De Innovatie versneller

HWBP voor sterke dijken

Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma is een samenwerking van de waterschappen en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Hoogwaterbeschermingsprogramma

COLOFON

Titel	**Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping**
Opdrachtgever	HWBP-De Innovatieversneller | Piping
Auteurs	Martine Brinkhuis (TAUW)
	Guido van Rinsum (Witteveen+Bos)
	Hizkia Trul (Witteveen+Bos)
	Jordi de Leau (TAUW)
	Eindredactie door HWBP-De Innovatieversneller | Piping
Foto omslag	Jan Maissan
Kenmerk	Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping DIV versie 1.0
Inhoudelijke kwaliteitsborging	Ane Wiersma (Deltares)
	Jacco Hoogewoud (Advies in Water)
	Ruben Jongejan (RMC)
	Marc Steenvoorden (TAUW)
	Ron Stroet (RHDHV)
	Wim Kanning (Deltares)
	Han Knoeff (Deltares)
Datum	28-1-2025
Status	V1.0

Inhoudsopgave

Afkortingenlijst 5

1 Inleiding 6

1.1 Algemeen 6

1.2 Aanleiding 6

1.3 Doel 6

1.4 Doelgroep 6

1.5 Relatie met andere leidraden en documentatie 7

1.6 Toepassingsgebied en afbakening 7

1.7 Leeswijzer 8

2 Keuze geohydrologische methode 9

2.1 Inleiding 9

2.2 Doelstelling en stappen pipinganalyse 9

2.2.1 Doelstelling 9

2.2.2 Stap 1: Conceptueel model (data/fysica/geologische setting) 10

2.2.3 Stap 2: Keuze methode 11

2.2.4 Stap 3: Analyses 11

2.3 Kiezen van een geohydrologische methode 11

2.3.1 Waterspanningen pipinganalyse 11

2.3.2 Toelichting verschillende methoden grondwatermodellering 12

2.3.2.1 1D enkellaags 12

2.3.2.2 2D meerlaags 13

2.3.2.3 3D meerlaags 13

2.3.3 Keuze geohydrologische methode 14

2.4 Metingen en data 16

3 Opzetten van een 3D grondwatermodel voor veiligheidsanalyses 17

3.1 Inleiding 17

3.2 Opzetten referentiemodel 17

3.3 Parametrisatie 17

3.3.1 Deklaag 17

3.3.2 Eerste watervoerend pakket 18

3.3.3 Anisotropie 19

3.3.4 Berging 19

3.3.5 Breuken 19

3.3.6 Modelrandvoorwaarden 19

3.3.7 Onttrekkingen 19

3.3.8 Buitendijkse waterlopen/drainagemiddelen 20

3.3.9 Binnendijkse waterlopen/drainagemiddelen 20

3.4 Validatie en kalibratie *20*
3.4.1 Validatie 20
3.4.2 Kalibratie 21
3.5 Opzetten model voor ontwerp- en sterkteberekeningen *21*
3.5.1 Hoogwatergolf 21
3.5.2 Extrapolatie 22
4 Kwantificeren van onzekerheden bij stijghoogtevoorspellingen 23
4.1 Inleiding *23*
4.2 Basisconcepten *23*
4.3 Methoden voor de kwantificering van onzekerheid *23*
4.4 Parameteronzekerheid *25*
4.5 Schematiseringsonzekerheid *29*
4.6 Modelonzekerheid *30*
4.7 Werken met een stochastisch grondwaterstromingsmodel bij beoordeling en ontwerp *31*
5 Toepassing van een 3D grondwatermodel in evenwichtsanalyses voor piping 33
5.1 Inleiding *33*
5.2 Koppeling stijghoogtemodel aan sterktevergelijking *33*
5.2.1 Opbarsten 33
5.2.2 Heave 33
5.2.3 Terugschrijdende erosie 33
5.3 Mogelijkheden vergroten betrouwbaarheid *36*
5.4 Toepassingsmogelijkheden *36*
5.5 Toekomstige optimalisatiemogelijkheden *36*
6 Bibliografie 38

Bijlage 1 Praktijkvoorbeeld Meanderende Maas

Afkortingenlijst

BOI	Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium
DIV	De Innovatieversneller
ENW	Expertise Netwerk Waterveiligheid
GAP	Geohydrologische Aanpak Piping
GZB	Grofzandbarrière
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma
IPLO	Informatiepunt Leefomgeving
LBO1	Eerste Landelijke Beoordelingsronde Overstromingskans
OI	Ontwerp Instrumentarium
POV	Projectoverstijgende Verkenning
SOS	Stochastische Ondergrondschematisatie
TRWD	Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken
VZG	Verticaal zanddicht geotextiel
WBI	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Voorliggend document richt zich op de praktische toepassing als gebruik wordt gemaakt van regionale 3D[1] grondwatermodellen bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen.

1.2 Aanleiding

Het Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping vindt zijn basis in een in 2018 tot en met 2020 uitgevoerde 'Projectgebonden HWBP innovatie' bij Waterschap Aa en Maas, wat uitmondde in de Geohydrologische Aanpak Piping (GAP). Inmiddels wordt de aanpak bij de projecten Meanderende Maas en Cuijk – Ravenstein toegepast. De toepassingspraktijk die daar en bij andere projecten is ontstaan rondom het gebruik van regionale grondwatermodellen voor de analyse van piping wordt op toegankelijke wijze beschreven in dit document.

1.3 Doel

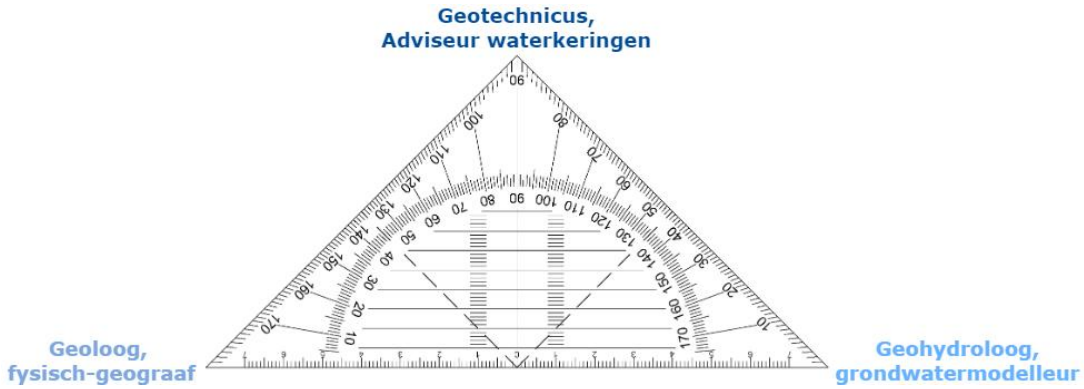
Het doel van dit document is het bieden van handvatten voor het uitvoeren van een geohydrologische analyse om de kans op overstroming door het faalmechanisme piping te kunnen bepalen. Deze analyse is nodig voor het goed invullen van de Zorgplicht, bij het inschatten van de scope van een versterkingsopgave en bij het ontwerpen van versterkingsmaatregelen. De huidige praktijk in Nederland is dat men daarbij veelal werkt met modellen voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie (rekenregel van Sellmeijer). Dit document geeft handvatten om de belangrijkste geohydrologische parameters te bepalen voor het uitvoeren van deze analyse.

Daarbij dient dit document twee doelen:

1. De beheerder ondersteunen in de keuze van een geschikte methode voor geohydrologische analyse gericht op piping, afhankelijk van de fase van een project, benodigde detailniveau, beschikbare data en geologische kenmerken.
2. De werkwijze voor een veiligheidsanalyse piping met een 3D geohydrologisch model beschrijven.

1.4 Doelgroep

Dit document is geschreven voor technisch specialisten die betrokken zijn bij de beoordeling of de versterking van waterkeringen als het gaat om piping: geologen, geohydrologen en geotechnici, die samen ook wel de 'geodriehoek' worden genoemd.



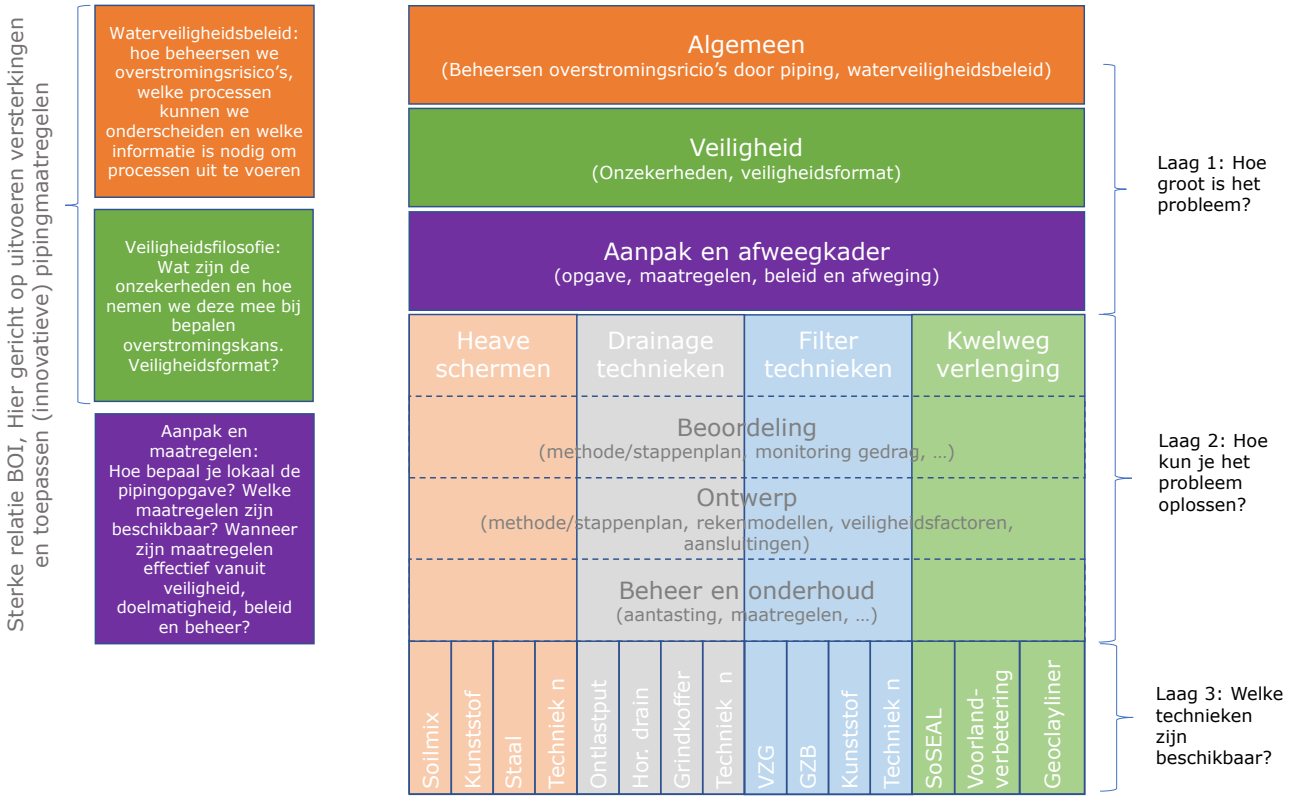
Figuur 1-1 De geodriehoek

1 In dit document wordt onder een 3D grondwatermodel een quasi-3D grondwatermodel bedoeld. In een quasi-3D grondwatermodel zijn de waterspanningen binnen een modellaag verticaal hydrostatisch.

1.5 Relatie met andere leidraden en documentatie

De aanpak die in dit document wordt beschreven sluit aan op de reeds bestaande handleidingen en technische rapporten voor waterkeringen. Zo zal regelmatig de verwijzing gemaakt worden naar het in 2004 verschenen Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) [1]. [1] geeft een overzicht van de relevante kennis over waterspanningen en toepassing van deze kennis in de praktijk. Destijds was het doel al om te komen tot een meer uniforme werkwijze bij het benaderen en modelleren van waterspanningen 'waardoor betere reproduceerbaarheid en verifieerbaarheid van praktijkadviezen wordt verkregen'.

Dit achtergronddocument past in het 'landschap' van De Innovatieversneller. De Innovatieversneller (DIV) stimuleert en versnelt de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Om de relevante ontwikkelingen rondom het thema piping te ontsluiten worden er in de komende jaren verschillende publicaties geschreven onder de regie van De Innovatieversneller Piping (DIV Piping) en in samenwerking met dijkversterkingsprojecten (waterschappen en marktpartijen), kennisinstituten en ontwikkelaars van innovatieve technieken. In Figuur 1-2 is de structuur van deze publicaties weergegeven. De verschillende publicaties geven handvatten voor het ontwerp, uitvoeren en beheren van innovatieve pipingmaatregelen. Het Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping is een achtergronddocument bij de Publicatie Aanpak en afweegkader pipingmaatregelen [2].



Figuur 1-2 Structuur publicaties DIV Piping

Mogelijk wordt het Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping als katern of artikel in een later stadium, wanneer voldoende ervaring is opgedaan, aan de technische leidraden van het BOI toegevoegd.

1.6 Toepassingsgebied en afbakening

Het Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping is toepasbaar voor het beoordelen, ontwerpen en beheren van waterkeringen gericht op piping. Het geeft handvatten voor het kiezen van een geschikte geohydrologische methode en beschrijft de werkwijze voor een veiligheidsanalyse piping met een (quasi-)

3D geohydrologisch model. Werkwijzen gericht op geohydrologische methoden anders dan de GAP zijn niet nader uitgewerkt.

1.7 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 lees je op welke manieren een pipinganalyse uitgevoerd kan worden. Na het doorlopen van dit hoofdstuk is duidelijk welke methode het meest doelmatig is om te hanteren voor de pipinganalyse. En of het opportuun is om daarbij te werken met een regionaal grondwatermodel.
Als blijkt dat het zinnig is om te werken met een 3D grondwatermodellering dan kunnen de hoofdstukken 3 tot en met 5 achtereenvolgens doorlopen worden. In hoofdstuk 3 wordt stap voor stap beschreven hoe je een bestaand regionaal 3D grondwatermodel geschikt maakt voor veiligheidsanalyses bij hoog water; hoofdstuk 4 geeft handvatten voor de manier waarop je de onzekerheden rondom de berekende stijghoogtes kunt kwantificeren op een manier die past binnen de veiligheidsfilosofie[2] en in hoofdstuk 5 wordt de manier aangereikt waarop de resultaten van de 3D grondwaterstromingsmodellering gekoppeld kunnen worden aan de evenwichtsanalyse voor piping. Wederom op een manier die past bij de veiligheidsfilosofie.

2 Bij het lezen van hoofdstuk 4, kwantificeren van onzekerheden, worden [22] en [22] als bekend verondersteld bij de lezer. De focus ligt in hoofdstuk 4 vervolgens op de aanpak rondom met een (quasi-)3D model berekende stijghoogtes.

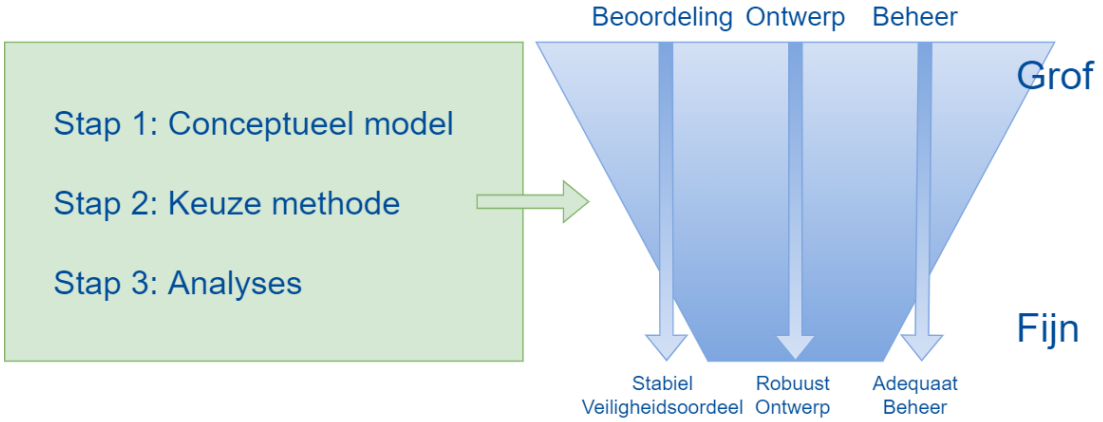
2 Keuze geohydrologische methode

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is beschreven welke methoden toegepast kunnen worden om de waterspanningen ten behoeve van een pipinganalyse te bepalen. Dit hoofdstuk geeft handvatten om af te wegen of het doelmatig is om een 3D-geohydrologisch model toe te passen. De toe te passen methode is afhankelijk van het doel (beoordeling, ontwerp of beheer), beschikbare data en geologische kenmerken (fysica) van het gebied. Na het doorlopen van dit hoofdstuk is duidelijk welke methode het meest doelmatig is om te hanteren voor de vaststelling van de waterspanningen voor een pipinganalyse.

