmaatregelen onder bepaalde condities kunnen worden uitgesteld bij de aankomende versterkingsopgaven.

8.3.2 Werkplaats en Beslisboom

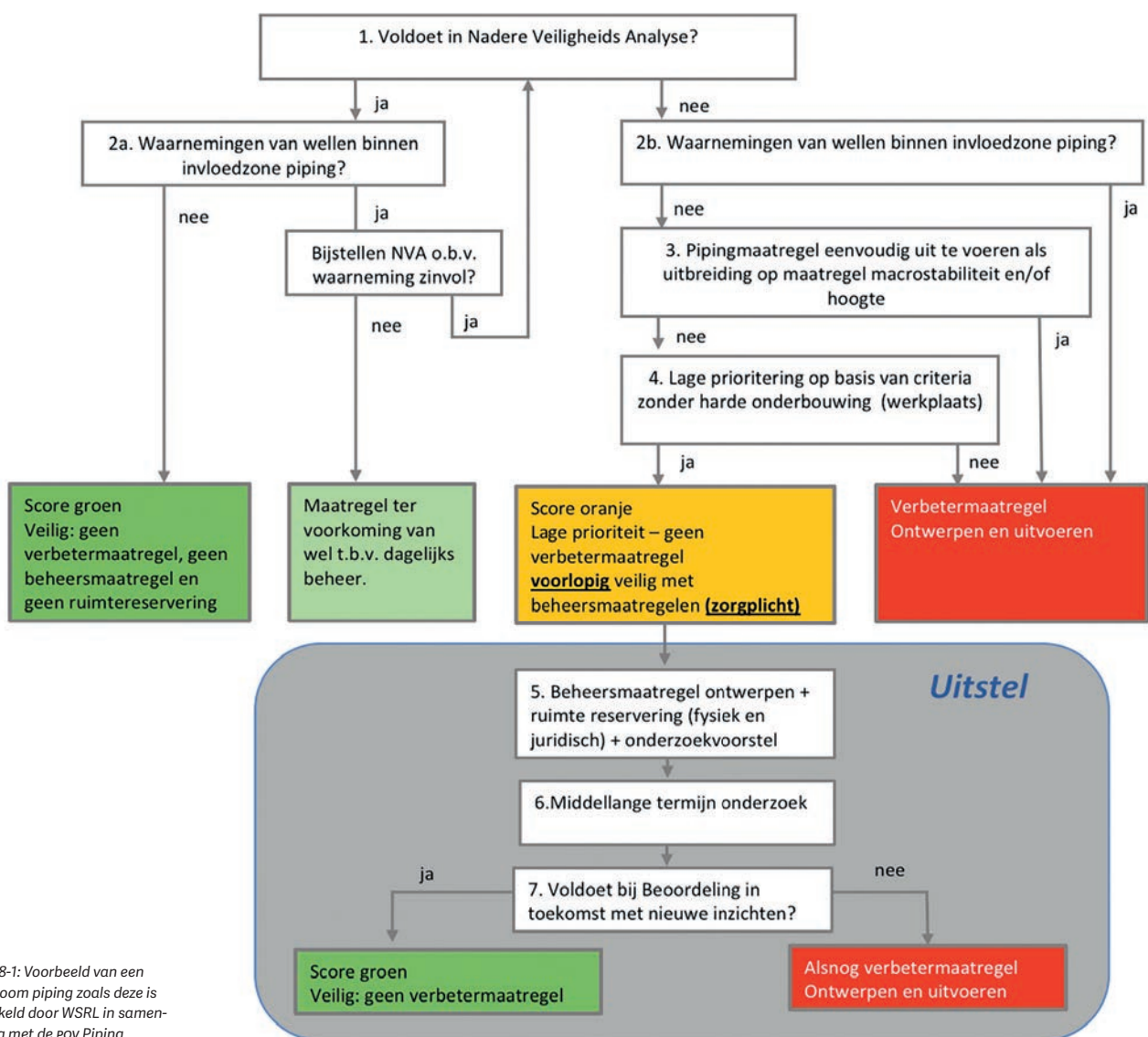
De verkenning Werkplaats Gorinchem-Waardenburg [V11] is een voorbeeld van het breed kijken naar de mogelijkheid om een fysieke versterkingsmaatregel op specifieke deeltrajecten uit te stellen. In navolging van deze werkplaats heeft Waterschap Rivieren-

land in samenwerking met de POV Piping een beslisschema uitgewerkt, dat in de wandelingen de 'Beslisboom Piping' is gaan heten, zie uitgelicht. In dit schema is aangegeven voor welke gevallen en onder welke condities uitstel van een fysieke versterkingsmaatregel mogelijk is.

Het toepassen van de beslisboom kan goed worden toegepast wanneer er twijfel bestaat over de noodzaak van pipingmaatregelen binnen een versterkingsopgave die onder hoge tijdsdruk moet worden gerealiseerd. Nader onderzoek, dat gewenst zou zijn om de noodzaak van de pipingopgave te onderbouwen, is binnen dit tijdsbestek in veel gevallen niet mogelijk waardoor er wordt teruggevallen op conservatieve uitgangspunten. Het gevolg: sneller besluiten tot het uitvoeren van pipingmaatregelen die misschien niet nodig zouden zijn geweest wanneer er meer onderzoekstijd beschikbaar zou zijn. Waterschappen vinden dergelijke maatregelen moeilijk te verantwoorden. Uitstel is dus het winnen van tijd om straks een gedetailleerde pipinganalyse volgens de nieuwe inzichten, op basis van metingen en uitgewerkt met gevalideerde software te kunnen uitvoeren. Bij de nieuwe beslisboom wordt dus altijd uitgegaan van later te onderbouwen keuzen. Daarbij bestaat er ook een kans dat deze onderbouwing straks niet geleverd kan worden en er alsnog verbetermaatregelen nodig zijn. Ook dit spoor is uitgewerkt in de Beslisboom Piping.

Inmiddels is, na diverse werkplaatsen en bijeenkomsten, duidelijk geworden dat de gedachte van een Beslisboom door vele waterschapsbestuurders wordt omarmd: uitstel is een must! Er is behoefte aan stevige adviezen die beter aansluiten bij de praktische en de lokale situatie.





Figuur 8-1: Voorbeeld van een beslisboom piping zoals deze is ontwikkeld door WSRL in samenwerking met de pov Piping

Verkenning 'Werkplaats GoWa' en de Beslisboom Piping [V11]

Waterschap Rivierenland heeft in samenwerking met de pov Piping een werkplaats georganiseerd waar de pipingopgave ter discussie werd gesteld voor het dijkversterkingsproject Gorinchem-Waardenburg. In drie bijeenkomsten is de rekenkundige pipingopgave beschouwd en genuanceerd met inbreng van dijkbeheerders (praktijk), van de taakhouder waterveiligheid (beleidsmatig), van adviseurs vanuit het waterschap (theorie) en van externe experts. Door middel van deze werkplaats is een beslisboom ontwikkeld waarbij niet alleen naar de modeluitkomsten wordt gekeken, maar ook naar beheerderservaring, de kosten, de maakbaarheid en er is een inschatting gemaakt van de impact van kennisontwikkeling. Op basis van deze beslisboom wordt meer nuance aangebracht in de pipingopgave en kan het besluit worden genomen om differentiatie aan te brengen in

de pipingopgave. Echter op voorwaarde dat: de veiligheid is gewaarborgd zonder fysieke versterkingsmaatregel. Deze voorwaarde stelt eisen aan de beheer- en calamiteitenorganisatie van een waterschap; er onderzoek wordt gestart met zicht op uitsluitel omtrent de piping veiligheid op middellange termijn. Gedacht kan worden aan metingen bij hoogwater of ontwikkelingen in modellen en software; er een terugval-optie bestaat, mocht het middellange termijn onderzoek uitwijzen dat de weerstand tegen piping toch lager is dan verwacht. Deze voorwaarde houdt in dat er bij dijkversterkingsplannen reeds ruimte moet worden gereserveerd voor een mogelijke pipingmaatregel en dat deze maatregel ook inpasbaar is in de omgeving. Dit vereist zowel een ontwerpinspanning als juridische regelingen.

8.3.3 Voorbeelden van technische uitwerking Beslisboom Piping

Wanneer er uit een werkplaats blijkt dat er binnen een waterschap voldoende draagvlak is voor het gecontroleerd uitstellen van een pipingmaatregel en de daarbij behorende condities, dan is het vervolgens van belang om de technische uitgangspunten vast te stellen. Het toepassen van de Beslisboom Piping wordt in HWBP-projecten bij verschillende waterschappen onderzocht. De technische uitwerking van de beslisboom is sterk afhankelijk van gebiedskenmerken. Hiernaast twee voorbeelden.

Voorbeeld 1: Meenemen van doorlatendheidsanisotropie in pipinganalyse

Wanneer uit de geologische karakterisering van de ondergrond blijkt dat het watervoerend pakket bestaat uit afzettingen waarin duidelijke doorlatendheidsanisotropie te verwachten is, dan kan hierop worden geanticipeerd door het effect van doorlatendheidsanisotropie reeds mee te nemen in de pipinganalyse. Met behulp van D-Geo Flow kan het effect van de doorlatendheidsanisotropie worden bepaald. Op het moment van uitbrengen van dit Piping Portaal is het programma D-Geo Flow nog niet gevalideerd, echter met het model kan een goede indicatie worden verkregen van het effect van geohydrologische parameters zoals de anisotropiefactor. Op basis van de Beslisboom Piping kan de pipingopgave worden uitgesteld als het effect van anisotropie dusdanig groot is, dat verwacht wordt dat hiermee de pipingopgave op een specifieke locatie vervalt. De mate van de doorlatendheidsanisotropie kan worden gemeten met AMPT proeven. Bij uitstel van deze pipingmaatregel hoort in dit geval een onderzoekstraject bestaande uit een validatietraject D-Geo Flow en het doen van anisotropiemetingen. Het validatietraject van D-Geo Flow wordt momenteel opgestart en zal resulteren in een gevalideerd programma waarmee het effect van anisotropie kan worden geëvalueerd. Als indicatie van de duur van het onderzoekstraject kan gedacht worden aan een termijn van enkele jaren. Mocht na dit onderzoekstraject, tegen de verwachting in, blijken

dat er toch een pipingopgave nodig is, dan ligt een kwelwegaafhankelijke oplossing voor de hand, zoals: een heavescherm, een filter- of drainage-oplossing, zie hoofdstuk 9. Ook hier is het te verwachten dat anisotropie een positieve invloed heeft op piping, dus het anisotropie-onderzoek kan gezien worden als no-regret.

