



Handreiking Geohydrologische Aanpak voor Piping

Hoe regionale grondwatermodellen als basis toe te passen bij piping

Geannoteerde inhoudsopgave

COLOFON

Titel	Handreiking geohydrologische aanpak voor piping, geannoteerde inhoudsopgave
Opdrachtgever	HWBP De Innovatieversneller
Auteur(s)	Martine Brinkhuis (Projectleider), Esther Rosenbrand, Jacco Hoogewoud
Foto omslag	Jan Maissan
Kenmerk	2021-PIP-001
Inhoudelijke kwaliteitsborging	Han Knoeff, Henk van Hemert, Ane Wiersma, Guido van Rinsum, Hendrik Meuwese, Hendrik Kok, Huub de Bruijn, Ron Stroet, Ruben Jongejan, Wing Hong Wong
Datum	20 december 2021
Status	Definitief

Inhoud

0	Samenvatting	Error! Bookmark not defined.
1	Inleiding	5
1.1	Doel van Handreiking Geohydrologische Aanpak bij Piping	5
1.2	Afbakening en relatie met andere documenten	6
1.3	Tot standkoming en status van deze handreiking	6
1.4	Leeswijzer	6
2	Keuze van methode voor de piping analyse	7
2.1	Uitgangspunten en strategie:	7
2.2	Piping analyse: kiezen van een grondwatermodel	8
2.3	Metingen en data	11
3	GAP-3D: opzetten van 3D grondwater model voor veiligheidsanalyses	12
3.1	Grondwatermodel: opzetten referentiemodel	12
3.2	Parametrisatie	12
3.3	Kalibratie & validatie	12
4	GAP-3D: Kwantificeren van onzekerheden	13
4.1	Parameteronzekerheden	14
4.2	Schematiseringonzekerheid	14
4.3	Opzet stochastisch model	14
4.4	Modelonzekerheid	14
4.5	Consistentie van stapelen van onzekerheden	15
5	GAP-3D: toepassing in sterkte analyses voor piping	16
5.1	Koppeling stijghoogtemodel aan sterktevergelijking	16
5.2	Optimalisatiemogelijkheden voor veiligheidsanalyse	18
6	Teamsamenstelling en kwaliteitsborging	19
6.1	Teamsamenstelling	19
6.2	Kwaliteitsborging	19
6.3	Beheer	19
Bijlage: Praktijkvoorbeeld(en)		20
Kwantificeren van onzekerheden		20
Koppeling stijghoogtemodel aan sterktevergelijking: fictieve voorlandlengte		23

0 Samenvatting

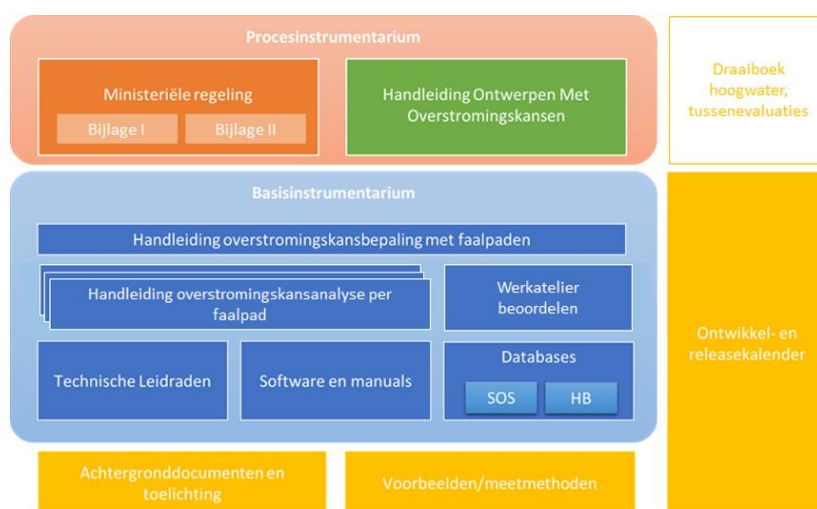
Voorliggend rapport is de uitwerking van een geannoteerde inhoudsopgave voor de ‘Handreiking Geohydrologische Aanpak voor Piping’. De inhoudsopgave is tot stand gekomen in interactie met een brede groep inhoudelijk deskundigen en vormt de basis voor de in 2022 te schrijven handreiking. Dit vindt plaats onder verantwoordelijkheid van De Innovatieversneller van het HWBP.

Het doel van de Innovatieversneller (DIV) is om de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen te stimuleren en versnellen. Een van de manieren waarop DIV haar versnellende effect bereikt is door het beschikbaar stellen van handreikingen waarin een nieuwe aanpak verder gebracht wordt tot een regulier gereedschap met heldere voorschriften. Zodat andere HWBP projecten ermee kunnen werken.

Centraal in deze handreiking staat de ‘geohydrologische aanpak voor piping’ die in 2020 door Waterschap Aa en Maas is ontwikkeld en in 2021 is toegepast in bij het dijkversterkingsproject Ravenstein-Lith. Door de uiterwaarden en rivierbedding goed te modelleren in een regionaal (semi-3D) grondwatermodel voor het hele projectgebied is een forse reductie van de pipingopgave bereikt. Door de ontwikkelde aanpak om de onzekerheden rond de berekende stijghoogtes te kwantificeren is de aansluiting bij de veiligheidsfilosofie geborgd en is een basis voor een slimme meetstrategie gelegd. ENW heeft in 2021 geadviseerd de methode breder toepasbaar te maken. Het schrijven van deze handreiking is daartoe een belangrijke stap: hiermee wordt het mogelijk de aanpak toe te passen bij andere beoordelings- en versterkingsprojecten.

In de handreiking wordt de gebruiker achtereenvolgens ondersteund in de keuze voor een geschikt model, het opzetten van een (semi-)3D grondwatermodel, het kwantificeren van onzekerheden en het toepassen van de rekenresultaten voor de sterkte analyse van piping. Ook worden handvatten gegeven voor de teamsamenstelling en de inrichting van de kwaliteitsborging.

De uitgewerkte handreiking komt in 2022 beschikbaar voor HWBP-projecten en kan op termijn als onderdeel worden toegevoegd aan de in 2022/2023 door Rijkswaterstaat te actualiseren handleiding voor het faalmechanisme piping (‘Handleiding Faalpad Piping’) uit het basisinstrumentarium voor het BOI.



