


POV piping regionale kwelstroom
theoretische beschrijving



POV piping regionale kwelstroom

theoretische beschrijving

referentie	projectcode	status
AP539-7/15-006.500	AP539-7	definitief
projectleider	projectdirecteur	datum
ir. P.E.M. Schoonen	ir. H.J.M.A. Mols	17 april 2015

autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	ir. P.E.M. Schoonen	

INHOUDSOPGAVE	blz.
1. INLEIDING	1
1.1. Aanleiding	1
1.2. Kader	2
1.3. Doel	2
1.4. Onderzoeksopzet POV Piping Regionale kwelstroom	3
1.5. Begripsomschrijving piping	4
1.5.1. Piping gedefinieerd als terugschrijdende erosie	4
1.5.2. Verschillende fasen bij het ontstaan van opbarsten en piping bij een dijk	4
1.5.3. Relevante ontwikkelingen: SBW-onderzoek piping	6
1.5.4. Relevante ontwikkelingen: POV piping	6
1.6. Begripsomschrijving regionale kwelstroom	7
1.7. Leeswijzer	9
2. HYPOTHESE 1: KLASSIEKE PIPING EN STROOMRICHTING	11
2.1. Analyse hypothese	11
2.2. Theoretische achtergrond	11
2.2.1. Stijghoogte bij grenspotentiaal	11
2.2.2. Pipe-vorming	13
2.3. Modelkader	15
2.3.1. Analytisch	15
2.3.2. Numeriek	15
3. HYPOTHESE 2: INTERACTIE KWELDRUK RIVIER EN ACHTERLAND	17
3.1. Analyse hypothese	17
3.2. Theoretische achtergrond	18
3.2.1. Grenspotentiaal	18
3.2.2. Grondwaterpotentiaal	19
3.2.3. Tijdsafhankelijkheid grondwaterpotentiaal	19
3.2.4. Optreden van opbarsten	21
3.3. Modelkader	21
3.3.1. Analytisch: Opbarstpotentiaal	21
3.3.2. Numeriek: Grondwaterpotentiaal	21
4. HYPOTHESE 3: EROSIEPATROON BIJ ALZIJDIGE TOESTROMING	23
4.1. Analyse hypothese	23
4.2. Theoretische achtergrond	24
4.2.1. Model van Sellmeijer [ref. 10.]	24
4.2.2. Aangepaste model van Sellmeijer [ref. 10.]	25
4.2.3. Toepassing model van Sellmeijer	27
4.2.4. Invloed dimensies opbarstkanaal	27
4.2.5. Invloed op verhang/potentieelverschil	28
4.2.6. Meerlaagsmodel	29
4.3. Modelkader	29
4.3.1. Analytisch	29
4.3.2. Numeriek	29
5. HYPOTHESE 4: TOEPASBAARHEID THEORIE OP GREBBEDIJK	31
5.1. Omschrijving situatie	31
5.2. Uitgevoerd onderzoek	32
5.2.1. Veiligheid Nederland in Kaart	32

5.2.2.	Veldonderzoek Blauwe Kamer	32
5.3.	Uit te voeren onderzoek	32
5.4.	Modelonderzoek	33
5.4.1.	Analytisch	33
5.4.2.	Numeriek	33
6.	REFERENTIES	35
	laatste bladzijde	35
	BIJLAGEN	aantal blz.
I	Concept monitoringsplan Grebbedijk	5

1. INLEIDING

1.1. Aanleiding

Uit onderzoek is gebleken dat de bestaande toetsregels voor piping het mechanisme onderschatten. Zandmeevoerende wellen treden in sommige gevallen op onder condities die volgens de huidige toetsystematiek niet tot zandtransport kan leiden. Eén van die locaties is de Grebbedijk, onderdeel van dijkkring 45, waarbij in 2011 en 2012 zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd bij waterstanden ruim onder het maatgevend hoogwater. Vanuit de projectoverstijgende verkenning (POV) piping wordt de vraag gesteld of deze zandmeevoerende wellen per definitie een voorbode zijn van het faalmechanisme piping, of dat ze in sommige gevallen ook op kunnen treden als gevolg van andere mechanismen en daarmee niet noodzakelijkerwijs tot een instabiliteit van de waterkering leiden.

Bij de Grebbedijk lopen naar verwachting de kwelstromen niet enkel vanuit de rivier naar het achterland. De hoge gronden van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug leiden mogelijk tot een regionale kweldruk in de polder die de stroming vanuit de rivier kan beïnvloeden. Een globale kwalitatieve beschrijving van de invloed van deze aanvullende kwelstroom vanuit het achterland is gegeven door het Waterschap Vallei en Veluwe. Zij stellen een viertal hypothesen over de mogelijke invloed van de regionale kwelstroom op verschillende schalen:

1. **hypothese 1 (op kilometer niveau):** Piping kan volgens de 'klassieke' schematisatie plaatsvinden in lagen waar één kwelstroom aanwezig is (eenrichtingsverkeer), maar niet in combinatie met een regionale tegenstroom. Dit is het geval bij hogere grondwaterstanden die draineren richting rivier;
2. **hypothese 2 (op 10-meter niveau):** De verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaald de mogelijke opbarstlocatie, stroomrichting en stroomsnelheid richting de zandmeevoerende wel. Alleen bij een scheve verhouding (kleine regionale kweldruk) kan 'klassieke' piping optreden;
3. **hypothese 3 (op meter niveau):** Het zand onder de deklaag wordt door de kwelwaterstroom slechts plaatselijk rondom het opbarstkanaal meegevoerd, waarna de stroomsnelheid vervolgens in 3D snel afneemt. Onder het diepste punt van het opbarstkanaal neemt het zandtransport aan de buitenranden van de met watergevulde holle ruimte snel af vanwege de vergroting van het geërodeerd oppervlak;
4. **hypothese 4 (Grebbedijk):** Door de regionale kweldruk zal het water bij de wellen achter de Grebbedijk in x en y-richting van alle kanten worden aangevoerd. Uit de z-richting vanuit de grovere zandlaag, met de hoogste k_D -waarde, zal de wateraanvoer het hoogst zijn, maar zandverplaatsing zal nauwelijks plaatsvinden door de korrelgrootte. Het zand dat uit de wellen is gekomen komt van rondom het opbarstkanaal. Van piping is hier geen sprake, wel van lokaal zandtransport.

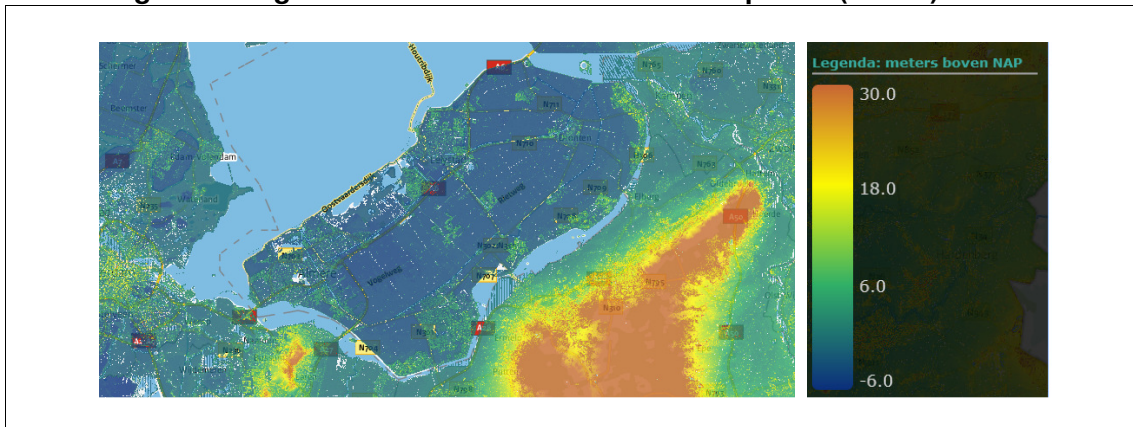
De hypothesen worden onderbouwd in het vervolg van het project. Als het lukt om hypothese 3 aan te tonen, zowel analytisch, numeriek als in een proefopstelling, kan dit een uitkomst bieden voor meerdere waterkeringen langs verschillende wateren, die zandmeevoerende wellen hebben. In Nederland bij bijvoorbeeld het Julianakanaal, maar ook in bijvoorbeeld Jakarta en Baku zijn grondwatermodellen opgezet waarbij aansluitende wateren grote invloed bleken te hebben op de waterspanningen in het watervoerende pakket.

Daarnaast zijn er situaties van een hoog achterland aan de ene kant van het water en een relatief diepe omvangrijke polder aan de andere kant. Een voorbeeld zijn de Randmeerdijken. Door de ligging van de Veluwe in het achterland en de diepe polders van de Flevopolder aan de andere kant van het water (Veluwemeer), is het principe van regionale kwel mogelijk ook hier van toepassing op de pipingbeschouwing, maar dan meewerkend naar

het achterland van de diepe polder, dus stroomsnelheid verhogend. Eenzelfde situatie is denkbaar aan de linkeroever van de Nederrijn onder invloed van de Veluwe

Het vergroten van specialistische kennis over waterkeringen en het verkleinen van het verbeteringsareaal zijn maatschappelijk belangrijke opgaven. In de toetsystematiek kan mogelijk rekening gehouden worden met regionale kweldruk als uit voorliggend onderzoek blijkt dat dit een gunstige werking heeft op het faalmechanisme piping. Dit zou niet alleen het verbeterareaal van piping inperken, het zal ook leiden tot een kleinere versterkingsopgave en dus tot lagere kosten.

Afbeelding 1.1. Hoogteverschil tussen Veluwe en Flevopolder (ahn.nl)



1.2. Kader

Het kader voor dit project is de POV Piping, onderdeel van het HWBP hoogwaterbeschermingsprogramma, dat als doel heeft het verbeterareaal en de versterkingsinspanning voor het probleem piping te verkleinen. Voor het verkleinen van het verbeterareaal wordt gezocht naar locatie-specifieke omstandigheden die nu in de bestaande toetsmethodiek buiten beschouwing blijven. Eén hiervan is de invloed van regionale kweldruk. Indien dit fenomeen kan worden aangetoond en het effect op piping kan worden gekwantificeerd, is de verwachting dat het totaal te verbeteren areaal afneemt.

Naast het onderzoek naar regionale kweldruk worden er 13 andere verkenningen uitgevoerd in het kader van de POV piping. Het waterschap Vallei en Veluwe trekt, naast dit onderzoek, ook de verkenning naar Dike Monitoring Conditioning (DMC) buizen.

1.3. Doel

Het doel van de POV piping Regionale kwelstroom en de case Grebbedijk is de praktische toepassing te onderzoeken van de verbeterde pipingregel van Sellmeijer in situaties met regionale kweldruk. Hierbij wordt gekeken naar de theoretische uitwerking van deze situatie, het opstellen van werkbare toetsregels en de validatie van deze methode door middel van een casus onderzoek bij de Grebbedijk. Voor het behalen van deze doelstelling zijn de volgende punten cruciaal:

- aantoonbaarheid: onderbouwen dan wel ontkrachten van de hypothesen;
- robuustheid en toepasbaarheid van methode en stappenplan;
- acceptatie en adaptatie door waterkeringbeheerders, STOWA en het ENW.

Het doel van het voorliggend rapport is het bundelen van relevante kennis en literatuur die vanuit de huidige kennis het fundament vormen voor de hypothesen.

1.4. Onderzoekopzet POV Piping Regionale kweldroom

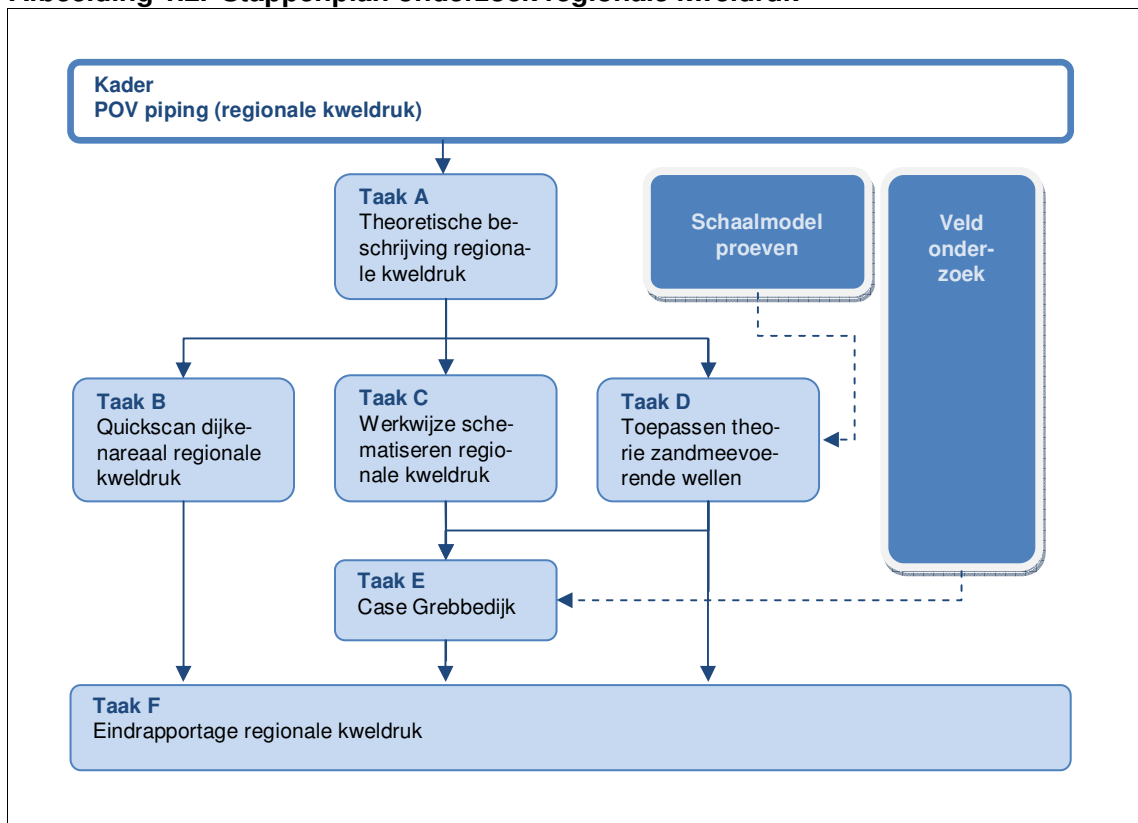
Door de onderstaande onderzoeksvragen te beantwoorden kan de projectdoelstelling worden behaald:

- (A) Hoe beïnvloedt regionale kweldruk het proces van piping? Uitgangspunt hiervoor zijn de vier hypothesen die geformuleerd zijn in paragraaf 1.1;
- (B) Welke delen van het areaal aan primaire keringen staan mogelijk onder invloed van regionale kweldruk?
- (C1) Wat is de werkwijze voor de numerieke geohydrologische modellering om het effect van regionale kweldruk aantoonbaar te maken?
- (C2) Welke stappen zijn nodig om de veiligheid van de waterkering te toetsen, rekening houdend met regionale kweldruk?
- (D) Hoe kan de theorie uit het (onderzoeks)rapport Zandmeevoerende wellen worden vertaald naar een theorie waarin regionale kweldruk mede in beschouwing wordt genomen?
- (E) Voor de casus van de Grebbedijk: kan het positief effect van regionale kweldruk worden aangetoond aan de hand van modellering en aanvullende veldgegevens (peilbuismetingen)?

Stappenplan

Om op deze onderzoeksvragen een antwoord te formuleren doorlopen we in het onderzoek naar Regionale kweldroom de stappen in het stappenplan zoals aangegeven in Afbeelding 1.2.

Afbeelding 1.2. Stappenplan onderzoek regionale kweldruk



1.5. Begripsomschrijving piping

1.5.1. Piping gedefinieerd als terugschrijdende erosie

Piping (ook onderloopsheid genoemd) is gedefinieerd als het ontstaan van holle ruimte onder een waterkering (dijk, dam of kunstwerk), ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd [ref. 5.].