Voorbeeld 2: Meenemen van voorlandweerstand in pipinganalyse

Uiterwaarden bij rivierdijken kunnen een aanzienlijk dempend effect hebben op de stijghoogte onder de dijk bij hoogwater. Toch werd dit dempende effect tot nog toe zelden uitgenut. Door het toepassen van de Beslisboom op voorlandweerstand kan een onnodige pipingopgave vermeden worden. Een geohydroloog kan op basis van ondergrondkenmerken en peilbuismetingen een inschatting maken van de weerstand en spreidingslengte in het voorland. Deze spreidingslengte en de fysiek aanwezige voorlandlengte bepalen samen de effectieve voorlandlengte die in de pipinganalyse mag worden meegenomen. Een geohydroloog kan hierbij aangegeven of een lokale afwijking in voorlandweerstand, bijvoorbeeld een sloot of een lokaal zandigere deklaag, effect heeft op deze spreidingslengte. Als een lokale afwijking van de weerstand in het voorland vrijwel geen effect heeft op de spreidingslengte dan kan de effectieve voorlandlengte worden bepaald op basis van een gelumpte voorlandweerstand. Wanneer voorlandweerstand wordt meegenomen in de pipinganalyse kan het criterium 'geen pipegroei onder voorland' maatgevend worden (paragraaf 7.3). In de schematiseringshandreiking piping bij het WBI [33] is voor dit criterium een conservatief uitgangspunt aangehouden. Het gevaar van een te conservatief uitgangspunt is dat gebieden met veel voorlandweerstand op basis van dit criterium ten onrechte worden afgekeurd. Een betere indicatie van de pipegroei bij hoogwater kan worden verkregen met D-Geo Flow waarmee de pipe-lengte kan worden berekend. De berekende pipe-lengte moet nog wel gezien worden als een indicatieve waarde omdat het programma D-Geo Flow nog niet is gevalideerd en de veiligheidsfilosofie rond pipegroei nog in ontwikkeling is.

Als het verwachte effect van voorlandweerstand dermate groot is dat hiermee een pipingopgave zou vervallen dan kan de pipingopgave met de Beslisboom Piping worden uitgesteld. Aan dit uitstel is dan een onderzoekstraject gekoppeld. Hierbij moet gedacht worden aan: het aantonen van gelumpte voorlandweerstand op locaties waar de pipingopgave wordt uitgesteld; het validatietraject van het programma D-Geo Flow; en het ontwikkelen van een veiligheidsfilosofie rond pipegroei onder het voorland. Een geschikte meetmethode voor gelumpte voorlandweerstand is het monitoren van de stijghoogte met peilbuismetnetten tijdens hoogwaterpassages. In de Handreiking meetnetten grondwatermonitoring voor piping [S2] is beschreven hoe de spreidingslengte kan worden bepaald op basis van gemeten stijghoogtes. Het is essentieel dat dergelijke meetnetten tijdig worden geïnstalleerd zodat de monitoring is gestart voorafgaand aan een hoogwater. Voor een representatieve meting is het belangrijk dat het voorland bij hoogwater voldoende lang onder water staat. Een alternatief is het meten van de weerstand van de deklaag met behulp van geofysische en geotechnische meettechnieken. De doorlooptijd van het onderzoekstraject bepaalt het moment dat er een definitief oordeel kan worden gegeven. Deze doorlooptijd wordt bepaald door: het moment dat er een hoogwatersituatie optreedt; het validatietraject van het programma D-Geo Flow en het ontwikkeltraject dat doorlopen moet worden om te komen tot een veiligheidsfilosofie ten aanzien van pipegroei. De laatste twee trajecten zijn in gang gezet. Als indicatie van de duur van het onderzoekstraject kan gedacht worden aan een termijn van enkele jaren. Mocht na dit onderzoekstraject, tegen de verwachting in, blijken dat er toch een pipingopgave nodig is, dan zal een verbetermaatregel moeten worden getroffen. Naast kwelwegaafhankelijke oplossingen kan hier ook een oplossing in het voorland worden overwogen, zoals het verlengen van de dijkzate in het voorland, zie tekstbox in paragraaf 9.3. Het voorlandonderzoek kan hier opnieuw van nut zijn en kan gezien worden als no-regret.



Figuur 8-2: Opkisten achter Waaldijk bij Zaltbommel, hoogwater januari 2018 (bron: WSR)

8.3.4 Monitoren zandmeevoerende wellen

Bij het gebruik van de Beslisboom hoort langdurige monitoring en registratie van wellen. De verkenning 'Monitoring zandmeevoerende wellen' [V16] kan gebruikt worden bij de koppeling tussen waarnemingen en pipinganalyse. In deze verkenning is er daarnaast bijzondere aandacht voor de koppeling tussen waarnemingen en de kenmerken van het geohydrologisch systeem.

Verkenning Landelijke registratie zandmeevoerende wellen [V16]

Deze verkenning heeft geresulteerd in een overeenkomst tussen 7 waterschappen, STOWA, IHW, RWS-WVL en DGWB om samen een landelijk databestand op te zetten voor de registratie en monitoring van zandmeevoerende wellen.

De kernpunten van deze overeenkomst zijn:

1. Het verzamelen van uniforme informatie met historische en nieuwe gegevens ter verbetering van de betrouwbaarheid van de voorspelling van het faalmechanisme piping. Dit wordt bereikt door per riviertak op een uniforme wijze informatie over karakteristieke parameters te verzamelen die in een landelijk databestand worden opgeslagen. Dit bestand is toegankelijk voor waterschappen en wetenschappers.
2. Het aanvullen van het databestand met waarnemingen bij hoogwater (kwalitatief en kwantitatief) door een team van specialisten en geotechnisch veldwerkers (de 'vliegende brigade').
3. De database moet ondersteuning kunnen bieden tijdens het calamiteitenproces wanneer het waterschap een beslissing moet nemen over inzet van noodmaatregelen.
4. Ook lokaal uitgevoerd geologisch en geotechnisch onderzoek ter plaatse van wellen kan in het landelijk databestand worden opgeslagen zodat relaties kunnen worden gelegd tussen waarnemingen en ondergrondinformatie.

De rapportage 'Monitoringsplan landelijke registratie van zandmeevoerende wellen' [20] geeft een beschrijving van het registratiesysteem. De waarnemingen en metingen in het veld zijn ingedeeld een 1e lijns-, 2e lijns- en 3e lijns- registratie. De eerste lijn sluit aan bij de dijkwacht-app (direct en globaal). Bij ernstig wellen wordt geëscaleerd naar de tweede lijn, die voortbouwt op de eerste lijn, maar is meer gedegen en nauwkeuriger is. De derde lijn omvat kort en langdurig onderzoek naderhand. Het rapport bevat een lijst met te meten parameters in de 1e, 2e en 3e lijnsregistratie en geeft voorbeelden van debietmeetsystemen.

Opgemerkt wordt dat er reeds enige tijd een internationale database bestaat met observaties van wellen langs dijken. Deze database is een initiatief van het US Army Corps of Engineers en Rijkswaterstaat en Deltares. Ook enkele Nederlandse waterschappen hebben hiervoor informatie aangeleverd. Informatie kan worden gevonden op: pipingdb-rws-coe.nl.

9. Versterkingsmaatregelen

9.1 Algemeen

Na het uitvoeren van de berekeningen ten behoeve van de beoordeling besluit de beheerder bij een te laag veiligheidsniveau of de waterkering versterkt dient te worden of op termijn versterkt dient te worden, maar in de tussentijd gemonitord wordt met een beheersmaatregel bij eventueel hoogwater.

Als eenmaal gekozen is voor een versterkingsmaatregel wordt door de beheerder de versterkingsfase opgestart, die begint met een verkenningfase waarin een voorkeursalternatief (VKA) wordt vastgesteld. Voor het vaststellen van een VKA worden verschillende type alternatieven opgesteld die vervolgens ten opzichte van elkaar gewogen worden om te komen tot een VKA. Om alternatieven te kunnen opstellen, moeten de technische eisen waaraan de waterkering moet voldoen in beeld zijn gebracht.

Maar net zo belangrijk zijn de wensen en eisen uit de omgeving die uiteindelijk van invloed zijn op de dimensies en/of type versterkingsmaatregel en VKA. Omgevingseisen zijn eisen vanuit omwonenden, gebruikers van de waterkering (indien deze nog andere functies heeft dan alleen water keren), natuureisen, plannen vanuit de gemeente of provincie, etc. Het ophalen van de omgevingseisen moet in het begin van een verkenning plaatsvinden door bijvoorbeeld het organiseren van bewonersavonden en werkplaatsen [V11].

Versterkingsmaatregelen met betrekking tot piping zijn in de volgende categorieën onder te verdelen:

- Horizontale kwelwegverlenging;
- Verticale kwelwegverlenging en heaveschermen;
- Drainageoplossing;
- Filteroplossing;
- Beheermaatregelen.

In de POV piping is een verkenning uitgevoerd om de innovaties uit de markt beter te ontsluiten. Zie 'Ontsluiten van innovatie uit de markt' [V13]. In deze verkenning zijn innovaties verzameld en getoetst op haalbaarheid en in hoeverre ze kansrijk zijn voor de toepassing als versterkingsmaatregel. Innovaties die ten tijde van het schrijven van voorliggend portaal aan beide voldoen, zijn in voorliggend portaal opgenomen.