Figuur 1 Weergave van de huidige ideeën rondom het Proces- en data instrumentarium van BOI.

1 Inleiding van de handreiking

- Doel en doelgroep van deze handreiking
- Benoemen dat GAP staat voor het bekijken van piping vanuit de geohydrologie. En dat de hoofdstukken 3/5 een uitwerking geven voor als je dat (semi)3D-(semi)probabilistisch doet. Nu aan te duiden als GAP_3D. Tijdens schrijven handreiking aandacht besteden aan of dit de juiste dekkende term is.
- De positie van deze handreiking ten opzichte van andere documenten zoals documenten gerelateerd aan BOI en POV Piping
- Over all: goede doorverwijzing naar andere richtlijnen e.d. maken. Streven naar compleetheit vanuit het gebruikersperspectief (dus theoretisch compleet is niet het doel)
- Eind van de handreiking ook goed doorverwijzen naar OBRs ed voor het ontwerpen van concrete maatregelen.
- Leeswijzer

1.1. Doel van Handreiking Geohydrologische Aanpak bij Piping

De handreiking heeft 2 doelen:

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

De aanpak die in deze handreiking wordt beschreven sluit aan op de reeds bestaande handleidingen en technische rapporten. Zo zal regelmatig de verwijzing gemaakt worden naar het in 2004 verschenen Technisch rapport Waterspanningen bij Dijken¹. In dit rapport is destijds een bundeling gemaakt van de aspecten over waterspanningen zoals die in de vigerende leidraden en voorschriften voor dijkbeheer en ontwerp zijn genoemd. 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.' Voorliggende handreiking richt zich op de praktische toepassing als gebruik wordt gemaakt van regionale (semi)3D grondwatermodellen bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen.

Doelgroep

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



De handreiking is door hen op twee manieren te gebruiken:

1. Voor de beginfase van een dijkversterkings- of beoordelingsproject, om het management en strategisch team te kunnen voorzien van advies over de inhoudelijke inrichting van de projectsporen en de technische afwegingen die daarbij van belang zijn. Hiervoor is met name hoofdstuk 2 geschikt

¹ Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 'Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. DWW-2004-057,' 2004

2. Tijdens het uitvoeren van de berekeningen in een dijkversterkings- of beoordelingsproject. Pragmatische tips voor het systematisch werken zodat reproduceerbaarheid, verifieerbaarheid en consistentie met de veiligheidsfilosofie en tussen verschillende waterveiligheidsprojecten geborgd blijft. Daarbij is ook aandacht voor het werken van grof naar fijn

1.2. Afbakening en relatie met andere documenten

- Korte paragraaf waarin staat dat de modellering van de geohydrologie ook van belang is voor macrostabiliteit. Met een paar verwijzingen naar nuttige publicaties zoals van Esch (ook inventarisatie)
- Noemen: BOI handleiding faalpadanalyse piping (doel is dat dit een bijlage wordt bij deze)
- Noemen: Inventarisatie voorlanden en andere nuttige publicaties zoals POV pipingportaal verwijzen naar DIV Wiki

1.3. Tot standkoming en status van deze handreiking

1.4. Leeswijzer

- Per hoofdstuk en per paragraaf geven we een annotatietekst in blauwe bullets

Daarnaast doen we op enkele plekken al een voorzet voor de inhoud van een onderdeel. Dit om gevoel te geven voor het detailniveau etc.

2 Keuze van methode voor de piping analyse

- Doel: Inzicht geven in de manieren waarop je de piping analyse uitvoert en gebruiker ondersteunen in de keuze van een model. Welke keuzes maak ik en wat zijn beschikbare modellen?
- Na het doorlopen van dit keuze-hoofdstuk weet je welk model het meest geschikt is voor je specifieke pipingvraagstuk. En dus of je met de geohydrologische aanpak voor piping wilt gaan werken. De uitkomst kan zijn dat je niet semi-3D gaat rekenen en dat je dus de hoofdstukken hierna gaat doorlopen
- Starten met strategie en uitgangspunten. Dan stroomschema, met hoofdkeuzes en stappen in de afweging. Korte beschrijving van onderliggende methoden met verwijzing naar relevante bronnen zoals technische rapporten en leidraden
- Goed neerzetten van je schematiseringsvraag bij het startpunt: conceptueel model en 1D 2D 3D. (iom Ane)
- Eventueel illustratie verschillende methoden met cases
- Aandacht voor meetnetten en metingen: De kwaliteit en hoeveelheid van je metingen en data is niet bepalend voor welk model je moet/kan gebruiken. Het is wel bepalend voor de zekerheid die je model kan bieden. Daarom in dit hoofdstuk aandacht voor data en metingen opnemen
- Aanvullende overwegingen bij het conceptuele model: wanneer 3D wel en niet zinvol is, als schematisatie onzekerheden te groot zijn kan 1D beter zijn. Keuze voor aanpak ook beïnvloed door beschikbare data, tijd, en andere projectfactoren.

2.1 Uitgangspunten en strategie:

- Piping is een relevant faalmechanisme voor de overstromingskans
- Data is op orde
- Analyse door iemand met ervaring

Strategie op hoofdlijnen:

1. Van grof naar fijn werken
2. Robuust en uitbreidbaar (in beheer nemen model, monitoring)
3. Op basis van de lokale situatie (het type probleem de oplossing bepalen)
4. Welke informatie is nodig (beoordeling, ontwerp, beheer)

Bij aanvang vaststellen:

- Is het een tot 2D te schematiseren probleem? Afhankelijk van bijvoorbeeld de loop van de rivier, de uitstroom in het achterland, de inrichting van het voorland
- Mate van relevantie piping probleem/hoe groot is het verwachte probleem? Op basis van de analyse generieke regels en beheerderservaring/observaties
- Is piping het enige veiligheidsissue, of kan een geohydrologisch model ook? Op basis van de analyse generieke regels en beheerderservaring/observaties
- Is er al een geohydrologisch model binnen de organisatie beschikbaar? Is er bereidheid dit uit te breiden/in beheer te nemen voor waterveiligheid?
- Hoeveelheid en kwaliteit van beschikbare ondergrond- en stijghoogte data

Tekstblok:

Bij deze aanvangsstrategie het belang benadrukken van het rustig stilstaan bij wat precies je studiegebied en je beslisprobleem is. Mogelijk handvatten/aanwijzingen opnemen van hoe verschillende gebieden in Nederland van elkaar verschillen, ook voor de modellering. Voorbeeld, om later uit te werken: voor MeMa is een lagenmodel a la REGIS goed te doen. Dat was een zandbak met een kleitop van variabele dikte. Voor bijvoorbeeld het benedenrivierengebied kom je er met lagen alleen niet. De belangrijke zandbanen kunnen opgesloten zitten in de deklaag (in regis is dat een "complexe" laag), of mogelijk lokaal kortsluiting maken, de bodem van de rivier kan uit klei bestaan.