Bij een zandvoerende kwelstroom kunnen twee belangrijke mechanismen worden onderscheiden, namelijk terugschrijdende erosie en suffosie. Uitgaande van homogeen zand, bepaalt de mate van uniformiteit welk van de twee mechanismen optreedt. Vrijwel alle in Nederland voorkomende watervoerende zandlagen onder primaire waterkeringen bestaan uit zand waar suffosie geen rol speelt. In Nederland wordt de term 'piping' als synoniem voor terugschrijdende erosie gebruikt, omdat vooral dat pipingmechanisme voor Nederland van belang is. In voorliggende rapportage wordt daarom met het begrip 'piping' het mechanisme terugschrijdende erosie bedoeld.

Vershil terugschrijdende erosie en suffosie

Suffosie betreft het wegspoelen van de fijnere fractie tussen de grovere fractie. De grovere fractie houdt, althans in eerste instantie, het korrelskelet in stand. Door suffosie ontstaat dus niet direct een hol kanaal, maar eerst een soort stabiele gatenkaas.

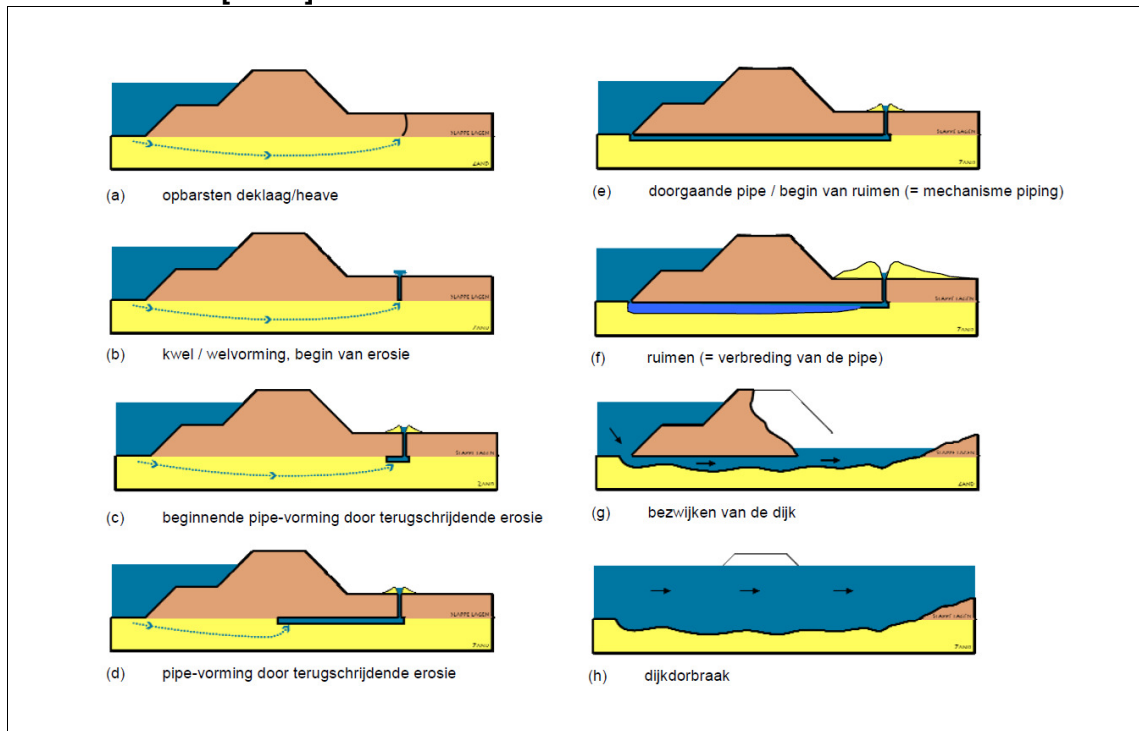
Bij terugschrijdende erosie wordt het gehele korrelskelet verstoord door het wegspoelen van korrels. Dit proces begint aan de benedenstroomse kant en zet zich voort tegen de stromingsrichting in. Hierdoor wordt een lege ruimte (kanaal, ook wel 'pipe' genoemd) gevormd.

1.5.2. Verschillende fasen bij het ontstaan van opbarsten en piping bij een dijk

Afbeelding 1.3 laat de verschillende fasen zien bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie van de ondergrondopbouw bij een dijk. Aan de linkerkant van de afbeelding zijn het ontstaan van het opbarstkanaal en de verschillende stadia van de vorming van de pipe weergegeven. Wanneer de pipe 'kortsluiting' maakt tussen het buitenwater en de polder is er sprake van een doorgaande pipe en is geen evenwicht meer mogelijk. Dit is weergegeven in de rechterzijde van de afbeelding. In dit geval wordt de waterkering beschouwd als gefaald. Een nadere omschrijving van de stappen in het proces is opgenomen in [ref. 5.].

De voorliggende theoretische beschrijving van de regionale kwelstroom zal zich alleen focussen op de fasen (a) tot en met (d) in afbeelding 1.3.

Afbeelding 1.3. Verschillende fasen bij het ontstaan van piping bij een in Nederland veel voorkomende situatie van de ondergrondopbouw bij een dijk [ref. 5.]



In Afbeelding 1.3 is de deklaag geschematiseerd als een laag met een constante dikte (in het achterland). Variaties in de dikte en soortelijk gewicht van de deklaag hebben een grote invloed op de locatie waar opbarsten plaatsvindt.

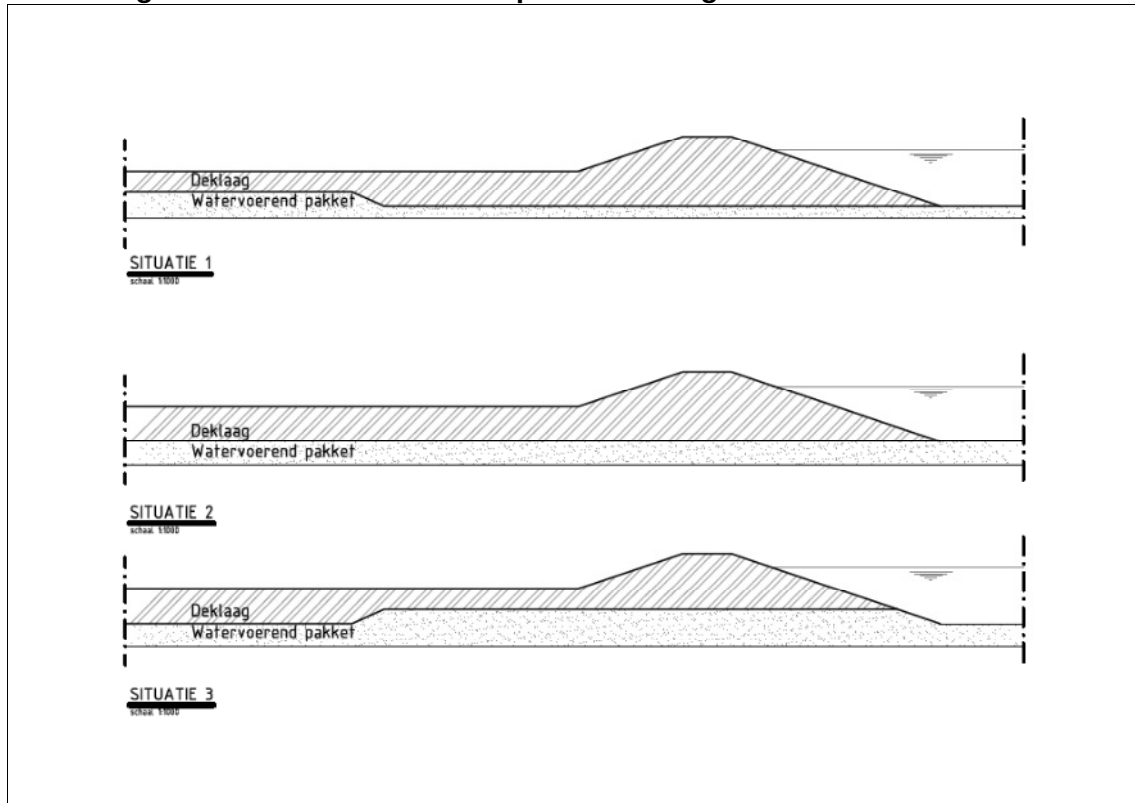
Op een locatie met een dikkere deklaag zal minder snel opbarsten plaatsvinden dan op een locatie met een dunnere deklaag, wanneer de druk aan de onderzijde van de deklaag gelijk is. Daarnaast speelt ook het volumiek gewicht van de deklaag mee in de balans tussen de druk onder de deklaag en gewicht van de deklaag.

Voor het bepalen van de opbarstlocatie zijn grofweg drie schematisaties denkbaar van de deklaag (Afbeelding 1.4):

1. een uniforme bodemopbouw;
2. een dikkere deklaag (of met hoog soortelijk gewicht) onder de dijk en tot een lengte L_{crit} vanaf het intreepunt in het achterland;
3. een dunnere deklaag (of met laag soortelijk gewicht) onder de dijk en tot een lengte L_{crit} vanaf het intreepunt in het achterland.

In werkelijkheid zal er geen sprong in de deklaagdikte aanwezig zijn, maar voor de gedachtegang in de toetsing zijn dit handige schematisaties.

Afbeelding 1.4. Schematisaties verloop dikte deklaag



1.5.3. Relevante ontwikkelingen: SBW-onderzoek piping

De Grebbedijk is in de derde toetsronde getoetst op het faalmechanisme piping. Uit deze toetsing volgde het toetsoordeel 'goed' [ref. 15.]. De toetsing op piping is uitgevoerd op de destijds vigerende regels zoals opgenomen in het Technisch rapport Zandmeevoerende wellen [ref. 7.]. Deze worden mogelijk aangepast naar aanleiding van de kennis die is en wordt verkregen binnen het onderzoeksprogramma Sterkte Belastingen Waterkeringen (SBW), onderdeel piping [ref. 4.]. Het uitgevoerde onderzoek heeft veel kennis opgeleverd en heeft onder andere geresulteerd in het Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (ORZW) [ref. 5.] en werkwijzer piping [ref. 9.].

1.5.4. Relevante ontwikkelingen: POV piping

Op basis van de rekenregels zoals zijn opgenomen in het ORZW wordt voorzien dat er in de toekomst meer dijken moeten worden afgekeurd op piping. Piping is bovendien met veel onzekerheden omgeven. Aanvullend onderzoek naar de omvang van het probleem is daarom noodzakelijk. De projectoverstijgende verkenning geeft daaraan invulling en heeft als tweede doel om innovatieve en doelmatige oplossingen te vinden. In het kader van de POV piping zijn op dit moment 14 verkenningen gestart (zie onderstaande tabel).

Tabel 1.1. Verkenningen POV Piping

Nummer	Verkenning	Deelnemende organisatie
1	Intredeweerstand	Rijn en IJssel en Arcadis
2	Proeftuin Mastenbroek	Waterschap Groot Salland, Medusa, Alterra, Arcadis
3	Praktisch verzamelen van d_{70} en kD in relatie tot VNK2 en WTI2017	Waterschap Rivierenland, Arcadis

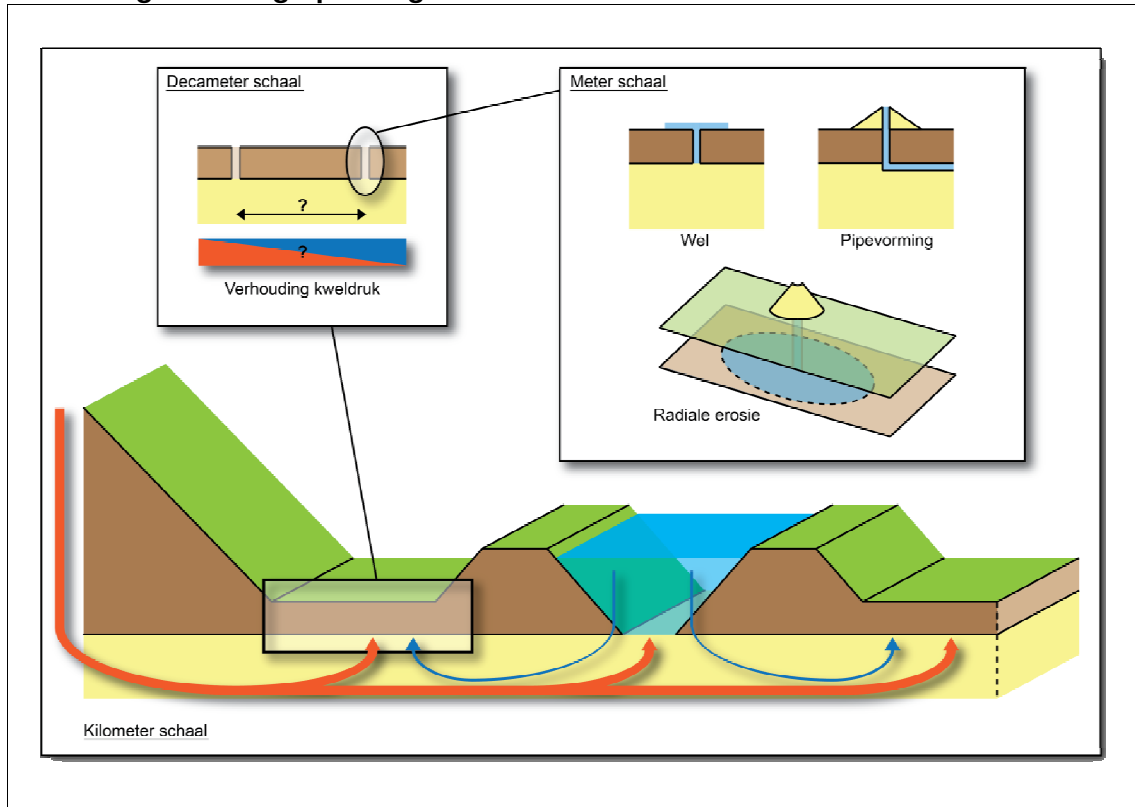
Nummer	Verkenning	Deelnemende organisatie
4	Positieve kwel: case Grebbedijk	Waterschap Vallei en Veluwe
5	Duurzaam monitoring en analyse van grond- en oppervlaktewater bij dijken.	Waterschap Groot Salland, TU Delft, Deltares
6	Acceptatie bestaande drainagesystemen als anti piping maatregel	RWS, Deltares
7	Toepassen van nieuwe sondeertechniek	Waterschap Aa en Maas, Fugro, Deltares
8	Onderzoek bij zandmeevoerende wellen	Waterschap Rivierenland, Acacia Water
9	Live dijk Willemspolder	Waterschap Rivierenland, Stichting IJkdijk
10	Afwegingsmethodiek voor het afleiden van maatregelen voor wat betreft anti piping maatregelen	De projectgroep Piping, Stowa, Stichting IJk dijk
11a	Werkwijzer piping	RWS, Fugro, Royal HaskoningDHV, Arcadis, Witteveen+Bos, en waterschappen
11b	Betere onderbouwing veiligheidsoordeel	De projectgroep Piping; Waterschappen, Rijk, WTI, Stowa, Deltares, HKV
12	DMC buizen	Waterschap Vallei en Veluwe, Landustrie, Volker Wessels telecom, Stichting IJkdijk
13	Ontsluiten van innovatie uit de markt	De Projectgroep piping, Taskforce Deltatechnologie, Stowa, Deltares
14	Waterontspanners als pipingmaatregel	Movares

Voor de theoretische uitwerking en het opstellen van een stappenplan voor regionale kwelstroom is afstemming relevant met de verkenningen 1, 8 en 11 relevant. Voor het uitwerken van de case Grebbedijk zijn mogelijk de verkenningen 3 en 7 relevant.

1.6. Begripsomschrijving regionale kwelstroom

Een regionale kwelstroom is gedefinieerd als een grondwaterstroming vanaf hooggelegen gronden, zoals de Grebbeberg en het Veluwemassief, in de richting van de rivier. De stroomrichting tijdens dagelijkse omstandigheden is door de regionale kwelstroom gericht naar de rivier. Dit is tegengesteld aan de richting van de kwelstroom in het geval van 'klassieke' piping, deze is namelijk tijdens hoogwater gericht van de rivier in de richting van het achterland.