9.2 Ontwerpinstrumentarium en onderliggende documenten

9.2.1 Algemene ontwerprichtlijnen

Voor het ontwerpen van fysieke maatregelen kan gebruik gemaakt worden van de volgende documenten:

- Ontwerpinstrumentarium 2014 [13];
- Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren [35];
- Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [22];
- Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken [36].

Bovenstaande documenten zijn gerangschikt naar mate van belangrijkheid in het ontwerpproces. De ontwerper/adviseur waterkeringen begint met het bepalen van het veiligheidsniveau en veiligheidsfactoren voor de berekeningen op basis van [13] en [35]. De achtergrondinformatie, rekenparameters en rekenmethodiek worden bepaald op basis van het [35], [22], [36] en [28].

Tot slot is het belangrijk om ook de onderhouds- en beheerorganisatie van het betreffende waterschap te betrekken bij de keuze en het ontwerp van een pipingmaatregel.

9.2.2 Specifieke richtlijnen voor drainage-oplossingen

Specifiek voor het ontwerpen van drainage-oplossingen kunnen de volgende aanvullende documenten worden gebruikt:

- pov Drainagetechnieken [28];
- Handreiking drainagesysteem in de verkenning [V6].

Waterschap Aa en Maas is voornemens om een ontwerp- en beoordelingsrichtlijn drainage technieken op te stellen. Specifiek voor het drainagesysteem DMC is reeds een ontwerp- en beoordelingsrichtlijn opgesteld [23].

Het document [28] is opgesteld voor het ontwerpen, het realiseren en het beheer en onderhoud van drainageoplossingen. De genoemde type-oplossingen zijn in POV Drainagetechnieken verder uitgewerkt en omschreven. Hierbij zijn de belangrijkste aandachtspunten en de voor- en nadelen van de verschillende type-oplossingen opgenomen. Daarnaast is er ook ingegaan op monitoring van een drainagesysteem.

9.2.3 Specifieke richtlijnen voor filteroplossingen

Voor het ontwerpen van filteroplossingen in de dijkversterking zijn algemene internationale handboeken beschikbaar. Specifiek voor de in Nederland ontwikkelde oplossing van een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG), is de Ontwerp- en beoordelings-richtlijn VZG [24] beschikbaar.

9.2.4 Grondwaterstromingsmodel

Vooraf voor het ontwerp van drainage- en filteroplossingen is het van belang dat een grondwaterstromingsmodel wordt gebruikt om waterstroming en stijghoogtes te bepalen. De gebruikelijke empirische reken- en ontwerpmodellen voor het ontwerpen van waterkeringen op het faalmechanisme piping zijn vaak ontoereikend.

9.3 Horizontale kwelwegverlenging

Onder maatregelen in grond verstaan we:

- Het aanbrengen van een berm aan de binnenteen van de waterkering;
- Het dempen van een binnen- of buitendijkse sloot;
- Het aanbrengen van afdekkende kleilaag in het voorland
- Het verwijderen van de waterdoorlatende grondlaag (indien deze dun is en ondiep gelegen).

Met grondoplossingen wordt de horizontaal aanwezige kwelweg verlengd zodat deze aan de berekende kritieke kwelweg voldoet. Het verlengen van de aanwezige horizontale kwelweg heeft meestal veel impact op het ruimtebeslag met gevolgen voor omgeving en het beheer. Bij de dimensionering van een maatregel in grond kan geoptimaliseerd worden indien gebruik gemaakt wordt van een van de methoden die genoemd zijn in tabel 3-1. Let op dat het WBI-beperkingen geeft voor de maximale buitendijkse kwelwegverlenging (zie hoofdstuk 8.5.5 in de schematiserings-handleiding piping WBI 2017 [33]).



Verlengen van de dijkzate

Bij de analyse van terugschrijdende erosie gelden twee criteria:

1. het aanwezige verval dient kleiner te zijn dan het kritieke verval;
2. de pipegroei mag niet voorbij te buiten- teen van de dijk reiken, zie uitgelicht in paragraaf 7.3.

Klassieke voorlandverbeteringen richtten zich uitsluitend op het eerste criterium: het creëren van extra kwelwegengte waarmee het kritieke verval volgens de rekenregel van Sellmeijer wordt vergroot. Wanneer het tweede criterium maatgevend is, dan kan overwogen worden om na te gaan of het voorland dusdanig ondoorlatend en sterk is dat pipegroei onder een deel van het voorland zou kunnen worden geaccepteerd. Ook het toekomstig beheer en gebruik van het voorland moet hierbij worden beschouwd. Ook kan gedacht worden aan het aanbrengen van een stevige en slecht waterdoorlatende klei-inkassing of een verlenging van de zate. Deze aanpak dient afgestemd te worden met de beheerder van de waterkering en het voorland.



Prolock B

Prolock B is een kunststofscherf uit gerecycled PVC met een ingebouwd zanddicht filter. De techniek kan dienen als een inbrengmethode voor het verticaal zanddicht geotextiel (VZG, zie paragraaf 9.6). De toepassing en uitwerking van Prolock B moet nog plaatsvinden.



Trisoplast

Trisoplast is een waterdicht mengsel van zand, bentoniet en polymeer dat reeds geruime tijd wordt toegepast voor de afdichting van stortplaatsen. De techniek wordt nu aangeboden in een verticale uitvoering waarbij het tot 8 meter diep als kwelscherf aangebracht wordt. Hiervoor moeten nog de maakbaarheid (in eigen ontwikkeling van de aanbieder) en de robuustheid van de techniek tegen deformaties en eventuele milieuaspecten worden onderzocht.



SoSeal

SoSeal is een injectietechniek waarbij neerslagproducten van aluminiumverbindingen en organisch materiaal de waterdoorlatendheid van zandlagen sterk verminderen. Het kan toegepast worden om dunne zandlagen af te sluiten of als kwelscherf. De techniek bevindt zich in het onderzoeksstadium (STW onderzoek, pilot Veerse Dijk (WSRL)). De beheersbaarheid van het proces en de in de praktijk te bereiken minimale ondoorlatendheid zijn belangrijke parameters. Een potentieel groot voordeel van de techniek is dat kabels en leidingen wellicht kunnen blijven liggen, met bijbehorende besparingen in kosten en doorlooptijd van dijkversterkingen.

9.4 Pipingschermen

Een effectief pipingscherf is het zogenaamde heavescherf. Dit scherf wordt toegepast aan de benedenstroomse zijde van een dijk of kunstwerk en zorgt ervoor dat de kwelstroom aan de benedenstroomse zijde verticaal omhoog is gericht. Het scherf dient daarvoor in de watervoerende laag te worden aangebracht. Er is geen minimale kwelweglengte nodig zoals bij een horizontale kwelwegoplossing. Het criterium waarop het scherf wordt ontworpen is een verticale uitrede gradiënt, zie OI2014 [13]. In het ontwerp moet er rekening mee worden gehouden dat er tussen de wel en het scherf interne erosie kan plaatsvinden. Dit erosieproces stopt bij het heavescherf.

Andere vormen van pipingschermen zijn: een kwelwegverlengend scherf en een scherf dat een watervoerende laag geheel afsluit waarmee ook de hoeveelheid kwel sterk reduceert. Deze schermen verlagen de belasting (gradiënt) en zorgen op deze wijze voor een verhoging van de pipingveiligheid. Een voorbeeld van een afsluitend scherf is te vinden langs de Waal bij Nijmegen. Kwelwegverlengende schermen, of beter:

‘belastingverlagende schermen’, kunnen effectief zijn in combinatie met anisotropie in doorlatendheid van het watervoerende pakket dat het scherf doorsnijdt. Zelfs schermen aan bovenstroomse zijde kunnen dan effectief worden, in tegenstelling tot heaveschermen die per definitie aan de benedenstroomse zijde moeten worden geplaatst.

Een traditioneel pipingscherf bestaat meestal uit een damwand of een cementbentonietwand. Tegenwoordig worden ook oplossingen gezocht in kunststofscherfen en mixed-in-place schermen. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is de beperking ten aanzien van installatiediepte, zeker wanneer vaste zanden of grindige lagen op geringe diepte kunnen voorkomen. Regelmatig is voor de stabiliteit een constructieve oplossing nodig in de vorm van een verticaal stabiliteitsscherf.

In een dergelijke situatie is het gebruikelijk de functie van de verticale constructie/stabiliteitsscherf te combineren voor zowel macrostabiliteit als voor piping.

Pipingschermen hebben de naam relatief duur te zijn. Dat is echter niet het geval als ze worden vergeleken met grote horizontale maatregelen die het kwelweglengtetekort, vertaald uit de uitkomsten van de rekenregel van Sellmeijer, teniet zouden moeten doen. Een damwand die ook dienst moet doen als stabiliteitsscherf is vaak vele malen duurder dan een scherf dat alleen voor piping wordt toegepast.

Binnen de pov en Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) zijn innovaties onderzocht. Op het gebied van doorbreken van de kwelweg of verlengen van de verticale kwelweg zijn innovaties geïnventariseerd en onderzocht op haalbaarheid voor het toepassen in HWBP-projecten. Onderstaand zijn de kansrijke innovaties beschreven.