2.2 Doelstelling en stappen pipinganalyse

Pipinganalyses worden uitgevoerd in het kader van Zorglicht (beoordeling en beheer) en voor het ontwerp van verbetermaatregelen. Bij elke analyse wordt van grof naar fijn gewerkt. De stappen binnen een pipinganalyse bestaan op hoofdlijnen uit 1) het opstellen van het conceptueel model, 2) de keuze van de methode en 3) de analyses (zie Figuur 2-1). Uiteindelijk wordt op basis van de uitgevoerde pipinganalyses een geloofwaardige overstromingskansbijdrage bepaald.



Figuur 2-1 Schematische weergave van de mogelijke doelstellingen en stappen op hoofdlijnen

2.2.1 Doelstelling

Het doel van de pipinganalyse bepaalt het type uitkomst en daarmee ook de toe te passen geohydrologische methode:

- Bij een **beoordeling** dient het veiligheidsoordeel stabiel[3] te zijn en moet een geloofwaardige overstromingskans worden bepaald in het licht van het systeemgedrag, zie ook de Handleiding Overstromingskansanalyse [3]. Geohydrologische modellen kunnen bijdragen aan het komen tot een stabiel eindresultaat en geloofwaardige overstromingskans.
- Voorafgaand aan het **ontwerpen** van pipingmaatregelen wordt vastgesteld of het veiligheidsoordeel stabiel is. Als duidelijk is dat een maatregel getroffen moet worden is het verstandig om af te wegen of extra robuustheid doelmatig en financierbaar is. Hiervoor kan een precieze scopebepaling nodig zijn om bijvoorbeeld vast te kunnen stellen hoeveel horizontale kwelweg aanvullend (breedte voorlandverbetering of pipingberm) nodig is. Hoe scherper het ontwerp dient te zijn, hoe gedetailleerder eventuele geohydrologische beschouwingen nodig zijn.
- Voor het uitvoeren van adequaat **beheer en onderhoud** is zo goed mogelijk inzicht in de pipinggevoeligheid van het gebied gewenst. Een geohydrologisch model, waarmee een beheerder tijdens hoogwater risicogestuurd inspecties kan uitvoeren, kan hieraan bijdragen. In veel gevallen

3 Het handelingsperspectief dat volgt uit de beoordeling is niet gevoelig voor veranderingen in aannames over en keuzes in bijvoorbeeld de schematisering.

kan dan volstaan worden met inzicht in het relatieve pipingrisico, de absolute waarde van het risico (faalkans) doet er in dat geval minder toe. Op basis van de constateringen in het veld kan het geohydrologisch model worden gekalibreerd, denk bijvoorbeeld aan het toevoegen van locaties van zandmeevoerende wellen of opbarstpunten.

2.2.2 Stap 1: Conceptueel model (data/fysica/geologische setting)

Allereerst dient de huidige situatie zo goed mogelijk begrepen te worden door alle relevante informatie over de ondergrond samen te brengen in een conceptueel model. Het conceptueel model vertelt het verhaal van de kering gericht op het faalmechanisme piping. Het conceptueel model beschrijft het geohydrologische gedrag en bestaat uit enkele schematische dwarsdoorsneden van de situatie en ondergrond waarin de mogelijke geometrie van de afzettingen, typische eigenschappen, verwachte afwisselingen en de intuïtief geschatte grondwaterstroming en kwelwegen worden geschetst.

In onderstaande tekst zijn de bouwstenen van het conceptuele model verder uitgewerkt. Daarnaast bevat de Handleiding Overstromingskansanalyse [3] (generieke) handvatten die kunnen helpen bij het opstellen van een conceptueel model.

1. *Geologisch systeemgedrag*
   Allereerst is van belang om het geologisch systeemgedrag van het gebied te begrijpen. Denk hierbij aan de geologische ontstaansgeschiedenis waaruit de te verwachten opbouw van de ondergrond afgeleid kan worden, bijvoorbeeld de aanwezigheid van getijdeafzetting met klei-inschakelingen of zandige rivierbeddingafzettingen ingekapseld in een dikke deklaag. Verder is het belangrijk om in te schatten of belangrijke (klei)lagen in de ondergrond continu zijn, of ook lokaal afwezig kunnen zijn, en wat voor variatie in dikte van de deklaag kan worden verwacht op basis van afzettingsmilieu en menselijke activiteiten in het gebied.
   Een veldbezoek na een korte bureaustudie is in deze fase belangrijk om te voorkomen dat aspecten over het hoofd worden gezien die van invloed zijn op piping en de opbouw van een grondwatermodel.
2. *Opbouw ondergrond*
   Pas als het geologisch systeemgedrag goed is begrepen wordt de opbouw van de ondergrond bepaald. Deze is van belang om vast te kunnen stellen of de grondopbouw pipinggevoelig is en, indien dit het geval is, dient als input voor geohydrologische analyses en pipingberekeningen. Denk hierbij aan de aan- of afwezigheid van een deklaag binnendijks en de dikte hiervan, de opbouw van het dijklichaam (zand-op-zand of niet), de grofheid van het zand, de dikte en opbouw van het watervoerend pakket, de aan- of afwezigheid van slecht doorlatende lagen in het voorland. Een eerste indruk van de verwachtte grondopbouw kan worden verkregen op basis van het SOS (Stochastische Ondergrond Schematisatie).
   Let op: soms kunnen door het ontbreken van informatie meerdere mogelijkheden bestaan van de opbouw van de ondergrond. Hier moet rekening mee worden gehouden bij de keuze van de modelstudie, bijvoorbeeld in de vorm van scenario's.
3. *De aanwezigheid van pipingremmende maatregelen*
   In een dijktraject kunnen diverse constructies aanwezig zijn die een functie hebben om weerstand te bieden tegen het faalmechanisme piping. Denk hierbij aan ontlastconstructies, heaveschermen en pipingbermen. In de toekomst zijn naar verwachting ook innovatieve technieken aanwezig zoals VZG's (verticaal zanddicht geotextiel), GZB's (grofzandbarrière) etc.
4. *Werking grondwatersysteem (geohydrologie)*
   Om het faalmechanisme piping te doorgronden is kennis over de werking van het grondwatersysteem essentieel. Hiervoor is het van belang om gebruik te maken van de kennis en gegevens die al aanwezig zijn, zoals een regionaal grondwatermodel[4] en bij voorkeur peilbuismetingen (waarbij metingen gedaan zijn tijdens een hoogwatergolf waar het voorland

4 Let op dat een regionaal grondwatermodel vaak niet direct geschikt is om een hoogwatersituatie door te rekenen. Dit wordt in het vervolg van dit achtergronddocument duidelijk.

onder water heeft gestaan). Ook hier geldt dat een veldbezoek essentieel is om aannames te valideren, denk aan slootdiepten, gaten in het voorland etc.

5. *Historische gegevens en ervaringen van de beheerder*
   Historische gegevens en ervaringen van beheerders, zoals de locaties van zandmeevoerende wellen en de hoeveelheid kwel tijdens hoogwater, zijn waardevol om te gebruiken in een pipinganalyse. Deze informatie kan gebruikt worden om een plausibiliteitscontrole uit te voeren, relatieve pipingrisico's te vergelijken en om bijvoorbeeld bewezen[5] sterkte toe te passen.
6. *Resultaten van eerdere beoordelingsrondes*
   Resultaten van eerdere beoordelingsrondes (zoals LBO1) kunnen gebruikt worden als basis[6] voor een pipinganalyse.

2.2.3 Stap 2: Keuze methode

Op basis van het conceptuele model wordt bepaald welke geohydrologische methode het meest doelmatig is om de waterspanningen ten behoeve van de pipinganalyse vast te stellen. In paragraaf 2.3 staat beschreven welke methode wanneer geschikt is en worden handvatten geboden voor de afweging.

2.2.4 Stap 3: Analyses

Wanneer de methode om de waterspanningen te bepalen is vastgesteld, worden de analyses uitgevoerd. Eén van de methoden om de analyses mee uit te voeren is de Geohydrologische Aanpak Piping en is uitgewerkt in dit document, zie hoofdstukken 3, 4 en 5.

2.3 Kiezen van een geohydrologische methode

Wanneer het doel en het conceptueel model helder zijn kan bepaald worden welke geohydrologische methode doelmatig is om de waterspanningen te bepalen. In deze paragraaf worden de benodigde waterspanningen beschreven en de verschillende geohydrologische methoden toegelicht. Tot slot wordt, in de vorm van een keuzeschema, ondersteuning gegeven bij het kiezen van de geohydrologische methode.

2.3.1 Waterspanningen pipinganalyse

Piping kan leiden tot een overstroming als er meerdere opeenvolgende gebeurtenissen[7] optreden. De trigger is de toename van de buitenwaterstand (hoogwater). Vervolgens reageert de grondwaterstand (stijghoogterespons) op de toegenomen buitenwaterstand. Analytische methoden of geohydrologische modellen kunnen worden toegepast om deze stijghoogterespons te berekenen. Het vastgestelde stijghoogteverloop wordt vervolgens gebruikt om de pipinganalyse uit te voeren.

In een pipinganalyse worden doorgaans drie gebeurtenissen uit het faalpad piping gekwantificeerd, namelijk:

1. opbarsten;
2. heave;
3. terugschrijdende erosie.

Opbarsten en heave worden doorgerekend met analytische formules waarvoor de deklaagdikte, het soortelijk gewicht van de deklaag (alleen voor opbarsten) en het verhang over de deklaag bij het uittredepunt invoer zijn.

De vorming van een doorgaand erosiekanaal (terugschrijdende erosie) wordt berekend met ofwel de rekenregel van Sellmeijer (1D, analytisch, homogeen, isotroop) of D-Geo Flow (2D doorsnede, numeriek, inhomogeen, mogelijkheid om anisotropie mee te nemen). Zowel de rekenregel als D-Geo Flow zijn

5 Bij het uitvoeren van een pipinganalyse moet het toepassen van bewezen sterkte met voorzichtigheid gebeuren. Opbarsten en heave zijn in het veld visueel waar te nemen (al betekent de afwezigheid van een waarneming niet dat het ook daadwerkelijk niet is opgetreden). Het faalcriterium van Sellmeijer is lastiger – zo niet onmogelijk – vast te stellen.
6 Let op dat de kennis van piping toeneemt. De berekeningen van een pipinganalyse uit LBO1 kunnen bijvoorbeeld uitgevoerd zijn met een voorlandlengte van maximaal één keer de dijkbasis, terwijl in werkelijkheid een veel langer voorland (en daarmee een langere kwelweg) aanwezig is.
7 Voor een gehele beschrijving van het faalpad piping wordt verwezen naar paragraaf 4.2 van de Fenomenologische Beschrijving [24].

afgeleid van het door Sellmeijer ontwikkelde rekenmodel. Zie voor meer informatie het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [4]. Naast bodemopbouw, doorlatendheden, d70 en aanwezige kwelweglengte, is het stijghoogte(verloop) noodzakelijk om de analyses uit te kunnen voeren.

2.3.2 Toelichting verschillende methoden grondwatermodellering

In onderstaande paragrafen zijn de methoden om de waterspanningen te bepalen beschreven. Op hoofdlijnen kunnen de waterspanningen bepaald worden met geohydrologische modellen[8] in 1D (analytische formules), 2D doorsnede, 2D vlak, quasi- (of semi-) 3D en zuiver 3D. Deze modellen kunnen worden geijkt met meetdata en worden gebruikt om stochastische berekeningen mee uit te voeren. Aan de hand van het type ondergrondschematisatie – 1D enkellaags, 2D meerlaags of 3D meerlaags – is in onderstaande paragrafen een toelichting gegeven op hoe de waterspanningen kunnen worden vastgesteld. Daarnaast is het toepassingsgebied, de benodigde data en een verwijzing naar relevante documentatie opgenomen. Tot slot is voor elk type schematisatie beschreven wanneer deze van toepassing zou kunnen zijn. In paragraaf 2.3.3 is vervolgens een overzichtelijk schema weergegeven waarin de toepassingsargumenten per schematisatie zijn opgesomd.

2.3.2.1 1D enkellaags

Indien een 1D schematisatie van de ondergrond van toepassing is kunnen de waterspanningen, inclusief de fictieve voorlandlengte[9] voor de bepaling van terugschrijdende erosie, analytisch vastgesteld worden. Een andere mogelijkheid voor het vaststellen van de waterspanningen is extrapolatie van stijghoogtemetingen.

Waterspanningen analytisch

- *Toelichting*: Met deze methode worden de waterspanningen onder de deklaag binnendijks voorafgaand aan opbarsten en het fictieve intredepunt voor stationaire grondwaterstroming door middel van analytische formules bepaald.
- *Toepassingsgebied*: Een homogene isotrope zandondergrond (1 laag) onder een ondoorlatende dijk met slecht doorlatende deklagen in het voorland en achterland zonder radiale intree of uittrede (zie Figuur 5-1 in hoofdstuk 5) van water. De grondwaterstromingsrichting in het zandpakket is horizontaal en in de deklaag is verticaal.
- *Benodigde data*: Bodemopbouw en doorlatendheden van lagen.
- *Documentatie*: Schematiseringshandleiding Piping [5] en Leidraad voor het ontwerpen van Rivierdijken - Deel 1 Appendix B [6].

Waterspanningen 1D extrapolatie van metingen

- *Toelichting*: Analytische methoden voor extrapolatie van waterspanning op basis van peilbuizen c.q. responsfactor naar hoogwateromstandigheden.
- *Toepassingsgebied*: Gebieden waar een relevante reeks responsmetingen beschikbaar is.
- *Benodigde data*: Bodemopbouw en doorlatendheden van lagen en peilbuismetingen van een hoogwater waarbij het voorland onder water heeft gestaan.
- *Documentatie*: Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) [1] en Notitie Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte [7].

Wanneer 1D?

Een 1D schematisatie geniet de voorkeur als de opbouw van de ondergrond eenvoudig is. Er wordt ingeschat dat het toevoegen van meer detail niet noodzakelijk is voor de bepaling van de stijghoogte. Is dit wel het geval, maar waterspanningen zijn nodig voor andere mechanismen en terugschrijdende erosie is niet het dominante deelmechanisme, dan geniet tevens de 1D schematisatie de voorkeur. Een denkbare situatie kan het bovenrivierengebied zijn waar een heel duidelijk onderscheid gemaakt kan worden tussen een dikke deklaag en een onderliggend relatief homogeen zandpakket.

8 Dit hoofdstuk beschrijft geohydrologische modellen waarmee waterspanning op lokaal niveau (gebied of dwarsprofiel) bepaald wordt en dus niet op zeer lokale schaal (bijvoorbeeld rond pipe/uittredepunt).
9 De fictieve voorlandlengte is een benaderingswijze om een doorlatend voorland mee te nemen in Sellmeijer formule (die uitgaat van een ondoorlatend voorland), zie hoofdstuk 5.

Een belangrijke randvoorwaarde voor de toepassing van een 1D schematisatie is dat de ruimtelijke component eenvoudig is. Bij een complexere ruimtelijke component met bijvoorbeeld een meanderende rivier, kronkelende dijk, wielen of zandwinningen in het voor- of achterland kan een 3D schematisatie waardevol zijn, ook al is de ondergrondopbouw 1D.

2.3.2.2 2D meerlaags
Indien een 2D schematisatie van de ondergrond van toepassing is kunnen waterspanningen en het fictieve intredepunt (op basis van spreidingslengte/leklengte van het voorland) bepaald worden met een 2D grondwaterstromingsmodel.

Waterspanningen 2D numeriek

- *Toelichting*: Gebruik van numeriek grondwaterstromingsmodel voor bepaling van waterspanningen in doorsnede en/of voor kalibratie van parameters (en afleiding leklengte/spreidingslengte) aan de hand van stijghoogtemetingen.
- *Toepassingsgebied*: 2D situaties. Vrijheid om ondergrond te schematiseren, bijvoorbeeld meerlaagsheid, anisotropie, voorland, intredeweerstand in rivier, aanwezigheid van sloten (langssloot), tijdsafhankelijkheid, berging, onverzadigde stroming, kan meegenomen worden.
- *Benodigde data*: Bodemopbouw en doorlatendheden (en bergingscoëfficiënten en parameters onverzadigde stroming bij tijdsafhankelijke stroming). Ook stijghoogtemetingen kunnen gebruikt worden om doorlatendheden te kalibreren. Voor kalibratie is tijdsafhankelijkheid direct relevant.
- *Verwijzingen naar documentatie*: POV PipingPortaal [8].

Wanneer 2D?
Een 2D schematisatie is passend als het toevoegen van meer detail in verticale richting (zoals meerlaagsheid, anisotropie of tijdsafhankelijke[10] stroming) noodzakelijk is voor de bepaling van de stijghoogte gelet op het doel van de analyse (stabiel eindresultaat en handelingsperspectief). 2D is in verschillende situaties toepasbaar, bijvoorbeeld in een getijdegebied waarin de tijdsafhankelijke component een belangrijke rol speelt, een Limburgse situatie met grind onder de watervoerende zandlaag óf een locatie waar er een goed doorlatende deklaag aanwezig is.