Afbeelding 1.5. Infographic regionale kwelstroom



De invloed van de kwelstroom op het faalmechanisme piping wordt op drie niveaus beschouwd:

- op kilometerschaal: onderzocht wordt wat de invloed is van de regionale kwelstroom op de stroomrichting en de het ontstaan van pipes die de waterveiligheid kunnen beïnvloeden. Op deze schaal kan onderzocht worden welke zandmeevoerende wellen mogelijk invloed kunnen hebben op de waterkering. Hypothese 1 gaat verder in op dit schaalniveau;
- op decameterschaal: onderzocht wordt wat de invloed is van de combinatie van de regionale kwelstroom en de kwelstroom vanaf de rivier op de locatie(s) van de wellen. Uit dit onderzoek volgt de verwachte locatie van de wel en de zekerheid waarmee deze locatie kan worden vastgesteld. Hypothese 2 gaat verder in op dit schaalniveau;
- op meter schaal: wanneer een wel optreedt kan water van zowel de rivierzijde als de zijde van het achterland toestromen. Ook toestrooming vanuit de tweede, grovere zandlaag (z-richting) wordt hierin meegenomen. De vorm van de pipe kan door de toestroom van water vanuit alle richtingen beïnvloed worden. Uit dit onderzoek volgt de afstand waarbuiten een zandmeevoerende geen invloed kan hebben op de waterveiligheid. Op basis van deze afstand kunnen beheerders inschatten of maatregelen getroffen dienen te worden indien een zandmeevoerende wel wordt aangetroffen in het achterland. Hypothese 3 gaat verder in op dit schaalniveau.

De belangrijkste geohydrologische parameters zijn geselecteerd op basis van de relevante geohydrologische processen en ervaring. De invloed en gevoeligheid van de parameters worden binnen het project nader uitgewerkt. De parameters zijn hieronder beschreven, per punt is aangegeven wat het effect op de regionale kwelstroom en opbarstlocatie is:

- bodemopbouw, de dikte en lithologie (bodemtype):

- de dikte en verticale weerstand van de deklaag bepalen hoe de stijghoogte zich ontwikkelt richting de rivier. Een dunnere deklaag zal eerder opbarsten;
- de dikte en opbouw en doorlaatfactor van het watervoerende pakket, bepaalt onder andere de toestroming na opbarsten;
- regionale stijghoogte;
- oppervlaktewater (rivier en overige watergangen) vormt randvoorwaarde voor grondwaterstroming via:
 - waterstand, met name in de winter en MHW;
 - afmetingen;
 - intreeweerstand.

1.7. Leeswijzer

Per hypothese is in voorliggende rapportage geanalyseerd welke vragen beantwoord moeten worden om deze hypothese te bewijzen of deze juist te weerleggen. Ter beantwoording van de vragen is een theoretische achtergrond gegeven met verwijzingen naar de relevante literatuur.

2. HYPOTHESE 1: KLASSIEKE PIPING EN STROOMRICHTING

Hypothese

Piping kan volgens de 'klassieke' schematisatie plaatsvinden in lagen waar één kwelstroom aanwezig is (eenrichtingsverkeer), maar niet in combinatie met een regionale tegenstroom. Dit is het geval bij hogere grondwaterstanden die draineren richting rivier;

2.1. Analyse hypothese

In de hypothese wordt gesproken van de 'klassieke' schematisatie van de piping. Deze schematisatie betreft het optreden van de verschillende fasen zoals weergegeven in afbeelding 1.3:

1. opbarsten van de deklaag/heave;
2. kwel/welvorming: begin van de erosie;
3. beginnende pipe-vorming door terugschrijdende erosie *in de richting van de rivier*;
4. pipe-vorming door terugschrijdende erosie *in de richting van de rivier*.

In de fasen van de klassieke schematisatie worden de eerste twee fasen niet noemenswaardig beïnvloedt door de stroomrichting in het watervoerende pakket. Opbarsten en de stroming in het opbarstkanaal zijn alleen gerelateerd aan het verval over de deklaag [ref. ORZW] en het eigen gewicht van de deklaag.

De pipe-vorming (fase 3 en 4) kan worden beïnvloedt door de stroomrichting. De pipe-vorming wordt veroorzaakt door terugschrijdende erosie, dat wil zeggen erosie tegen de stroomrichting in. Bij hogere grondwaterstanden die draineren richting rivier, wordt verwacht dat de pipe daarom zal groeien richting het achterland. Hierdoor zal geen doorgaande pipe onder de waterkering kunnen ontstaan en zal de standzekerheid van de waterkering niet door piping in het geding komen.

Opgemerkt wordt dat de stroomrichting kan worden beïnvloedt ten gevolg van opbarsten. Het opbarstkanaal heeft een drainerende werking; de potentiaal in het watervoerende pakket is gelijk aan de opbarstpotentiaal. Indien de opbarstpotentiaal lager is dan het hoogwater aan de buitenzijde van de waterkering, kan mogelijk de stroomrichting onder de waterkering omdraaien, waardoor er alsnog een pipe kan ontstaan onder de waterkering. Hiermee is de locatie van de wel van belang voor de waterveiligheid, wat is beschreven in hypothese 2.

Vraagstellingen die beantwoord moeten worden om de hypothese te verifiëren zijn:

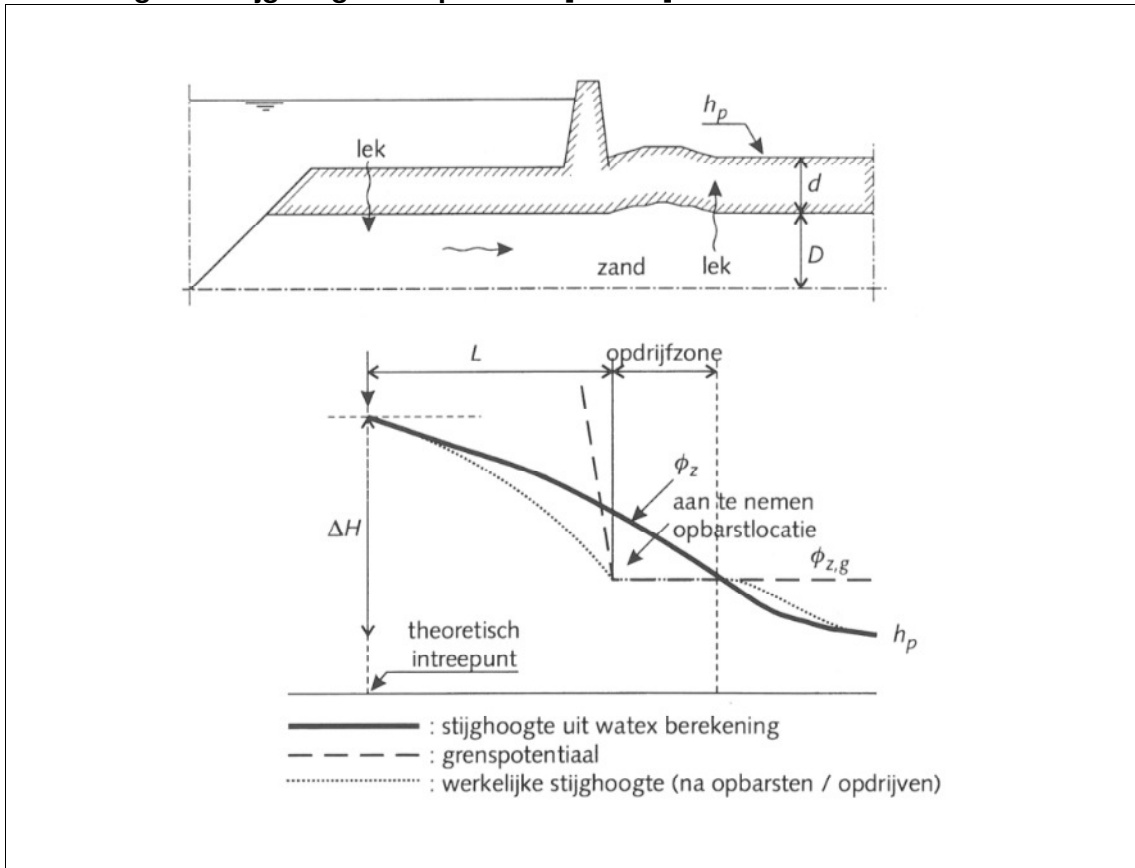
- indien er sprake is van opbarsten, kan dan met zekerheid worden gesteld wat de stroomrichting is?
- gegeven het optreden van opbarsten op een bepaalde locatie, wat zal de stroomrichting zijn (alleen vanaf hoge grond, alzijdig of alleen vanaf rivier?)

2.2. Theoretische achtergrond

2.2.1. Stijghoogte bij grenspotentiaal

De stijghoogte op de aangenomen opbarstlocatie zal gelijk zijn aan de grenspotentiaal [ref. 14.], zie afbeelding 2.1.

Afbeelding 2.1. Stijghoogte na opbarsten [ref. 14.]



De rekenregel voor de grenspotentiaal staat in paragraaf 5.2.2 van het Onderzoeksrapport Zandmeeverende wellen [ref. 5.] en luidt:

$$\Phi_{z,g} = h_p + d \frac{\gamma_{nat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Waarin:

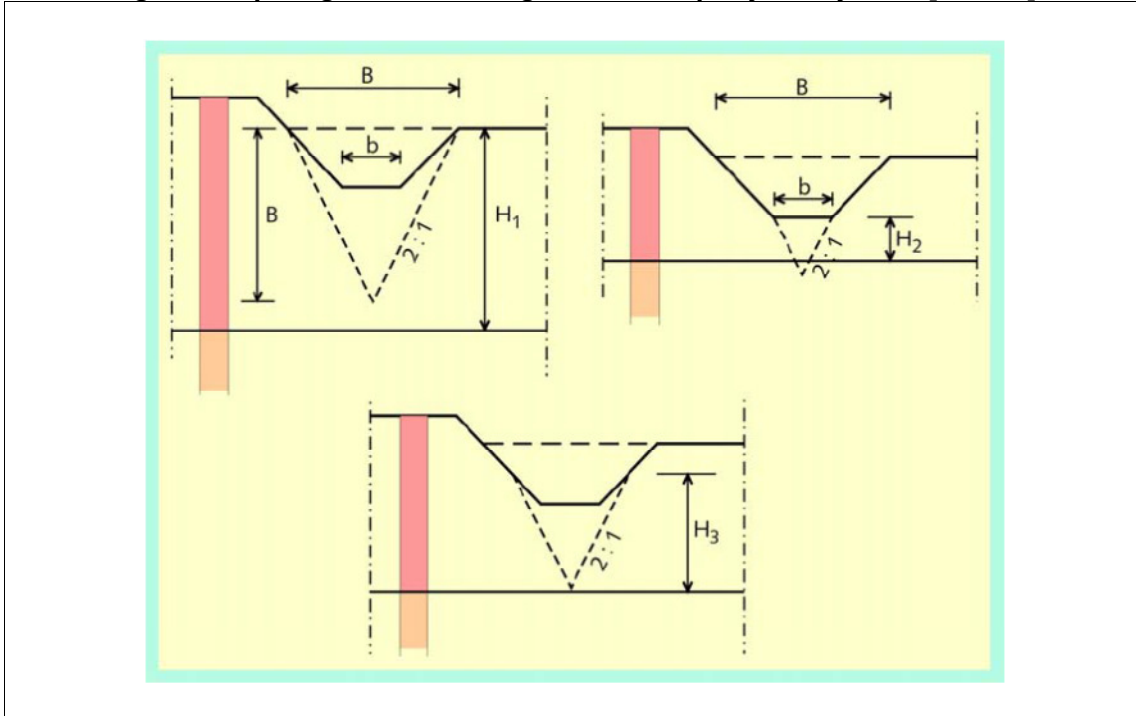
symbool	omschrijving	eenheid
$\Phi_{z,g}$	grenspotentiaal	[m]
h_p	polderpeil	[m+NAP]
d	dikte afdekkende laag	[m]
γ_{nat}	soortelijk gewicht van de afdekkende laag	[kN/m ³]
γ_w	soortelijk gewicht van water	[kN/m ³]

Bij berekening van de opbarstpotentiaal dient rekening gehouden te worden met aanwezigheid van teensloten [ref. 14.], zie afbeelding 2.2. De dikte van de deklaag wordt gereduceerd tot H_1 , H_2 of H_3 afhankelijk van de breedte en diepte van de sloot in relatie tot de dikte van de deklaag. In afbeelding 2.2 zijn de volgende definities gehanteerd:

symbool	omschrijving	eenheid
B	breedte van de sloot	[m]
b	bodembreedte van de sloot	[m]
H_1	de effectieve laagdikte die gehanteerd moet worden in de berekening van de grenspotentiaal in het geval het afsluitende lagenpakket dikker is dan de breedte van de sloot. Deze laagdikte is gelijk aan de totale laagdikte van het afsluitende lagen pakket.	[m]
H_2	de effectieve laagdikte die gehanteerd moet worden in de berekening van de grenspotenti-	[m]

symbool	omschrijving	eenheid
	aal in het geval het afsluitende lagenpakket onder de slootbodem dunner is dan de breedte van de slootbodem. Deze laagdikte is gelijk aan de totale laagdikte van het afsluitende lagenpakket onder de slootbodem.	
H_3	de effectieve laagdikte die gehanteerd wordt in alle overige gevallen, hierbij wordt geïnterpoleerd tussen H_1 en H_2 .	[m]

Afbeelding 2.2. Bepaling effectieve laagdikte voor opdrijven bij sloot [ref. 14.]



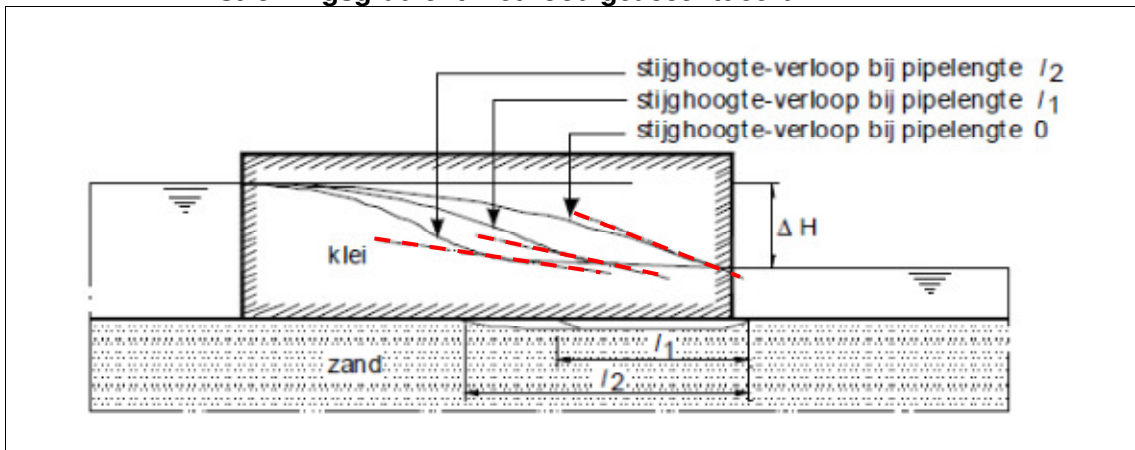
2.2.2. Pipe-vorming

In het geval van 'klassieke' piping zal bij een verval over de 'constructie' dat kleiner is dan het kritieke verval¹ door erosie een spleet ontstaan, die net zolang doorgroeit tot de met dit verval corresponderende spleetlengte is bereikt. De stromingsgradiënten zijn dan zodanig afgezwakt dat de zandkorrels op de rand van de spleet weerstand kunnen bieden aan de aanstroomkrachten [ref.10.] . Dit is weergegeven in afbeelding 2.3.

Wordt het verval opgevoerd, dan zal de spleet weer gaan groeien, tot een nieuw evenwicht wordt bereikt. Het erosieproces stopt, zolang het verval niet groter is dan het kritieke verval. Wordt het verval wel groter dan zal de spleet door blijven groeien, omdat het verval waarbij evenwicht mogelijk is kleiner is dan het aanwezige verval. De spleet groeit dan uit tot een open kanaaltje tussen boven- en benedenstroomse kant van de constructie; piping is daarmee een feit.