9.5 Drainageoplossingen

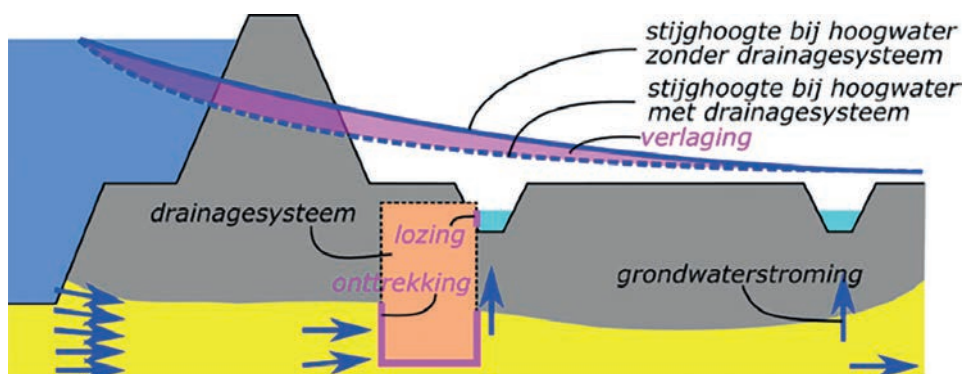
9.5.1 Algemeen

De gangbare toepassing van drainage-oplossingen bij piping is het voorkomen van opbarsten. Een drainageoplossing is dan een manier om de stijghoogte te verlagen en daarmee het opbarsten van de deklaag te voorkomen (het principe van het 'overdrukventiel'). Voorkomen van opbarsten is een oplossing voor piping en heeft een gunstig effect op de macrostabiliteit. Een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerp van een drainage-oplossing is de toename van de stijghoogte gradiënt in de doorlatende zandlaag. Het is daarom essentieel dat de drainage-oplossing van een goed filter wordt voorzien om uitspoeling bij uitstroompunt te voorkomen.

Ook kan een drainagesysteem worden toegepast om ongecontroleerd uitstromen van kwelwater op een kritieke locatie te voorkomen. Het gaat in dit geval om het verlagen van een lokale piekgradiënt bij een kritiek uitstroompunt, zoals bij de teen of bij een sloot. Een drainage-oplossing die zich richt op het spreiden van uittredend water en verlagen van de gradiënt is bijvoorbeeld een grindkoffer zoals is toegepast in de Rijndijk bij Spijk (Spijkse Dijk). Deze oplossing combineert de principes van een drainage-oplossing en een filterconstructie en is verder beschreven in paragraaf 9.6.

Een andere nevenfunctie van een drainagesysteem is het lokaal voorkomen of verminderen van wateroverlast. Dit laatste was bijvoorbeeld een belangrijke nevenfunctie van het drainagesysteem dat bij Opijnen is aangelegd.

Onderstaande illustratie volgt uit POV Drainagetechnieken [28] en geeft het principe van een drainageoplossing goed weer.



Figuur 9-1 Schematische doorsnede drainagesysteem tijdens hoogwater [28]

De twee parse lijnen geven de directe invloed weer tussen het drainagesysteem en de omgeving, namelijk in de volgende compartimenten:

- De grondwaterhuishouding via een ont-trekking in de watervoerende laag;
- Het hydrologische systeem via een lozing op het (binnendijkse) oppervlaktewater.

Een drainagesysteem kan worden aangebracht in een afgesloten zandlaag en ondiep nabij de binnentee van de waterkering. Toepassing in een afgesloten zandlaag beïnvloedt de stijghoogte en vermindert de kans op opbarsten en piping. Vanuit het geohydrologische systeem is de toepassing van drainagesystemen vaak kansrijk in afgesloten zandlagen met een beperkt, maar ook niet te laag doorlaatvermogen.

Vragen die gesteld moeten worden bij het toepassen van een drainageoplossing zijn:

- Hoeveel moet de stijghoogte verlaagd worden om te kunnen voldoen aan de vereiste veiligheid van de waterkering?
- Wat betekent de benodigde verlaging voor het type drain, de capaciteit en dimensies van de drain? Is een actieve ontwatering nodig (pompen)?
- Wat is de locatie van een drain voor een effectieve drainage? Hoe heterogeen is het gebied en wat betekent dit voor de diepte van de drain?
- Hoe moet het vrijkomende water afgevoerd worden? Welke rol moet de beheerder hierin vervullen?

- Hoeveel invloed heeft de afvoer van het vrijkomende water op de functie van de drain? Denk hierbij bijvoorbeeld aan de weerstand van de afleidingen door dimensies en verhang op de waterdrukken in de drain;
- Welke eisen moeten gesteld worden aan beheer en onderhoud?
- Wat is het effect op de dagelijkse waterhuishouding? In dit geval kan het werken met overstort effectief zijn (systeem treedt in werking bij bereiken van de overstorthoogte).

Net als elke te treffen maatregel bij dijkversterking, vereist een drainagesysteem beheer en onderhoud. De constante aandacht voor het systeem maakt de beheerder meer bewust van zijn taak. Dit kan weer een verhoging van de veiligheid met zich mee brengen. Eventuele omissies in het ontwerp komen bij dit systeem bovendien snel aan het licht: de effectiviteit van de oplossing kan bij ieder hoogwater gemeten worden en vergeleken met de berekeningen. Dat is bij andere traditionele oplossingen niet het geval, daar worden omissies pas laat opgemerkt en is reactief handelen veel lastiger. Binnen drinkwaterwinning, bemaling en riolering is veel ervaring opgedaan in de toepassing van drainageoplossingen. Kennis uit deze werelden dient te worden gebruikt tijdens het ontwerp van een drainageoplossing in een dijkversterking.

De volgende 3 type drainagetechnieken voor dijkversterkingen zijn beschikbaar:

- Verticale bron (in het algemeen zal een bronnenstelsel nodig zijn);
- Horizontale drain;
- Grindkoffer.

Naast de ontwerprichtlijnen zoals genoemd in paragraaf 9.2 kan gebruik gemaakt worden van de Handreiking drainagesysteem in de verkenning [V6]. Deze handreiking dient als hulpmiddel voor alle betrokkenen bij dijkversterkingen, om drainagetechnieken als een volwaardig element mee te nemen in de verkenning van dijkversterkingsprojecten. De resultaten en inzichten uit deze handreiking zijn gebruikt bij het opstellen van de POV publicatie Drainagetechnieken [28].

In een verkenningsfase kan gebruik gemaakt worden van de Quickscan-tool die binnen de verkenning drainagesystemen is ontwikkeld. Het doel van de tool is om de mogelijkheden voor drainagetechnieken te verkennen. De tool is niet geschikt voor het maken van (voor)ontwerpen of vergunningsaanvragen.

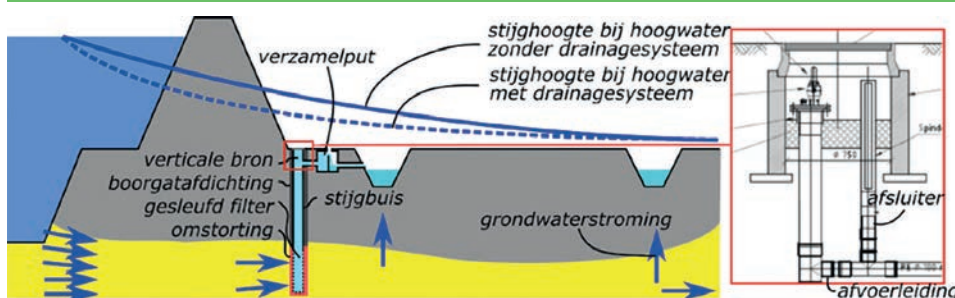


Quickscan-tool drainagetechnieken [V6B]

Doel van de verkenning is het ontwikkelen van een tool om de effectiviteit en kosten van een drainagesysteem inzichtelijk te maken. De quickscan-tool drainagetechnieken geeft een eerste indruk van de toepassing van een drainagesysteem voor een specifieke dijklocatie. De tool berekent het debiet dat uit een drainagesysteem kan komen en de kosten van aanleg (en beheer). De tool is bedoeld om in de verkenningsfase van een dijkversterkingsproject, een beeld te krijgen van de inzetbaarheid van een drainagesysteem. Het is een quickscan die helpt in de afweging van de verschillende dijkversterkingstechnieken. Deze afweging zal door de gebruiker zelf gedaan moeten worden.

De tool richt zich op het draineren van een afgesloten watervoerende laag in de ondergrond nabij een buitenwater. Drainage van de freatische lijn in de dijk wordt niet beschouwd.

Via de volgende link is de quickscantool te bereiken: drainagequickscan.nl. Na het accepteren van de disclaimer start de tool direct. Voer vervolgens de kenmerken van de dijk in, of start eerst een voorbeeld.



Figuur 9-2 Schematische doorsnede verticale bron en verzamelput tijdens hoogwater [28]

Pipingontspanner:

drainagetechniek met kwelkade

Pipingontspanner bestaat uit verticale bronnen achter de dijk die in combinatie met een kwelkade leiden tot een gecontroleerde afvoer van kwelwater en het verhang over de kering reduceren. Het is een oplossing die voornamelijk geschikt lijkt in combinatie met natuurontwikkeling. Deze innovatieve oplossing is verder nog niet uitgewerkt, maar voor het ontwerp kan gebruik worden gemaakt van de bestaande ontwerp- en rekenmodellen. De kwelkade vormt samen met de hoofdwaterring en de verticale bronnen een systeem, dat als geheel aan de norm moet voldoen.