Een 2D meerlaagse schematisatie kan, net zoals een 1D schematisatie, worden gebruikt om de invloed van onzekerheden in de ondergrondopbouw op piping te testen. Bijvoorbeeld de aanwezigheid van een kleilaag op diepte, variaties in de dikte van de deklaag, of variaties in de ondergrondopbouw kunnen snel worden doorgerekend. Op basis van de uitkomsten kan worden doorgegaan met een conservatieve aanpak of kan gekozen worden voor aanvullend grondonderzoek om een potentieel gevoelige situatie aan te tonen of uit te sluiten. Het toepassingsgebied van 2D is echter beperkter dan voor 3D. Daarnaast kan het 2D model alleen met nabij de dijk gelegen meetpunten gekalibreerd worden, omdat meetpunten op grotere afstand niet goed bruikbaar zijn doordat 3D effecten meespelen.

2.3.2.3 3D meerlaags
Indien een 3D schematisatie van toepassing is kan een 3D grondwaterstromingsmodel gehanteerd worden voor de bepaling van waterspanningen en het bepalen van het fictieve intredepunt op basis van spreidingslengte/leklengte van het voorland.

Waterspanningen 3D numeriek

- *Toelichting*: Gebruik van 3D numeriek grondwaterstromingsmodel voor bepaling van waterspanningen en/of voor kalibratie van parameters (en de afleiding van leklengte/spreidingslengte) aan de hand van metingen.
- *Toepassingsgebied*: 3D situaties. Brede mogelijkheden om ondergrond te schematiseren, Bijvoorbeeld alle punten genoemd bij het toepassingsgebied van 2D en aanvullend nog 3D ondergrondgeometrie.

10 Het meenemen van de tijdsfactor in de modellering van grondwaterstroming vergt inzicht in meer en complexere (ondergrond)parameters. Stationaire stroming leidt tot gelijke of hogere stijghoogtes dan tijdsafhankelijke stroming dus stationair is de eerste keuze in het licht van grof naar fijn werken en kan gebruikt worden om de resultaten van niet-stationaire stroming te duiden.

- *Benodigde data*: Bodemopbouw in 3D en doorlatendheden. Ook stijghoogtemetingen kunnen gebruikt worden om doorlatendheden te kalibreren.
- *Verwijzingen naar documentatie*: Voorliggend Achtergronddocument Geohydrologische Aanpak Piping

Wanneer 3D?
Een 3D schematisatie kan in alle gevallen worden toegepast, maar ook hier geldt dat dit moet passen bij het doel van de analyse. 3D is met name passend als de situatie ruimtelijk heterogeen is en grondwaterstroming niet (altijd) haaks op de dijk staat vanwege het meanderen van de rivier, variatie van voorlandbreedtes, verschillende afstanden van de dijk tot de rivier-as, sloten, grindgaten en/of heterogeniteiten in de deklaag die niet parallel aan de dijk lopen. Een 3D schematisatie kan bijvoorbeeld van toepassing zijn voor het benedenrivierengebied waar de belangrijke zandbanen opgesloten kunnen zitten in de deklaag of mogelijk lokaal kortsluiting maken en/of de rivierbodem uit klei bestaat. Ook wanneer regionale stromingscomponenten invloed hebben op de stijghoogte (hoge achterlanden zoals de Veluwe) is een 3D aanpak passend. Een extra argument om voor een 3D schematisatie te kiezen is als de beheerorganisatie de ambitie heeft een 3D model in beheer te nemen en met monitoring uit te breiden, of al een beschikbaar 3D-model in beheer heeft dat toepasbaar kan worden gemaakt voor het bepalen van waterspanningen gerelateerd aan piping. Een voordeel is dat de invloed van toekomstige ingrepen rondom de dijk op de waterspanningen dan direct doorgerekend kunnen worden.

2.3.3 Keuze geohydrologische methode
Om te bepalen welke geohydrologische methode (1D, 2D[11] of 3D[12]) van toepassing is, kan gebruik gemaakt worden van het schema weergegeven in Figuur 2-2. Het schema geeft weer hoe, op basis van het conceptuele model, tot een 1D, 2D of 3D ondergrondschematisatie gekomen wordt.

Op basis van de ondergrondschematisatie kan een bijbehorende geohydrologische methode gekozen worden om de waterspanningen vast te stellen. Het schema geeft per type schematisatie de toepassingsargumenten. In Figuur 2-3 en Figuur 2-4 zijn twee toepassingsvoorbeelden gegeven.

Het detailniveau van de ondergrondschematisatie is bepalend voor de haalbare nauwkeurigheid van de waterspanningen. Met een gedetailleerde ondergrondschematisatie kunnen zowel gedetailleerde (3D en 2D) als minder gedetailleerde (1D) geohydrologische methoden worden toegepast. Ditzelfde geldt ook voor de stap van waterspanningen naar evenwichtsanalyses.

11 2D betreft een verticale dwarsdoorsnede waarin de heterogeniteit van de ondergrond is opgenomen.
12 In dit document wordt onder een 3D grondwatermodel een quasi-3D grondwatermodel bedoeld. In een quasi-3D grondwatermodel zijn de waterspanningen binnen een modellaag verticaal hydrostatisch.

	Conceptueel model		
Ondergrond-schematisatie	1D enkellaags	2D meerlaags	3D meerlaags
Water-spanningen	Analytische formule of extrapolatie stijghoogtemeting	2D numeriek model	3D numeriek model
	Sterkte-analyses piping		
Toepassings-argumenten	• Bij homogene niet anisotrope zandondergrond (1 laag) onder uniforme slechtdoorlatende laag in voor- en achterland • Wanneer ingeschat wordt dat het meenemen van meerlaagsheid, anisotropie of tijdsafhankelijkheid niet noodzakelijk is voor de bepaling van de stijghoogte • Ruimtelijke component is eenvoudig, de dijk loopt parallel aan de rivier over een lengte groot in verhouding tot de spreidingslengte • Grondwaterstroming is haaks op dijk • Extrapolatie van stijghoogtemetingen is alleen mogelijk wanneer relevante metingen beschikbaar zijn	• Wanneer ingeschat wordt dat het meenemen van meerlaagsheid, anisotropie of tijdsafhankelijkheid noodzakelijk is voor de bepaling van de stijghoogte • Wanneer bodemopbouw tot een enkel profielmodel leidt en stroming overal haaks op de dijk optreedt • Met name bruikbaar voor verkennende berekeningen, aangezien betrouwbaarheid 2D-modellen moeilijk vast te stellen is • Kalibratie op basis van meetpunten nabij de dijk, meetpunten op grotere afstand zijn niet goed bruikbaar, omdat 3D-effecten meer gaan meespelen	• In alle gevallen kan een 3D-model toegepast worden • Wanneer ingeschat wordt dat het meenemen van 3D-effecten nodig is om voldoende zekerheid te krijgen over de stijghoogte • Ruimtelijke component is hetrogeen en grondwaterstoming is niet (altijd) haaks op de dijk • Beheerorganisatie beheert reeds een 3D-model of heeft de ambitie dit te doen

Figuur 2-2 Schema keuze methode vaststelling waterspanningen ten behoeve van pipinganalyses

Toepassingsvoorbeeld 1
Ten behoeve van het dijkontwerp van een rivierdijk moeten pipingmaatregelen ontworpen worden. De dimensies van de toe te passen pipingmaatregelen zijn afhankelijk van de waterspanningen. In dit voorbeeld is de dijk gelegen nabij een meanderende rivier. Zowel de oriëntatie ten opzichte van de rivier als de breedte van het voorland is variabel. De deklaagdikte is relatief constant en te dun om opbarsten en/of heave eenvoudig uit te kunnen sluiten. De doorlatendheid van het 1e watervoerende pakket is lokaal variabel door de aanwezigheid van opgevulde stroomgeulen.

De complexiteit is dusdanig dat een 3D numeriek model passend is om de waterspanningen vast te kunnen stellen en gedetailleerd de dimensies van de pipingmaatregelen te kunnen bepalen.

Figuur 2-3 Toepassingsvoorbeeld 1

Toepassingsvoorbeeld 2
Ten behoeve van de beoordeling van een kanaaldijk moet een pipinganalyse uitgevoerd worden. De breedte van het voorland is constant, de doorlatendheid van het 1e watervoerende pakket is homogeen en isotroop en de dikte van de deklaag is constant en relatief dik.

Deze casus is dusdanig eenvoudig dat een 1D schematisatie passend is.

Figuur 2-4 Toepassingsvoorbeeld 2

2.4 Metingen en data

Binnen het conceptuele model wordt de huidige situatie zo goed mogelijk in beeld gebracht.

Het benodigde grondonderzoek is afhankelijk van de toe te passen methode en het beoogde detailniveau van de uitkomst. Op basis van de reeds beschikbare gegevens en het beoogde detailniveau wordt vastgesteld of er aanvullende gegevens ingewonnen moeten worden. In de Handreiking grondonderzoek voor Piping [9] staat uitgebreid beschreven welk grondonderzoek noodzakelijk is en hoe dit onderzoek uitgevoerd kan worden.

In de Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor Piping [10] staat uitgebreid beschreven hoe meetnetten kunnen worden opgezet en grondwatermonitoring kan worden uitgevoerd. De genoemde handreikingen geven houvast bij het uitvoeren van metingen om de benodigde data in te winnen. Historische data van hoogwaters kunnen ondersteunen bij het valideren van het geohydrologisch model, zie paragraaf 3.4.1.

De noodzakelijke kwaliteit en kwantiteit van grondonderzoek en metingen is afhankelijk van de beoogde betrouwbaarheid die de pipinganalyse moet geven. Hanteer voor de vaststelling van benodigde data (en eventueel aanvullend onderzoek) een van grof naar fijn benadering. Stem de informatiebehoefte dus af op de beoogde zekerheid en verfijn als onzekerheden verkleind moeten worden.

In alle gevallen zal er een mate van onzekerheid zijn over de opbouw van de ondergrond. De invloed van de onzekerheid is niet altijd goed te voorspellen. In deze gevallen kan een eenvoudig model worden opgezet om de invloed van de onzekerheid in te schatten door middel van gevoeligheidsanalyses. Mocht een onzekerheid toch een groot effect hebben waardoor de sterkte mogelijk wordt over- of onderschat, dan kan er besloten worden tot aanvullend grondonderzoek om de onzekerheid te verkleinen. Een algemene opmerking bij het verzamelen van gegevens is dat er altijd moet worden bedacht of de hoeveelheid beschikbare data voldoende is voor het detailniveau van de schematisatie, zie ook het hoofdstuk 4.

3 Opzetten van een 3D grondwatermodel voor veiligheidsanalyses

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat in op het opzetten van een 3D[13] grondwatermodel voor pipinganalyses en presenteert een stappenplan voor de adviseur waterveiligheid. Daarnaast geeft het aandachtspunten voor de geohydroloog om een geschikt grondwatermodel op te zetten, welke parameters daarbij van belang zijn en hoe het model gekalibreerd en gevalideerd kan worden.

Uitgangspunt is dat er al een regionaal grondwatermodel beschikbaar is. Deze dient geschikt gemaakt te worden voor hoogwatersituaties zodat de resultaten uit het model helpen om de pipinganalyse aan te scherpen. De belangrijkste aanpassingen zijn specifieke eisen voor de bergingscoëfficiënten. Allereerst zal men een realistisch referentiemodel moeten opstellen en deze kalibreren en valideren. Vervolgens kan dit referentiemodel aangepast worden om het geschikt te maken voor ontwerp- en sterkteberekeningen voor pipinganalyses.

3.2 Opzetten referentiemodel

Vaak is er al een gekalibreerd basismodel beschikbaar voor 'gemiddelde' grondwaterstanden in het gebied. Een dergelijk model dient geschikt gemaakt te worden voor hoogwaterberekeningen. Hieronder zijn de stappen beschreven om dit te doen.

1. Basismodel verkrijgen
2. Beoordelen of het grondwatermodel aangepast moet worden om het geschikt te maken voor het berekenen van stijghoogtes ten behoeve van pipinganalyses
3. Indien uitbreiding noodzakelijk: model uitbreiden, technische koppeling aan de hand van het lagenmodel van REGIS[14] of een ander grondwaterstromingsmodel
4. Parametrisatie van het lagenmodel geschikt maken voor hoogwater (paragraaf 3.3 bevat per parameter een uitgebreide beschrijving)
5. Schematisatie hoogwatergolf (specifiek voor piping)
6. Kalibratie en validatie van het model

Resolutie
De rekenpuntafstand moet over het algemeen 25 meter zijn (resolutie 25 x 25 meter) voor dit soort modellen. Bij een grovere resolutie zullen niet de juiste resultaten bereikt worden voor een pipinganalyse. In het geval van een fijnere resolutie kunnen er problemen (rekentijd en computergeheugen) ontstaan met het grondwatermodel. Ook geeft een model met hogere resolutie niet altijd een nauwkeuriger rekenresultaat.

3.3 Parametrisatie

Deze paragraaf beschrijft verschillende aandachtspunten per modelonderdeel, maar is niet uitputtend. Uitgangspunt is de keuze voor het conceptuele model dat is gemaakt in hoofdstuk 2.

3.3.1 Deklaag

Een belangrijk onderdeel van het model is de deklaag. De weerstand van de deklaag bepaalt in belangrijke mate hoeveel water er onder de dijk door kan stromen (terugschrijdende erosie) en wat de stijghoogtes rondom de dijk zullen zijn (opbarsten/heave). Het is daarom aan te raden om aandacht te besteden aan de geschematiseerde deklaag in het model en indien wenselijk de relevante parameters (dikte en weerstand

13 In dit document wordt onder een 3D grondwatermodel een quasi-3D grondwatermodel bedoeld. In een quasi-3D grondwatermodel zijn de waterspanningen binnen een modellaag verticaal hydrostatisch.
14 REGIS II is een 3D-lagenmodel dat de ondergrond van Nederland tot ongeveer 500 meter onder NAP in blokken van 100 x 100 meter weergeeft. Er zijn ook uitschieters in REGIS II tot circa 1.200 meter. Het model geeft aan wat goed doorlatende en slecht doorlatende lagen in de ondergrond zijn [17].

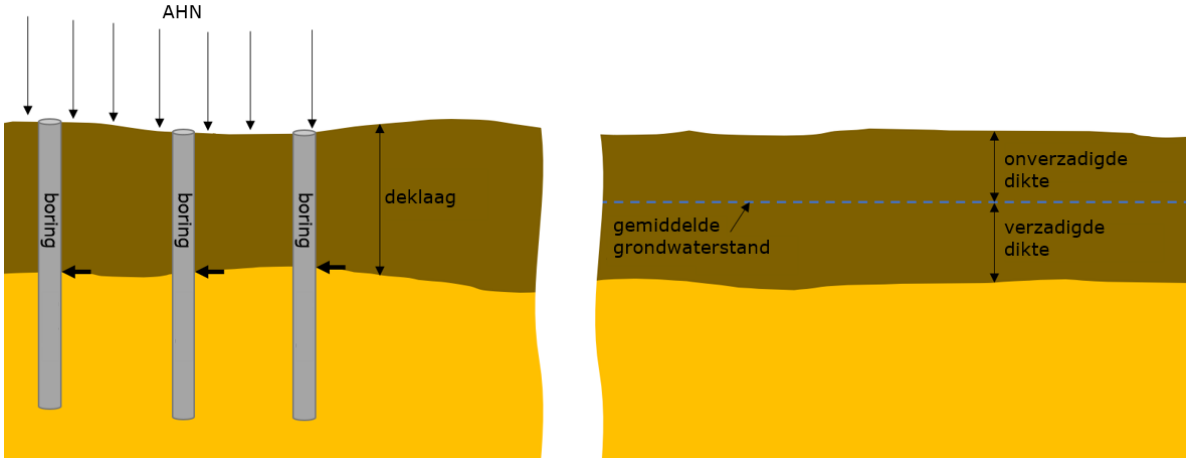
of verticale doorlatendheid) opnieuw af te leiden. Als er weinig informatie beschikbaar is, is het aan te raden onderzoek naar de deklaag te doen om hier meer gevoel bij te krijgen (lithologie, gelaagdheid, dikte, ruimtelijke variabiliteit).

Brongegevens
Als input voor het afleiden van de deklaag dienen boringen of andere geotechnische onderzoeksgegevens gebruikt te worden. De informatie kan bijvoorbeeld in iMOD[15] gevisualiseerd worden.

Systeem
De kennis van het geohydrologische systeem en de verschillende facies/afzettingsmilieus is belangrijk bij de selectie van te gebruiken boringen en bij de interpolatie van lagen. Gaat het bijvoorbeeld over een zandbaan (met deklaag) ingekapseld in een dikke klei opeenvolging of over een uitgebreid zandpakket met daarop een deklaag van variabele dikte. Een representatieve selectie van boringen is noodzakelijk om tot een juist ruimtelijk beeld van dikte, opbouw en hydraulische weerstand van de deklaag te komen. De representatieve selectie van boringen kan op basis van expert judgement vastgesteld worden.