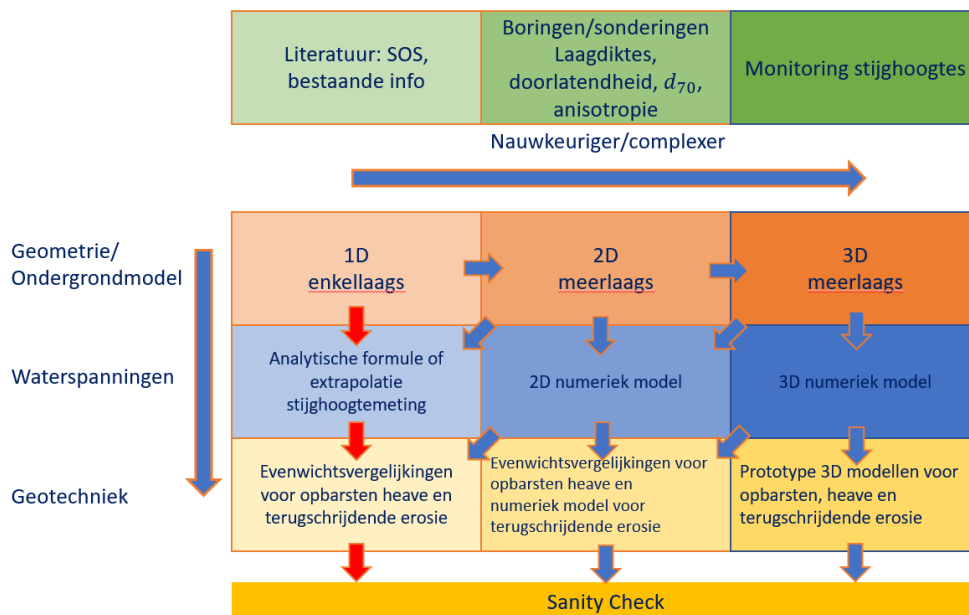
2.2 Piping analyse: kiezen van een grondwatermodel

- Mechanisme piping toelichten (dit kan heel kort gezien de doelgroep)
- Stroomschema met stappen in de afweging
- Aan het eind van deze paragraaf weet je welk model het meest geschikt is voor je specifieke pipingvraagstuk. En dus of je met de geohydrologische aanpak voor piping wilt gaan werken

Algemeen

- Stroomschema maken met sleutelvragen die je helpen om bij een keuze uit te komen.
- Dit stroomschema ontwerpen en uitwerken met de beoogde doelgroep

Onderstaande figuur illustreert de stappen in een piping analyse. Van boven naar beneden: schematiseren ondergrond, bepalen waterspanningen en geotechnische analyse. Van links naar rechts: naar een nauwkeurigere of complexere analysemethode. Een nauwkeurigere analyse kan ook met eenvoudige analysemethoden maar aanvullende data bereikt worden. De afwegingen hoe dit schema te doorlopen zijn hieronder beschreven, de methoden zijn in textboxes samengevat met verwijzing naar relevante literatuur.



Figuur: schema geeft werkwijze piping analyse aan, van boven naar beneden. Rode pijlen geven generieke analyse aan. Van links naar rechts is naar een nauwkeurigere of complexere analysemethode. Aanscherping kan zowel behaald worden door aanvullende dataverzameling of door complexere analyse. Hieronder wordt toegelicht welke afwegingen te maken zijn om tot de analyse methode te komen. De methoden zelf zijn kort toegelicht in Bijlage X.

De oranje baan, voor geometrie en ondergrondmodel is bepalend voor de manier waarop je de waterspanningen wilt of kunt benaderen (de blauwe baan).

De generieke analyse (conform BOI) is aangegeven met rode pijlen. Hieruit volgt de eerste inschatting van de mate van relevantie van de piping opgave. Indien er een relevante opgave is, is een nadere analyse van de kans op piping nodig.

Onderstaand een voorzet voor sleutelvragen die een plek kunnen krijgen in een keuze-stroomschema. Eventueel meerdere keren te doorlopen als aanvullende gegevens leiden tot ander handelingsperspectief of kleinere onzekerheden:

Bij 1D enkellaags:

Waterspanningen: Analytisch (incl. bepaling voorlandlengte voor terugschrijdende erosie). (zie box methode hieronder/bijlage)

Geotechniek: Rekenregels (incl. check pipe lengte met voorland);(zie box methode hieronder/bijlage)

Indien 2D meerlaags:

Leidt meerlaagsheid, anisotropie of tijdsafhankelijke stroming (onverzadigde stroming of berging) tot een wezenlijke (van betekenis voor de (ontwerp) beslissing) onder- of overschatting van de stijghoogte of het debiet naar de pipe?

- Nee: vertaal 2D meerlaags naar 1D enkellaags equivalent en zie schema 1D enkellaags.
- Ja: beantwoord onderstaande vragen:
- Spelen er nog andere faalmechanismen waarvoor waterspanning relevant is? (Zijn waterspanningen in slechtdoorlatende lagen of in dijklichaam relevant?)
- Is opbarsten de dominante knoop voor de overstromingskans (niet terugschrijdende erosie)?
- Is informatie ook nodig voor ontwerp?

Bij ja op een of meer vragen:

Waterspanningen: 2D grondwaterstromingsmodel voor waterspanningen en bepaling fictieve intredepunt (op basis van spreidingslengte/leklengte voorland).(zie box methode hieronder/bijlage)

Geotechnische analyse met rekenregels (incl. check pipe lengte met voorland).(zie box methode hieronder/bijlage)

Bij terugschrijdende erosie is dominant voor de overstromingskans

Gekoppelde geohydrologische en geotechnische analyse terugschrijdende erosie met D-Geo Flow (rekenregels opbarsten en heave). (zie box methode hieronder/bijlage)

Indien 3D meerlaags:

Overweeg onderstaande vragen:

- Leidt 3D component tot een wezenlijke (van betekenis voor de (ontwerp) beslissing) over- of onderschatting van de stijghoogte of stroming naar een pipe?
- Spelen er nog andere faalmechanismen waarvoor waterspanning relevant is?
- Is informatie ook nodig voor ontwerpen?
- Is regionaal geohydrologisch model al beschikbaar? Is organisatie gesteld om 3D model in beheer te nemen/met monitoring aan te scherpen?