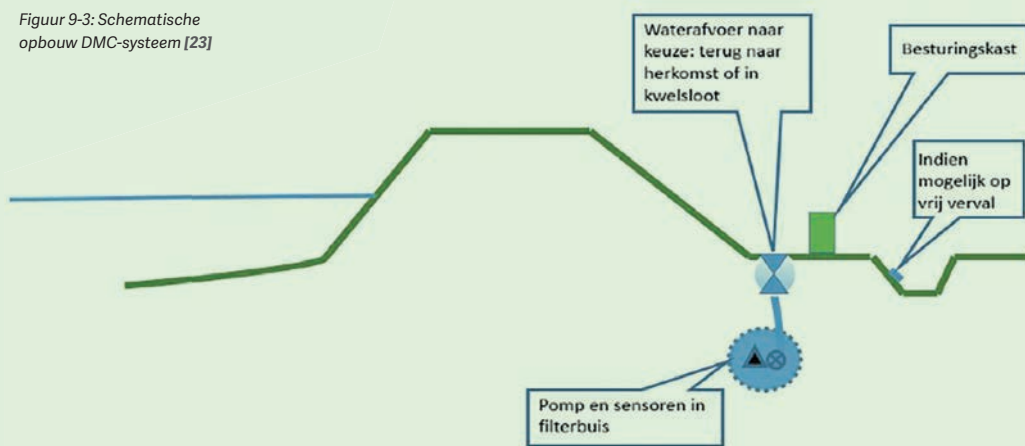
9.5.2 Verticale bron

Met een verticale bron (internationaal bekend als 'relief well', ofwel ontlastbron) wordt grondwater uit een diepe zandlaag onttrokken en wordt daarmee de waterdruk in deze zandlaag verlaagd. In de Verenigde Staten van Amerika is bij het U.S. Army Corps of Engineers veel ervaring met relief wells als pipingmaatregel. Buiten de dijkenwereld wordt deze techniek bijvoorbeeld toegepast bij tijdelijke bemalingen en voor drinkwaterwinning. Een schematisch voorbeeld is weergegeven in onderstaande figuur. De verticale bron wordt geplaatst in een boorgat. Via sleuven in het filter (perforaties in de stijgbuis) staat de bron in verbinding met de zandlaag. Bij een overdruk in de zandlaag kan water onder vrij verval uitstromen, dit wordt een passief systeem genoemd. Een actief systeem bevat een pomp die grondwater aan het watervoerende pakket onttrekt.

Binnen de POV Piping is de een innovatieve oplossing voor verticale bronnen onderzocht, de pipingontspanner: drainagetechniek met kwelkade.

In de praktijk is gebleken dat het waterbezwaaar van verticale bronnen ten opzichte van horizontale drains en grindkoffers noemenswaardig hoger kan zijn. Dit doordat de verlaging van de grondwatercurve tussen de bronnen een relatief grotere onttrekking ter plaatse van de bronnen vereist vergeleken met een horizontale drain om opbarsten te voorkomen. Het is daarom van belang om het aantal verticale bronnen en de bijbehorende tussenafstand goed te beschouwen om het waterbezwaaar te optimaliseren.

Figuur 9-3: Schematische opbouw DMC-systeem [23]



Dijk Monitoring Conditioning (DMC) systeem

Het DMC-systeem is een horizontale drain die aangebracht wordt middels een horizontaal gestuurde boring.

Het DMC-systeem is een autonoom systeem dat op basis van de gemeten stijghoogte of hoogte van freatische lijn automatisch wordt geactiveerd. Hierdoor wordt de stijghoogte of freatische lijn verlaagd en daarmee wordt de stabiliteit van de dijk verhoogd. Het DMC-systeem bestaat uit een filterbuis die het overtollige water uit de ondergrond draineert. Om de capaciteit optimaal te benutten wordt tevens een afvoerpomp geïnstalleerd waardoor er meer water gedraineerd kan worden dan alleen onder vrij verval mogelijk is. De activering van het DMC-systeem wordt autonoom gedaan op basis van geïnstalleerde referentiemonitoring, die wordt gedaan door een glasvezelkabel in de filterbuis. Indien de stijghoogte boven de vooraf ingestelde stijghoogte of freatische lijn komt, wordt het DMC-systeem geactiveerd. De stijghoogte/ freatische lijn neemt af en de stabiliteit van de kering wordt verhoogd. De gemeten data wordt ontsloten in een online database.

9.5.3 Horizontale drain

Een horizontale drain wordt frequent gebruikt als freatische drainage in de binnenteen van een dijk. Een horizontale drain kan ook worden gebruikt in een afgesloten watervoerende laag volgens een vergelijkbare methode als de hiervoor beschreven verticale bron. In dit geval onttrekt een geperforeerde horizontale buis het toestromende grondwater.

Als innovatieve horizontale drainoplossing is het Dijk Monitoring Conditioning (DMC) systeem ontwikkeld. De innovatieve drainageoplossing is inmiddels getest en er is een ontwerp- en beoordelingsvoorschrift opgesteld [23].

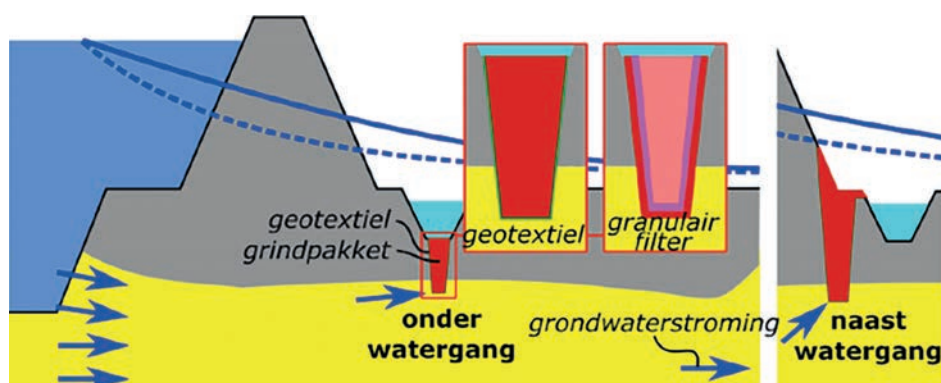
9.5.4 Grindkoffer

Een grindkoffer kan ontworpen worden als drainagesysteem om piping te voorkomen. Net als bij andere drainageconstructies dient het grindkoffer goede filtereigenschappen te bezitten zodat alleen water en geen zanddeeltjes worden afgevoerd bij hoogwater. Een schematische doorsnede is in Figuur 9-4 weergegeven.

De opbouw van een grindkoffer voorkomt dat zand door het uittredende kwelwater mee spoelt, door het toepassen van een geotextiel in combinatie met grind (linker inzet) of door een granulair filter (rechter inzet). Het filter is in beide gevallen grond dicht en daarom kan geen uitspoeling van zand plaatsvinden. Piping treedt dan ook niet op. Het principe is vooral geschikt bij een dunne deklaag (enkele meters), omdat dan de aanleg relatief eenvoudig kan worden uitgevoerd.

Een grindkoffer kan ook toegepast worden in een deklaag, zonder kortsluiting met de watervoerende laag. Door een grindkoffer aan te brengen op een zwakke plaats, zoals een slootbodemp, kan deze als overdrukventiel fungeren. Door het gewicht wordt opbarsten voorkomen of uitgesteld en geconcentreerd uitstromen van water dat zand meevoert wordt voorkomen.

Wanneer een grindkoffer kortsluiting maakt met de watervoerende laag dan kan een grote toename in waterbezwaar ontstaan, ook bij normale hoogwatercondities, omdat dan bij hoog buitenwater een open verbinding bestaat met de rivier. Dit aspect verdient bijzondere aandacht wanneer deze oplossing zou worden overwogen.



Figuur 9-4 Schematische doorsnede grindkoffer onder watergang tijdens hoogwater [28]

9.6 Filteroplossingen

In een filteroplossing wordt er in de ondergrond een filter aangebracht of wordt de opbouw van het zandpakket aan het uittredepunt zodanig aangepast, dat de zandkorrels niet in beweging kunnen komen. Het filter kan op verschillende plekken in het dwarsprofiel worden geplaatst. Wanneer het filter aan het uittredepunt wordt geplaatst, kan er geen pipe-vorming optreden. Wanneer het filter tussen dijk en uittredepunt wordt geplaatst kan er wel een pipe ontstaan, maar deze zal doodlopen op het filter zodat de pipe zich niet onder de dijk kan voortzetten. Een van de kenmerken van een filteroplossing is dat het grondwaterregime vrijwel niet wijzigt omdat filteroplossingen alleen invloed hebben op de korrelstructuur en niet op de doorlatendheid van de doorlatende grondlagen. Hierin verschilt een filteroplossing van een kwelscherm of een heavescherm. Er zijn echter uitzonderingen zoals een grindkoffer dat tevens als drainage werkt. Deze constructie kan wel degelijk effect hebben op het grondwaterregime.

In de markt zijn meerdere innovatieve initiatieven aanwezig welke men kan scharen onder filteroplossingen. De volgende filteroplossingen worden ten tijde van het opstellen van voorliggend portaal in de markt onderzocht of zijn reeds gelanceerd als oplossingsrichting.

- Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG);
- GrofZandBarrière (GZB).

Vragen die gesteld moeten worden bij het toepassen van een filteroplossing zijn:

- Hoeveel ruimte is beschikbaar aan de binnendijkse zijde?
- Hoe ziet de ondergrond eruit in relatie tot het kunnen inbrengen van een geotextiel? Voor het inbrengen dient men te beschikken over een gedetailleerd beeld van de dikte deklaag op het tracé van het VZG en obstakels en grindige lagen die het inbrengen van het textiel kunnen bemoeilijken.
- Waarop sluit de filteroplossing aan in lengterichting? Hoe worden deze aansluitingen ontworpen? De aansluiting moet dusdanig zijn dat er geen piping kan optreden door een geconcentreerde kwelstroming achterlangs, onderlangs of bovenlangs de filterconstructie?
- Is de oplossing uitvoerbaar?
- Hoe kan de functionaliteit van de maatregel gemonitord en beoordeeld worden?