Parametrisatie deklaag
De bovenkant van de deklaag kan gedefinieerd worden aan de hand van het AHN (of andere hoogtedata). De onderkant van de deklaag wordt bepaald met behulp van boringen. Wat daartussen zit wordt gedefinieerd als de deklaag.

In de deklaag dient onderscheid gemaakt te worden tussen onverzadigde (gerijpte) weerstand en verzadigde (ongerijpte) weerstand. De onverzadigde dikte is de laagdikte tussen het maaiveld en de gemiddelde grondwaterstand. De verzadigde dikte is de laagdikte tussen gemiddelde grondwaterstand en de onderzijde van de deklaag. Als de verschillende diktes van de deklaag bepaald zijn dienen de hydraulische waarden toegekend te worden. De onverzadigde weerstand heeft alleen effect in het voorland, wanneer deze onder water komt te staan en daardoor verzadigd raakt. In het achterland draagt het, zo lang de laag onverzadigd blijft, niet bij aan de weerstand voor verzadigde stroming.



Figuur 3-1 Parametrisatie deklaag

3.3.2 Eerste watervoerend pakket
De doorlatendheden van het eerste watervoerend pakket kunnen bijvoorbeeld uit een ondergrondmodel worden gehaald, zoals REGIS. Samenvoegingen of aanpassingen aan regionale grondwaterstromingsmodellen kunnen als gevolg hebben dat doorlatendheden in het watervoerende pakket aangepast worden. Hier dient aandacht voor te zijn. De regionale grondwaterstromingsmodellen zijn vaak gekalibreerd voor gemiddelde omstandigheden en om die reden kunnen de doorlatendheden flink

15 iMOD is een opensource versnelde versie van MODFLOW, waarbij 2D en 3D analyses en visualisaties van de ondergrond en grondwaterstromingen gemaakt kunnen worden [18].

zijn aangepast ten opzichte van de REGIS-waarden. Ook kunnen in het gebied van interesse fenomenen aanwezig zijn die niet in het regionale stromingsmodel zijn opgenomen, zoals lokale continue kleilagen die wel in lokaal grondonderzoek naar voren komen. Als deze relevant worden geacht, zoals uit het conceptuele model zou moeten volgen, dienen ze geschematiseerd te worden.

Beoordeel of de gekalibreerde waarden in de te beschouwen omgeving goed en relevant zijn. In geval van twijfel gebruik conservatieve doorlatendheden, eventueel van bijvoorbeeld de meest recente versie van REGIS. Bij de kalibratie kunnen deze doorlatendheden (weer) worden aangepast.

3.3.3 Anisotropie

Er zijn twee typen anisotropie waar rekening mee gehouden kan worden:

1. *Verticale anisotropie*: dit gaat voornamelijk over de aanwezigheid van dunne horizontale laagjes met een variabele doorlatendheid in de bodemopbouw. Dit zie je vooral in rivierengebieden.
2. *Horizontale anisotropie*: bij horizontale anisotropie gaat het over variatie in de horizontale doorlatendheid als gevolg van opstuwing of scheef gestelde bodemlagen. Dit zie je voornamelijk bij heuvelruggen.

3.3.4 Berging

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen freatische en elastische berging. De kenmerkende parameters voor freatische en elastische berging zijn de freatische bergingscoëfficiënt en de elastische bergingscoëfficiënt. Bij voorkeur wordt de waarde voor de bergingscoëfficiënt afgeleid aan de hand van modelkalibratie met een hoogwatergolf. Meestal zijn hiervoor niet de juiste gegevens beschikbaar en kunnen de onderstaande waarden als richtwaarden gehanteerd worden.

Freatische bergingscoëfficiënt

De geohydroloog dient zich ervan bewust te zijn dat freatische condities tijdens extreem hoogwater door stijgende grondwaterstand kunnen omslaan naar gespannen condities, wat gevolgen heeft voor de freatische bergingscoëfficiënt. In het buitendijkse gebied kan de berging aangepast worden, maar dit heeft de voorkeur om alleen te doen als de zone gevuld is door een hoogwater. Helaas is dit niet altijd mogelijk met de huidige software van grondwatermodellen (MODFLOW, iMOD). In dat geval kan er gekozen worden voor een kleine freatische bergingscoëfficiënt in het voorland van bijvoorbeeld 0,01 (conservatieve richtwaarde) bij het niet-stationair doorrekenen van een hoogwatersituatie.

Elastische bergingscoëfficiënt

In grondwatermodellen worden vaak (ten onrechte) veel te hoge waarden voor de elastische bergingscoëfficiënten gebruikt. Voor het doorrekenen van een hoogwater zorgt dat voor een te grote dempende werking. Daarom kan de elastische berging in de watervoerende pakketten berekend worden met een (lagere) specifieke bergingscoëfficiënt van 1/100.000 per meter (conservatieve richtwaarde).

3.3.5 Breuken

Als er breuken in de aardkorst aanwezig zijn dienen deze alleen meegenomen te worden in het grondwatermodel als deze horizontale weerstand hebben. Sommige breuken veroorzaken namelijk een hogere weerstand tegen horizontale stroming. Het is dan van belang dat eventuele sprongen in kD- en C-waarden goed worden meegenomen.

3.3.6 Modelrandvoorwaarden

Op de randen van het model waar de rivier het model binnenkomt zal een ‘no-flow’ rand gemaakt moeten worden, zodat de dynamiek vanuit de rivier vrij landinwaarts kan bewegen. Daarvoor moeten de randen haaks op de rivier/dijk gezet worden en vervolgens op inactief worden gezet.

3.3.7 Onttrekkingen

Alle relevante grondwateronttrekkingen dienen in het model te worden opgenomen. Dit zijn bijvoorbeeld drinkwaterwinningen of industriële onttrekkingen.

3.3.8 Buitendijkse waterlopen/drainagemiddelen

Waterlopen

De hoofdwaterloop is de rivier. In het ontwerp-/sterktemodel wordt in deze waterloop een hoogwatergolf gesimuleerd.

In de waterlopen dienen intredeweerstanden te worden gehanteerd. De intredeweerstand in het buitendijkse gebied moet niet te hoog aangenomen worden om bij een simulatie van een hoogwater onderschatting van de stijghoogtetoename in het watervoerend pakket te voorkomen. Voor deze toepassing zijn realistische waarden belangrijk. Als voorbeeld kunnen de volgende conservatieve richtwaarden gehanteerd worden:

- Intredeweerstand van het zomerbed is 0,1 dag
- Voor nevengeulen is de intredeweerstand 0,1 dag (de doorstroming hier is minimaal, waardoor dus waarschijnlijk een sliblaag aanwezig is)
- Intredeweerstand van het winterbed is 1 dag

De infiltratiefactor voor de buitendijkse waterlopen is 1. Dat betekent dat de intredeweerstand gelijk is aan de uittredeweerstand.

Drainagemiddelen

Als drainagemiddelen buitendijks aanwezig zijn dan mogen deze niet werkzaam zijn tijdens een hoogwater situatie. Het is belangrijk dat tijdens hoogwater deze drainagemiddelen niet aan staan en/of het juiste peil hebben.

Overlandflow

Overlandflow zorgt ervoor dat grondwaterstanden niet boven maaiveld kunnen stijgen. Bij de toekenning van overlandflow wordt onderscheid gemaakt tussen de (stationaire) aanloopperiode waarbij het voorland nog niet onder is gelopen en de simulatie van de hoogwatergolf. Op plaatsen waar het rivierpeil boven maaiveld komt, dient overlandflow uitgeschakeld te zijn.

3.3.9 Binnendijkse waterlopen/drainagemiddelen

Waterlopen

Binnendijkse watergangen dienen gecontroleerd te worden of deze insnijden in het watervoerend pakket. Als een watergang insnijdt in een watervoerend pakket dient afhankelijk van de modellaag de bodemweerstand aangepast te worden. De bodemweerstand dient aan de hand van de bodemhoogte en diepte van modellagen verdeeld te worden over de juiste bodemlagen.

Op basis van beschikbare gegevens dient ingeschat te worden wat de peilen in de binnendijkse watergangen is bij hoogwater. Indien geen gegevens beschikbaar zijn kan het peil gelijkgezet worden op minimaal de maaiveldhoogte van de omgeving van de watergang.

Drainagemiddelen

Als binnendijks drainagemiddelen aanwezig zijn is het belangrijk deze zo realistisch mogelijk in het model worden gebracht.

3.4 Validatie en kalibratie

Als het referentie grondwatermodel is opgezet dient het gevalideerd te worden. Als de validatie onvoldoende is moet het model gekalibreerd worden.

3.4.1 Validatie

Ten behoeve van validatie van het grondwatermodel zijn historische meetreeksen benodigd van hoogwatergolven. Daarbij is het belangrijk dat eventueel aanwezige voorlanden ook onder water stonden. De hoogwatergolven worden gesimuleerd in het grondwatermodel en de berekende stijghoogtes dienen dan vergeleken te worden met data uit peilbuizen en meetnetten.

Indien de historische meetreeksen onvoldoende toereikend zijn, kan dit betekenen dat het grondwatermodel niet goed genoeg gevalideerd kan worden. Dat brengt uiteindelijk grotere onzekerheid met zich mee.

3.4.2 Kalibratie

Kalibratie geeft meer zekerheid over de parameterwaardes. In de kalibratie dienen dan ook de gevoelige parameters te worden meegenomen. Meestal zijn dat:

1. de intredeweerstand van de rivierbodem;
2. de deklaagweerstand;
3. de weerstand aan de onderzijde van het 1^{e} watervoerende pakket;
4. de kD van het 1^{e} watervoerende pakket;
5. de conductance van de legger en detailwaterlopen;
6. (indien aanwezig) de weerstand in de scheidingslaag tussen twee watervoerende pakketten.

Onderstaand zijn de stappen benoemd die nodig zijn voor kalibratie:

1. IJkset samenstellen waaraan de kalibratie wordt uitgevoerd (kalibratie ijkset)
2. Initiële prestatie van referentiemodel bepalen
3. Kalibratie van referentiemodel (bepalen aanpassingsfactoren)
4. Gevoeligheid van de meetpunten bepalen
5. Betrouwbaarheid van de aanpassingsfactoren vaststellen.

Kalibratie ijkset
Voor de ijkset is het wenselijk dat die representatief is voor een hoogwater, of tenminste voor de grondwater-hoogwater interactie. Bij voorkeur zijn er langjarige meetreeksen beschikbaar, waarin ook gemeten is tijdens (grote) veranderingen van de buitenwaterstand. Als er slechts een beperkt aantal meetreeksen beschikbaar zijn, dan is dat waarmee gewerkt zal moeten worden. Afhankelijk van de situatie moeten metingen met voldoende afstand tot de modelrand worden meegenomen. Op zijn minst moeten er voldoende peilbuizen beschikbaar zijn rond de dijkzone (benodigde hoeveelheid peilbuizen dient bepaald te worden op basis van expert judgement).

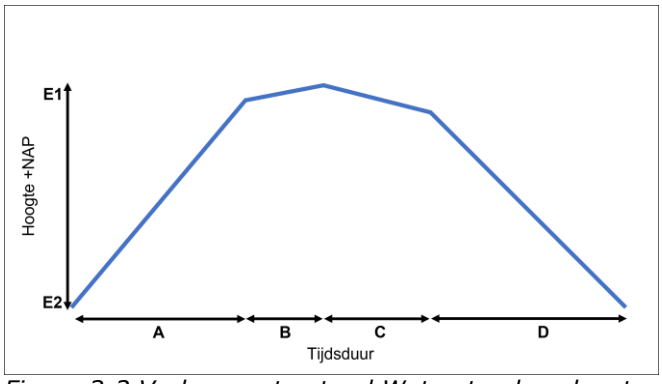
3.5 Opzetten model voor ontwerp- en sterkteberekeningen

Zodra er een gevalideerd en gekalibreerd referentiemodel beschikbaar is, kan dit model worden aangepast ten behoeve van ontwerp- en sterkteberekeningen. Een belangrijk onderdeel daarvan is het schematiseren van een hoogwatergolf. Daarnaast kan gekozen worden om parameters conservatief te gaan inschatten of stochastische methoden toe te gaan passen, hoofdstuk 4 helpt hierbij.

3.5.1 Hoogwatergolf

In het geohydrologische model wordt gerekend met een niet-stationaire hoogwater. De tijdsduur en het verloop van de hoogwatergolf beïnvloeden de stijghoogtes.

Verloop hoogwatergolf
Bij het beoordelen van waterkeringen, die alleen een beperkte tijd worden belast, kan gebruik worden gemaakt van de waterstandsverlopen, zoals die worden gepresenteerd in de tool Waterstandsverloop (versie 2.0) [5]. Met deze tool kunnen eenvoudig waterstandsverlopen op een bepaalde locatie in Nederland worden opgevraagd en geëxporteerd.



Figuur 3-2 Verloop waterstand Waterstandsverlooptool [5]

Gevoeligheidsanalyse
Het wordt aanbevolen om het verloop van de hoogwatergolf nader te beschouwen met een gevoeligheidsanalyse. Deze gevoeligheidsanalyse kan inzicht geven in het effect van het verloop van de hoogwatergolf op de stijghoogte. In de gevoeligheidsanalyse kunnen de volgende vragen gesteld worden:

- Wat is het effect van een hogere stationaire uitgangspositie?
- Wat is de invloed van de vorm van de hoogwatergolf?
- Wat is het effect van stationair hoogwater ten opzichte van niet-stationair hoogwater?
- Etc.

Tijdsafhankelijke inundaties van voorlanden
De interpolatie van het hoogwaterpeil dient vergeleken te worden met de naastgelegen maaiveldniveaus om te bepalen of het maaiveld wel of niet onderloopt. Als het maaiveld onderloopt dan wordt op die plek in het model een rivierelement gedefinieerd.

3.5.2 Extrapolatie
Met het modeleren van de hoogwatergolf wordt er geëxtrapoleerd buiten de gemeten kalibratiewaarden. Het model kan in extreme situaties anders reageren dan de werkelijkheid. Extrapolatie zal praktisch altijd plaatsvinden omdat er bijna nooit gemeten kalibratiewaarden beschikbaar zijn van een hoogwatergolf vergelijkbaar met het waterstandsverloop uit de Waterstandsverlooptool. Wanneer men een hoogwatergolf modelleert in het model, is het goed hier bewust van te zijn. Zie hiervoor ook paragraaf 4.6.

4 Kwantificeren van onzekerheden bij stijghoogtevoorspellingen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de kwantificering van de onzekerheden ten aanzien van stijghoogtevoorspellingen bij een gegeven buitenwaterstand (en waterstandsverloop). Het resultaat daarvan kan worden benut in een probabilistische benadering, waarin ook de onzekerheid ten aanzien van de buitenwaterstand (en waterstandsverloop) wordt meegenomen. Het resultaat kan ook worden gebruikt in een semi-probabilistische benadering.

4.2 Basisconcepten

In de semi-probabilistische benadering worden modellen, voor bijvoorbeeld opbarsten, heave en terugschrijdende erosie, gevoed met zogenaamde karakteristieke waarden. Dit zijn doorgaans waarden met een onderschrijdingskans van 95% voor belastingparameters (met een negatieve invloed). Voor sterkteparameters (met een positieve invloed op de grenstoestand) wordt doorgaans een 5% onderschrijdingswaarde gebruikt. De stijghoogte is een bepalende (belasting)parameter in de sterktemodellen. De met een grondwaterstromingsmodel voorspelde stijghoogte bij een gegeven hoogwater is onzeker. Met deze onzekerheid kan bij gebruik van de semi-probabilistische rekenregels uit het BOI worden omgegaan door, uitgaande van de Waterstand Bij Norm (WBN), de 95% waarde van de stijghoogte aan te houden.

Onzekerheden in een geohydrologisch model kunnen ontstaan door:

1. Parameteronzekerheid: onzekerheden ten aanzien van invoerparameters van het model
2. Schematiseringsonzekerheid: onzekerheid over de schematisatie (bijvoorbeeld ondergrondopbouw) die recht doet aan de realiteit
3. Modelonzekerheid: onzekerheid doordat een model een versimpeling van de werkelijkheid is en dus zelfs zonder parameter- of schematiseringonzekerheid geen perfecte voorspellingen zal geven

Deze drie bronnen van onzekerheid worden in dit hoofdstuk in afzonderlijke paragrafen behandeld.

4.3 Methoden voor de kwantificering van onzekerheid

Er zijn verschillende mogelijkheden om de onzekerheden over de berekende stijghoogtes met een geohydrologisch model (bijvoorbeeld een quasi-3D model) te kwantificeren. Op hoofdlijnen zijn dit de volgende methodes:

A. *'Klassieke' statistische analyse van de verschillen tussen modelresultaten en waargenomen stijghoogtes*.
   Op basis van de verschillen tussen modelresultaten en waargenomen stijghoogtes kan de modelonzekerheid in beeld worden gebracht (systematische en toevallige afwijkingen). Bij bijvoorbeeld de kleinste kwadratenmethode (Ordinary Least Squares, OLS) wordt de som van de gekwadrateerde verschillen tussen observaties en modelvoorspellingen geminimaliseerd uitgaande van een lineaire relatie tussen de onafhankelijke en de afhankelijke variabele (hier: de voorspelde stijghoogte en de waargenomen stijghoogte).