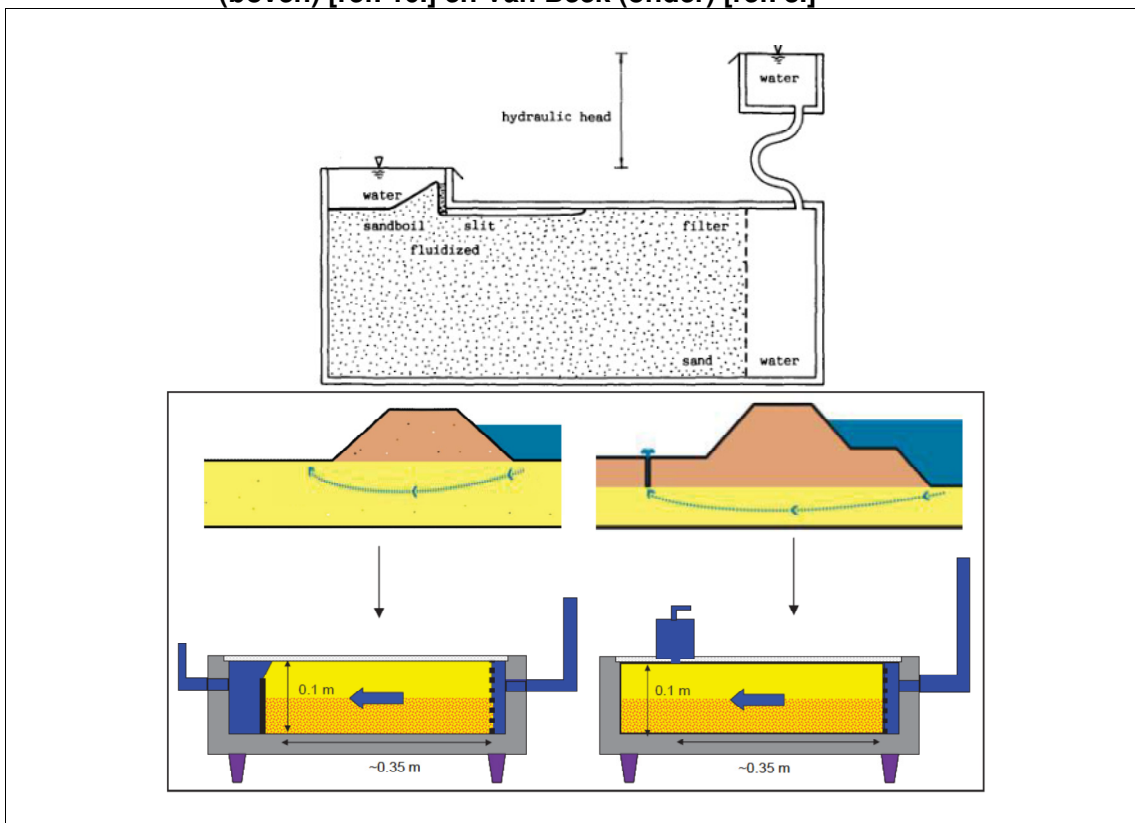
¹ Het kritieke verval is het verval waarbij nog juist evenwicht mogelijk is. Boven het kritieke verval is geen evenwicht mogelijk en zal de pipe zeer snel doorgroeien tot de bovenstroomse zijde is bereikt.

Afbeelding 2.3. Afzakken stromingsgradiënten bij ontstaan van een 'pipe' [ref. 5.], stromingsgradiënt met rood geaccentueerd



De groei van de pipe en de vorm daarvan is onderzocht in onder andere [ref. 10.], [ref. 1.] en [ref. 3.] door middel van het aanbrengen van een verval over een zandlaag opgesloten in een (plexi-)glazen container.

Afbeelding 2.4. Kleine schaal laboratorium onderzoek, toegepast door Sellmeijer (boven) [ref. 10.] en Van Beek (onder) [ref. 3.]



Het verloop van het piping-proces is op ware grootte getest in een proef met de IJkdijk [ref. 2.]. Hierbij is het proces van start van de vorming van pipes tot en met het falen van de waterkering doorlopen.

2.3. Modelkader

2.3.1. Analytisch

Grondwater stroomt van hoge potentiaal naar lage potentiaal (Wet van Darcy). De snelheid en bijgevolg het volume van grondwaterstroming wordt bepaald door de weerstand die het water in de ondergrond ondervindt. Door de ruimtelijke verdeling van watervoerende pakketten en de inhomogeniteit van ondergrondsamenstelling en geometrie zijn analytische oplossingen voor het bepalen van stromingsinteractie tussen regionale kweldruk en rivierwaterstanden niet mogelijk.

2.3.2. Numeriek

Voor het schematiseren van grondwaterstroming in een watervoerend pakket bestaan er twee en drie-dimensionale modellen. Daarnaast zijn er semi-driedimensionale modellen (2Dh) beschikbaar:

- **twee-dimensionale modellen** worden onder meer toegepast in een systeem van verticale vlakken waarbij de stroming binnen een vlak elke richting kan aannemen tussen horizontaal en verticaal, terwijl de stroming in elk verticaal vlak identiek is¹
- **drie-dimensionale modellen** zoals ModFlow vereisen een 'discretisatie' van het gehele stromingsdomein, waarbij het domein wordt onderverdeeld in kleinere elementen of cellen. Binnen elke cel hebben de bodemparameters een constante waarde, maar zij kunnen van cel tot cel variëren. De grondwaterstroming in een driedimensionaal model kan elke willekeurige richting aannemen¹;

Een overzicht van in Nederland veel toegepaste geohydrologische modellen is gegeven in Tabel 3.1.

Voor voorliggend vraagstuk is een driedimensionaal model meest aangewezen:

- beschikbaarheid: voor heel Nederland is een gekalibreerd drie-dimensionaal model beschikbaar via het NHI, op regionale schaal zijn gekalibreerde drie-dimensionale modellen ontwikkeld zoals het AZURE model voor Midden-Nederland;
- aanstroming wel: de invloed van regionale kwel op wellen komt tot uiting in de drie-dimensionale aanstroming van de wel;
- complexe omgeving: grote variëteit in x, y en z richting in een omgeving als die van de Grebbedijk met twee stuwwallen en een rivier.

¹ bron Wikipedia

3. HYPOTHESE 2: INTERACTIE KWELDRUK RIVIER EN ACHTERLAND

Hypothese

De verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaald de mogelijke opbarstlocatie, stroomrichting en stroomsnelheid richting de zandmeevoerende wel. Alleen bij een scheve verhouding (kleine regionale kweldruk) kan 'klassieke' piping optreden.

3.1. Analyse hypothese

In de hypothese wordt gesproken van de 'klassieke' schematisatie van de piping. Deze schematisatie betreft het optreden van de verschillende fasen zoals weergegeven in afbeelding 1.3:

1. opbarsten van de deklaag/heave;
2. kwel/welvorming: begin van de erosie;
3. beginnende pipe-vorming door terugschrijdende erosie *in de richting van de rivier*;
4. pipe-vorming door terugschrijdende erosie *in de richting van de rivier*.

Deze hypothese gaat alleen in op fase 1: het opbarsten van de deklaag en de stroomrichting en snelheid direct na het opbarsten¹. De locatie van opbarsten zal bij aanwezigheid van een regionale kwelstroom bepalen of de betreffende wel kritiek is voor de waterveiligheid. Hypothese 1 laat zien of een wel die ver genoeg van de waterkering afgelegen is geen invloed heeft op de waterveiligheid, deze hypothese gaat in op de invloed van de regionale kweldruk op de opbarstlocatie.

In het geval van 'klassieke' piping zal bij toenemende buitenwaterstand de potentiaal in het watervoerend pakket toenemen. Opbarsten zal optreden wanneer de waterspanning in de zandlaag bij hoge buitenwaterstand zo groot is dat de afdekkende laag gaat opdrijven. De waterspanning in de zandlaag kan nooit groter zijn dan het gewicht van de afdekkende laag; de potentiaal in de zandlaag waarbij net evenwicht aanwezig is wordt de grenspotentiaal genoemd [ref. 5.].

Over het algemeen zal opbarsten het eerst optreden daar waar de deklaag het dunst is; dit is veelal de teensloot direct achter de waterkering. Door reductie van de potentiaal tot de opbarstpotentiaal is het onwaarschijnlijk dat opbarsten optreedt op een locatie dicht bij de waterkering, alhoewel dit niet uitgesloten kan worden.

In afbeelding 3.1 zijn de stappen in welvorming (opbarsten) in het geval van regionale kweldruk schematisch weergegeven. Opgemerkt wordt dat, in tegenstelling tot 'klassieke' piping, in het geval van regionale kweldruk geïnfiltreerd moet worden of een tweede opbarstlocatie dicht bij de waterkering kan worden gevormd na vorming van de eerste wel. Reden is dat verwacht wordt dat door regionale kweldruk een hogere potentiaal in het watervoerend pakket aanwezig is. Hierdoor kan in het achterland opbarsten optreden op een locatie met een hogere grenspotentiaal, terwijl nabij de waterkering de grenspotentiaal nog niet is overschreden. Na vorming van de eerste wel kan de rivier nog stijgen, waarbij een verhang ontstaat tussen de rivier en de eerst gevonden wel. Tijdens het hoogwater kan de grenspotentiaal nabij de waterkering dan alsnog worden overschreden.

¹ De stroomrichting en snelheid zullen naar verwachting voornamelijk invloed hebben op de groeirichting van de pipes na het ontstaan van de wellen. Dit effect is nader beschouwd als onderdeel van Hypothese 1 en is daarom niet verder beschouwd bij deze hypothese.

Afbeelding 3.1. Stappen optreden opbarsten bij regionale kweldruk

1		<p>In het geval van regionale kweldruk is tijdens dagelijkse omstandigheden een verhang aanwezig tot in de rivier. De rode lijn geeft aan dat tijdens een hoogwatergolf de stroming nog steeds in de richting van de rivier is. De blauwe lijn geeft aan dat dan een tegengestelde grondwaterstroming kan ontstaan.</p>
2		<p>Tijdens een hoogwatergolf kan de afstroming van water door het watervoerend pakket stikken door de toegenomen potentiaal ter plaatse van de rivier</p>
3		<p>In de polder tussen hooggelegen grond en de waterkering zal nu de waterdruk in het zandvoerend pakket toenemen, totdat op een locatie de opbarstpotentiaal wordt overschreden. De locatie van opbarsten is afhankelijk van de verhouding tussen de potentiaal vanuit de regionale kweldruk en het hoogwater.</p>
4		<p>Door het opbarsten zal ter plaatse van de wel de potentiaal afnemen tot de opbarstpotentiaal</p>
5		<p>De waterstand in de rivier kan nog steeds toenemen, waardoor de potentiaal tussen het intredepunt van rivierwater en de eerste opbarstlocatie zal toenemen. Mogelijk zal hierdoor op een locatie dichterbij de waterkering een additionele wel vormen. Indien hier de opbarstpotentiaal wordt overschreden.</p>

Vragen die voor deze hypothese beantwoordt moeten worden zijn:

- wat is de invloed van regionale kweldruk op de opbarstlocatie?
- afhankelijk van de opbarstlocatie, wat is het stromingspatroon rond de wel?
- kan de opbarstlocatie met voldoende zekerheid worden vastgesteld?

De invloed van het stromingspatroon rond de wel op de benodigde minimale kwelweglengte is geen onderdeel van deze hypothese, maar is onderdeel van hypothese 3.

3.2. Theoretische achtergrond

Voor het opbarstmechanisme zijn de belangrijke parameters de grondwaterpotentiaal in de potentieel pipinggevoelige zandlaag en het gewicht van het afdekkende grondpakket op die locatie. Het gewicht kan worden berekend als de grondlaagindeling van dit pakket bekend is en per grondlaag de droge en natte volumegewichten.

3.2.1. Grenspotentiaal

De rekenregel voor de grenspotentiaal staat in paragraaf 5.2.2 van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen [ref. 5.] en luidt:

$$\Phi_{z,g} = h_p + d \frac{\gamma_{nat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Waarin:

symbool	omschrijving	eenheid
$\Phi_{z,g}$	grenspotentiaal	[m]
h_p	polderpeil	[m+NAP]
d	dikte afdekkende laag	[m]
γ_{nat}	soortelijk gewicht van de afdekkende laag	[kN/m ³]
γ_w	soortelijk gewicht van water	[kN/m ³]

Bij berekening van de opbarstpotentiaal dient rekening gehouden te worden met aanwezigheid van teensloten [ref. 14.], zie paragraaf 2.2.1.

3.2.2. Grondwaterpotentiaal

De grondwaterpotentiaal is afhankelijk van de buitenwaterstand en de geohydrologische configuratie van de ondergrond [ref. 5.]. Van belang zijn:

- de lengte, dikte en weerstand van het afdekkende pakket in het voorland (indien aanwezig);
- de dikte en weerstand van het afdekkende pakket in het achterland;
- de doorlatendheid (kD-waarde) van de zandlaag;
- de potentiaalrandvoorwaarden: buitenwaterstand en stijghoogte in de zandlaag binnendijs. Deze laatste is veelal gerelateerd aan het polderpeil.

De stijghoogte in de zandlaag ter plaatse van een potentiële opbarstlocatie kan met elk geschikt rekenmodel voor grondwaterstroming worden berekend. De geohydrologische parameters voor een analyse kunnen geschat worden op basis van schattingen van de weerstand en de dikte van afdekkende lagen buiten- en binnendijs en van de zandlaag.

Ook kunnen waterspanningsresponsmetingen worden gebruikt om de geohydrologische parameters te schatten, c.q. om schattingen van deze parameters aan te scherpen.

3.2.3. Tijdsafhankelijkheid grondwaterpotentiaal

Hoge rivierwaterstanden zijn een tijdelijke wijziging in de randvoorwaarden van het geohydrologische systeem. Door de weestand van de rivierbodem zal de intrede van rivierwater vertraagd worden. Hierdoor is de respons van het grondwater nog niet volledig als de piek van de afvoergolf alweer gepasseerd is. De grootte respons van de grondwaterpotentiaal is daardoor afhankelijk van de duur van de belasting.

In het onderzoeksrapport Waddenzeedijk Ameland [ref. 15.] is het tijdsafhankelijk effect van een hoogwatergolf op piping onderzocht. Hiertoe zijn vijf verschillende methoden onderzocht om de tijdsafhankelijkheid te voorspellen:

- methode 1: Analytisch conform TRWD: analytische methode om het stijghoogteverloop naar het achterland inzichtelijk te maken op basis van de voorgeschreven methode in het Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRWD) [ref. 14.];
- methode 2: Directe extrapolatie: methode waarbij voor elk individueel getij de gemeten waterspanning lineair geëxtrapoleerd wordt naar ontwerpomstandigheden op basis van de buitenwaterstand; [ref. 15.];
- methode 3: methodiek Scheldestromen: door Waterschap Scheldestromen ontwikkelde methode waarbij de meetreeksen voor extrapolatie eerst opgedeeld worden in een quasi-statisch (gemiddeld) deel en een dynamisch deel. De methode is toegepast in de verlengde derde toetsronde;
- methode 4: Frequentieanalyse: wiskundige variant van de methode Scheldestromen;

- methode 5: PlaxFlow: mathematisch model om op basis van geometrische en geohydrologische eigenschappen de grondwaterstroming in het watervoerende pakket te modelleren.