9.6.1 Verticaal Zanddicht Geotextiel

Het gebruik van filteroplossingen is nieuw in de Nederlandse dijk-adviesing waardoor er nog weinig praktijkervaring is opgedaan. De praktijkervaring is wel van belang voor de toepassing. In de volgende concrete projecten wordt ervaring opgedaan met een VZG:

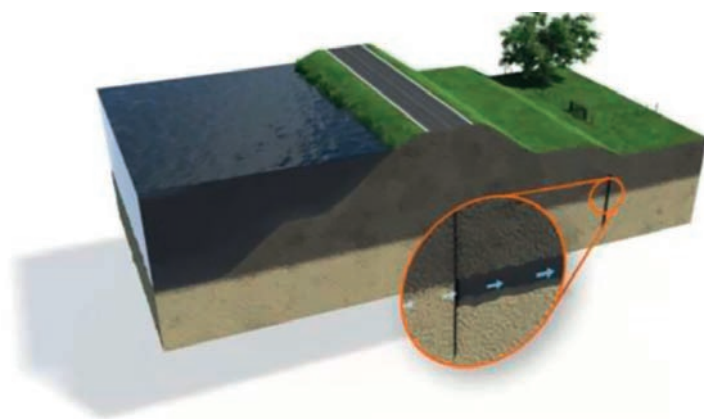
- Full-scale proef, IJkdijk (2013);
- Livedijk Willemspolder (2015), Waterschap Rivierenland [V9];
- Dijkversterking Hagestein-Opheusden (2015), Waterschap Rivierenland
- Dijkversterking Twentekanaal (2018-2019), Waterschap Rijn en IJssel;

In de verkenning Live dijk Willemspolder [V9], is een pilot uitgevoerd naar de toepasbaarheid van een VGZ. Voor het ontwerp en beoordeling van een VZG is een ontwerp- en beoordelingsrichtlijn opgesteld [24].

Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG)

Een VZG bestaat uit een verticaal geotextiel dat geen zandkorrels doorlaat, maar wel water. Een VZG wordt aan de binnenzijde van de dijk verticaal aangebracht, ter plaatse van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag onder de ondoorlatende deklaag. Door het geotextiel wordt de kwelweg voor zandkorrels geblokt en kan een pipe zich niet onder de waterkering doorzetten. Dit betekent dat zandmeevoerende wellen wel kunnen optreden, maar geen risico vormen voor de veiligheid van de waterkering op het gebied van piping. Wel dient in een dergelijke situatie het effect van pipe-vorming met bijkomende verstoringen op andere faalmechanismen, zoals macrostabiliteit, beoordeeld te worden.

Voor het aanbrengen van het VZG zijn innovaties in ontwikkeling. Diverse aannemers zijn de afgelopen jaren bezig geweest met het ontwikkelen van inbreng-technieken. Zo heeft de combinatie Boskalis/Cofra een maakbaarheidsproef uitgevoerd bij Kesteren voor Waterschap Rivierenland waar het VZG in panelen trillend is ingebracht. In 2018 heeft Waterschap Rijn en IJssel maakbaarheidsproeven met een frezend ingebracht VZG uit laten voeren, zie uitgelicht. Vervolgens is er in 2019 een pilot uitgevoerd langs een deel van het Twentekanaal waarbij verder onderzoek is gedaan naar de doorontwikkeling van deze innovatie.



Figuur 9-5 Illustratie van de werking van het Verticaal Zanddicht Geotextiel [24]



Figuur 9-6 Gefreesde inbrengmethode VZG. Foto links: Van den Herik. Foto rechts: Van Kessel



Maakbaarheidsproeven VZG Twentekanaal - Frezend inbrengende technieken [V9]

Drie marktpartijen - Van Kessel, Van den Herik en Gebroeders de Koning - hebben meegedaan aan de maakbaarheidsproeven VZG Twentekanaal in opdracht van Waterschap Rijn en IJssel, waarbij het VZG frezend wordt ingebracht. Bij dit inbrengsysteem wordt een smalle sleuf in de grond gevreesd waarin een cassette wordt aangebracht. Het textiel wordt in een cassette ontvouwen. De ruimte tussen textiel en ondergrond wordt direct aangevuld met zand in het onderste deel waar het textiel aansluit op de watervoerende zandlaag en met zwelkleikorrels in het bovenste deel waar het scherm aansluit op de slecht doorlatende deklaag. Door deze werkwijze is versmering van

het VZG met klei uit de deklaag niet mogelijk. De machine voor het maken van de sleuf en het aanbrengen van het geotextiel moet op een vlak maaiveld staan. De benodigde werkruimte bedraagt ca. 10 meter.

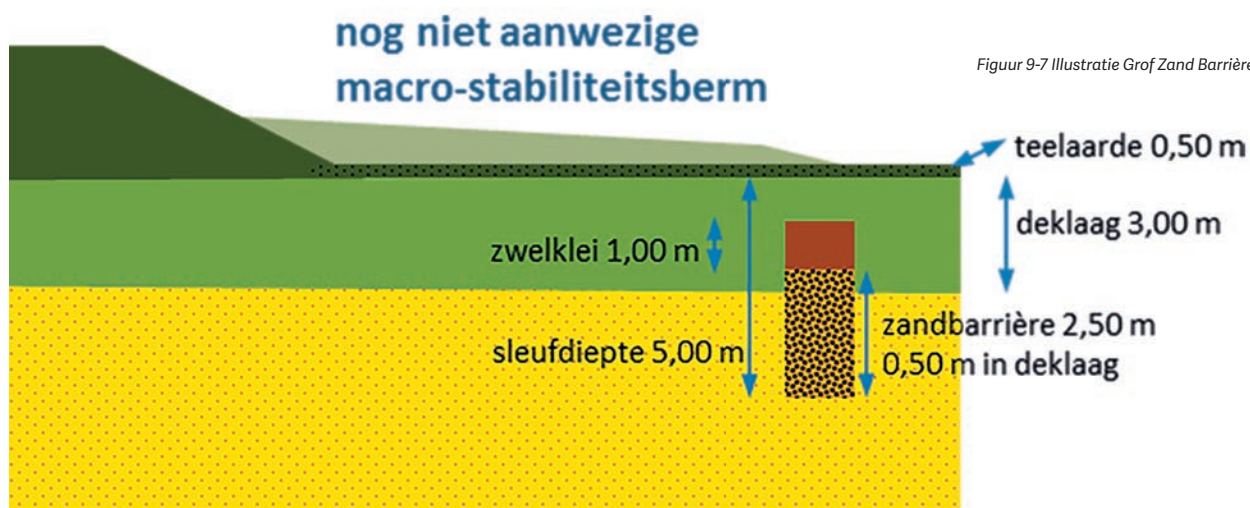
Eén van de partijen, Van den Herik, heeft vervolgens een pilot uitgevoerd op een strekking langs het Twentekanaal. Tijdens de pilot bij het Twentekanaal is een textiel over een hoogte van 3,5m aangebracht op de scheiding van deklaag en watervoerende zandlaag. De gefreesde inbrengmethode heeft momenteel een dieptebereik van zo'n 7m vanaf het maaiveldniveau tijdens het inbrengen. Door middel van een speciaal detectiesysteem wordt tijdens het inbrengen gecontroleerd of het

textiel daadwerkelijk tot de gewenste diepte in de grond is aangebracht. De pilotproef heeft laten zien dat het detectiesysteem goed werkt en dat de voorspelde productiesnelheid kan worden bereikt. Met de pilot is informatie verkregen over de wijze waarop een kwaliteitscontrole kan worden uitgevoerd tijdens de uitvoering. Verder geeft de pilot inzicht in de wijze waarop een VZG-oplossing kan aansluiten op een landhoofd van een brug, een gemaal of een ander kunstwerk dat het tracé van de waterkering kruist. Op het pilot tracé wordt, in opdracht van Waterschap Rijn en IJssel, een duurzaamheidsmonitoringsysteem ontwikkeld om de functionaliteit van het VZG op langere termijn testen.

9.6.2 Grof Zand Barrière

Voor het toepassen van de Grof Zand Barrière is ten tijde van het schrijven van voorliggend portaal nog geen richtlijn beschikbaar. Er wordt momenteel nog op laboratoriumschaal onderzoek verricht naar het gedrag van de GZB. Het GZB is ten tijde van het schrijven van het PipingPortaal nog niet in het veld getest.

Voor het gebruik van de grof zand barrière zal een pilot worden uitgevoerd binnen dijkversterking Gameren in opdracht van Waterschap Rivierenland.



GrofZandBarrière (GZB)

De Grof Zand Barrière wordt als een sleuf gegraven tot voldoende diepte in de pipinggevoelige zandlaag. De sleuf wordt gevuld met een grove zandsoort. Een zich ontwikkelende pipe zal stoppen bij het grove zand. In de deklaag wordt de sleuf gevuld met afdichtende klei. Momenteel wordt het gedrag en stabiliteit van het GZB in de Deltagoot bij Deltares onderzocht. De resultaten van dit onderzoek worden tweede helft 2019 verwacht. De techniek is eenvoudig, lijkt breed inzetbaar en lijkt kostenvoordelen op te kunnen leveren. Er is op dit moment nog geen ontwerp- of beoordelingsrichtlijn beschikbaar voor de toepassing van de maatregel.

De oplossingsrichting kan ten tijde van het schrijven van voorliggend portaal alleen in een pilot toegepast worden of in combinatie met beheersmaatregelen tijdens hoogwater. Eén van de aspecten die nog nader moet worden onderzocht is de lokale stabiliteit van het GZB ter plaatse van het contact met de gefluïdeerde pipe.

10. Dagelijks beheer na de realisatiefase

10.1 Datamanagement

Pipingonderzoek houdt niet op bij de realisatie van een dijkversterking. In hoofdstuk 2 is ingegaan op het belang van het langdurig observeren en registreren van wellen en kwel en het tijdig en systematisch meten van het gedrag van de stijghoogte in de ondergrond. Het blijven meten na realisatie van de versterkingsopgave is essentieel voor een volgende beoordelingsronde maar ook voor het adequaat reactief kunnen optreden bij een calamiteit. De toename van de hoeveelheid gegevens en de grotere behoefte aan de toegankelijkheid van gegevens vergen meer inspanning in het uniformeren en het traceerbaar maken van data. Juist tijdens het dagelijkse beheer zal data-management een belangrijke taak blijven zodat gegevens steeds weer makkelijk te gebruiken zijn. Initiatieven zoals Landelijke Registratie Zandmeevoerende Wellen helpen daarbij.