B. *Bayesiaanse statistische analyse waarin prior-verdelingen van modelparameters worden bijgesteld op basis van metingen en veldwaarnemingen.*
   Bij Bayesiaanse parameterschatting wordt de gezamenlijke (a-priori) kansdichtheidsfunctie van de onzekere parameters bijgesteld op basis van veldwaarnemingen, gebruik makend van het theorema van Bayes. Deze waarnemingen kunnen meer omvatten dan alleen waargenomen stijghoogtes, zoals ook wel/geen waargenomen zandtransport (heave).

C. *Probabilistische analyse waarin parameter-, schematisering- en modelonzekerheden afzonderlijk worden beschouwd en gekwantificeerd.*
Vervolgens wordt hun doorwerking in stijghoogtevoorspellingen bepaald, dit resulteert in een stochastisch grondwatermodel.

D. *Kwantificering van onzekerheid rond de uitkomsten van een 'deterministisch' grondwaterstromingsmodel op basis van engineering judgement.*
De onzekerheden worden niet op voorhand meegenomen bij het opstellen van het grondwaterstromingsmodel, maar op basis van expert-oordelen wordt bepaald met welke onzekerheid de uitkomsten van het opgestelde (deterministische) grondwaterstromingsmodel zijn omgegeven. In beginsel zijn hiervoor systematische methoden beschikbaar (Expert Opinion Elicitation, EOE), al is het gebruik van dergelijke methoden in de Nederlandse waterbouwsector weinig gebruikelijk en wordt vaak naar consensus door dialoog gezocht.

Methoden A en B verdienen de voorkeur omdat hiermee zo dicht mogelijk bij de beschikbare gegevens wordt gebleven (geen zwaar beroep op engineering judgement). Voor vraagstukken in hoogwaterbescherming is een 'klassieke' statistische analyse (methode A) vaak echter niet mogelijk vanwege het gebrek aan stijghoogtemetingen bij hoogwatercondities in het projectgebied. In een Bayesiaanse statistische analyse (methode B) kunnen ook andere waarnemingen worden benut. Het systematisch beschrijven van deze waarnemingen en het berekenen van posterior-verdelingen vergt echter een zeer grote inspanning. Voor zover bekend is dit nog niet eerder vertoond met een regionaal grondwaterstromingsmodel.

Methode C is en wordt breed toegepast bij de ontwikkeling van de belasting- en sterktemodellen uit het BOI. Bij quasi-3D geohydrologische modellen is deze methode ook toepasbaar, zoals geïllustreerd door de praktijktoepassing bij Meanderende Maas. Vanwege de complexiteit van quasi-3D geohydrologische modellen (met variaties in drie dimensies) en de bijbehorende rekentijden vergt dit echter wel een forse inspanning. Kwantificering op basis van engineering judgement (methode D) is relatief eenvoudig maar vereist wel dat de onzekerheid op een overtuigende/overdraagbare wijze kan worden ingeschat door experts. De ervaring bij Meanderende Maas leert dat dit niet eenvoudig is en dat er in de praktijk (verklaarbare) ruimtelijke variaties in de mate van onzekerheid zijn die zich moeilijk laten vatten in een algemene onzekerheidsterm. Methode D wordt daarom niet als een kansrijke optie gezien. Dat gezegd hebbende is een indicatieve kwantificering van onzekerheid op basis van engineering judgement (methode D) wel een verstandige 'sanity check' bij methoden A tot en met C. Verschillen in zowel grootte als richting moeten verklaarbaar zijn.

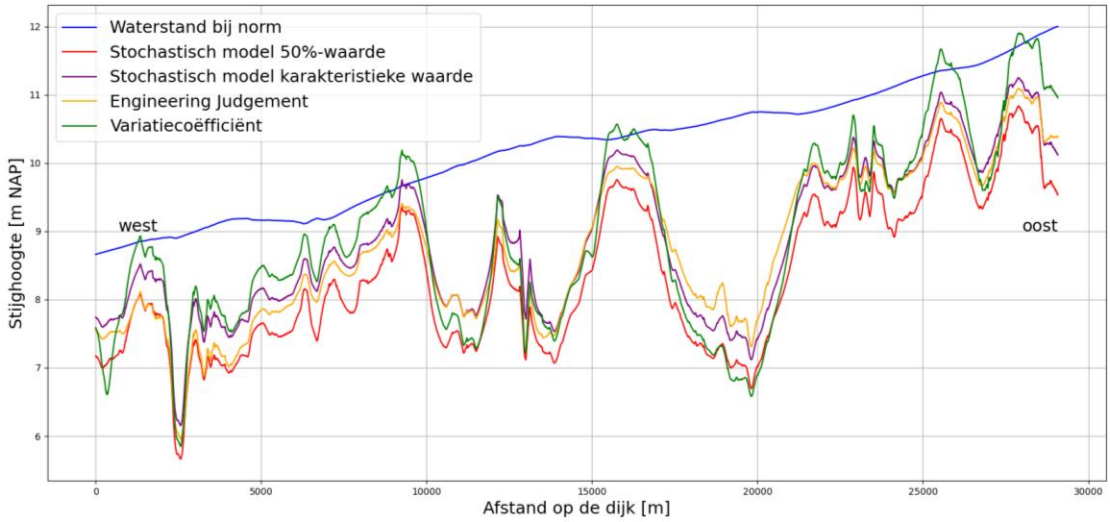
Omdat methode C doorgaans het meest kansrijk zal zijn bij vraagstukken op het gebied van hoogwaterbescherming wordt in het vervolg van dit hoofdstuk (alleen) van deze methode uitgegaan. In de hiernavolgende paragrafen worden handvatten gegeven voor het bouwen van een stochastisch grondwatermodel op basis van deze methode.

Voorbeeld: Kwantificeren van onzekerheid in Meanderende Maas
Binnen Meanderende Maas is methode C uitgewerkt: er is een stochastisch model ontwikkeld door de belangrijkste onzekere grootheden als stochastische variabelen te behandelen. Alle onzekerheden die niet expliciet zijn gemodelleerd zijn gevat in een modelonzekerheidsterm. Vanwege het gebrek aan stijghoogtemetingen onder hoogwatercondities waren methoden A en B bij Meanderende Maas niet haalbaar.

Ter controle is een behoudend (veilig) geohydrologisch model opgesteld op basis van engineering judgement (methode D). De uitkomsten van dit model zijn vergeleken met de 95% waarden van de stijghoogte volgens het stochastische model.

In Figuur 4-1 zijn deze 95% waarden ('karakteristieke waarden') van de stijghoogte langs de dijk weergegeven, uitgaande van:
1 een behoudend model dat geheel berust op engineering judgement (methode D);
2 het gebruik van het referentiemodel met een vaste variatiecoëfficiënt (methode D);
3 het gebruik van het ontwikkelde stochastisch model inclusief modelonzekerheid (methode C).

Ook de Waterstand Bij Norm is weergegeven. De karakteristieke waarden uit het stochastisch model komen redelijk goed overeen met de berekende stijghoogtes volgens het engineering-judgement model (dat voor duiding en controle dient). De grootte en richting van de verschillen is verklaarbaar op basis van de ligging van de rivier (binnen- en buitenbochten) en de aanwezigheid van voorlanden. Dit geeft vertrouwen in het stochastisch model.



Figuur 4-1 Vergelijking tussen de berekende stijghoogtes volgens het stochastische model (methode C) en het engineering judgement-model (methode D) voor Meanderende Maas

Figuur 4-2 Voorbeeld: Kwantificeren van onzekerheid in Meanderende Maas

4.4 Parameteronzekerheid

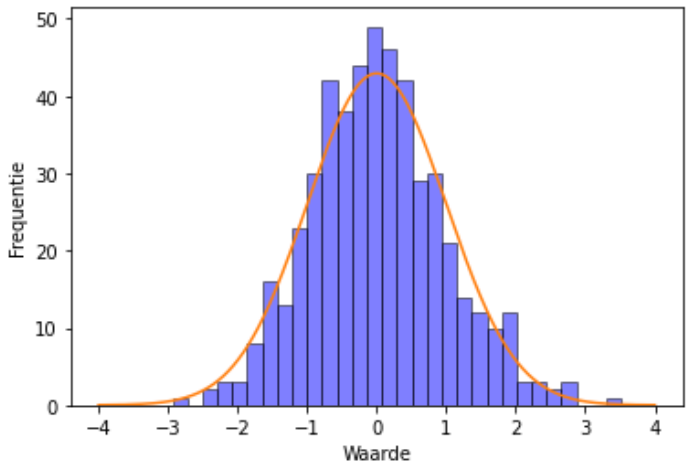
In grondwaterstromingsmodellen zijn er veel parameters die in meer of mindere mate onzeker zijn. Om de complexiteit en de rekentijd van het stochastisch grondwaterstromingsmodel te beperken, kan het nodig zijn om het aantal parameters dat als stochastische variabele wordt behandeld, te beperken. De selectie van stochastische variabelen kan worden gedaan met engineering judgement, eventueel aangevuld met gevoeligheidsanalyses. Door de waarden van de onzekere parameters binnen hun bandbreedtes te variëren en het effect op de berekende stijghoogtes te bepalen, kunnen de parameters worden geïdentificeerd die het meest bepalend zijn voor de stijghoogteonzekerheid. De overige parameters worden dan als deterministische variabelen behandeld. Een deel van de parameteronzekerheid wordt dan dus niet als zodanig meegenomen. Dit kan pragmatisch worden opgevangen door de modelonzekerheid (een

overkoepelende onzekerheidsterm) enigszins te vergroten. Als evident veilige waarden worden aangehouden, dan is een vergroting van de modelonzekerheid niet nodig en is het van belang dat men zich realiseert dat het stochastisch model een veilige afwijking bezit.

In algemene zin is een stochastische variabele te beschrijven aan de hand van:

1. een *kansverdeling* die voor een willekeurige locatie aangeeft wat de kans is dat de (werkelijke maar ons onbekende) waarde van de parameter kleiner (of groter) is dan een bepaalde waarde;
2. *auto-correlaties in het tijdsdomein* die aangeven hoe de (werkelijke maar ons onbekende) waarde van de parameter in de tijd varieert;
3. *ruimtelijke (auto)correlaties* die aangeven hoe de (werkelijke maar ons onbekende) waarde van de parameter ruimtelijk varieert.

Ad 1. De selectie van passende kansverdelingen
Op hoofdlijnen kan onderscheid worden gemaakt tussen empirische en parametrische kansverdelingen. Een empirische kansverdeling (zie Figuur 4-3) is een verdelingsfunctie die de beschikbare data direct 'volgt'. Een parametrische kansverdeling is een verdelingsfunctie die volledig wordt gedefinieerd door enkele parameters, zoals bijvoorbeeld het gemiddelde, de standaardafwijking, scheefheid, shift en/of truncation. Voorbeelden van parametrische kansverdelingen zijn de extreme-waardeverdelingen, de normale verdeling, de lognormale verdeling, de truncated normale verdeling, etc. In de praktijk wordt bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen vrijwel uitsluitend gewerkt met parametrische verdelingen.



Figuur 4-3 Voorbeeld van empirische kansdichtheidfunctie (paars/blauw histogram) en parametrische verdeling (oranje lijn)

Bij het vaststellen van een passend verdelingstype moet in eerste instantie worden gekeken naar het beschikbare statistisch materiaal. Het verdelingstype moet namelijk zo goed mogelijk aansluiten op de realiteit in de relevante range. Voor betrouwbaarheidsanalyses zijn dat vaak de wat ongunstigere waardes/ de staart van de verdeling. Engineering judgement is hierbij echter ook van belang. Bij geotechnische parameters en materiaaleigenschappen wordt veelal uitgegaan van lognormale verdelingen omdat negatieve waarden bij dit verdelingstype niet mogelijk zijn. In [11] staat beschreven van welke verdelingstypen in het WBI is uitgegaan. Het is raadzaam om dit in gedachten te houden bij het selecteren van verdelingstypen. Bij het vaststellen van de verdelingsparameters kan gebruik worden gemaakt van gangbare statistische methoden als er voldoende statistisch materiaal voorhanden is. Anders zal een beroep moeten worden gedaan op engineering judgement. Daarbij kan dan ook worden gekeken naar de default-waarden uit het WBI.

Ad 2. Het beschrijven van (auto)correlaties in het tijdsdomein
De parameteronzekerheden in een geohydrologisch model zijn onzekere ondergrondeigenschappen. Ondergrondeigenschappen worden standaard als constant in de tijd verondersteld. Bepaalde kenmerken van de ondergrond kunnen in hoogwatersituaties veranderen (zoals de dikte van een sliblaag). In de praktijk worden dat soort variaties niet als variaties in de tijd gemodelleerd maar wordt in de modellen uitgegaan van de situatie gegeven hoogwater. Voor zover die situatie onzeker is, is dit te beschouwen als een schematiseringsonzekerheid. Het ligt daarom in de rede om voor de parameteronzekerheden uit te gaan van perfecte correlatie in het tijdsdomein. Aanbevolen wordt om hier alleen van af te wijken als daar een duidelijk reden voor bestaat.

Ad 3. Het beschrijven van ruimtelijke correlaties
De ruimtelijke variabiliteit van de stochastische variabelen kan worden beschreven met autocorrelatiefuncties. In het BOI wordt standaard gewerkt met een 'kwadratisch exponentiële' autocorrelatiefunctie met twee invoerparameters:
1 de fluctuatieschaal: deze parameter geeft aan hoe snel de onzekerheid toeneemt als functie van de afstand van een meting;
2 de restcorrelatie (=ondergrens van de autocorrelatiefunctie): deze parameter geeft aan welk gedeelte van de onzekerheid ruimtelijk volledig gecorreleerd is.

Met deze autocorrelatiefuncties kunnen per stochastische variabele realisaties/trekkingen van een random field worden gegeneerd. Eén zo'n realisatie is een weergave van de waarden die de stochastische variabele overal in het veld zou kunnen bezitten.

Het rekenen met random fields op basis van autocorrelatiefuncties is relatief bewerkelijk en rekenintensief. Vereenvoudiging kan daarom nodig zijn. Er kan voor het bepalen van kansverdelingen van lokale stijghoogtes bijvoorbeeld worden uitgegaan van volledige ruimtelijke correlatie (ofwel: restcorrelatie gelijk aan 1,0) bij een grote fluctuatieschaal (bijvoorbeeld >500 meter) en/of grote restcorrelatie. Bij dergelijke fluctuatieschalen is het effect van het negeren van ruimtelijke variaties op de lokale stijghoogte mogelijk beperkt of conservatief. Het is raadzaam om dit altijd te doordenken voordat een dergelijke vereenvoudiging wordt doorgevoerd.

Ter illustratie: voor de doorlatendheid van watervoerende pakketten levert de veronderstelling van volledige ruimtelijke correlatie een overschatting van de stijghoogteonzekerheid op. Ruimtelijke variatie dempt dan de stijghoogteonzekerheid. De deklaagdikte daarentegen kan dusdanig veel variëren dat er wel voor kan worden gekozen om de ruimtelijke variabiliteit ten aanzien van deze onzekerheid wel expliciet te modelleren.

Ook voor het werken met continue random fields[16] zijn vereenvoudigingen denkbaar. Te denken valt aan:
1. Het werken met een 'schaakbordpatroon' waarbij binnen de velden van het bord wordt uitgegaan van volledige correlatie en tussen de velden van onafhankelijkheid. Om bij goede benadering uit te kunnen gaan van onafhankelijkheid moeten de afmetingen van de schaakborden minimaal gelijk zijn aan correlatielengtes. Een correlatielengte is niet hetzelfde als een spreidingslengte. De correlatielengte geeft aan hoe snel de waarde van een onzekere variabele in de ruimte fluctueert; de spreidingslengte is een maat voor de ruimtelijke doorwerking van variaties in ondergrondeigenschappen op de stijghoogte.
2. Het werken met een 'schaakbordpatroon' waarbij de midpoints van de velden onafhankelijk worden verondersteld en tussen deze punten lineair wordt geïnterpoleerd.
3. Het werken met een 'schaakbordpatroon' waarbij binnen elk veld de uitkomst van een continue random fields-simulatie wordt aangehouden. De rekenintensieve continue random fields-simulatie kan dan een groot aantal maal voor een veld met een beperkte grootte worden uitgevoerd. Door dit vaak te herhalen kan een 'bibliotheek van realisaties van het continue random field' worden

16 Bij het numeriek genereren van een continu random field wordt feitelijk ook gewerkt met een schaakbordpatroon (waarden op enige afstanden), alleen zijn de onderlinge afstanden dan zodanig klein dat het resultaat oogt als een vloeiend verloop.

aangelegd. Door uit deze bibliotheek per veld van het schaakbord een willekeurige realisatie te halen, kan een realisatie van het complete schaakbord worden geconstrueerd.