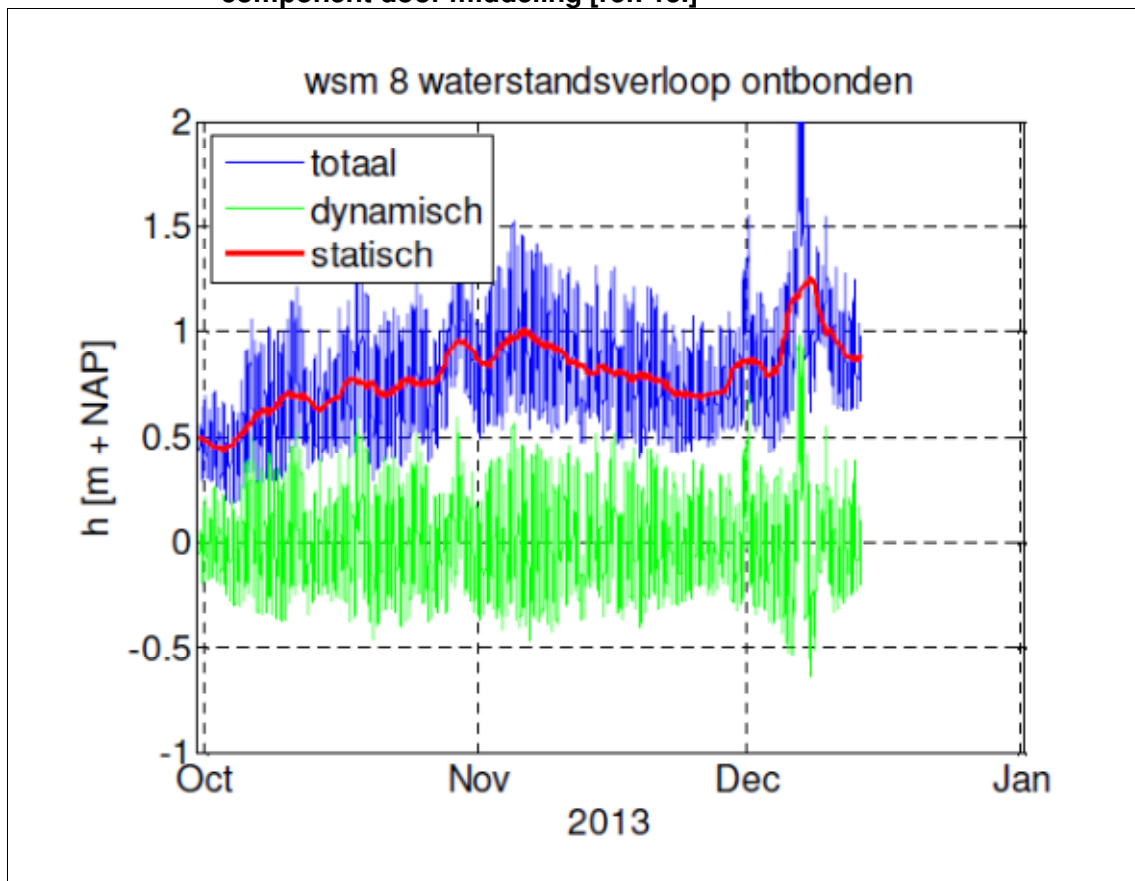
De Waddenzeedijk Ameland is een zeedijk en wordt belast door dagelijks optredende wisselingen van het getij en een relatief kort durende hoogwatergolf. Afbeelding 3.2, geeft de splitsing van statisch en dynamisch deel van het getij weer.

De casussen voor regionale kwelstroom betreffen met name rivierdijken waar geen dagelijks getij aanwezig is en er sprake is van een langere duur van de hoogwatergolf, namelijk een tijdsduur in orde van grootte meerdere dagen. Regionale kwelstroom kan echter ook van toepassing zijn in gebieden met invloed vanuit water met getij-invloeden, zoals aan de Oosterschelde.

Methode 2 tot en met 4 worden dus niet op voorhand afgeschreven, aangezien deze onderscheid maken tussen het quasi-statisch deel en een dynamisch deel van de waterbeweging. Op de rivier zal het dynamisch deel zeer klein zijn en de belasting hoofdzakelijk worden gevormd door het quasi-statisch deel.

De keuze voor een methode ligt bij de toetsers, omdat de keuze afhankelijk is van de situatie en de voorkeur van de toetsers voor een bepaalde werkwijze.

Afbeelding 3.2. Opsplitsen totale meetsignaal in quasi-statisch deel en dynamische component door middeling [ref. 15.]



3.2.4. Optreden van opbarsten

Wanneer de stijghoogte in de zandlaag overal kleiner is dan de berekende grenspotentiaal, dan is opdrijven en dus ook opbarsten uitgesloten [ref. ORZW.]. De veiligheid tegen opbarsten wordt bepaald met behulp van:

$$(\Phi_z - h_p) \leq \frac{1}{\gamma} (\Phi_{z,g} - h_p)$$

Waarin:

symbool	omschrijving	eenheid
Φ_z	berekend potentiaal	[m]
$\Phi_{z,g}$	opbarstpotentiaal	[m]
h_p	polderpeil	[m+NAP]
γ	veiligheidsfactor. zie hoofdstuk 7 uit [ref. ORZW]	[kN/m ³]

De locatie waar opbarsten optreedt is tijdsafhankelijk. De stijghoogte in de zandlaag is een tijdsafhankelijke respons op het verloop van de buitenwaterstand te berekenen. De vorm, duur en hoogte van de hoogwatergolf op het buitenwater is daarmee van belang. Het optreden van twee hoogwaters kort na elkaar kan mogelijk leiden tot een meer maatgevende situatie, doordat de ondergrond verzadigd zal zijn.

3.3. Modelkader

3.3.1. Analytisch: Opbarstpotentiaal

De opbarstpotentiaal kan op elke locatie bepaald worden, met bijvoorbeeld GIS, indien de volgende gegevens beschikbaar zijn in kaartlagen:

- ligging maaiveld (kan worden overgenomen uit AHN);
- polderpeil en de handhaving hiervan tijdens hoogwater;
- onderzijde kleilaag (op basis van (beschikbaar) grondonderzoek);
- soortelijk gewicht van de kleilaag.

Op basis van de ligging van het maaiveld en de onderzijde van de kleilaag kan door middel van bepaling van de gemiddelde dikte van de kleilaag het effect worden meegenomen van de aanwezigheid van een sloot en daarmee de gereduceerde dikte van de kleilaag.

3.3.2. Numeriek: Grondwaterpotentiaal

De stijghoogte in de zandlaag ter plaatse van een potentiële opbarstlocatie kan met elk geschikt rekenmodel voor grondwaterstroming worden berekend. Voorwaarde hiervoor is dat het toegepast model tijdsafhankelijk kan rekenen en het effect van opbarsten kan worden meegenomen. Een niet uitputtende lijst van mogelijke programma's waarmee de grondwaterpotentiaal kan worden berekend is opgenomen in Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Mogelijke programma's waarmee de grondwaterpotentiaal kan worden berekend

programma	beschrijving
Dupuit	Dupuit is een eenvoudig model dat is gebaseerd op een mathematische formule. De Dupuit aanname is een alternatief voor meer complexe aannames. De benadering gaat uit van een 2-dimensionale stroming, waarbij stroming door het watervoerend pakket verondersteld wordt horizontaal te zijn. Deze benadering is toegepast in het vooronderzoek Grebbedijk [ref. 6.].
ModFlow	ModFlow is een drie-dimensionaal grondwaterstromingsmodel. De modellen kunnen worden aange-

programma	beschrijving
	<p>stuur met FloPy, waarmee tijdsafhankelijkheid en het opbarsten van de deklaag kan worden gemodelleerd.</p> <p>Modflow kan worden gevoed met parameters vanuit het regionale AZURE model, dat in iMod is opgesteld (een afgeleide van Modflow).</p>
Watex	<p>Watex is een programma die de totale veiligheid van de dijk met betrekking tot opbarsten, piping en heave beschouwd. Watex berekent hiervoor tijdsafhankelijke drukken in de ondergrond onder variërende waterhoogtes in de rivier en tegen de dijk. In Watex wordt de ondergrond van een dijkdoorsnede in vier secties opgedeeld en gespecificeerd.</p>

Opgemerkt wordt dat MSeep en PlaxFlow niet geschikt zijn om de grondwaterpotentiaal uit te rekenen, aangezien opdrijven hier niet in mee kan worden genomen

Wanneer opbarsten op enig moment optreedt, dan wordt in het model op die locatie de berekende opbarstpotentiaal toegepast. Het model zal worden doorgerekend tot tenminste het einde van de hoogwatergolf om te verifiëren of door toename van de potentiaal in tijd of door toename in de buitenwaterstand niet op een locatie op een kortere afstand van de waterkering de opbarstpotentiaal wordt overschreden.

4. HYPOTHESE 3: EROSIEPATROON BIJ ALZIJDIGE TOESTROMING

Hypothese

Het zand onder de deklaag wordt door de kwelwaterstroom slechts plaatselijk rondom het opbarstkanaal meegevoerd, waarna de stroomsnelheid vervolgens in 3D snel afneemt. Onder het diepste punt van het opbarstkanaal neemt het zandtransport aan de buitenranden van de met watergevulde holle ruimte snel af vanwege de vergroting van het geërodeerd oppervlak.

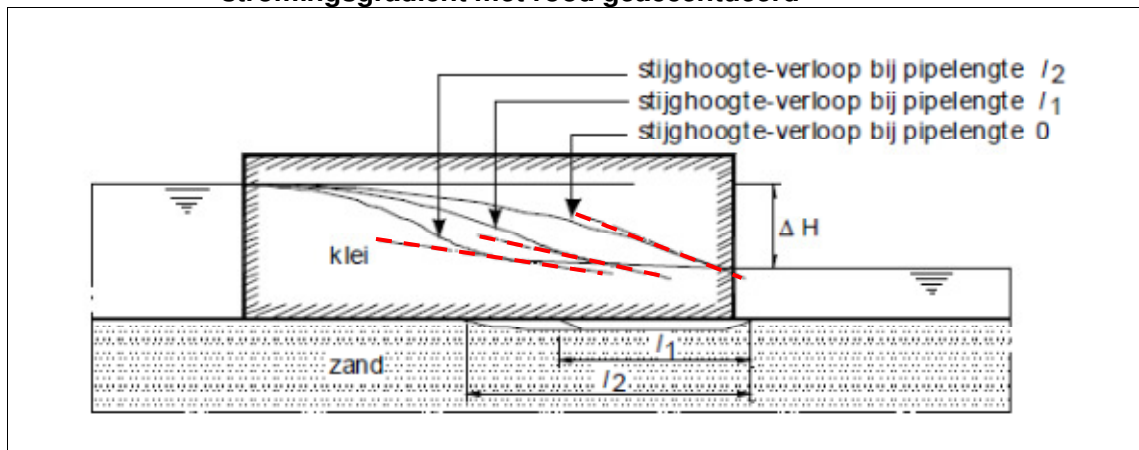
4.1. Analyse hypothese

Uitgaande van het optreden van opbarsten (hypothese 1) op een bepaalde afstand (hypothese 2) zal grondwaterstroming optreden in de richting van de wel of wellen op de opbarstlocatie. Ten gevolge van deze grondwaterstroming kan zand worden meegevoerd waardoor er sprake is van zandmeevoerende wellen en de vorming van 'pipes'.

In het geval van 'klassieke' piping zal bij een verval over de 'constructie' dat kleiner is dan het kritieke verval door erosie een spleet ontstaan, die net zolang doorgroeit tot de met dit verval corresponderende spleetlengte is bereikt. De stromingsgradiënten zijn dan zodanig afgezwakt dat de zandkorrels op de rand van de spleet weerstand kunnen bieden aan de aanstroomkrachten. Dit is weergegeven in afbeelding 4.1. De rode stippellijn geeft de gradiënt weer. Deze neemt af als de pipe groter wordt en is in de afbeelding het laagst bij lengte l_2 .

Wordt het verval opgevoerd, dan zal de spleet weer gaan groeien, tot een nieuw evenwicht wordt bereikt. Het erosieproces stopt, zolang het verval niet groter is dan het kritieke verval. Wordt het verval wel groter dan zal de spleet door blijven groeien, omdat het verval waarbij evenwicht mogelijk is kleiner is dan het aanwezige verval. De spleet groeit dan uit tot een open kanaaltje tussen boven- en benedenstroomse kant van de constructie; piping is daarmee een feit.

Afbeelding 4.1. Afzakken stromingsgradiënten bij ontstaan van een 'pipe' [ref. 5.], stromingsgradiënt met rood geaccentueerd



Wanneer er sprake is van een regionale kwelstroom zal (in het 2-dimensionale vlak gezien) water van weerszijden toestromen. Door deze alzijdige toestroming kan mogelijk de vorm van de pipe anders zijn. De vorm van de pipe heeft invloed op de afzakking van de stro-

mingsgradiënten en daarmee invloed op de evenwichtslengte¹. Daarnaast kan door alzijdige toestroming het debiet door het opbarstkanaal toenemen, wat het verval over het opbarstkanaal kan beïnvloeden.

Vragen die voor deze hypothese beantwoordt moeten worden:

- wat wordt de vorm van de 'pipe' in het geval van alzijdige toestroming?
- heeft de vorm en grootte van de wel aan de achterlandzijde invloed op de stromingsgradiënten onder de waterkering en hoe groot is deze?
- neemt het debiet door het opbarstkanaal toe en wat is de invloed hiervan?
- hoe kan het effect op de stabiliteit worden meegenomen in de berekening van de benodigde kwelweglengte?

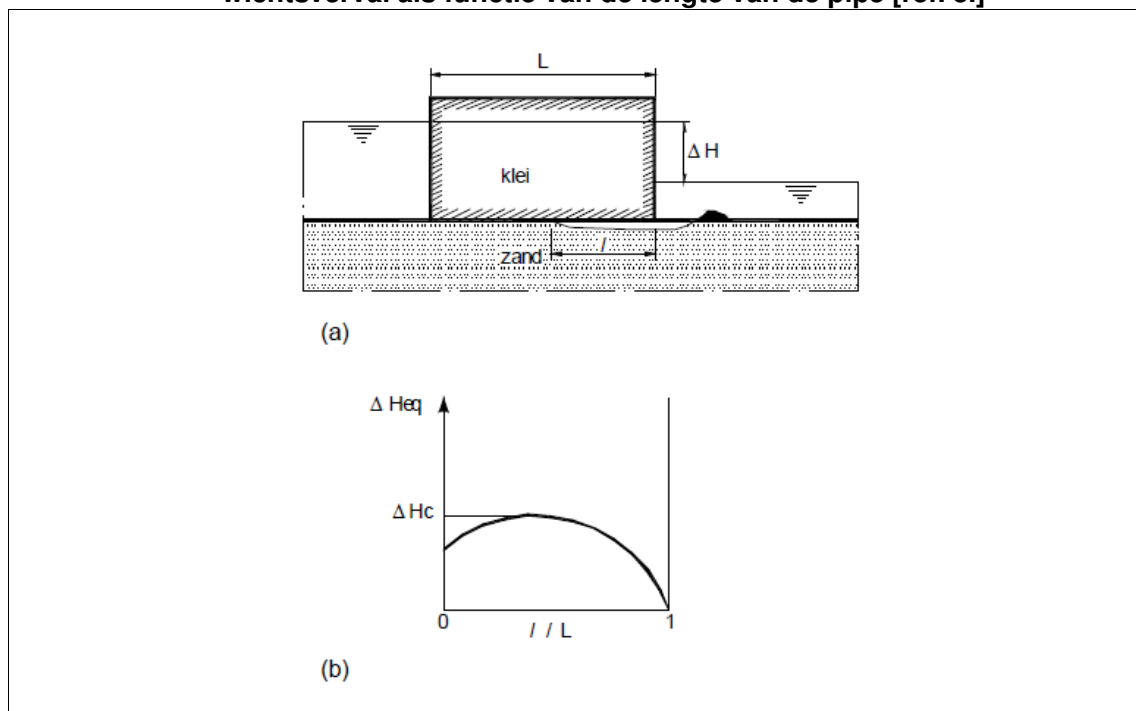
Driedimensionale grondwaterstroming en radiale toestroming hebben invloed op de kwelweglengte. Deze invloed wordt onderzocht in de POV-piping naar het ontstaan van wellen door het Waterschap Rivierenland en niet in het voorliggende onderzoek.

4.2. Theoretische achtergrond

4.2.1. Model van Sellmeijer [ref. 10.]

Het model van Sellmeijer bestaat uit een analytisch twee-dimensionaal grondwaterstromingsmodel gekoppeld aan evenwichtsvergelijking voor de stabiliteit van de zandkorrels in de 'pipe' [ref. 10.].

Afbeelding 4.2. Basisconfiguratie rekenmodel van Sellmeijer [ref. 10.] en evenwichtsverval als functie van de lengte van de pipe [ref. 5.]

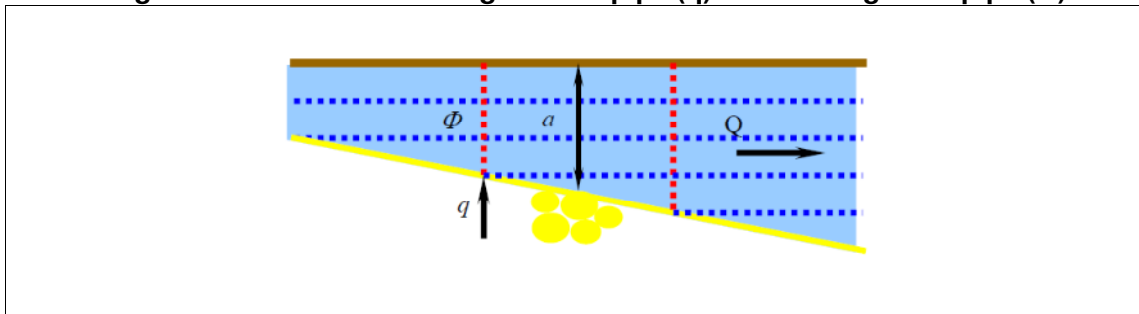


¹ Evenwichtslengte is de lengte van de 'pipe' in het geval van een bepaald verval over de waterkering. Illustratief: l_2 is de evenwichtslengte bij een verval ΔH in afbeelding 4.1.