10.2 Kennisoverdracht tussen geo-disciplines

In hoofdstuk 3 tot en met 7 is aanbevolen om de lokale situatie en ervaringen expliciet in beeld te brengen voor wat betreft grondonderzoek, schematisering en berekeningen. Hiertoe is het concept van de 'geodriehoek' geïntroduceerd: Geotechniek, Geohydrologie, Geologie. Doel is om door middel van expertise uit de verschillende geo-werkvelden het conservatisme in de omgang met piping te verminderen. Dit vergt meer van de dijken-specialist: hij zal diverse andere specialismen tijdig moeten inschakelen en daarbij kennis over het pipingfenomeen en de te garanderen pipingveiligheid moeten overdragen. Dit vergt ook meer van de andere geo-disciplines. Zo zal de geohydroloog goed moeten aangeven waar zijn expertise wordt geïntroduceerd bij de interpretatie van metingen en modelkeuzen. Deze kennisoverdracht en kruisbestuiving houdt niet op bij de realisatie van een dijkversterking maar zal steeds dieper in het beheersysteem verankerd raken.

10.3 Onderzoeksverplichting bij uitstel maatregelen

In hoofdstuk 8 is het concept van de Beslisboom Piping beschreven. Er is aangegeven dat uitstel van een versterkingsmaatregel ook een keuze kan zijn indien de noodzaak tot een versterkingsopgave nog onvoldoende kan worden aangetoond vanwege het gebrek aan metingen en onderzoek. Het gaat hierbij in feite om het winnen van tijd om later een gedetailleerde pipinganalyse te kunnen uitvoeren volgens de nieuwe inzichten, op basis van metingen bij hoogwater en uitgewerkt met gevalideerde software. Uitstel kan geclaimd worden indien binnen afzienbare tijd een definitief oordeel kan worden gegeven met de dan beschikbare middelen. Uitstel brengt dus een onderzoeksverplichting met zich mee en deze zal ook duidelijke tijdhorizon moeten hebben. Hierover zullen afspraken moeten worden gemaakt: wanneer en door wie wordt dit onderzoek uitgevoerd? Het Piping Portaal geeft de kaders aan maar niet de organisatorische invulling.

10.4 Gedrag nieuwe pipingmaatregelen

Bij een hoogwatersituatie kan het gedrag van pipingmaatregelen pas echt worden geobserveerd. Ontwerp en Beoordelingsrichtlijnen voor filter- en drainageconstructies geven algemene aanwijzingen voor meet- en beheerprotocollen. Juist bij hoogwater zal er vaak een inspanning worden gevraagd. Daarnaast zal ook het lange termijngedrag moeten worden gemeten om de beoogde levensduur van het systeem te evalueren. Denk aan duurzaamheidsmetingen van de waterdoorlatendheid van een VZG.

10.5 Delen ervaringen

De trein van het HWBP-versterkingsprogramma rijdt in volle gang. Door POV Piping zijn vele handreikingen gedaan om te komen tot een uitgebalanceerd en verantwoord pipingontwerp waarbij juist rekening wordt gehouden met de dilemma's van tijd en budget. Projecten zullen eigen keuzen maken hoe met inzichten uit verkenningen om te gaan. Het is belangrijk om de ervaringen ook na het beëindigen van de POV Piping uit te blijven delen. Oproep voor alle dijkwerkers die midden in de project hectiek zitten: ga ook te rade bij de burens!



Slotwoord

De pov Piping is het initiatief van een zestal waterschappen die een praktische invulling wilden geven aan onderzoek, rekenen en maatregelen ten aanzien van piping. Het was daarmee de eerste pov voor het HWBP. De meeste verkenningen richtten zich dan ook op sober en doelmatig ontwerpen van de op-stapel-staande HWBP dijkversterkingsopgaven. De grootste winst wordt behaald in de fasen voorafgaand aan de realisatie: beoordelen en ontwerpen. Verantwoord minder meters versterken levert de grootste winst op!

Het PipingPortaal is een synthesedocument maar ook een aanvulling op bestaande technische richtlijnen. Het Portaal beschrijft hoe nieuwe inzichten vanuit de verkenningen met gebruik van de bestaande technische leidraden kunnen worden toegepast. Het Portaal kan dus prima naast het bestaande instrumentarium gebruikt worden.

Met dit document draagt de pov Piping ook een strategie uit. Deze strategie is in vele pov Piping bijeenkomsten vertolkt door het projectteam van de pov Piping en alle dijkwerkers die een bijdrage aan de pov Piping hebben geleverd. Deze strategie is geleidelijk tot stand gekomen via de bijeenkomsten, interviews en samenwerking tussen alle betrokken dijkwerkers over de afgelopen 6 jaar en is daarmee breed gedragen.

Dank aan een ieder die hieraan een bijdrage heeft geleverd.

pov 
Piping

**DJK
WERKERS**

11. Literatuurlijst

11.1 Algemeen

- [1] Achtergrondrapport WBI. Piping bij dijken. Deltares, 2017.
- [2] Anisotropie in doorlatendheid - Een literatuuronderzoek naar anisotropie in doorlatendheid en de effecten hiervan op piping. Deltares, augustus 2018.
- [3] Consequentieanalyse pov Piping, pov Piping, 2019.
- [4] Dijkdoorbraakprocessen. Deltares, 2002.
- [5] Evaluation of Dutch backward erosion piping models and a future perspective, 25th Meeting of the European Working Group on Internal Erosion. V.M. van Beek & G.J.C.M. Hoffmans, Delft, September 2017.
- [6] Fenomenologische beschrijving. Faalmechanismen WTI. Deltares, 2016.
- [7] Geotechnical Risk Management Geosysta Short Courses, mei 2017.
- [8] Gevoeligheidsanalyse Piping Pannerden-Kandia en 's Gravenwaard. Lievense, Witteveen+Bos en Antea Group, november 2018.
- [9] Gevoeligheidsanalyse Piping Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis. Lievense, Witteveen+Bos en Antea Group, januari 2019.
- [10] Gevoeligheidsanalyse Piping Zaltbommel en Nijmegen. Waterschap Rivierenland en Arcadis, maart 2019.
- [11] Haalbaarheidsstudie Geofysische Karteringstechnieken, I. Ritsema, S. Bakkenist, W.S. Zomer, juni 2018.
- [12] Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS. Deltares, 2015.
- [13] Handleiding ontwerpen met overstromingskansen (Ontwerp-instrumentarium OI2014v4). Ministerie van Infrastructuur en Milieu, februari 2017.
- [14] Handelingsperspectief Geotechnisch Onderzoek, Opzetten en uitvoeren van risicogestuurd geotechnisch onderzoek voor HWBP projecten, versie 1.0. Hoogwaterbeschermingsprogramma, september 2017.
- [15] Handleiding voor het opstellen van een monitorings-plan t.b.v. piping, versie 2. Stichting FloodControl IJkdijk, 1221356-GEO-0010, juni 2017.
- [16] Handleiding Innovaties Waterkeringen. Groene versie. Rijkswaterstaat, 2013.
- [17] Handleiding Voorland, pov Voorlanden, april 2019.
- [18] Infraroodmetingen bij Dijken – Haalbaarheidsstudie voor de pov Piping. Dijkmonitoring Nederland, december 2017.
- [19] International Levee Handbook. CIRIA publicatie C73. CIRIA, 2013.
- [20] Monitoringsplan registratie van zandmeevoerende wellen. N. van Veen, M van Woerden, B. Van Meekeren, Concept, november 2018.
- [21] Omgaan met piping. pov Piping. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Deltares, Blueland, november 2015.
- [22] Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen. Rijkswaterstaat-WVL, Deltares, maart 2012 – juli 2013.
- [23] Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn DMC, J. G. Rinsema, C. K. E. ter Brake, H. J. Bos, H. Wiering, R. D. Rothuizen, maart 2018.
- [24] Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel. Waterschap Rivierenland pov Piping, groene versie, 14 juni 2017.
- [25] Optreden van piping in getijdenafzettingen, Scherper toetsen voor piping bij dijken, bijlage B van Schematiseringshandreiking WBI2017. RWS WVL, januari 2017.
- [26] Piping in the Maasvallei; A possibility or far-fetched scenario? Master Thesis Delft Technical University, P.G. van der Hulst, februari 2017.
- [27] Piping – Realiteit of rekenfout. ENW, januari 2010.
- [28] pov Drainagetechnieken. pov Macrostabieliteit en pov Piping, definitief, mei 2018.
- [29] Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage III Sterkte en veiligheid (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium WBI2017). Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017.
- [30] Regressieanalyse en reliability updating - Memo voor gedachten-vorming. Ruben Jongejans, januari 2019.
- [31] Richtlijn risicogestuurd grondonderzoek van planfase tot realisatie. CUR/Geo-impuls 247, ISBN978-903760534-1, 2013.
- [32] Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk WBI 2017. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, januari 2017.
- [33] Schematiseringshandleiding piping WBI 2017. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, januari 2017.
- [34] Technisch Rapport Actuele Sterkte, Onderzoeksrapport voor de bepaling van de actuele sterkte van rivierdijken. Grondmechanica Delft, TAW, juni 1996.
- [35] Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren. ENW, 2012.
- [36] Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. ENW, 2004.
- [37] Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen. TAW, 1999.
- [38] Technisch Rapport voor de controle op het mechanisme piping bij rivierdijken. Calle, E.O.F. Weijers J.B., 1994.
- [39] Toelichting Anisotropie en gelaagdheid. B.M. Berbee, G.R.P. van Goor. Fugro 2017.
- [40] Visie op meten en monitoren voor waterkeringen - Focus op geofysica en remote sensing. I. Ritsema, M. de Kleine, M. van der Meer, S. Bakkenist, K.J. Leuvenink. Februari 2019.
- [41] Werkwijzer piping bij dijken. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, november 2014.
- [42] Zebra's en damborden, Teun van Ooijen & Max van Dalen, 2012.
- [43] The Weakest Link. Spatial Variability in the Piping Failure Mechanism of Dikes. Wim Kanning, 2012.