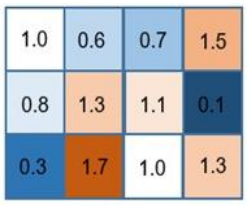
Nadelen van opties 1 en 2 is dat gecontroleerd zal moeten worden of de autocorrelaties van de gerealiseerde random fields nog enigszins corresponderen met de veronderstelde autocorrelatiefunctie. Bij optie 3 gaat dit vrijwel zeker goed als de velden groot genoeg zijn en er geen sprake is van restcorrelatie. Bij alle opties is sprake van discontinuïteiten op de randen van de velden, wat tot artefacten kan leiden. Met name bij optie 1 kan sprake zijn van grote verschillen tussen de parameterwaarden op de randen van de velden.

Voorbeeld: De omgang met ruimtelijke variabiliteit bij Meanderende Maas
Binnen het innovatietraject is op basis van gevoeligheidsanalyses voor gekozen om zeven parameters als stochastische variabelen te behandelen:

- weerstand deklaag;
- doorlatendheid eerste watervoerende pakket;
- conductance zomer- en winterbed Maas;
- conductance waterlopen;
- weerstand scheidende laag;
- doorlatendheid tweede watervoerende pakket;
- bergingscoëfficiënt.

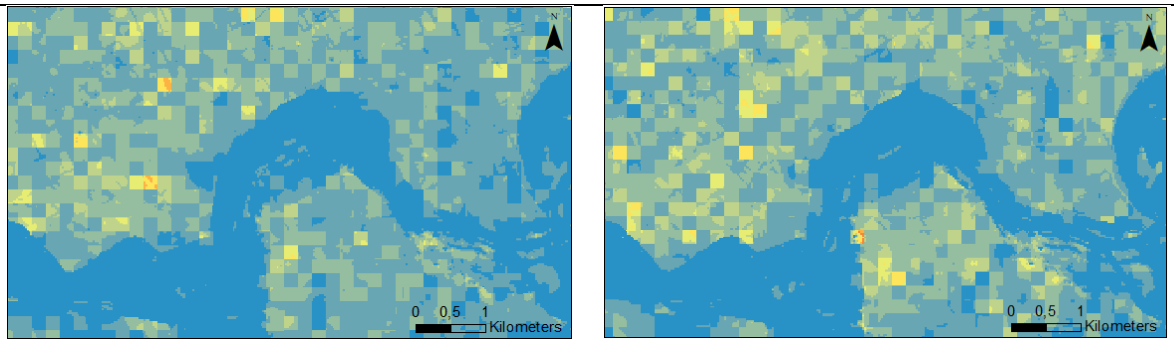
Voor deze variabelen zijn lognormale verdelingen aangehouden. Meer informatie hierover is te vinden in [12]. De meeste van deze variabelen zijn ruimtelijk perfect gecorreleerd verondersteld. Dit betekent dat geen rekening is gehouden met hun eventuele ruimtelijke variaties.

Enkel de onzekerheid over de dikte van de deklaag uit het basismodel is als ruimtelijk variabel gemodelleerd, omdat de deklaag zeer veel varieert en ruimtelijke variatie niet per sé een dempend effect heeft op de stijghoogteonzekerheid. Dit is gedaan door deklaagdiktes uit het basismateriaal met een lognormaal verdeelde verschilfactor te vermenigvuldigen. Hierbij is gebruik gemaakt van een schaakbordpatroon. Per modelrealisatie is de ligging van deze vlakken verschoven. Voor ieder vlak is een deklaagdikte bepaald door vermenigvuldiging van de lokale deklaagdiktes binnen het vlak met een random trekking van de verschilfactor, dit principe is weergegeven in Figuur 4-4. Vlakdekkend gezien is de verschilfactor met de deklaagdikte uit het basismodel gemiddeld steeds gelijk aan één, maar lokaal treden verschillen in dikte op.



Figuur 4-4 Principevoorbeeld schaakbordpatroon van de factoren die de onzekerheid van de dikte van de deklaag beschrijven in één Monte Carlo-realisatie

In Figuur 4-5 is de praktische toepassing voor Meanderende Maas weergegeven voor twee modelrealisaties.



Figuur 4-5 Twee modelrealisaties van deklaagdikte in Meanderende Maas. De verschillende kleuren representeren de deklaagdikte, waarbij de deklaagdikte toeneemt van blauw naar geel naar oranje

Parameters die betrekking hebben op de diepere ondergrond zijn niet als stochastische variabelen behandeld. Voor deze parameters is met verwachtingswaarden gerekend. Daarnaast is voor verschillende topsysteemparameters, zoals de dikte van de deklaag in het achterland, gekozen voor een veilige instelling. Een veilige instelling is een relatief dikke deklaag in het achterland, omdat een grotere weerstand in het achterland leidt tot een kleinere stijghoogtereductie, en daarmee tot grotere berekende stijghoogtes aan de buitenzijde van de dijk.

Figuur 4-6 Voorbeeld: De omgang met ruimtelijke variabiliteit bij Meanderende Maas

4.5 Schematiseringsonzekerheid

De onzekerheid in de bodemopbouw is in theorie mee te nemen door scenario's te onderscheiden en aan de scenario's kansen van voorkomen toe te kennen. Een voorbeeld van een schematiseringsonzekerheid is het wel of niet aanwezig zijn van een sliblaag op de bodem van een geul tijdens hoogwatercondities. Een complicerende factor bij een 3D model is echter dat er soms zeer veel mogelijkheden zijn. Ter illustratie: als het onzeker is waar een zandbaan zich bevindt, dan volstaat het niet te rekenen met een scenario zonder zandbaan (zoals in een 2D model zou kunnen). In theorie zou dan elke mogelijke positie van de zandbaan beschouwd moeten worden.

Om de complexiteit te beperken wordt aanbevolen om te werken met een conservatieve basisschematisatie (voor bijvoorbeeld ontwerpdoeleinden) en/of een optimistische basisschematisatie (om te bepalen of versterking onontkoombaar is). Als de schematiseringsonzekerheid groot is en van belang voor het beeld van de veiligheid, dan ligt het meer voor de hand om deze – voor zover mogelijk – weg te nemen door te meten, dan veel energie te steken in een complexe stochastische modellering.

Voorbeeld: De omvang met schematiseringonzekerheid bij Meanderende Maas
In het geohydrologisch model van Meanderende Maas is gebruik gemaakt van een conservatieve basisschematisatie ter ondersteuning van een dijkversterkingsproject (ontwerp). Om de mate van conservatisme te kunnen duiden, zijn een aantal gevoeligheidsanalyses gedaan. De volgende aspecten zijn beschouwd:

- geologische scenario's in het achterland;
- geologische scenario's in het voorland;
- gat in de deklaag;
- vorm en piek van hoogwatergolf.

In het achterland kunnen gaten ontstaan als gevolg van (grootschalig) opbarsten. Dit zorgt voor een verminderende druk op het grondwater en dus een verlaging van de stijghoogte. In het gekozen scenario worden geen gaten in het achterland door opbarsten meegenomen, dit is het meest conservatieve scenario wat betreft gaten in het achterland.

Voor de geologische scenario's in het voorland zijn twee uiterste scenario's voor de deklaagdikte doorgerekend. Een geologisch scenario met de dunste deklaag en een geologisch scenario met de dikste deklaag.

Lokale intredepunten in het voorland als gevolg van deklaagverstoring door fauna zijn onderzocht, hieruit bleek (zoals verwacht) slechts een klein effect op de stijghoogte voor dit studiegebied. Het effect tijdens een hoogwater bedroeg ordegrootte een centimeter op een afstand groter dan 2 meter. Het was zodoende niet nodig om de kans op een klein gat in de deklaag mee te nemen bij de kwantificering van de onzekerheden ten aanzien van de stijghoogtes in het studiegebied.

Als laatste is er een gevoeligheidsanalyse op de piek en vorm van de hoogwatergolf gedaan. Hieruit bleek dat de piekwaterstand belangrijker is dan de vorm van de afvoergolf voor de stijghoogte in het projectgebied. In het basis geohydrologisch model is gerekend met de Waterstand Bij Norm en een standaard afvoergolf.

Figuur 4-7 Voorbeeld: De omvang met schematiseringonzekerheid bij Meanderende Maas

4.6 Modelonzekerheid

Naast parameteronzekerheid en schematiseringonzekerheid is er modelonzekerheid. Deze komt voort uit het feit dat een model op benaderingen berust. De voornaamste zijn in dit geval:

- onzekere parameters die in het model worden behandeld als deterministische variabelen;
- versimpeling in de modellering van ruimtelijke variabiliteit van de stochastische variabelen;
- versimpeling in de omgang met schematiseringonzekerheid.

Onzekere parameters kunnen bijvoorbeeld een effect hebben op de modelonzekerheid omdat er wordt geëxtrapoleerd van 'normale' omstandigheden naar maatgevende omstandigheden. Extrapolatie heeft als gevolg dat er extrapolatieonzekerheden ontstaan. In de kalibratie zal in de regel gebruik worden gemaakt van lagere waterstanden dan de Waterstand Bij Norm (WBN). In het algemeen geldt dat hoe groter het verschil tussen omstandigheden (rivierwaterstand, polderpeilen, etc.) bij de meting en bij WBN, hoe groter de extrapolatieonzekerheid. Dit is verder voor een groot deel afhankelijk van te verwachten niet-lineair gedrag zoals erosie van weerstand biedende lagen, onderlopende voorlanden, het mee gaan stromen van nevengeulen etc. De weerstand van het rivierbed is een voorbeeld van een parameter die onderdeel kan zijn van de kalibratie (zie paragraaf 3.4.2) en kan afwijken onder maatgevende omstandigheden. Er kan namelijk erosie van weerstand biedende lagen plaatsvinden. Indien dit soort parameters als deterministische variabelen zijn behandeld kan dit doorwerken in de modelonzekerheid. De omgang met extrapolatieonzekerheid kan van groot belang zijn.

Daarnaast zijn er onzekerheden ten aanzien van de Darcy-stromingsvergelijkingen en er ontstaat onzekerheid door (de kans op) numerieke fouten en de ruimtelijke resolutie. De ervaring leert dat deze onzekerheden bij een voldoende kleine celgrootte zeer gering zijn (ordegrootte millimeters).

De modelonzekerheid kan verschillende vormen aannemen. Dit betreft onder andere het verdelingstype en de afhankelijkheid tussen de modelonzekerheid en de berekende stijghoogte (die in het vlak varieert). Het beschrijven van de modelonzekerheid is vooral een kwestie van engineering judgement. Daarbij is het raadzaam om de voornaamste bronnen van modelonzekerheid op een rij te zetten en vervolgens per bron aan te geven:

- hoe de onzekerheden van invloed zijn op de stijghoogte;
- welk verdelingstype passend is, rekening houdend met onder andere fysische boven- en ondergrenzen en of de verdeling symmetrisch of asymmetrisch is (bijvoorbeeld normaal of eerder lognormaal);
- wat passende verdelingsparameters (bijvoorbeeld gemiddelden, spreidingen) zijn;

- of de betreffende bron van onzekerheid onafhankelijk of afhankelijk van de andere bronnen van onzekerheid is.

Voorbeeld: De kwantificering van modelonzekerheid bij Meanderende Maas
De modelonzekerheid in het quasi-3D geohydrologisch model voor Meanderende Maas is gemodelleerd als een onzekere grootheid die (1) onafhankelijk, (2) normaal verdeeld en (3) additief is. Dit betekent:
1 de modelonzekerheid is onafhankelijk van andere typen onzekerheid;
2 de modelonzekerheid is symmetrisch verdeeld, waarbij grotere afwijkingen steeds minder waarschijnlijk zijn;
3 de kansverdeling van de modelonzekerheid is bij elke stijghoogte hetzelfde.

De eerste aanname ligt in de rede gelet op de verschillende achtergronden van de model- en parameteronzekerheden. De tweede aanname berust deels op expert judgement en deels op de opgedane inzichten uit de uitgevoerde stochastische berekeningen. De derde aanname berust volledig op engineering judgement en is deels ingegeven doordat een eventuele fout eerder aan de veilige dan de onveilige kant zal zitten.

De verwachting is dat het model geen systematische fout bezit (gegeven de gekozen basisschematisering). Daarom is uitgegaan van een gemiddelde modelonzekerheid van nul. De standaardafwijking van de modelonzekerheid is gekwantificeerd op basis van de verwachting dat de modelonzekerheid hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door:
1 de onzekere parameters die als deterministische parameters zijn behandeld;
2 de aanname dat de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte, die het resultaat is van parameteronzekerheid, normaal verdeeld is.

Voor verdere details wordt verwezen naar [12].

Figuur 4-8 Voorbeeld: De kwantificering van modelonzekerheid bij Meanderende Maas

4.7 Werken met een stochastisch grondwaterstromingsmodel bij beoordeling en ontwerp

Door voor elk van de onzekere grootheden random trekkingen te doen (Monte Carlo-simulatie) kan de kansverdeling van de stijghoogte voor elke locatie in het veld bij een gegeven buitenwaterstand worden bepaald. De resultaten van dergelijke berekeningen kunnen worden gebruikt als de invoer van sterktemodellen. Beoordelingen en verificaties van de kans op falen kunnen zowel probabilistisch als semi-probabilistisch worden uitgevoerd (zie onder andere hoofdstuk 5 van dit document).

Als het uitvoeren van een groot aantal berekeningen met een stochastisch quasi-3D geohydrologisch model een te grote rekeninspanning vergt, kan ook met een benadering worden gewerkt. Als het aantal Monte Carlo-berekeningen te klein is voor het bepalen van stabiele empirische verdelingen over het relevante kansbereik, dan kunnen eventueel ook parametrische kansverdelingen worden gefit op de berekeningsresultaten (zie over dit onderwerp ook paragraaf 4.4). Dit is in het project Meanderende Maas gedaan.

Ten behoeve van semi-probabilistische verificaties zal uit de kansverdeling van de stijghoogte bij de Waterstand Bij Norm (WBN) de 95% waarde geselecteerd moeten worden. Voor volledig probabilistische verificaties is de gehele kansverdeling van belang en zullen dus ook andere buitenwaterstanden beschouwd moeten worden. In theorie kan de buitenwaterstand als een stochastische variabele worden meegenomen in Monte Carlo-simulaties met het stochastisch grondwaterstromingsmodel. Het kan echter handiger zijn om slechts een beperkt aantal buitenwaterstanden te beschouwen en daartussen te interpoleren. Daarbij moet worden gelet op eventuele discontinuïteiten die kunnen ontstaan door het wel/niet onderlopen van voorlanden, etc. De onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte bij de beschouwde waterstanden moet vervolgens worden uitgeïntegreerd, zoals dat bijvoorbeeld ook wordt gedaan met de statistische

onzekerheid rond de waterstandsfrequentielijn. Voor meer details wordt verwezen naar paragraaf 4.8 van het rapport WBI-onzekerheden [11].

Een van de complicerende factoren bij het werken met een stochastisch grondwaterstromingsmodel is dat dat de ondergrondopbouw en de ondergrondeigenschappen niet alleen van invloed zijn op het stijghoogteverloop (de belasting), maar ook op de weerstand tegen piping (de sterkte). Als ondergrondeigenschappen onzeker zijn, dan zullen de realisaties van de ondergrondeigenschappen bij elke modelrealisatie van de belasting- en sterktemodellen identiek moeten zijn. In de praktijk is dat vrijwel alleen goed voor elkaar te krijgen door de belasting- en sterktemodellen samen te voegen in een enkel model[17]. Dat betekent dat voor een goede koppeling tussen een vlakdekkend stochastisch geohydrologisch model en bijvoorbeeld de rekenregel van Sellmeijer of D-Geo Flow een geïntegreerd model gemaakt zou moeten worden (belasting en sterkte niet langer gescheiden). Dit vergt echter een grote inspanning en levert een relatief complex model op dat mogelijk minder transparant is. Het kan dan ook praktischer zijn om de modellen gescheiden te houden en de consequenties van eventuele inconsistenties middels gevoeligheidsanalyses te verkennen. Dit is uiteindelijk wat in het project Meanderende Maas is gedaan.

17 Ter illustratie: een dikkere deklaag in het achterland zal normaliter leiden tot een grotere stijghoogte (ongunstig), maar ook tot een grotere weerstand tegen opbarsten (gunstig). Bij een geïntegreerd belasting- en sterktemodel wordt bij elke Monte Carlo-run met dezelfde deklaagdikte gerekend bij het bepalen van de stijghoogte (belasting) en bij het bepalen van de weerstand tegen opbarsten (sterkte). Dat is niet zoals er twee gescheiden, opeenvolgende Monte Carlo-analyses worden uitgevoerd. Als eerst een kansverdeling van de stijghoogte wordt bepaald (eerste Monte Carlo-analyse) en daarmee vervolgens de weerstand tegen opbarsten wordt geëvalueerd (tweede Monte Carlo-analyse), dan wordt 'onder de motorkap' gerekend met andere deklaagdiktes in het belastingmodel en het sterktemodel.