Het model is gebaseerd op een combinatie van stroming door een watervoerende zandlaag (met homogene doorlatendheden een constante dikte die zich uitstrekt tot ver voorbij het uittreepunt), stroming door het kanaal (de pipe) en het krachterevenwicht op de korrel. Uitgangspunt voor het mathematische model is de configuratie van dijk en ondergrond, zoals in afbeelding 5.2 is geschetst.

Door de zandlaag vindt onder invloed van het verval grondwaterstroming plaats. Aangenomen wordt dat zich een pipe ontwikkeld heeft met de lengte l . Sellmeijer modelleert deze pipe als spleet onder de constructie. In de pipe vindt laminaire stroming richting het opbarstkanaal plaats. Op de zandkorrels op de rand tussen pipe en zandlaag worden krachten uitgeoefend door de uittredende grondwaterstroming naar de pipe (afbeelding 5.3, aangegeven met q) en door de stroming van het water in de pipe (afbeelding 5.3, aangegeven met Q).

Afbeelding 4.3. Grondwaterstroming naar de pipe (q) en stroming in de pipe (Q)



Voor de stabiliteit van de zandkorrels in de 'pipe' gebruikte [ref. 10.] het zogenaamde vierkrachten model. Op basis van dit analytische model is een eenvoudig te gebruiken rekenregel afgeleid, de zogenaamde rekenregel van Sellmeijer. De rekenregel van Sellmeijer is empirisch, deze is afgeleid uit een verzameling van berekeningen met een analytisch model.

4.2.2. Aangepaste model van Sellmeijer [ref. 10.]

In het kader van het project SBW Piping is fundamenteel onderzoek verricht naar het mechanisme piping. Het uitgevoerde onderzoek omvatte proeven op kleine (0,35 m), medium (1,35 m) en grote schaal (15 m). Het doel van het onderzoek was een hervalidatie van de theorie van Sellmeijer zoals beschreven in het voormalige TR Zandmeevoerende Wellen [ref. 14.]. Het model en de voor de toetsing te gebruiken rekenregel zijn opnieuw gekalibreerd met de nieuwe experimentele data.

De aangepaste rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op een twee-krachtenmodel (sleepkracht en grensevenwicht). Voor een standaard dijkconfiguratie met een homogene zandlaag onder een ondoorlatende laag is het evenwicht als volgt geformuleerd:

$$\frac{\Delta H_c}{L} = F_{resistance} F_{scale} F_{geometry}$$

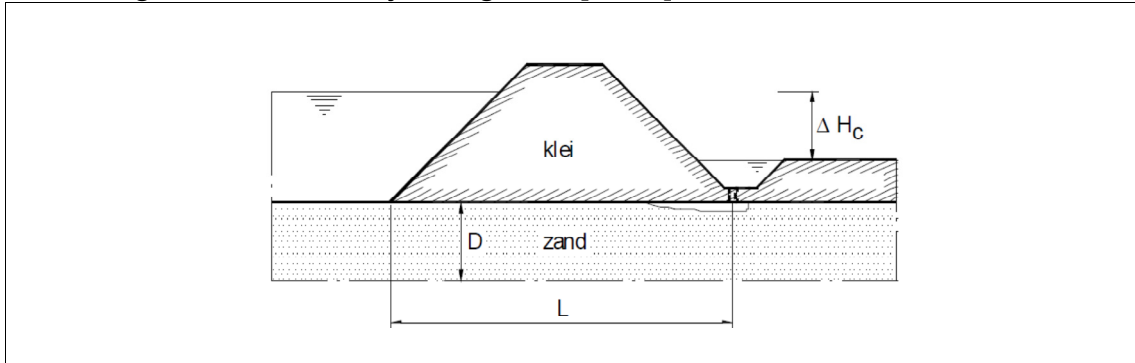
Met:

$$F_{resistance} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \}$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4}$$

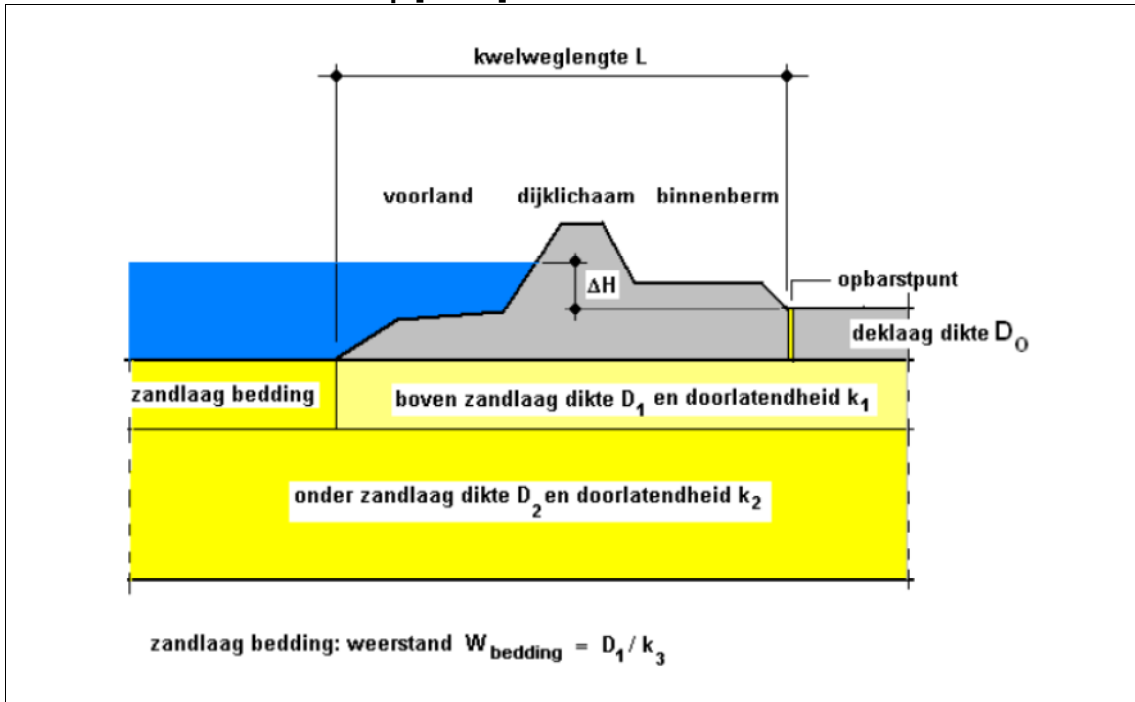
$$F_{geometry} = 0,91 \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{D}{T} \right)^{\frac{0,28}{2,8} - 1} + 0,04$$

Afbeelding 4.4. Standaard dijkconfiguratie [ref. 5.]



De eerste factor beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe. De tweede term reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft. Voor schaalproeven is dit een belangrijke verhouding. De laatste term beschrijft de invloed van de vorm van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming. Deze is afhankelijk van de verhouding tussen dikte en kwelweglengte van de aanwezige zandlagen. In geval van een meerslagensysteem (afbeelding 4.5) is deze factor ook afhankelijk van het doorlatendheidscontrast tussen de zandlagen. De *geometry* factor is situatieafhankelijk en kan worden bepaald met een grondwaterstromingsmodel MSeep.

Afbeelding 4.5. Voorbeeld van meerslagensysteem. Configuratie van deellagen van het watervoerende pakket waarvoor een ANN¹ is ontwikkeld met behulp van grote aantallen numerieke berekeningen met de pipingmodule in MSeep [ref. 5.]



¹ Artificial Neural Network

4.2.3. Toepassing model van Sellmeijer

Het model van Sellmeijer wordt gebruikt in de analyse van de invloed van de regionale kwelstroom. Met het model van Sellmeijer kan per dijksectie de minimaal benodigde kwelweglengte bepaald worden, L_{crit} . Wanneer een opbarstlocatie verder weg ligt van het in-treepunt dan afstand L_{crit} zal er geen doorgaande pipe vanaf deze opbarstlocatie kunnen ontstaan vanaf de wel onder de dijk door, want $L > L_{crit}$.

4.2.4. Invloed dimensies opbarstkanaal

In situaties met een afdekkende laag (bijvoorbeeld klei en/of veen) op een pipinggevoelige zand- of grondlaag, ontstaat na opbarsten van de afdekkende laag een kwelweg met een verticale component ter grootte van de dikte d van de afdekkende laag in het achterland. Voor de bepaling van de waterkerende hoogte wordt bij toepassing van de regel van Sellmeijer het verval over de waterkering gereduceerd met een factor $0,3d$. Dit is mogelijk vanwege de extra weerstand die veroorzaakt wordt door de gefluïdiseerde zandkorrels in het opbarstkanaal. Voordat de zandkorrels verticaal worden getransporteerd dient de stroming voldoende sterk te zijn om de korrelspanningen tot nul te herleiden (fluïdisatie, ook wel drijfzand). De reductie om bij piping deze weerstand in rekening te brengen staat ook wel bekend als de '0,3d-regel' [ref. 5].

De controle op piping wordt hiermee:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \frac{\Delta H_c}{\gamma}$$

Waarin:

symbool	omschrijving	eenheid
ΔH_c	kritiek verval	[m]
ΔH	verval over de grondconstructie	[m]
d	dikte van de afdekkende laag (D_0 in afbeelding 4.5)	[m+NAP]
γ	veiligheidsfactor	[-]

De onderbouwing van de '0,3d-regel' is onderzocht in [ref. 7.]. Uit het onderzoek kan worden geconcludeerd dat de onderbouwing voor de huidige rekenregel met een reductie van $0,3d$ voor een vertikaal stroomkanaal niet sluitend is, maar dat er onvoldoende redenen zijn om deze aan te passen.

Uit beschikbare proeven blijkt dat bij een toenemend debiet het verval over het opbarstkanaal vermindert. Het verval over het opbarstkanaal wordt veroorzaakt door de fluïdisatie van zand in het kanaal. De verklaring voor het afnemende verval over het kanaal bij toenemende debieten is dat het kanaal in dat geval sneller schoongespoeld wordt. Ondergrens voor het verval die in het onderzoek genoemd worden is circa $0,15d$ op basis van proeven en ervaringen in de Verenigde Staten.

Voor die situaties met alzijdige of radiale toestroming naar de wel dient gecontroleerd worden of het debiet wat toestroomt niet zodanig toeneemt dat '0,3d-regel' niet meer van toepassing is. Wanneer de '0,3d-regel' aangepast moet worden ten aanzien van het optredende debiet, kan dit leiden dat de benodigde kwelweglengte toeneemt. De aanbeveling om meer praktijkgevallen van piping te verzamelen en aanvullend laboratoriumonderzoek uit te voeren wordt dan ook onderschreven.

4.2.5. Invloed op verhang/potentieelverschil

De invloed van alzijdige toestroming op het verhang en daarmee de toename op het kritieke verval kan op twee wijzen worden verdisconteerd:

- aanpassing van de geometrie-factor;
- aanpassing van het verval over de waterkering.

De eerste methode van de geometrie-factor kan alleen toegepast worden door voor iedere locatie deze af te leiden met een numeriek model.

De tweede methode is gebaseerd op de methode ontwikkeld door de heer J. Weijers van Rijkswaterstaat voor tijdsafhankelijk rekenen [ref. 15.]. Deze methode gaat ervan uit dat het effect van het waterstandverloop in rekening gebracht mag worden door het verval (ΔH) over de waterkering te verlagen met een factor F_i . Deze factor is gelijk aan de verhouding tussen de gradiënten voor steady state en transiënt flow (Afbeelding 4.6), welke kan worden afgeleid uit grondwaterstromingsberekening.

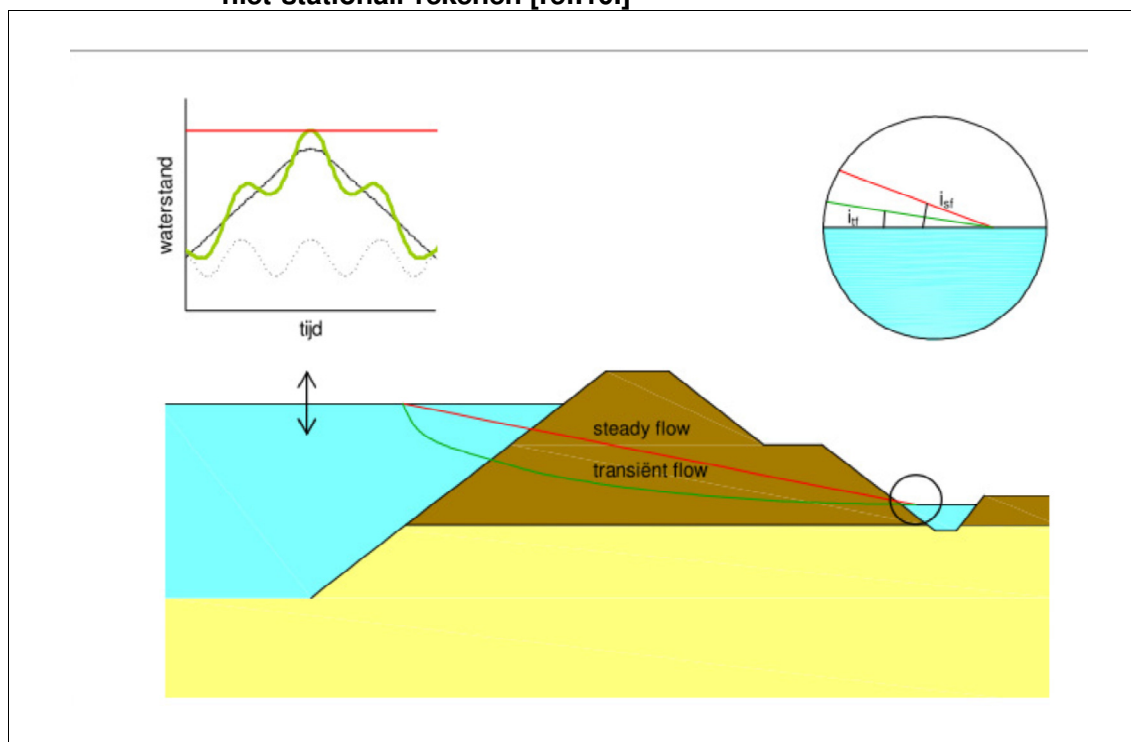
$$F_i = i_{tf} / i_{sf}$$

Waarin:

i_{sf} gradiënt bij stationaire stroming [-];

i_{tf} gradiënt bij tijdsafhankelijke stroming [-].

Afbeelding 4.6. Stijghoogteverloop stationaire en tijdsafhankelijke stroming voor niet-stationair rekenen [ref.10.]



Voor het geval van alzijdige stroming kan in dit geval de verhouding tussen de gradiënten van 'klassieke' piping en piping met alzijdige toestroming worden gehanteerd om het verval te verlagen.

4.2.6. Meerlaagsmodel

Het rekenmodel van Sellmeijer is afgeleid voor een analytische oplossing van een standaardgeometrie met een geïdealiseerde bodemsamenstelling, dat wil zeggen een homogene horizontale watervoerende zandlaag met één uniforme (en isotrope) doorlatendheid en met een constante dikte die zich uitstrekt tot voorbij het uittreepunt, afgedekt door een compleet ondoorlatende waterkering en niet onderbroken door kwelchermen en dergelijke. In de praktijk zijn watervoerende zandpakketten niet uniform van samenstelling, maar kunnen laagsgewijs bestaan uit zanden met verschillende fijnheden en doorlatendheden [ref. 5.].

Het watervoerende pakket bestaat ter plaatse van de Grebbedijk uit een laag fijn zand op een grovere, bijna grindige, zandlaag. Dit betekent dat de doorlatendheid zich niet goed door één doorlatendheidscoëfficiënt laat karakteriseren, wat het toepassen van de rekenregel van Sellmeijer bemoeilijkt.