Ja op een of meerdere ondersteunt keuze voor

Waterspanningen: 3D grondwaterstromingsmodel voor waterspanningen en bepalen fictieve intredepunt (op basis van spreidingslengte/leklengte voorland). (zie box methode hieronder/bijlage)

Geotechnische analyse met rekenregels (incl. check pipe lengte met voorland). (zie box methode hieronder/bijlage)

Is afleiden randvoorwaarden voor D-Geo Flow ook mogelijk?

Algemene opmerking bij dit stappenplan: je moet er altijd oog voor hebben dat de hoeveelheid data die je hebt voldoende is voor het detailniveau van de schematisatie waar je op in gaat zetten. Hierbij verwijzen we ook naar het hoofdstuk over kwantificeren van onzekerheden.

Methoden

- [Toelichting op wat met de verschillende methoden uit het keuze-stroomschema bedoeld wordt](#)
- [Verwijzing naar nuttige achtergronddocumenten per methode zoals technische rapporten en leidraden](#)



Waterspanningen analytisch

Toelichting: Bepaling van waterspanningen onder de deklaag binnendijks voorafgaand aan opbarsten en bepaling van fictieve intredepunt voor stationaire grondwaterstroming.

Toepassingsgebied: een homogene isotrope zandondergrond (1 laag) onder een ondoorlatende dijk met slecht doorlatende deklagen in het voorland en achterland zonder radiale intree of uitree van water. Horizontale stroming in het zandpakket, verticale stroming in de deklaag.

Benodigde data: bodemopbouw en doorlatendheden van lagen.

Verwijzingen naar documentatie: huidige SH Piping (UPDATE met TL piping); methode ook beschreven in LOR 1 bijlage B.

Waterspanningen 1D extrapolatie van metingen

Toelichting: Analytische methoden voor extrapolatie waterspanning o.b.v. peilbuizen c.q. responsfactor naar MHW

Toepassingsgebied: Getijdegebieden en andere gebieden waar een relevante reeks respons metingen beschikbaar is.

Benodigde data: bodemopbouw en doorlatendheden van lagen. Peilbuismetingen met voorland onder water.

Verwijzingen naar documentatie: TR Waterspanningen bij Dijken; Notitie Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte. J. Lambert 2015

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.

(voor gekoppelde analyse grondwaterstroming met terugschrijdende erosie zie Geotechnisch gekoppeld model).

Toepassingsgebied: 2D situaties. Vrijheid om ondergrond te schematiseren, bijv. meerlaagsheid, anisotropie, voorland, intredeweerstand in rivier, aanwezigheid van sloten (langssloot) etc. 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.

Verwijzingen naar documentatie: Is hier iets voor, kan dit in DIV GAP? Documentatie ook inclusief bepaling fictieve intredepunt voor terugschrijdende erosie.

Overwegingen:

- Tijdsafhankelijke stroming vergt meer parameters dan stationaire stroming. 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.
- Voor kalibratie van model aan de hand van metingen is tijdsafhankelijkheid wel direct relevant.

Waterspanningen 3D numeriek

Toelichting: Gebruik van 3D numeriek grondwaterstromingsmodel voor bepaling van waterspanningen en/of voor kalibratie parameters (en afleiding leklengte/spreidingslengte) aan de hand van metingen.

Toepassingsgebied: 3D situaties. Vrijheid om ondergrond te schematiseren, bijv. meerlaagsheid, anisotropie, voorland, intredeweerstand in rivier, aanwezigheid van sloten etc.

Benodigde data: bodemopbouw en doorlatendheden. Ook stijghoogtemetingen kunnen gebruikt worden om doorlatendheden te kalibreren.

Verwijzingen naar documentatie: DIV-GAP handleiding



Geotechniek rekenregels

Toelichting: Rekenregels voor geotechnische analyse van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie (piping).

Toepassingsgebied: Opbarsten en heave: generiek.

Terugschrijdende erosie: een homogene isotrope zandondergrond (1 laag) onder een ondoorlatende dijk, stationaire grondwaterstroming.

Benodigde data:

Opbarsten: deklaag dikte en gewicht en verhang over deklaag bij uittredepunt.

Heave: deklaag dikte en verhang over deklaag bij uittredepunt.

Terugschrijdende erosie: Kwelweglengte (inclusief voorland met fictief intredepunt), d_{70} , doorlatendheid watervoerend pakket, dikte watervoerend pakket, dikte deklaag bij uittredepunt (voor 0,3d drukval in opbarstkanaal)

Verwijzingen naar documentatie: TL piping (nu SH PIPING) aanvullen met inzichten KvK voorlanden voor pipegroei onder voorland.

Geotechniek rekenregels opbarsten en heave en gekoppeld model terugschrijdende erosie

Toelichting: Rekenregels voor geotechnische analyse van opbarsten, heave en gekoppeld model geohydrologie en terugschrijdende erosie (D-Geo Flow).

Toepassingsgebied: Opbarsten en heave: generiek.

Terugschrijdende erosie: Mogelijkheid om ondergrond 2D te schematiseren, bijv. meerlaagsheid, anisotropie, voorland, intredeweerstand in rivier, aanwezigheid van sloten (langssloot) etc.

Benodigde data:

Opbarsten: deklaag dikte en gewicht en verhang over deklaag bij uittredepunt.

Heave: deklaag dikte en verhang over deklaag bij uittredepunt.

Terugschrijdende erosie: bodemopbouw en doorlatendheden, d_{70}

Verwijzingen naar documentatie: TL piping (nu Factsheet D-Geo Flow) aanvullen met inzichten KvK voorlanden voor pipegroei onder voorland.

Geotechniek prototype

Zie releasekalender BOI voor mogelijkheden bijv.