5 Toepassing van een 3D grondwatermodel in evenwichtsanalyses voor piping

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat beschreven hoe 3D[18] grondwaterstromingsmodellering gekoppeld kan worden aan de (analytische) evenwichtsanalyse voor piping.

In de huidige praktijk worden benaderingen gehanteerd. Daarbij wordt vaak met het ene model aan de belasting (hier stijghoogte) gerekend en met het andere model aan de sterkte (hier opbarsten, heave en terugschrijdende erosie). Uitdaging van deze aanpak is het zo correct mogelijk aan elkaar verbinden van het belasting- en sterktemodel om de overstromingskans zo goed mogelijk te benaderen.

Bij koppeling van het belasting- en sterktemodel dient rekening gehouden te worden met onderstaande punten:

1. *Kalibreren/meten*, alleen door te meten en kalibreren kan tot een voldoende betrouwbaar 3D model gekomen worden. Bepaal op basis van het gewenste detailniveau de bijbehorende onderzoeksbehoefte.
2. *Vermijd* zoveel als mogelijk *fysisch onmogelijke combinaties*, zoals bijvoorbeeld dikke deklaag binnendijks om stijghoogte te berekenen en dunne deklaag om sterkte te berekenen (je mag overigens wel de 5% en 95%-grenzen van dezelfde verdeling gebruiken).
3. *Gebruik*, wanneer beschikbaar, *vlakdekkende uitvoer* van de belasting om de sterkte ook vlakdekkend te bepalen[19].

5.2 Koppeling stijghoogtemodel aan sterktevergelijking

Voor falen ten gevolge van piping is, op hoofdlijnen, achtereenvolgens nodig:

- *opbarsten* van de cohesieve deklaag in het achterland;
- *heave*, het verticaal transporteren van zandkorrels door het opbarstkanaal;
- *terugschrijdende erosie*, het groeien in buitenwaartse richting van het erosiekanaal.

5.2.1 Opbarsten

De stijghoogte zoals berekend met het 3D grondwatermodel is een directe invoerparameter (belasting) in de opbarst-evenwichtsbeschouwing. In het grondwatermodel is opbarsten niet meegenomen[20], de resultaten zijn dus direct toepasbaar. Als semi-probabilistisch wordt gerekend is een 95% waarde van de stijghoogte als invoerparameter nodig. Bij een probabilistische analyse kan de verdeling van de stijghoogte gebruikt worden.

5.2.2 Heave

Ondanks het feit dat heave pas op kan treden na opbarsten wordt normaliter in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) gerekend met de stijghoogte voor opbarsten. Deze vereenvoudiging maakt dat de resultaten uit de 3D grondwatermodellering ook direct toepasbaar zijn in de sterktevergelijkingen. Als semi-probabilistisch wordt gerekend is een 95% waarde van de stijghoogte benodigd. Bij een probabilistische analyse kan de verdeling van de stijghoogtes gebruikt worden.

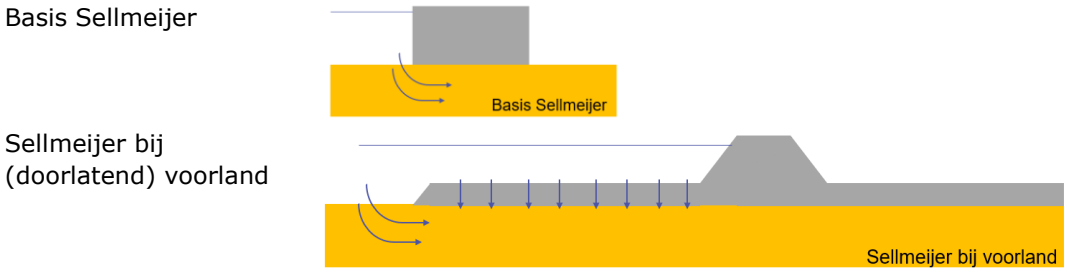
5.2.3 Terugschrijdende erosie

De weerstand tegen terugschrijdende erosie wordt doorgaans bepaald aan de hand van de rekenregel van Sellmeijer. In de rekenregel van Sellmeijer is de grondwaterstroming (2D in een homogeen isotroop zandpakket) direct verwerkt in het model en hiervoor is dus geen koppeling met een (ander)

18 In dit document wordt onder een 3D grondwatermodel een quasi-3D grondwatermodel bedoeld. In een quasi-3D grondwatermodel zijn de waterspanningen binnen een modellaag verticaal hydrostatisch.
19 Vlakdekkend oogt soms nauwkeuriger, maar let op: het is zo nauwkeurig als de nauwkeurigheid van de invoer.
20 Opbarsten zou wel meegenomen kunnen worden in een grondwatermodel, maar is niet standaard. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen wat de meerwaarde hiervan is.

grondwatermodel nodig. Om de weerstand van een doorlatend voorland mee te nemen in de rekenregel[21] van Sellmeijer kan de koppeling worden gemaakt met een grondwatermodel. De koppeling met een grondwatermodel kan worden gelegd door de afstand tussen buitenteen en intredepunt (L in de formule van Sellmeijer) zodanig te kiezen dat deze overeenkomt met de fictieve voorlandlengte die uit het grondwatermodel kan worden afgeleid. In die fictieve voorlandlengte is de hydraulische weerstand (doorlatendheid) van het voorland verwerkt.

Achtergrond: Sellmeijer-rekenregel bij doorlatend voorland
De Sellmeijer-rekenregel geldt voor een ondoorlatend voorland en daarmee een lineair stijghoogteverloop. Bij een doorlatend voorland is het stijghoogteverloop gekromd omdat er ook voeding van boven komt (zie Figuur 5-1). Om voor de afwijkende fysische situatie toch de rekenregel van Sellmeijer toe te kunnen passen kan een equivalente schematisatie worden afgeleid met niet het fysiek aanwezige voorland als kwelweglengte maar een fictieve voorlandlengte.

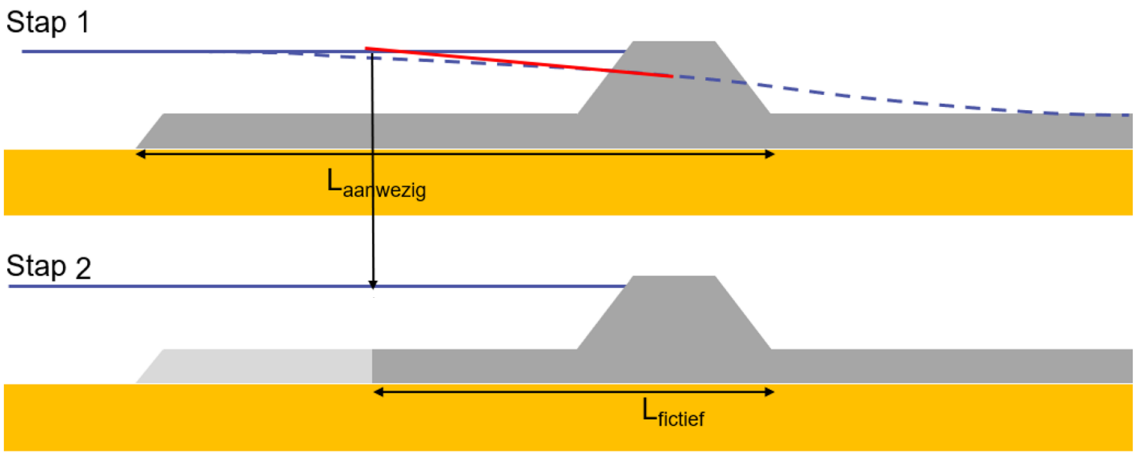


Figuur 5-1 Sellmeijer bij doorlatend voorland

Principe methode fictieve voorlandlengte
Een methode om een doorlatend voorland mee te kunnen nemen als kwelweglengte in de rekenregel van Sellmeijer is door te rekenen met een fictieve voorlandlengte. De fictieve voorlandlengte kan worden bepaald met een numeriek grondwatermodel en met een analytisch grondwatermodel. Een korte toelichting op beide mogelijkheden:

Numeriek (3D) grondwatermodel (hierin is onder andere de weerstand van het voorland (inclusief voorlandlengte) en de intredeweerstand ter plaatse van de geul direct verwerkt)
De methode is gevisualiseerd in Figuur 5-2. In de methode wordt het (lineaire) verhang onder het dijklichaam (bijvoorbeeld te bepalen op basis van de stijghoogtes bij de binnen- en buitenteen) lineair geëxtrapoleerd tot deze lijn de buitenwaterstand snijdt. Het snijpunt van deze twee lijnen is het fictieve intredepunt. Het fictieve intredepunt tot het uittredepunt is de fictieve kwelweglengte. Zie voor een uitgebreide beschrijving van deze methode het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) [1]. De Sellmeijer rekenregel (bij doorlatend voorland) kan geëvalueerd worden op basis van de buitenwaterstand en de fictieve voorlandlengte.

21 Als terugschrijdende erosie wordt beschouwd met bijvoorbeeld D-Geo Flow dan wordt de daadwerkelijk aanwezige weerstand van het voorland direct gemodelleerd.



Figuur 5-2 Bepaling fictieve voorlandlengte

Analytisch grondwatermodel (zoals model 4A uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) [1]*)*
Voor een homogeen, tweedimensionaal stationair grondwatermodel kan de fictieve voorlandlengte als volgt worden berekend:

$$L_{fict} = \lambda * \tanh(L/\lambda) \text{ waarin } \lambda=\sqrt{(kDc)} \qquad (5\text{-}1)$$

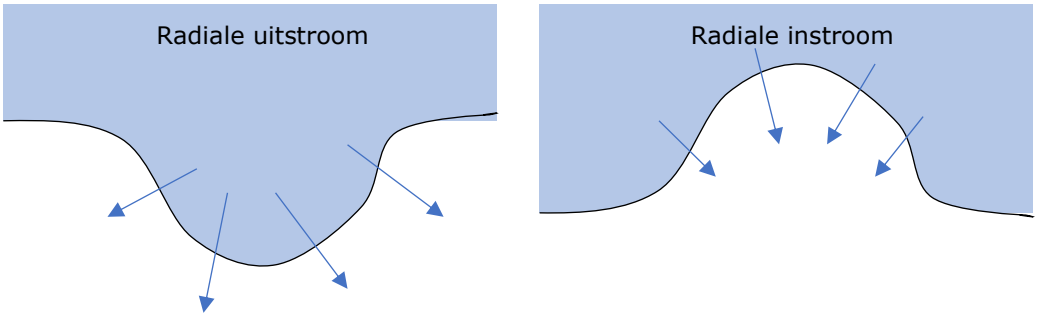
Waarin:

L_{fict}	Fictieve voorlandlengte	[m]
k	Horizontale doorlatendheid watervoerend pakket	[m/d]
D	Dikte watervoerend pakket	[m]
c	Weerstand deklaag	[d]
λ	Spreidingslengte voorland	[m]

Bij grote waarden van L ten opzichte van λ is de tanh-term nagenoeg 1 en is de fictieve voorlandlengte gelijk aan de spreidingslengte van het voorland. Bij waarden van L in dezelfde orde als λ of kleiner, wordt de tanh-term kleiner dan 1 en wordt de voorlandlengte dus kleiner dan de spreidingslengte.

Een belangrijk voordeel van de fictieve voorlandlengte-methode is dat opbarsten binnendijks geen invloed heeft op het fictieve intredepunt. Binnendijks opbarsten zorgt voor een verlaging van de stijghoogte bij de binnenteen. De locatie van het fictieve intredepunt blijft ongewijzigd. Hierdoor wordt de verhanglijn steiler. Omdat de locatie van het fictieve intredepunt ongewijzigd blijft, is zowel een grondwatermodel met als zonder opbarsten binnendijks geschikt om de fictieve voorlandlengte te bepalen.

Toepassingsbereik fictieve voorlandlengte
De methode is toepasbaar voor parallelle stroming haaks op de dijk. Er zijn ook andere stromingssituaties mogelijk, bijvoorbeeld als de dijk gekromd is, zie Figuur 5-3. Bij radiale uitstroom is de fictieve voorlandlengte die wordt bepaald eigenlijk iets te klein, bij radiale instroom is deze juist te groot [13]. Om de fictieve voorlandlengte correct vast te kunnen stellen moet voor radiale instroom gecompenseerd worden.



Figuur 5-3 Stromingssituaties bij een gekromde dijk

Een andere kanttekening bij het meenemen van fictieve voorlandlengte als kwelweglengte heeft betrekking op het groeien van de pipe onder de dijkbasis door. Zie voor een uitgebreide beschrijving over hoe hiermee omgegaan dient te worden de Handleiding Overstromingskansanalyse – Dijken/dammen deel 2 Piping [14].

Doorlatendheid, dikte watervoerend pakket en d70 in de Sellmeijer formule
Naast de grootheid L worden in de Sellmeijer formule andere grootheden gebruikt die gerelateerd zijn aan de geohydrologische parameters van een 3D grondwatermodel, namelijk:

- Dikte watervoerend pakket (D)
- Doorlatendheid (k) (of intrinsieke doorlatendheid (κ))
- 70-percentielwaarde van de korrelverdeling pipinggevoelige laag (d70)

In [5] staat beschreven hoe de parameters verkregen kunnen worden. Voor de D en k zou gebruik gemaakt kunnen worden van de waardes uit het 3D grondwatermodel.

Figuur 5-4 Achtergrond: Sellmeijer-rekenregel bij doorlatend voorland

5.3 Mogelijkheden vergroten betrouwbaarheid

De voornaamste mogelijkheid om de betrouwbaarheid van geohydrologische parameters te vergroten is het verkrijgen van meer zekerheid in de schematisatie en parametrisatie. Door het geohydrologische model bijvoorbeeld te kalibreren op stijghoogten gemeten in peilbuizen (bij voorkeur bij hoogwater met ondergelopen voorland), pompproeven in het watervoerend pakket en doorlatendheidsmetingen in het voorland kan het model en daarmee de uitkomst van de veiligheidsanalyse verder geoptimaliseerd worden.

5.4 Toepassingsmogelijkheden

Het gebruik van een 3D grondwatermodel geeft de mogelijkheid om vlakdekkende pipinganalyses uit te voeren in plaats van analyses op dwarsdoorsnedeniveau. Dit geeft de mogelijkheid om dijkvakken homogener te bepalen en oplossingsrichtingen lokaler/gerichter vast te stellen. Pipinganalyses op basis van 3D grondwatermodellen kunnen worden toegepast voor beoordelingen, ontwerp, beheer en vergunningsverlening. Hierdoor kan tot een scherp oordeel of juist een robuust ontwerp gekomen worden. Adequaat beheer kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd door op basis van deze analyses de meest risicovolle locaties te bepalen. Tijdens een calamiteit (hoogwater) kunnen deze locaties gericht gemonitord worden. Ten slotte kunnen de 3D grondwatermodellen gebruikt worden als ondersteuning bij pipinganalyses in kader van vergunningverlening. Met het model kan bepaald worden of aan vergunningseisen wordt voldaan. Het ontworpen 3D model kan bijvoorbeeld als een instrument gebruikt worden om de effecten op hoogwaterveiligheid van het afgraven van klei uit het voorland te bepalen. Een vergunningverlener kan vervolgens op basis van een gekwantificeerd effect bepalen of aan de vergunningsvereisten wordt voldaan.

5.5 Toekomstige optimalisatiemogelijkheden

Een toekomstige optimalisatiemogelijkheid is het tijdsafhankelijk doorrekenen van terugschrijdende erosie. De huidige systematiek gaat uit van stationair hoogwater. Voor het groeien van het erosiekanaal door

terugschrijdende erosie is tijd nodig. Naar verwachting levert het niet-stationair doorrekenen met Sellmeijer een geoptimaliseerd resultaat. Dit is tot op heden niet mogelijk, maar zou door een rekenmodel zoals D-Geo Flow in de toekomst mogelijk gemaakt kunnen worden.

Verdere optimalisatie kan behaald worden door het geohydrologische model en de sterktevergelijkingen verder te integreren. In D-Geo Flow is bijvoorbeeld al een 2D geohydrologisch model gekoppeld aan het rekenmodel van Sellmeijer. Verdere integratie kan zijn het uitbreiden van D-Geo Flow door het toevoegen van de sterktevergelijkingen voor opbarsten en heave. Een verdergaande stap zou zijn om een D-Geo Flow 3D versie te ontwikkelen waarin zowel de geohydrologische berekeningen als sterkteberekeningen (niet-stationair) uitgevoerd kunnen worden.