Binnen het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNKI & II) is gewerkt aan een rekenmodel waarbij de watervoerende zandlaag willekeurig gemodelleerd kan worden als samenstel van volumes zand met verschillende doorlatendheden. De berekening van het kritieke verval kan hier alleen via een numerieke benadering worden uitgevoerd. De stationaire oplossing van het stromingsveld is geïmplementeerd in het computerprogramma voor numerieke grondwaterstromingsanalyse MSeep, dat is gebaseerd op een Eindige Elementen Methode. Het erosiekanaal wordt hier gemodelleerd als een speciale randvoorwaarde waarmee het stijghoogteverschil bij gegeven erosielengte vervolgens stapsgewijs wordt bepaald [ref. 5.].

Dit betekent dat om het effect van alzijdige toestroming mee te kunnen nemen, gezocht moet worden naar een numerieke oplossing, waarbij het effect van de aanwezigheid van een erosiekanaal aan de achterlandzijde van het opbarstkanaal meegenomen wordt.

4.3. Modelkader

4.3.1. Analytisch

Het rekenmodel van Sellmeijer is afgeleid voor een analytische oplossing van een standaardgeometrie met een geïdealiseerde bodemsamenstelling. Binnen het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNKI & II) is gewerkt aan een rekenmodel waarbij de watervoerende zandlaag willekeurig gemodelleerd kan worden als samenstel van volumes zand met verschillende doorlatendheden. De berekening van het kritieke verval kan hier alleen via een numerieke benadering worden uitgevoerd. Dit betekent dat hypothese 3 niet analytisch kan worden onderbouwd.

4.3.2. Numeriek

In [ref. 11.] is de achtergrond beschreven van de numerieke berekening van piping met behulp van het programma MSeep. Het rekenproces is opgesplitst in drie zelfstandige deelgebieden:

1. stationaire stroming in het watervoerende pakket;
2. visceuze stroming in het erosiekanaal (Navier-Stokes, laminair);
3. toestand van het grensevenwicht.

De principes van deze opzet kunnen worden toegepast voor de situaties met regionale kwelstromen. In de berekening van de stationaire stroming in het watervoerende pakket

dienen in dit geval de alzijdige toestroming worden meegenomen. De locatie van het opbarstkanaal (uittredepunt) moet bepaald worden conform hypothese 2.

Drie software programma's, waarmee de veiligheid met betrekking tot piping kan worden berekend, zijn bekend. Dit zijn:

1. MSeep; dit programma simuleert tweedimensionale vlakke stationaire grondwaterstroming in gelaagde, doorlatende grondmassieven, inclusief freatische randen. Het programma bestaat uit een basis module voor grondwaterstroming en een erosion module voor piping en heave berekeningen;
2. Mpiping; een neurale netwerk¹, gebaseerd op een verzameling van berekeningen met MSeep;
3. Watex is een programma die de totale veiligheid van de dijk met betrekking tot losbarsting, piping en heave beschouwd. Watex berekent hiervoor tijdsafhankelijke drukken in de ondergrond onder variërende waterhoogtes in de rivier en tegen de dijk. In Watex wordt de ondergrond van een dijkdoorsnede in vier secties opgedeeld en gespecificeerd.

Indien de vorm van de pipe afwijkt dan de (standaard) vorm die is aangenomen in bovenstaande programmatuur, kunnen deze programma's mogelijk niet meer toegepast worden. In dat geval dient de piping groei gesimuleerd te worden waarbij het effect van alzijdige aanstroming wordt meegenomen.

Een nieuw instrument bestaande uit een drie dimensionaal grondwatermodel als ModFlow en een automatische pre- en postprocessing kan in dit geval toegepast worden. De automatische pre- en postprocessing moet de berekende grondwaterstanden door het grondwatermodel toetsen en nieuwe invoer genereren. De resultaten van dit instrument kunnen worden gevalideerd met behulp van bovenstaande programma's voor de gevallen zonder alzijdige toestroming, en met de resultaten van het modelonderzoek voor de gevallen met alzijdige toestroming.

¹ Toegankelijk via: <http://dt-as1.geodelft.nl/DGWebPiping/default.aspx>

5. HYPOTHESE 4: TOEPASBAARHEID THEORIE OP GREBBEDIJK

5.1. Omschrijving situatie

Waterschap Vallei en Veluwe heeft meerdere locaties waarvoor onderzoek naar de kans op piping nodig is, omdat daar tijdens de recente 'beperkte' hoogwaters in 2011 en 2012 zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd in het achterland. Eén van deze gebieden is het achterland van de Grebbedijk langs de Nederrijn.

Afbeelding 5.1. Ligging Grebbedijk



De Grebbedijk is een onderdeel van dijkkring 45 en is gelegen tussen de Utrechtse heuvelrug en het Veluwemassief. De Grebbedijk is 5,5 kilometer lang en voorkomt overstrooming van de Gelderse Vallei vanuit de Nederrijn. Binnen het beheergebied van Vallei en Veluwe is het één van de belangrijkste primaire waterkeringen wanneer gekeken wordt naar de achterliggende waarde in het gebied. Het maaiveldniveau bij de Nederrijn is ca NAP +10 m en dit loopt geleidelijk af naar NAP +0 m nabij de randmeren. Dit heeft tot gevolg dat bij een doorbraak van de Grebbedijk nagenoeg de hele Gelderse Vallei overstroomt. Hierbij kunnen waterdieptes tot 4 m ontstaan nabij Veenendaal, is een directe overstroomingsschade van 10 miljard euro mogelijk en kunnen in de orde van 1.000 slachtoffers vallen [ref. 8.].

Het belang van de Grebbedijk in het overstroomingsrisico van het achterliggende gebied komt ook naar voren in het voorstel voor de nieuwe normering van dit dijktraject met een faalkansnorm van 1/100.000 jaar [ref. 12.].

In de Grebbedijk bevinden zich twee kunstwerken De Witte Sluis in het oostelijk deel en de Grebbesluis en de westzijde.

Het ondiepe geohydrologisch systeem tussen de Nederrijn en de stuwwallen dat invloed heeft op opbarsten en piping bestaat uit een slecht waterdoorlatende deklaag van circa 2 m dik met daaronder een grof zandpakket van circa 20 m dik.

Voor de Grebbedijk dient op basis van de vast te stellen werkwijze te worden onderzocht of de geconstateerde wellen een gevolg zijn van regionale kwelstroom en dus geen gevaar

vormen voor de dijkveiligheid. Dit onderzoek zal bestaan uit veldonderzoek naar de ondergrond en geohydrologie in het gebied en een modelmatige studie om het effect onder extreme omstandigheden te voorspellen.

5.2. Uitgevoerd onderzoek

5.2.1. Veiligheid Nederland in Kaart

In het kader van het project Veiligheid Nederland in Kaart is de veiligheid van alle Nederlandse dijkringgebieden bepaald op basis van een overstromingsrisicobenadering. De kans op falen van de dijk is berekend voor de vier dominante faalmechanismen (overloop en overslag, opbarsten en piping, macrostabiliteit binnenwaarts en bekleding). Deze kans is gekoppeld aan de gevolgen van een dijkdoorbraak uitgedrukt in directe overstromingschade en het aantal slachtoffers.

Voor dijkring 45 is de kans op doorbraak van de dijkvakken van de Grebbedijk bepaald op 1/130 per jaar. De overstromingskans wordt gedomineerd door het faalmechanisme opbarsten en piping. Een overzicht van alle resultaten is gegeven in [ref. 8.].

5.2.2. Veldonderzoek Blauwe Kamer

Het veldonderzoek bij de Blauwe Kamer is een veldonderzoek dat voorafging aan het POV Piping onderzoek regionale kwelstroom. Het betrof een studie naar de hydrologie en heterogeniteit bij de Grebbedijk, locatie Blauwe kamer op basis van het project data-interpretatie monitoring Grebbedijk.

Op basis van geohydrologische metingen is een Dupuit grondwaterstromingsmodel gekalibreerd waarmee de risico's op opbarsten en piping zijn onderzocht.

Uit het onderzoek volgen aanbevelingen voor vervolgonderzoek. Deze worden meegenomen in stap E van het onderzoeksplan bij het uitwerken van regionale kwelstroom voor de case Grebbedijk.

5.3. Uit te voeren onderzoek

Een eerste opzet van het grondonderzoeksplan is opgenomen in Bijlage I. Deze opzet is gebaseerd op geohydrologische ervaring. Naar aanleiding van de bevindingen in de onderzoeken die uitgevoerd in de stappen A tot en met D wordt dit plan nog bijgesteld. Vooral nog wordt gedacht aan het volgende veldonderzoek:

- met veldonderzoek wordt inzicht verkregen in de laagopbouw in ondergrond, de eenvormigheid en dikte van deklagen en de variatie in het achterland. Bekeken wordt of aangesloten kan worden op de POV piping nieuwe sondeertechnieken om de k_D -waarde te bepalen;
- met grondonderzoek worden de k_D waarde en korreldiameter D_{70} bepaald;
- de grondwaterstanden en kweldruk worden nabij de dijk en in het gebied tussen stuwwal en dijk gemonitord. Nabij de bekende wellen wordt bij hoogwater onderzoek gedaan naar de stromingsrichting en de herkomst van het kwelwater.

5.4. Modelonderzoek

5.4.1. Analytisch

Zoals aangegeven bij hypothese 2 en 3 is een analytisch model niet mogelijk voor de uitwerking van piping bij regionale kwelstroom.

5.4.2. Numeriek

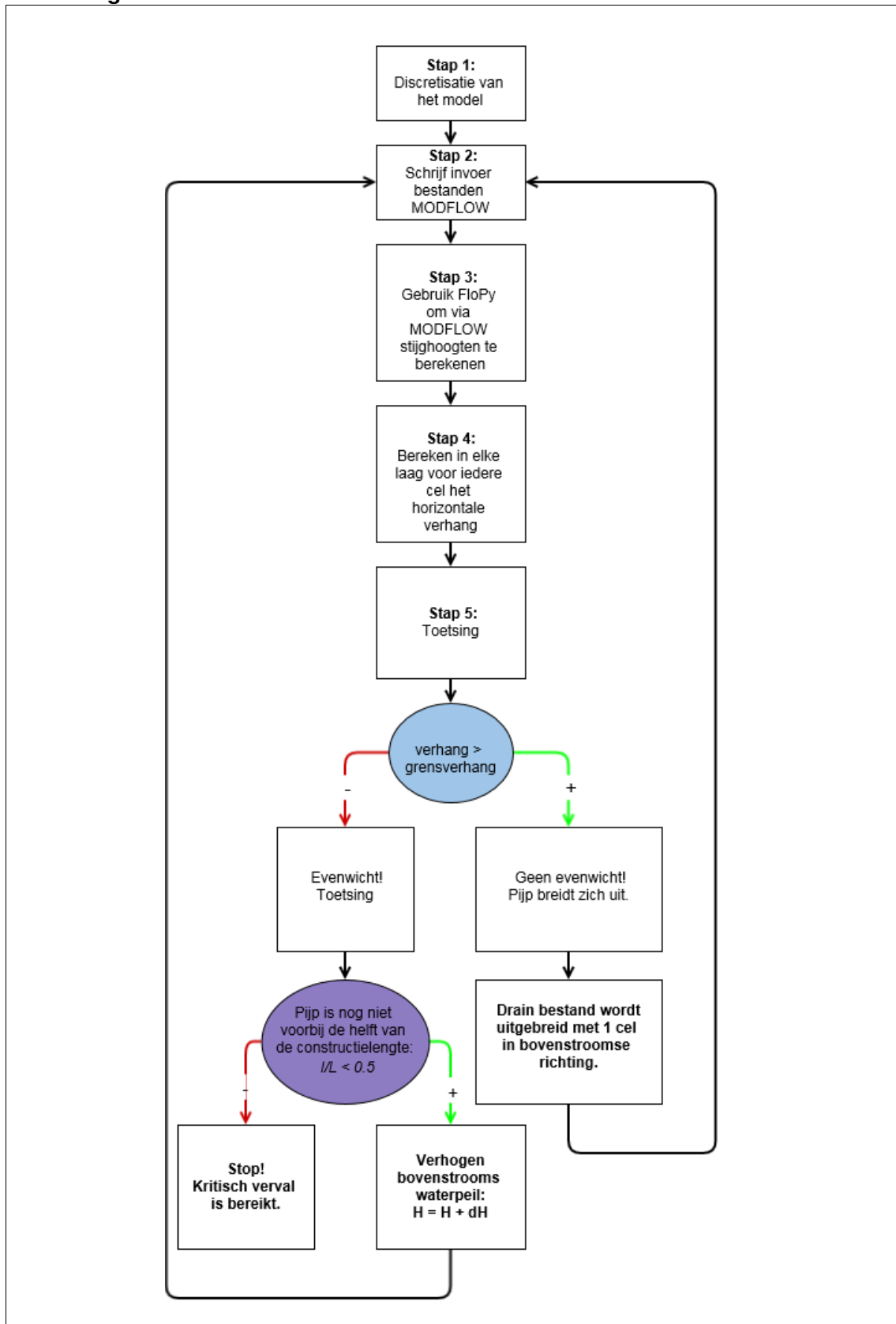
Vanuit het AZURE-model is voor de omgeving van de Grebbedijk een regionaal grondwaterstromingsmodel beschikbaar in iMod. Dit drie dimensionale model zal ingezet worden voor de case Grebbedijk. Het model wordt gekalibreerd aan meetgegevens uit de verschillende veldonderzoeken.

Met dit model worden stijghoogtes, stroomrichting en stroomsnelheid bepaald (hypothese 1).

Voor het optreden van opbarsten dienen berekende stijghoogtes vergeleken te worden met het gewicht van de afdekkende laag. Voor het bepalen van de opbarstlocatie zal deze vergelijking per tijdstap en per gridcel moeten worden uitgevoerd (hypothese 2).

Om meer vrijheid te creëren in de modelresultaten wordt voor het onderbouwen van hypothese 3 een eigen instrument opgezet. Dit model is geschreven in Python en maakt gebruik van de FloPy-package om MODFLOW aan te sturen. Op deze manier kunnen stijghoogte berekeningen iteratief worden uitgevoerd en kan het kritieke verhang worden bepaald (zie Afbeelding 5.2).

Afbeelding 5.2. Stroomschema instrument



6. REFERENTIES

1. Beek, van, V.M., et al (2012). Validation of Sellmeijer's model of backward piping under dikes on multiple sand layers;
2. Beek, van, V.M., et al (2012). Levee failure due to piping: a full-scale experiment;
3. Beek, van, V.M., Bezuijen, A. (2009), SBW Hervalidatie piping HP2.2 Medium-Schaalproeven;
4. Deltares (2009). SBW Piping (TO);
5. Deltares (2012). Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen;
6. Deltares (2014). Vooronderzoek Grebbedijk, piping risico's bij Blauwe Kamer. 1208977-000-GEO-0004- jvm, Versie definitief, 2 juni 2014;
7. Koelewijn, A.R. (2009). SBW Hervalidatie piping E. Evaluatie 0,3d rekenregel;
8. Ministerie van infrastructuur en milieu (2012), VNK 2 Overstromingsrisico Dijkkring 45 Gelderse Vallei;
9. Rijkswaterstaat (2013). Werkwijzer piping, d.d. 19 december 2013;
10. Sellmeijer, J.B. (1988). On the mechanism of piping under impervious structures. TR diss 1670;
11. Sellmeijer, J.B. (2006). Numerical computation of seepage erosion below dams (piping). ICSE paper (Engels);
12. Staf Deltacommissaris (2014) Deltaprogramma 2015;
13. TAW (1999). Technisch rapport zandmeevoerende wellen;
14. TAW (2004). Technisch rapport waterspanningen bij dijken;
15. Waterschap Vallei en Veluwe (2010) Toetsrapportage waterkeringen dijkkring 45 en 46, derde toetsronde 2006-2011;
16. Witteveen+Bos (2014). Waddenzeedijk Ameland Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1 Onderzoeksrapport.