- Meenemen effect van opbarsten in geohydrologisch model
- gekoppelde analyse geohydrologie en opbarsten (2D/3D)
- 3D gekoppelde analyse geohydrologie en terugschrijdende erosie
- Tijdsafhankelijke pipegroei
-

2.3 Metingen en data

- Aandacht voor benodigde gegevens/metingen, van grof naar fijn: De kwaliteit en hoeveelheid van je metingen en data is niet bepalend voor welk model je moet/kan gebruiken. Het is wel bepalend voor de zekerheid die je model kan bieden
- Tips voor data inwinning die specifiek van toepassing zijn bij een geohydrologische modellering voor hoogwaters. Onder andere het belang en gebruik van (peilbuis)metingen, met een paar verwijzingen naar nuttige publicaties
- Meetstrategie: wanneer en waar bepaal je dat meer meten zin heeft. Relatie leggen met het verkleinen van onzekerheden
- Goede verwijzingen opnemen (handreiking grondonderzoek en handreiking meetnetten en grondwatermonitoring, etc)

3 GAP-3D: opzetten van 3D grondwater model voor veiligheidsanalyses

- De modelkeuzen die voorliggen, en waar je rekening mee moet houden bij het geschikt maken van een grondwatermodel voor het berekenen van een goed stijghoogteverloop in tijd en ruimte bij hoogwatersituaties. (3.1)
- Aandacht voor water anders is bij het opbouwen en parametriseren van een hoogwatermodel ten opzichte van een "normaal" regionaal grondwatermodel." Geen cursus geohydrologie
- Voorliggende Handreiking werkt alleen het pad uit voor een (semi)3D model, maar dezelfde stappen die nu volgen moeten worden doorlopen voor elk ander te kiezen model. Op een logische plek (H2 of juist H3/5) handvat geven of verwijzen naar bestaande handleidingen op dat punt.

3.1. Grondwatermodel: opzetten referentiemodel

- De modelkeuzen die voorliggen, en waar je rekening mee moet houden bij het geschikt maken van een grondwatermodel voor hoogwatersituaties
- We gaan ervan uit dat men werkt met een (semi)3D grondwatermodel zoals dat bij veel waterschappen al in gebruik is, veelal geschematiseerd in MODFLOW
- Benodigde resolutie voor beoordelen/ontwerp/beheer. Relatie met mogelijke versterkingsmaatregelen
- Ombouwen rekening houdend met eventueel toekomstige aanvullende gegevens

Vaak is er al een al gekalibreerd basismodel beschikbaar voor "gemiddelde" grondwaterstanden in het gebied. Om een dergelijk model geschikt te maken voor hoogwaterberekeningen zijn (ten minste) de volgende stappen nodig:

- Uitbreiden van het model met een buur-model als de rivier de "rand" vormt, wat vaak zo is. Hierbij kan je het lagenmodel van Regis als uitgangspunt gebruiken bij het technisch aan elkaar knopen
- Schematiseren en in grids omzetten van een tijdsafhankelijke hoogwatergolf met aandacht voor zowel piek als vorm (mogelijk eigen paragraaf geven en ook verbreden naar de kustgebieden en stormvloed et cetera, Ruben). Aandacht voor (tijdsafhankelijke) inundaties van voorlanden
- Aanscherpen van de schematisering als het gaat om de weerstand in het rivierbed, lagenopbouw en het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket, de weerstand van de deklaag en schematisering van de ontwateringsmiddelen
- Kalibreren / valideren aan recente hoogwaters aan peilbuizen, wellen, natte percelen etc.

3.2. Parametrisatie

- Geen cursus geohydrologie: vooral de aandacht voor de parameters die extra van belang zijn bij het geschikt maken voor hoogwater
- Deklaag, bodemweerstand, waterlopen, watervoerend pakket, (...)

3.3. Kalibratie & validatie

- Aandachtspunten bij welke info heb je nodig om model zinvol te kunnen kalibreren voor hoogwater(ondergronddata, significante meetreeksen)
- Kalibratie rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen en eventuele ontgravingen

4 GAP-3D: Kwantificeren van onzekerheden

- Uitleg over hoe je de onzekerheden rondom de berekende stijghoogtes kunt kwantificeren op een manier die past binnen de veiligheidsfilosofie
- Statistisch/baysiaans versus probabilistisch/stochastisch
- Parameter- schematiserings- en modelonzekerheid
- Tips voor het bouwen van het stochastisch model aan de hand van praktijkvoorbeeld Meanderende Maas
- De hieronder geschetste keuzes A, B en C: C wordt in detail uitewerkt maar ook A en B worden toegelicht, met verwijzing naar relevante publicatie.
- Bij verdere uitwerking nog goed checken hoe een koppeling van grondwatermodel aan sterktemodel uitpakt ten aanzien van omgaan met onzekerheden: GAP heeft stijghoogte bij buitenteen uitgewerkt, maar bij gebruik effectieve voorlandlengte (H5) met $L_{\text{eff}} = \lambda * \tanh(L/\lambda)$ nog even goed kijken hoe dat zit
- Indien beschikbaar of consensus bij kwaliteitsborgers: ook aanreiken hoe je nieuwe (stijghoogte) metingen benut om je model te checken. (dus naast de 95% waarde die er in ieder geval in komt.)

De essentie van de overstromingskansbenadering is dat onzekerheden ten aanzien van de sterkte van waterkeringen en de belasting worden geëxpliciteerd en vertaald in een overstromingskans. Men kan de keuze maken om (eenvoudiger maar grover) te rekenen met een semi-probablistische benadering. (nog benomen dat full probabilistisch nog niet haalbaar is?) In de semi-probablistische benadering worden modellen, voor bijvoorbeeld opbarsten, heave en piping, gevoed met zogenaamde karakteristieke waarden. Dit zijn doorgaans waarden met een onderschrijdingskans van 95 % voor belastingparameters (met een negatieve invloed), ook wel de P95 genoemd. 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, en hier wordt daarom de karakteristieke waarde (P95) van gezocht bij een gegeven hoogwater.

Om deze p95 te kunnen bepalen is het nodig de onzekerheden rondom de met het grondwatermodel berekende stijghoogtes te bepalen. De onzekerheid van de stijghoogte in het geohydrologisch model komt ten eerste door onzekerheden ten aanzien van invoerparameters van het model. Ten tweede bestaat er onzekerheid over de schematisatie (bijv. ondergrondopbouw) die recht doet aan de realiteit. In dit verband wordt in de geotechniek gesproken over schematiseringonzekerheden. Ten derde is er modelonzekerheid doordat een model een versimpeling van de werkelijkheid is.