11.2 Synthesedocumenten

- [S1] Synthesedocument Handreiking grondonderzoek voor piping. B. Berbee en F. Fennis, 2019.
- [S2] Synthesedocument Handreiking meetnetten grondwatermonitoring voor piping. R. van Montfort, 2019.

11.3 Verkenningen pov Piping

- [V1] Intredeweerstand. Waterschap Rijn en IJssel en Arcadis, 21 juli 2017.
- [V2] pov Piping 'Proeftuin Mastenbroek' – Hoofdrapport invloed van 'Dijk gsgiedenis' voorlanden en zandgrofheid op piping. Waterschap Groot Salland en Arcadis, januari 2017.
- [V3] pov Piping 'Pipingonderzoek Dijkkring 43, D70 en KD bepaling (Proeftuin IJzendoorn)' onderzoek naar de toepasbaarheid van de rekenregel van Sellmeijer 2011 ondersteund met veldwaarnemingen. Waterschap Rivierenland en Arcadis, 6 juni 2016.
- [V4] pov Piping regionale kwelstroom, Concept 02. Waterschap Vallei en Veluwe en Witteveen en Bos, 22 januari 2016.
- [V5] Duurzame monitoring: Handreiking voor een meetnet gerelateerd aan piping, versie 2. Waterschap Drentse en Overijsselse Delta en Deltares, A. Koelewijn, augustus 2017.
- [V6]
 - A] Acceptatie bestaande drainagesystemen als anti piping maatregel. RWS, HDSR, Deltares, onder verantwoordelijk van de programmamanager van de pov Piping.
 - B] Ontwikkeling Quick-scan drainagetool. RWS, WSRL, HDSR, Witteveen en Bos.
 - C] Handreiking Drainagesysteem in de verkenning (pov Piping, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Witteveen & Bos, RPS, 17 januari 2017.
- [V7] Doorlatendheden en HPT sondering. Fugro, Waterschap AA en Maas, Deltares, 2016.
- [V8] Onderzoek bij zandmeevoerende wellen. Waterschap Rivierenland, Acacia Water (opgenomen in [V16A])
- [V9] Live dijk Willemspolder. Waterschap Rivierenland, stichting Flood control.
- [V10] Werkgroep Afwegingsmethodiek voor het afleiden van maatregelen voor wat betreft anti piping maatregelen Werkgroep. De projectgroep Piping, Stowa, Stichting Flood control.
- [V11] B] Werkgroep Betere onderbouwing veiligheidsoordeel. De projectgroep Piping; Waterschappen, Rijk, WTI, Expertteam, Stowa, Deltares, HKV.
- [V12] DMC. Waterschap Vallei en Veluwe, Landindustrie, Volker Wessels telecom, Stichting IJkdijk.
- [V13] Ontsluiten van innovatie uit de markt. Aantal Waterschappen, Taskforce, Deltatechnologie, Stowa, Deltares.
 - A] Infrarood. pov-P, BZIM (Wouter Zomer), DMN (Onne Rosingh), Deltares (Andre Koelewijn).
 - B] Onverzadigd Stochastisch rekenen. pov-P, State of the Art Engineer.
 - C] Geofysische karteringstechnieken. pov-P, BZIM (Wouter Zomer), DMN (Onne Rosingh), Deltares (Andre Koelewijn).
- [V14] Waterontspanners.
- [V15] Effect tijdsafhankelijkheid op stijghoogte bij getijdewateren. Waterschap Scheldestromen.
- [V16]
 - A] Monitoring zandmeevoerende wellen; is een verdiepend onderzoek n.a.v. verkenning 8. Waterschap Rivierenland; Acacia Water.
 - B] Registratie van zandmeevoerende wellen. WSRL, Waterschapshuis, Informatiehuis Water.
- [V17] Piping maatregelen en RO in gebiedsgerichte aanpak. Waterschap Groot Salland, Provincie Overijssel.
- [V18] Leem en grind. Waterschap Peel en Maasvallei en Arcadis.
- [V19] Ontwerp en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel. Waterschap Rivierenland.
- [V20] Heterogeniteit. Arcadis, Fugro, Deltares.
- [V21] Noordelijke Randmeerdijk. Waterschap Vallei en Veluwe en Witteveen en Bos.



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

Onderwerp: Synthesedocument POV-Piping 'PipingPortaal'
Datum: 31 maart 2020
Bijlagen:
Afschrift aan: DGWB, Heij,
Van der Veen,
Weijers, de Jong

Ons kenmerk: 20-03
Uw kenmerk: 20191125646/2019115759
Contactpersoon: ir. M. Hazelhoff
Functie: Coördinator ENW
E-mail: marieke.hazelhoff@rws.nl
Telefoon: 06-46935746

Geacht College,

Sinds 2014 werkt de POV Piping aan beter inzicht krijgen in de scope van de versterkingsopgave ten aanzien van het mechanisme piping. Daartoe heeft de POV Piping innovatieve methoden voor onderzoek, beoordeling en verbetering onderzocht en gestimuleerd. Een en ander heeft zijn beslag gekregen in circa 24 deelprojecten of verkenningen en diverse advies- en begeleidingsgroepen. Het *PipingPortaal* is het synthesedocument waarin de bevindingen uit de verkenningen worden gepresenteerd. Het geeft aan hoe de opbrengsten van de verkenningen in de praktijk van beoordelen en ontwerpen kunnen worden toegepast als aanvulling op de bestaande technische leidraden.

Het PipingPortaal is zelfstandig leesbaar met verwijzingen naar brondocumenten. Belangrijke documenten die parallel gebruikt moeten worden zijn bijvoorbeeld de *Schematiseringshandleiding piping* horend bij het WBI2017, het OI2014 en het *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Het PipingPortaal voegt een aantal nieuwe zaken toe, zoals de Werkplaats, een betere beschrijving van de processtappen en nieuwe onderzoekstechnieken. Het PipingPortaal moet een levend document zijn waarin nieuwe kennis een plek kan krijgen.

In uw brief met kenmerk 20191125646/2019115759 vraagt u het ENW advies uit te brengen over het PipingPortaal.

Het synthesedocument PipingPortaal bestaat uit verschillende onderdelen. Sommige delen zijn afgerond en kunnen de instemming van het ENW krijgen, maar het bevat ook onvoltooide onderzoeken en suggesties. Het ENW is daarom van mening dat het over het synthesedocument in zijn geheel geen advies kan uitbrengen, omdat het daarmee ook een advies uitbrengt over de onderliggende onderdelen.

Dit besluit is op 24 januari 2020 in een gesprek tussen de POV Piping en het ENW toegelicht. Het ENW heeft tijdens dit gesprek meegedacht over de wijze waarop de goede aanbevelingen voor vervolgonderzoek in het PipingPortaal verder kunnen worden geholpen en hoe kan worden gewerkt aan het behouden van de aandacht voor het mechanisme, het opgebouwde netwerk en de kennis.

Wij hopen u voldoende te hebben geïnformeerd.

Hoogachtend,

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

COLOFON

COPYRIGHT

Digitale verspreiding in ongewijzigde vorm is toegestaan.

AUTEURS PIPINGPORTAAL

Albert Wiggers, Hans Niemeijer, Monique Sanders en Michel Tonneijck

MET BIJDRAGEN VAN

Vele waterschappen, Rijkswaterstaat, het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, diverse ingenieurbureaus, kennisinstituten, marktpartijen en universiteiten.

PROJECTTEAM POV-PIPING

Henk Weijers	Hoogheemraadschap Rijnland (projectmanager 2016-heden)
Hans Niemeijer	Arcadis (technisch manager)
Albert Wiggers	RHDHV (technisch manager)
Joep Schreurs	Waterschap Rivierenland (manager projectbeheersing)
Leonie de Jong	Waterschap Rivierenland (secretaris en omgevingsmanager)

PROJECTGROEP POV-PIPING

Bert Koster	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Laura Taal	Waterschap Rivierenland
Kees Jan Leuvenink	Waterschap Aa en Maas
Hans van der Sande	Waterschap Scheldestromen
Leo van Nieuwenhuijzen	Waterschap Rijn en IJssel
Paul Nijenhuis	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Joost Borgers	Waterschap Vallei en Veluwe
Jan Jaap Heerema	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Koos Poot	Ministerie van I&W, Directoraat Generaal Water en Bodem
Huub de Bruijn	Hoogwaterbeschermingsprogramma
Bart Pastor	Hoogwaterbeschermingsprogramma

STUURGROEP POV-PIPING

Jaap van der Veen	Waterschap Zuiderzeeland (gedelegeerd opdrachtgever)
Roelof Bleker	Waterschap Rivierland (voorzitter tot 2018)
Mattie Busch	Ministerie van I&W, Directoraat Generaal Water en Bodem
Herman Dijk (<i>in memoriam</i>)	Waterschap Drents Overijsselse Delta (voorzitter 2018-2019)
Patrick Poelmann	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Bert de Smet	Waterschap Scheldestromen
Wiliam de Kleijn	Waterschap Aa en Maas
Frank Wissink	Waterschap Rijn en IJssel
Frans ter Maten	Waterschap Vallei en Veluwe

VORMGEVING

No Concept No Glory, Zwolle

pov-piping.nl

november 2019

Het Pipingportaal is opgesteld in het kader van de Projectoverstijgende Verkenning Piping, een innovatieproject van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Het Pipingportaal is het document waarin alle resultaten van de diverse verkenningen die zijn uitgevoerd in de periode 2014-2019 binnen de pov-Piping bijeen zijn gebracht.

Waterschap Rivierenland
Blomboogerd 1
4003 BX Tiel

POV Piping is onderdeel van het
Hoogwaterbeschermingsprogramma