BIJLAGE I CONCEPT MONITORINGSPLAN GREBBEDIJK

Het veldwerk voeren we uit in samenwerking met onze onderaannemer Grondboortechneek en Bronbemaling Theo van Velzen B.V. In deze bijlage is een eerste opzet veldwerk plan opgenomen. Deze opzet is gebaseerd op geohydrologische ervaring. Naar aanleiding van de bevindingen in de onderzoeken die uitgevoerd in de stappen A tot en met D wordt dit plan nog bijgesteld. In onderstaande paragrafen worden de concept locaties en concept onderdelen van het veldwerk toegelicht en wordt per onderzoek toegelicht welke toegevoegde waarde het heeft in het project.

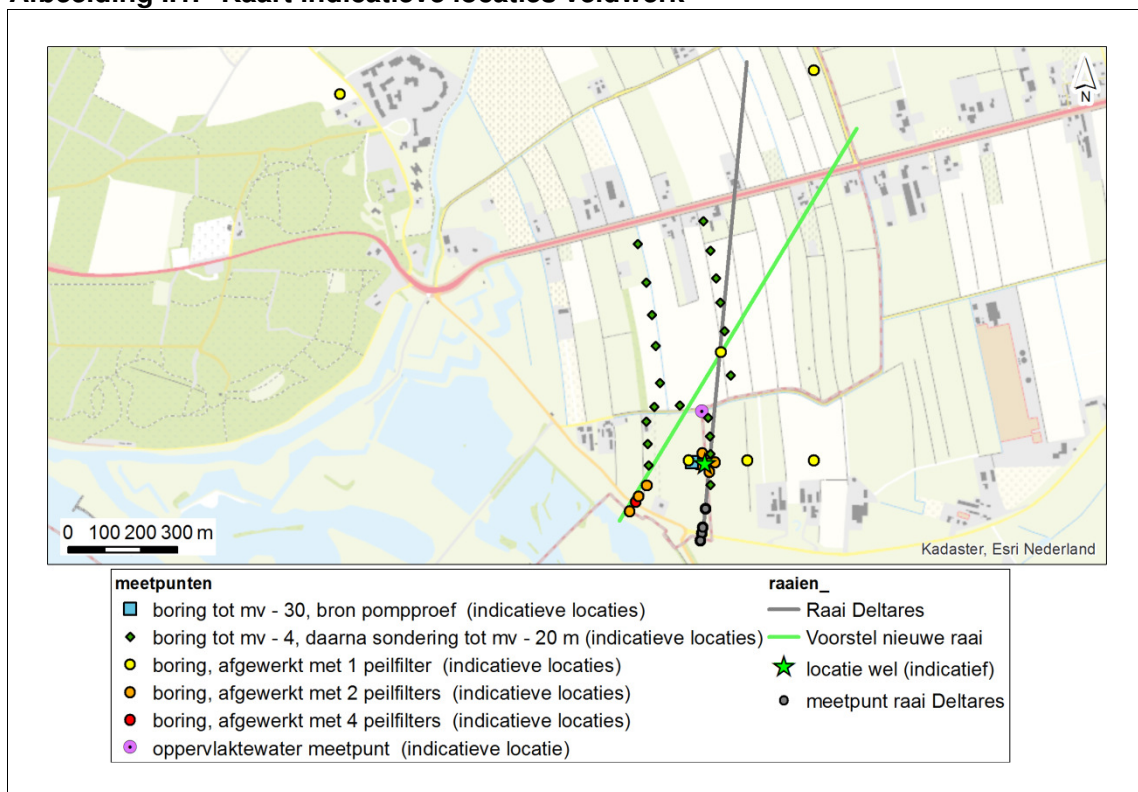
Locaties

De locaties van het grondonderzoek worden afgestemd op basis van de volgende punten:

- de wens om de onzekerheid over de variatie van parameters in de ruimte te verkleinen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de beschikbare resultaten uit het POV-piping onderzoek 'Proeftuin Mastenbroek';
- de onderzoeksinspanning wordt afgestemd op de lokale geologie, zoals het voorkomen van zandbanen.

Onderstaande figuur geeft een bovenaanzicht van onze opzet van het veldwerk. Een toelichting op de locaties en de activiteiten hebben we in de onderstaande paragrafen opgenomen.

Afbeelding I.1. Kaart indicatieve locaties veldwerk



Nieuwe raai

We nemen in het veldwerk op om 1 nieuwe raai van 4 locaties in te richten. De locatie van deze raai kiezen we op basis van de resultaten in Taak A - D en de lokale ervaring van het waterschap. Indien mogelijk kruist de raai locaties waar wellen optreden. We verwachten dat een raai ten westen van de raai van Deltares een goede locatie zal zijn, omdat de raai dan niet wordt beïnvloed door de ligging nabij de zomerdijk. Hierdoor is de randvoorwaarde

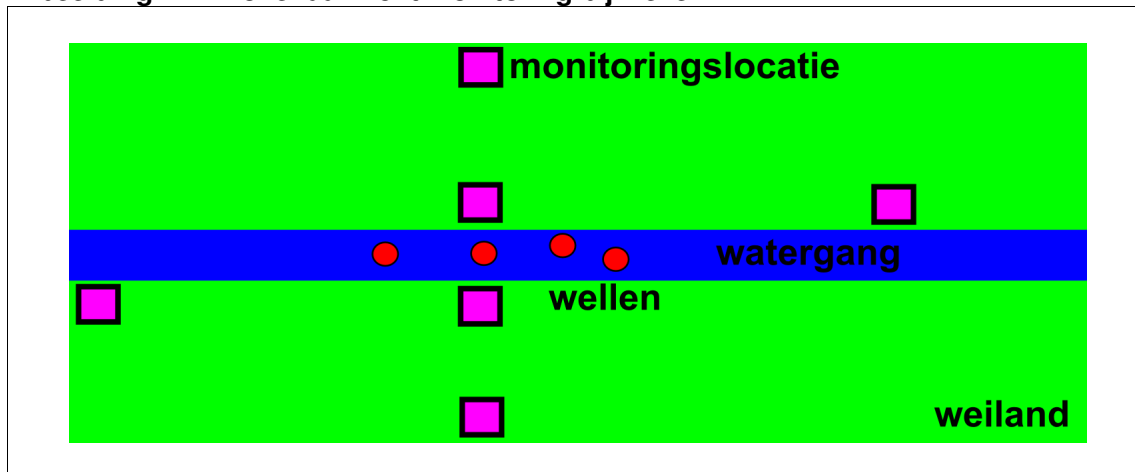
vanuit het voorland afhankelijk van de maximale waterstand in de Rijn, bij een beperkt hoogwater overstroomt de zomerdijk niet.

We gaan nu uit van een opzet van de raai die vergelijkbaar is met de raai van Deltares. Wel is er een belangrijk verschil omdat alleen peilbuizen worden gebruikt in plaats van waterspanningsmeters. Onze eigen ervaring én de resultaten van het vooronderzoek van Deltares geven aan dat waterspanningsmeters over de lange duur niet robuust zijn. In de raai installeren we op 4 locaties peilbuizen. Per locatie worden 2 peilbuizen aangebracht, in de dijk worden 4 peilbuizen geplaatst. De filterstelling wordt bepaald tijdens de boring. De specificatie van de peilbuizen is hieronder beschreven.

Wellen

Een derde meetlocatie wordt ingericht rondom de locatie waar in het verleden frequent wellen zijn waargenomen. De exacte locatie wordt in samenspraak met het waterschap vastgesteld. Voor deze locatie zijn 6 locaties voorzien met per locatie 2 peilbuizen, in Afbeelding I.2 is dit in bovenaanzicht weergegeven. Hiervan worden 2 peilbuizen nabij de wellen geplaatst, de overige 4 peilbuizen worden op circa 20 m afstand geplaatst. Deze omliggende peilbuizen monitoren het verhang richting de wellen.

Afbeelding I.2. Boven-aanzicht monitoring bij wellen



Peilbuizen in achterland

Om de regionale stijghoogte waar te nemen worden 3 peilbuizen geplaatst. Namelijk 500 en 1.000 m landinwaarts en aan de rand van de Grebbeberg. De peilbuizen op 500 en 1.000 m nemen de invloed van de Nederrijn op de stijghoogte waar. De peilbuis op de Grebbeberg geeft de regionale stijghoogte weer.

We kiezen er voor om op de Grebbeberg een eigen peilbuis te plaatsen, in plaats van data te betrekken van een bestaande peilbuis, omdat hier geen peilbuizen aanwezig zijn vanuit het Platform Water Vallei en Eem. Doordat peilbuizen van het platform ontbreken, heeft het waterschap geen direct toegang tot meetdata en meetlocatie. Het plaatsen van een eigen peilbuis stelt de data levering veilig. Daarnaast kan deze locatie worden gebruikt om de waterkwaliteit te meten.

Aan de oostzijde betrekken we waarnemingen van de regionale stijghoogte via het Waterschap vanuit het Platform Water Vallei en Eem. De peilbuizen zijn hier uitgerust met automatische drukopnemers, waardoor hoog frequente data beschikbaar zijn.

Specificaties veldwerk

In deze subparagraaf lichten we de specificaties van specifieke onderdelen van het veldwerk toe.

Peilbuizen

Elke peilbuis kent de volgende specificaties:

- tijdens de plaatsing wordt een boorbeschrijving gemaakt;
- rondom het filter wordt filtergrind aangebracht;
- doorsneden kleilagen worden met zwelklei afgewerkt;
- de peilbuis heeft een binnendiameter van tenminste 30 mm;
- peilbuizen in een meetraai hebben een filter van 0,5 m, overige hebben een filter van 2 m;
- het maaiveld en de bovenkant buis wordt ingemeten ten opzichte van NAP met een nauwkeurigheid in de verticaal van 0,02 m;
- de peilbuis locatie wordt in X,Y opgemeten in RD, met een nauwkeurigheid van 1 m;
- de peilbuizen in de raai bij de dijk en de wellen worden boven maaiveld opgelengd tot NAP + 10 m. Hierdoor is het mogelijk om ook tijdens MHW de stijghoogte te registreren. Verwacht wordt dat de stijghoogte niet boven NAP + 10 m zal stijgen tijdens een MHW situatie (peil Nederrijn NAP + 11,4 m);
- aan maaiveld wordt de peilbuis afgewerkt met een beschermkoker en afgesloten met een slot.

Bovenstaande specificaties zorgen er voor dat de bodemopbouw ter plaatse van iedere peilbuis bekend is en dat de stijghoogte langdurig kan worden waargenomen.

Bodemopbouw

De dikte en opbouw van de deklaag brengen we in kaart via:

- de boringen ten behoeve van het plaatsen van peilbuizen;
- 20 aanvullende boringen, tot 1 m in het watervoerende pakket. Dat komt overeen met een diepte van circa 4 m - mv;
- 20 aanvullende sonderingen tot 20 m - mv;
- 1 boring te maken tot mv - 30 m.

We voeren ook laboratorium onderzoek uit, namelijk:

- in de deklaag bepalen we tijdens het plaatsen van de peilbuizen tot mv - 6 m eenmalig het volumiek gewicht. Het volumiek gewicht is invoer voor de opbarstanalyse;
- in het watervoerende pakket nemen we in alle ondiepe boringen 1 geroerd monster waarvan de zeefkromme wordt bepaald. Op basis van de zeefkrommen berekenen we de horizontale doorlatendheid met empirische formules en de D_{70} van het zand voor Sellmeijer berekeningen;
- in de boring tot 30 m - mv nemen we iedere 3,0 m een monster genomen waarvan we de zeefkromme bepalen. Deze zeefkrommen geven inzicht in de gelaagdheid van het watervoerende pakket. Op basis van de zeefkrommen berekenen we de doorlatendheid met empirische formules en de D_{70} van het zand voor Sellmeijer berekeningen. In deze boring plaatsen we de onttrekkingsput voor de pompproef.

Tenslotte voeren we een pompproef uit. Een pompproef is de beste methode om de horizontale doorlatendheid van het watervoerende pakket te analyseren. Hiervoor wordt water onttrokken uit het pakket, terwijl de reactie in omliggende peilbuizen wordt geregistreerd. Na stopzetting van de onttrekking wordt het herstel van de waterstand gemeten. Voor de waarneming van de stijghoogte gebruiken we (naast de onttrekkingsput) de nieuwe geplaatste peilbuizen, voor de waarneming van de freatische grondwaterstand plaatsen we 3 aanvullende peilbuizen.

Binnendijks oppervlaktewater

Het binnendijkse oppervlaktewater brengen we op de volgende manieren in kaart:

- op 50 locaties meten we sloot bodem in. Dit geeft inzicht voor de opbarst analyse;
- op 1 locatie richten we een meetpunt in waar we de oppervlaktewaterstand waarnemen. Nadere details zijn opgenomen in de paragraaf Waterstand monitoring;
- de dikte van de kleilaag onder de sloot brengen we in kaart door langs de sloot boringen uit te voeren. Dit heeft de voorkeur boven het maken van boringen in de sloot.

Waterstand en temperatuur monitoring

Na plaatsing nemen we de waterstand en temperatuur waar in de peilbuizen en het binnendijkse oppervlaktewater. Dit lichten we in deze paragraaf toe.

Meetperiode

Het meetnet wordt in de herfst van 2015 ingericht. De metingen starten we direct na de installatie van ieder meetpunt. Conform de uitvraag zetten we de metingen voort tot februari 2016.

Wijze van data verzending

De waarnemingen van de sensoren verzenden we via telemetrie naar een centrale server. De verzending vindt dagelijks plaats, behalve tijdens hoogwater verzenden we data uurlijks. We valideren deze data (zie onder) en uploaden de gevalideerde data naar het DDSC van het waterschap. Deze validatie en upload vindt iedere maand plaats.

Data validatie

De kwaliteit van de metingen bepalen we met de Dataprofeet. De Dataprofeet is een toolbox met statistische toetsen om grote hoeveelheden meetdata snel en geautomatiseerd te kunnen beoordelen op kwaliteit. De Dataprofeet kent aan elke individuele meting een label toe. In de beoordeling worden de volgende labels (en bijbehorende toetsen) gebruikt. Bij elk label anders dan 'G' wordt nader onderzocht wat de oorzaak is van de afwijking.

Tabel I.1. Toe te kennen labels bij validatie van meetgegevens

label	omschrijving
G	goede, betrouwbare meting
X	meting is geen getal maar bijvoorbeeld NaN, Inf, -999
N	afwijkende meetfrequentie: meer of minder dan 3 minuten
M	datum/tijdstempel ontbrak in meetreeks en is toegevoegd
D	dubbel datum/tijdstempel
B	meting buiten het meetbereik van de sensor
O	outlier (uitschieter) die niet vanuit het systeem kan worden verklaard
S	staptrend die niet vanuit het systeem kan worden verklaard
L	lineaire trend die niet vanuit het systeem kan worden verklaard (sensor drift)
T	twijfelachtige meting op basis van regressieanalyse met andere reeksen

Data kwaliteit

Omdat kwalitatief goede data van groot belang zijn in het project wordt de datalevering iedere ochtend tijdens werkdagen gecontroleerd door de onderaannemer. Bij storing wordt in overleg met Witteveen+Bos actie ondernomen. Tijdens een hoogwater periode wordt een defecte sensor binnen 48 uur na constatering van het defect vervangen. Zo garanderen we de beschikbaarheid van sensoren tijdens het belangrijkste deel van de meetperiode. Buiten hoogwaterperiode wordt de sensor binnen enkele dagen vervangen.

Grondwaterkwaliteit

Tijdens hoogwater nemen we de grondwaterkwaliteit waar om de herkomst van het water in de wellen af te leiden. Hiervoor gaan we in het veld de waterkwaliteit analyse, omdat dit een efficiëntere methode is dan analyse in het laboratorium. De exacte parameters definiëren we tijdens de eerste stappen van het project, we verwachten dat temperatuur, EC en redox en zuurstofconcentratie geschikte parameters zijn.

Circa een week na plaatsing van de peilbuizen vindt bemonstering op deze parameters eenmalig plaats in alle peilbuizen. Dat is de nul situatie. Tijdens hoogwater vindt bemonstering 2 maal per week plaats, met een maximum van 4 weken per winter. Ieder keer worden de wellen bemonsterd en de bovenste filters van iedere peilbuis (zowel in de raai als de landinwaarts gelegen peilbuizen).

Hierdoor wordt een verloop van de parameters in de ruimte (meerdere peilbuizen) en tijd (meerdere metingen) verkregen. Dit inzicht gebruiken we in onze analyse van het effect van regionale kweldruk.