6 Bibliografie

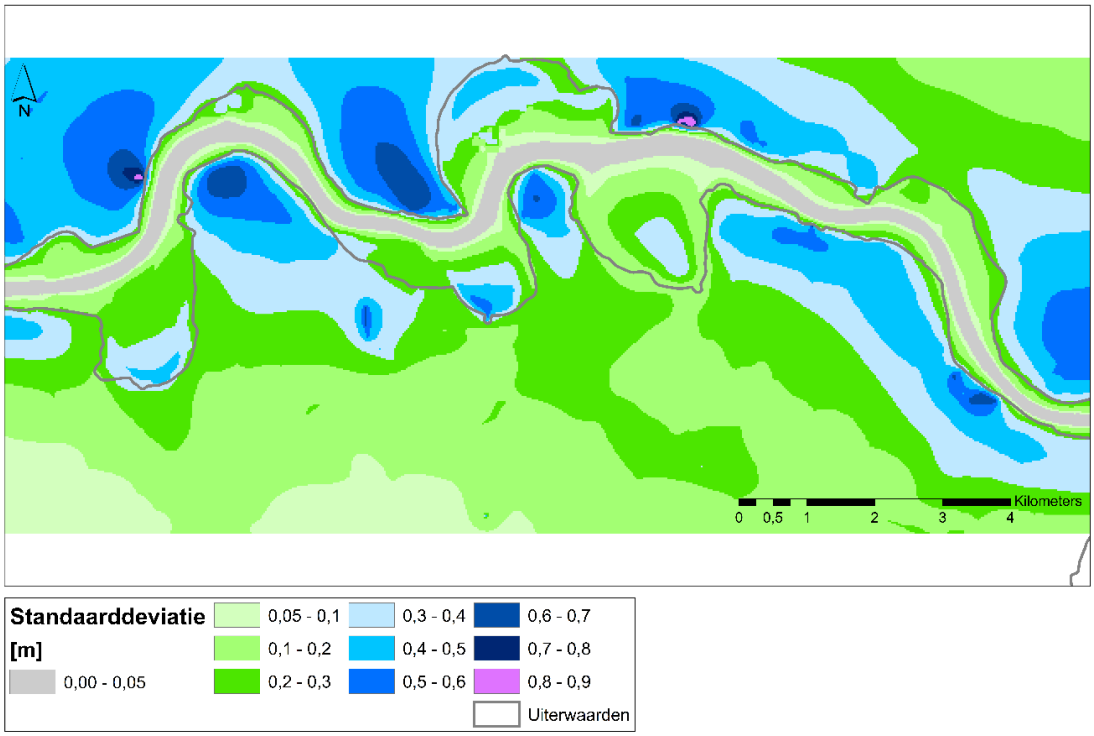
[1] TAW, „Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken," 2004.
[2] DIV Piping, „Publicatie Aanpak en afweegkader pipingmaatregelen," 2024.
[3] Rijkswaterstaat, „Handleiding Overstromingskansanalyse," 2023 (groene versie).
[4] TAW, „Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen," 1999.
[5] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Schematiseringshandleiding Piping," 2021.
[6] TAW, „Leidraad voor het ontwerp van rivierdijken, Deel 1 - Bovenrivierengebied," 1985.
[7] Deltares, „Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte," 2015.
[8] POV Piping, *POV PipingPortaal - een publicatie van de POV Piping,* Tiel: Waterschap Rivierenland, 2019.
[9] POV Piping, „Handreiking grondonderzoek voor Piping," Waterschap Rivierenland, Tiel, 2020.
[10] POV Piping, „Handreiking Meetnetten en Grondwatermonitoring voor Piping," Waterschap Rivierenland, Tiel, 2020.
[11] Deltares, „Omgaan met piping onzekerheden," z.d..
[12] Projectteam Innovatietraject Meanderende Maas, „Kwantificering onzekerheden stijghoogte - Achtergrond bij syntheserapport GAP," 2020.
[13] RoyalHaskoningDHV, „Invloed van 3-dimensionale stroming op pipingparameters," 2022.
[14] Rijkswaterstaat, „Handleiding Overstromingskansanalyse - Dijken/dammen deel 2 Piping," 2023.
[15] Projectteam Innovatietraject Meanderende Maas, *Geohydrologisch model Meanderende Maas,* 2020.
[16] Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening, „REGIS II, hydrogeologisch model (HGM)," Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening, [Online]. Available: https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/regis-ii-hydrogeologisch-model-hgm/.
[17] Deltares, „iMod," Deltares, [Online]. Available: https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/imod.
[18] DIV Piping, „Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen," 2023.
[19] Deltares, „Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI," 2018.

Bijlage 1 Praktijkvoorbeeld Meanderende Maas

Kwantificeren van onzekerheden
In deze bijlage wordt als voorbeeld beschreven hoe de stappen voor het kwantificeren van onzekerheden uit dit document zijn doorlopen bij het dijkversterkingsproject Meanderende Maas.

Voor het dijkversterkingsproject Meanderende Maas is een stochastisch model opgesteld waarin de belangrijkste parameteronzekerheden als stochastische variabelen zijn meegenomen. De meeste parameters zijn ruimtelijk 100% gecorreleerd verondersteld, de dikte van de deklaag is ruimtelijk gevarieerd in een random gepositioneerd schaakbordpatroon. Binnen elk vak van het schaakbord is overal dezelfde waarde aangehouden. De vakken zijn iedere run verplaatst. Voor de overige 'gevoelige parameters' (dat wil zeggen parameters waardoor de berekende stijghoogtes wezenlijk worden beïnvloed) zijn licht veilige waarden gebruikt en voor de ongevoelige parameters gemiddelde waarden. Alle onzekerheden die niet expliciet zijn gemodelleerd zijn gevat in een modelonzekerheidsterm.

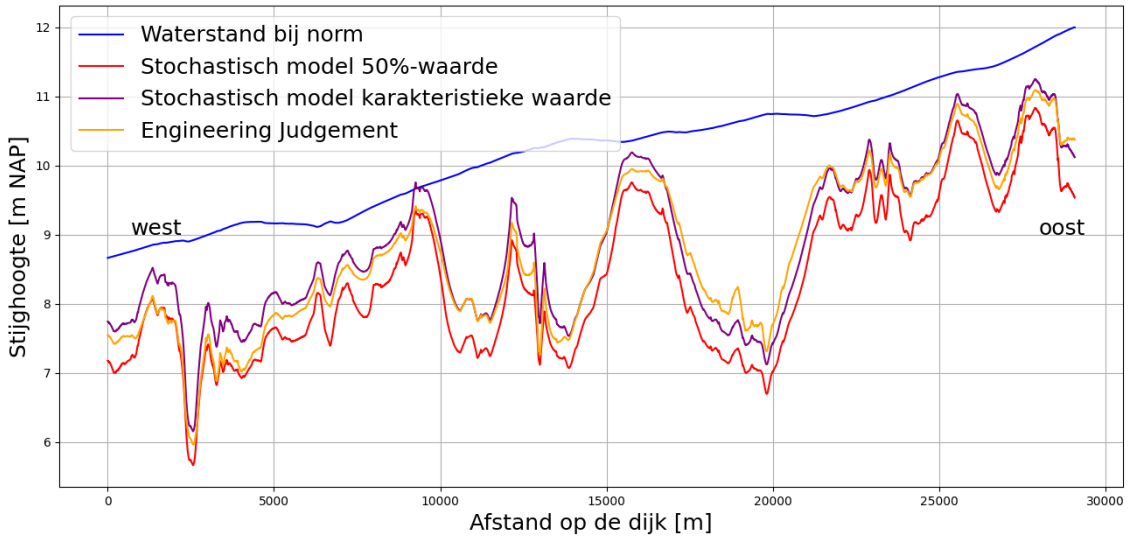
De berekende onzekerheid over de stijghoogte is ruimtelijk variabel, zie Figuur 1. In de binnenbochten van de meanders is de onzekerheid in de berekende stijghoogten aanzienlijk groter dan in de buitenbochten: in de binnenbocht is er toestroming van meerdere kanten. Dit betekent dat een verandering in parameterwaarden extra doorwerkt in het effect op de stijghoogte. Bij buitenbochten geldt het omgekeerde. Meestal is de onzekerheid binnendijks het grootst, maar bij grote uiterwaarden is er vaak ook een grote onzekerheid buitendijks. Onder de dijk is de onzekerheid vaak 'gemiddeld' en bij sommige trajecten zelfs expliciet kleiner dan in de omgeving. Dit komt onder andere doordat dijken zich (relatief ten opzichte van de spreidingslengte) vaak dicht bij het zomerbed van de rivier bevinden. Op grote afstand van de rivier (enkele kilometers) neemt de onzekerheid duidelijk weer af tot een waarde kleiner dan 10-20 centimeter.



Figuur 1 Standaarddeviatie van de stijghoogte in het stochastisch model door expliciet gemodelleerde parameteronzekerheden (standaarddeviatie van de stijghoogte berekend bij WBN)

95%-waarde van de stijghoogte
Op grond van stochastisch model inclusief modelonzekerheid is de 95%-waarde van de stijghoogte berekend, als karakteristieke waarde. Ter controle is door geohydrologen een behoudend (conservatief)

geohydrologisch model opgesteld op basis van engineering judgement. De karakteristieke waarden uit het stochastisch model komen redelijk goed overeen met de stijghoogtes uit een engineering judgement model dat is opgesteld ter controle ('sanity-check'). Dit geeft vertrouwen in het stochastisch model.



Figuur 2 Verloop onzekerheid stijghoogte in langs richting van de dijk. Paars lijn, karakteristieke waarde, is de in de aanpak gebruikte 95%-waarde van het stochastisch model

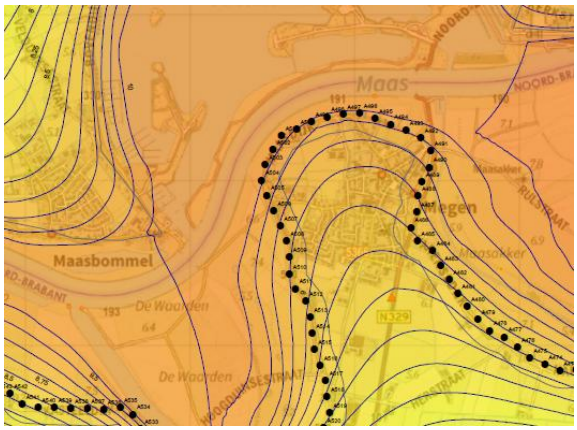
De karakteristieke waarden zoals bepaald met het stochastisch model zijn geschikt als uitgangspunt voor semi-probabilistische analyses van opbarsten, piping en heave. De verwachtingswaarde (50%) van de stijghoogte en de karakteristieke waarde liggen over het algemeen 40 tot 80 centimeter uit elkaar. Dit geeft gevoel voor wat je nog zou kunnen winnen met het verkleinen van onzekerheden, bijvoorbeeld na een gemeten hoogwater.

Tabel 1 Parameteronzekerheden als stochast

	Parameter	Variatiecoëfficiënt
Onzekerheden	• dikte deklaag • weerstand deklaag	0,5 0,4
	• dikte eerste scheidende laag • doorlatendheid eerste scheidende laag	0,1 0,4
	• dikte eerste wvp • doorlatendheid eerste wvp	0,1 0,5
	• dikte tweede wvp • doorlatendheid tweede wvp	0,1 0,5
	• intredeweerstand waterlopen	0,4
	• intredeweerstand zomer- en winterbed	0,4
	• specifieke bergingscoëfficiënt	0,5
Methode	Bovenstaande onzekerheden zijn expliciet in het stochastisch model verwerkt met een Monte-Carlosimulatie. Iedere parameter heeft hierbij een variatiecoëfficiënt gebaseerd op het BOI meegekregen, die in de rechter kolom genoemd staan.	
Conservatieve keuzes	• Ook parameters in de watervoerende pakketten die goed gekalibreerd zijn in de stationaire kalibratie hebben een variatiecoëfficiënt uit het BOI, dit leidt tot een overschatting van hun onzekerheid. • De lagen binnen één laag (bijvoorbeeld een watervoerend pakket) zijn per run als 100% gecorreleerd beschouwd. In werkelijkheid zijn ze dat niet en zouden ze tot een lagere onzekerheid uitmiddelen. • Behalve de deklaagweerstand zijn alle parameters 100% ruimtelijk gecorreleerd. Voor de watervoerende pakketten leidt dit tot een	

	overschatting van de onzekerheid, omdat deze zich als weerstand in serie gedragen. • De deklaagweerstand kon niet goed gekalibreerd worden. Daarom is op basis van boringen in het voorland een dunne deklaag afgeleid en in het achterland een dikke deklaag. Dit levert ten aanzien van de stijghoogte in het achterland een conservatief model op. Dit is apart gecontroleerd, zie schematiseringsonzekerheid.
Niet-conservatieve keuzes	• Als de deklaag volledig afwezig is, is de weerstand van geulen op tien dagen gezet. Het is mogelijk dat bij hoogwater deze weerstand lager is. In de planfase is twee dagen gehanteerd. • In de uiterwaarden is de afleiding van de deklaagweerstand niet conservatief, omdat er (nog) geen methode gehanteerd is om een dunne deklaag af te leiden. In de planfase wordt dit wel gedaan. • Een aantal scheidende lagen zijn niet terug te zien in het Dinoloket. In de planfase is daarom op sommige plekken de eerste scheidende laag verwijderd.

Koppeling stijghoogtemodel aan sterktevergelijking: fictieve voorlandlengte
Bij Meanderende Maas wordt de fictieve voorlandlengte bepaald uit de resultaten van het stochastische geohydrologische model dat voor Meanderende Maas is gebouwd [15]. Het stochastische model wordt doorgerekend voor een groot aantal (N) verschillende parametersets. Met het model worden voor situaties met rivierwaterstanden gelijk aan het WBN stijghoogten in het watervoerende pakket berekend. Dat levert dus N verschillende stijghoogtebeelden bij WBN op. Onderstaande kaart is een isohypsenkaart van één van die stijghoogtebeelden.



Figuur 3 Isohypsenkaart van de stijghoogtebeelden

Voor elke dijkpaal wordt voor elk van de N modelresultaten de stromingsrichting van het grondwater bepaald. Parallel aan de stromingsrichting wordt de helling van de verhanglijn en de spreidingslengte van het voorland bepaald. Dat levert dus N verschillende spreidingslengten per dijkpaal op. Vervolgens wordt uit die set spreidingslengten de karakteristieke waarde (95%-waarde) bepaald.

Voor de pipingtoets wordt een extra veiligheid ingebouwd voor situaties waarin in het voorland een geul ligt die insnijdt tot in het watervoerende pakket, of in het project een geul zal worden aangelegd die insnijdt tot in het watervoerende pakket. Het punt waar deze geul het watervoerende pakket aansnijdt wordt het geometrische intredepunt genoemd, op afstand L van de dijk.

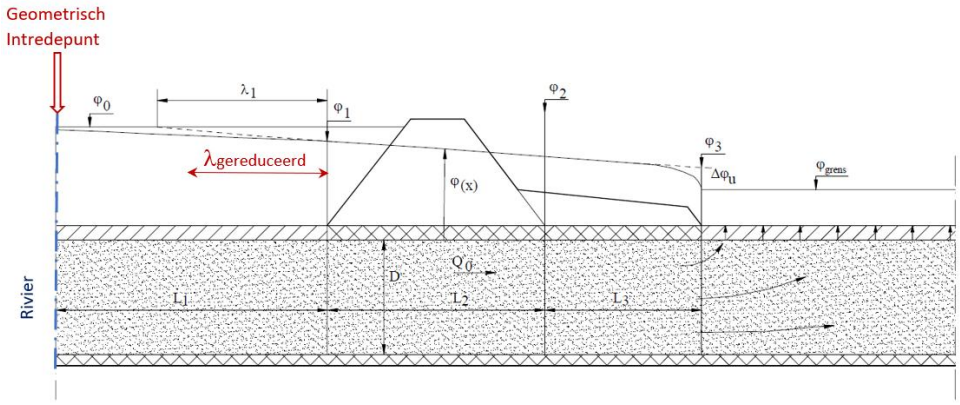
De fictieve voorlandlengte wordt vervolgens berekend met onderstaande formule uit [1]:

L_{fict} = λ* tanh(L/λ) waarin λ=√(kDc)

Waarin:

L_{fict}	Fictieve voorlandlengte	[m]
k	Horizontale doorlatendheid watervoerend pakket	[m/d]
D	Dikte watervoerend pakket	[m]
c	Weerstand deklaag	[d]
λ	Spreidingslengte voorland	[m]

Het ontwerp van geulen is in het geohydrologische model van Meanderende Maas in veel gevallen al ingebouwd met een lage weerstand van de deklaag in het voorland. De reductie van de voorlandlengte is daarom een extra ingebouwde veiligheid voor omstandigheden waarbij bijvoorbeeld door erosie tijdens WBN de weerstand tussen rivierwaterstand en watervoerend pakket nóg verder afneemt dan in het geohydrologische model wordt aangenomen.



Figuur b4.10 Optreden van de grenspotentiaal bij een situatie met een slecht doorlatende laag in het voorland

Aan het einde van de berm kan, om rekening te houden met de sterke opwaartse kwel, een radiale uittreeweerstand in rekening worden gebracht.
De totale weerstand van het zandpakket is dan:

$$W_t = W_1 + W_2 + W_3 + W_u = \frac{\lambda_1}{kD}\tanh\left(\frac{L_1}{\lambda_1}\right) + \frac{L_2}{kD} + \frac{L_3}{kD} + \frac{0{,}44D}{kD}$$

Figuur 4 Reductie van de voorlandlengte