Het kwantificeren van deze onzekerheden kan op verschillende manieren gedaan worden:

- 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 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 het effect van onzekerheden ten aanzien van invoerparameters wordt bepaald.
Bij deze methode wordt de doorwerking beschouwd van de onzekerheden ten aanzien van de invoer van het grondwaterstromingsmodel. Deze aanpak berust op de veronderstelling dat het belang van

parameteronzekerheid (veel) groter is dan dat van de pure modelonzekerheid. Wanneer dit niet zo is, dan levert deze methode een onderschatting op van de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte

Bij hoogwatervraagstukken zal optie C doorgaans het meest kansrijk zijn: Een 'klassieke' statische analyse (A) is vaak niet mogelijk vanwege het gebrek aan stijghoogtemetingen bij hoogwatercondities in het projectgebied. In een Bayesiaanse statistische analyse (B) kunnen ook andere waarnemingen worden benut. Het systematisch beschrijven van deze waarnemingen en het berekenen van posterior-verdelingen vraagt echter een zeer grote inspanning en is (voor zover bekend) nog niet eerder vertoond met een regionaal grondwaterstromingsmodel.

Probabilistische analyses waarin het effect van onzekerheden ten aanzien van invoerparameters wordt bepaald (C) vraagt wel wat werk maar is goed uitvoerbaar door een stochastisch model op te stellen waarin de belangrijkste parameteronzekerheden als stochastische variabelen zijn meegenomen. Daarbij moet ook de onzekerheid ten aanzien van het model zelf worden gekwantificeerd door de modelonzekerheid als losse stochastische variabele te modelleren. Wat resulteert is een stochastisch grondwatermodel.

In de hiernavolgende paragrafen worden handvatten gegeven voor het bouwen van een dergelijk

Kader: Tips voor meetstrategie om onzekerheden in nabije toekomst te verkleinen.

4.1. Parameteronzekerheden

Er zijn zeer veel parameters in het grondwaterstromingsmodel die in meer of mindere mate onzeker zijn. Om de complexiteit van het stochastisch grondwaterstromingsmodel en de rekentijd te beperken, hoeven niet alle onzekere parameters als stochastische variabelen te worden gemodelleerd. Door gevoeligheidsanalyses in het geohydrologisch model uit te voeren kan onderscheid worden gemaakt tussen parameters die een relatief groot effect op de stijghoogteonzekerheid hebben en dus als stochastische variabele moeten worden behandeld, en parameters die een klein effect hebben.

Van elk van deze stochastische parameters moet worden aangegeven wat hun variatiecoëfficiënt is en of de werkelijke waarde van de parameter onzeker is en vooral lokaal varieert, of dat de parameterwaarde onzeker is en ruimtelijk weinig varieert.

Als er voor bepaalde parameters onvoldoende lokale (statistische) informatie beschikbaar is kan ervoor gekozen worden de kansverdelingen van deze variabelen te baseren op de default-kansverdelingen uit het BOI.

4.2. Schematiseringonzekerheid

- Er zijn vaak verschillende schematiseringen (scenario's) denkbaar. Handvat geven voor de manier waarop je hiermee om kan gaan in een project
- Geologische scenario's: hoe werk je ermee en wat zijn de voor- en nadelen
- Zijn er nog andere schematiseringonzekerheden die hier behandeld moeten worden?
- Vaak zal uiteindelijk gekozen worden om dit soort schematiseringonzekerheden te verwerken tot een conservatieve basisschematisatie. Het is belangrijk deze goed te onderbouwen en documenteren
- Gebruik aanvullende bronnen zoals topotijdreis, zandbanen, statistieken REGIS, geotop et cetera

4.3. Opzet stochastisch model

- Uitleg waar je op moet letten bij het bouwen van een stochastisch model

4.4. Modelonzekerheid

- Uitleg waar je op moet letten bij het bepalen en bij het in je berekeningen meenemen van de modelonzekerheid

Naast parameteronzekerheid en schematiseringonzekerheid is er modelonzekerheid. Deze komt voort uit het feit dat het model op benaderingen berust. Denk daarbij aan:

- Er zijn onzekere parameters die in het model worden behandeld als deterministische variabelen
- De ruimtelijke variatie in parameters (zoals de deklaagdikte) is versimpeld gemodelleerd
- Er zullen aannames zijn gedaan over de standaard verdeling (vaak normaalverdeling) van de parameteronzekerheden
- Er zijn onzekerheden ten aanzien de Darcy-stromingsvergelijkingen en er ontstaat onzekerheid door (de kans op) numerieke fouten en de ruimtelijke resolutie. De ervaring leert dat deze onzekerheden echter zeer gering zijn (ordegrootte millimeters stijghoogteverschil)

Voor dit geheel moet het gemiddelde en de standaardafwijking van de modelonzekerheid worden bepaald.

4.5. Consistentie van stapelen van onzekerheden

Hoe onzekerheden netjes op te tellen en dubbeltellingen te voorkomen

5 GAP-3D: toepassing in sterkte analyses voor piping

- Beschrijving van de do's and dont's bij het koppelen van een stijghoogtemodel aan de sterktevergelijkingen voor piping
- Aanreiken van een aanbevolen manier van koppelen: werken met fictieve voorlandlengte. Ook onderbouwen waarom dit de voorkeursmethode is (plaatjes)

In de ideale situatie reken je voor elke hoogwaterveiligheidssituatie en voor elke stap in je berekening van belasting tot aan falen met dezelfde ondergrond. Dus je rekent met 1 integraal model. Dit is in beginsel mogelijk, maar complex.

In de huidige praktijk zijn benaderingen nodig om een en ander behapbaar te houden. 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).

En dan gaat het er om belasting- en sterktemodel zo elegant mogelijk met elkaar te verbinden.

5.1. Koppeling stijghoogtemodel aan sterktevergelijking

Voor falen ten gevolge van piping is achtereenvolgens nodig:

- Opbarsten van de cohesieve deklaag (opbarsten)
- Het verticaal transporteren van zandkorrels door het opbarstkanaal (heave)
- Het groeien in buitenwaartse richting van de pipe (terugschrijdende erosie)

Voor deze beschrijving is aangesloten bij deze drie deelfaalmechanismen.

Opbarsten

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

Heave

Ondanks het feit dat heave pas op kan treden na opbarsten wordt in het ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium gerekend met de stijghoogte voor opbarsten. Deze vereenvoudiging maakt dat de resultaten uit de grondwatermodellering ook direct inpasbaar zijn in de sterktevergelijkingen. Als semi-probabilistisch wordt gerekend is een 95 %-waarde van de stijghoogte benodigd. Bij een probabilistische analyse kan de verdeling gebruikt worden.

Terugschrijdende erosie

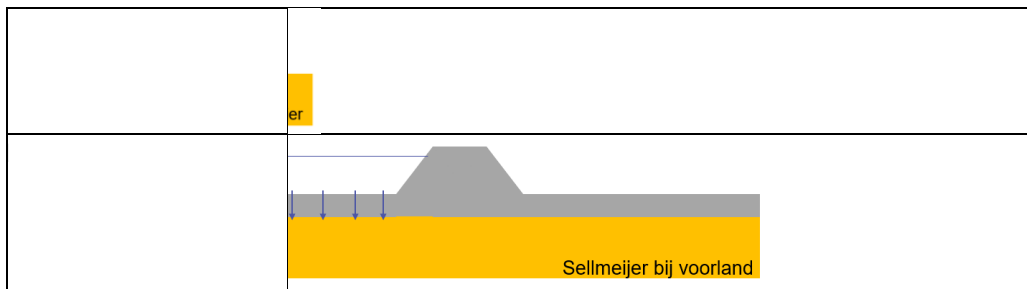
We schetsen hiervoor twee opties die voor piping gebruikt kunnen worden:

1. Via de stijghoogte op x m van de buitenteen
2. Via de flux onder de dijk ('Fictieve voorlandlengte')

Voor beide methoden aangeven hoe het werkt en wat de beperkingen zijn of het effect van de aannamen binnen de veiligheidsbenadering. (mogelijk aanpassen tot 1 methode!).

Sellmeijer rekenregel bij doorlatend voorland

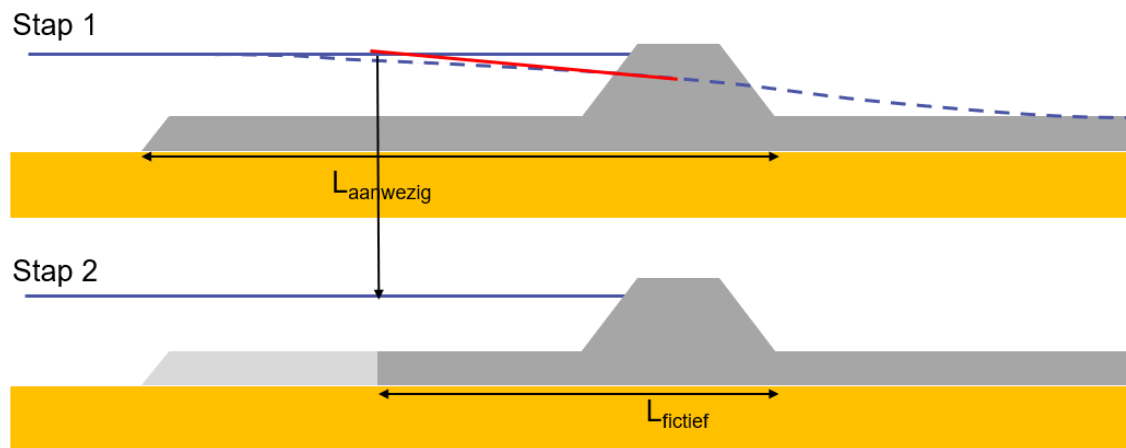
Een probleem bij het meenemen van voorland in de sterktevergelijking van Sellmeijer is dat de rekenregel is afgeleid voor een ondoorlatende plaat en er dus alleen water stroomt door het watervoerend pakket. Bij een doorlatend voorland stroomt ook water door de deklaag het watervoerend pakket in. Het verhang in het watervoerend pakket is daarom anders. Het probleem is visueel weergegeven in figuur 5.1.



Figuur 5.1. Sellmeijer bij doorlatend voorland

Methode fictieve voorlandlengte

Een al lang bestaande methode om een doorlatend voorland mee te kunnen nemen als kwelweglengte in de rekenregel van Sellmeijer is door te rekenen met een fictief intredepunt. De methode is onder andere beschreven in bijlage E van de schematiseringshandleiding piping. De methode is gevisualiseerd in Figuur 5.2. In de methode wordt het verhang onder het dijklichaam 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. De Sellmeijer rekenregel (bij doorlatend voorland) mag geëvalueerd worden op basis van de buitenwaterstand en de fictieve kwelweglengte.



Figuur 5.2 Bepaling fictieve voorlandlengte

Een belangrijk voordeel van de fictieve-voorlandlengte-methode is dat opbarsten binnendijks geen invloed heeft op het fictieve intredepunt. Binnendijks opbarsten geeft reductie in stijghoogte en daarmee een verhanglijn die in absolute waarde lager ligt. De helling van de verhanglijn wijzigt echter ook waarmee het fictieve intredepunt op dezelfde locatie blijft. Een grondwatermodel zonder opbarsten binnendijks is dus geschikt om de fictieve voorlandlengte te bepalen.

Na het bepalen van het geometrische intredepunt, op afstand L van de dijk, wordt de effectieve voorlandlengte berekend met onderstaande formule uit het Technisch rapport Waterspanningen bij dijken²:

$$L_{\text{eff}} = \lambda * \tanh(L/\lambda)$$

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

² Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, „Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. DWW-2004-057,“ 2004.

wordt de tanh-term kleiner dan 1 en wordt de voorlandlengte dus significant kleiner dan de geohydrologische spreidingslengte.

5.2. Optimalisatiemogelijkheden voor veiligheidsanalyse

- Optimalisatie mogelijkheden voor veiligheidsanalyse (effect van opbarsten meenemen in regionaal model (relatie datagedreven schematiseren KvK), combinatie geohydro model met D-Geo Flow voor terugschrijdende erosie)
- Mogelijkheden voor toepassing geohydro model voor ontwerp/beheer (per OBR richting, voor calamiteiten en zwakke plekken, navraag bij WS of dit al gedaan wordt?)

6 Teamsamenstelling en kwaliteitsborging

- Hier aandacht voor wat er bij teamsamenstelling en kwaliteitsborging anders moet dan men tot nu toe gewend was
- Ook aandacht voor het feit dat je na bouwen in projectcontext het verstandig is je model te blijven beheren (voor vergunningen, volgende beoordelingsronde etc.)

6.1. Teamsamenstelling

6.2. Kwaliteitsborging

6.3. Beheer

Bijlage: Praktijkvoorbeeld(en)

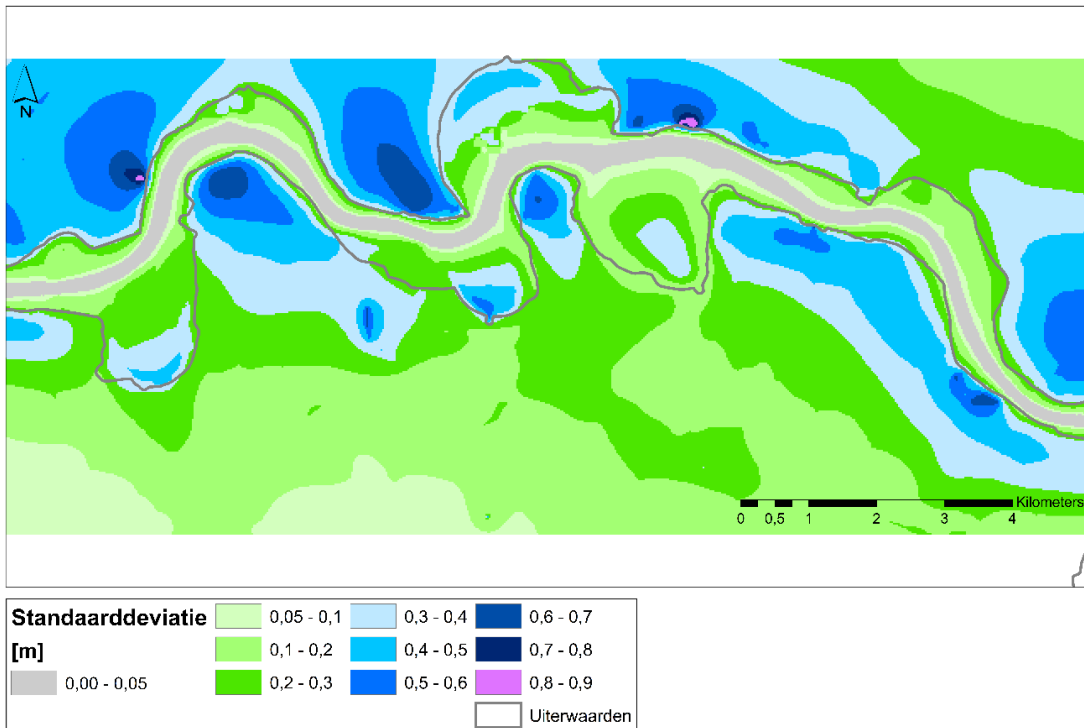
- Beschrijving van een toepassingen die wellicht niet algemeen geldig zijn, maar die wel heel concreet zijn. Dat helpt gebruikers om voor zichzelf te bepalen wat ze voor hun casus moeten uitwerken.
- Kwantificeren van onzekerheden
- Koppeling stijghoogte aan sterkte
- Voor nu Meanderende Maas als voorbeeld genomen. Bij het vullen van de handreiking kunnen daar andere relevante voorbeelden aan toegevoegd worden. Hetzij via verwijzingen, hetzij via korte samenvattende teksten zoals hieronder ook gedaan is

Kwantificeren van onzekerheden

In deze paragraaf wordt als voorbeeld beschreven hoe de stappen uit hoofdstuk 4 zijn doorlopen bij het dijkversterkingsproject Meanderende Maas.

Er 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.

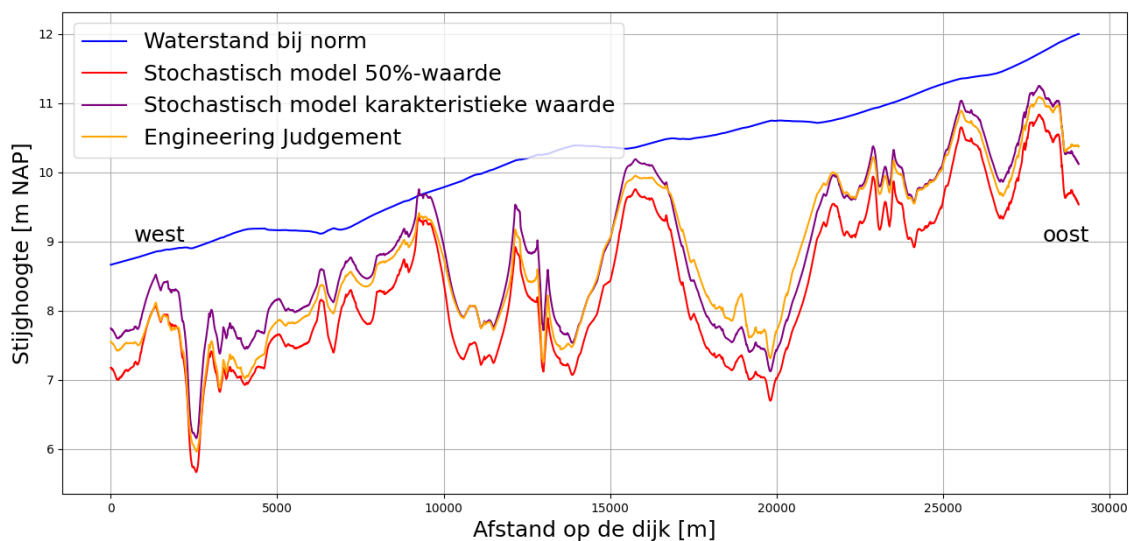
De berekende onzekerheid is ruimtelijk variabel. In de binnenbochten van de dijk-'meanders' is de onzekerheid in de berekende stijghoogten aanzienlijk groter dan in de buitenbochten. In de binnenbocht is er toestroming van meerder kanten. Dit betekent dat een verandering in parameterwaarden extra doorwerkt in het effect op de stijghoogte. Bij buitenbochten geldt het omgekeerde. Verder zit bij grote uiterwaarden de meeste onzekerheid vaak buitendijks, maar meestal ligt de grootste onzekerheid een paar honderd meter binnendijks. 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 cm.



Figuur B1.1 Standaarddeviatie van de stijghoogte in het stochastisch model door expliciet gemodelleerde parameteronzekerheden

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 B1.2 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

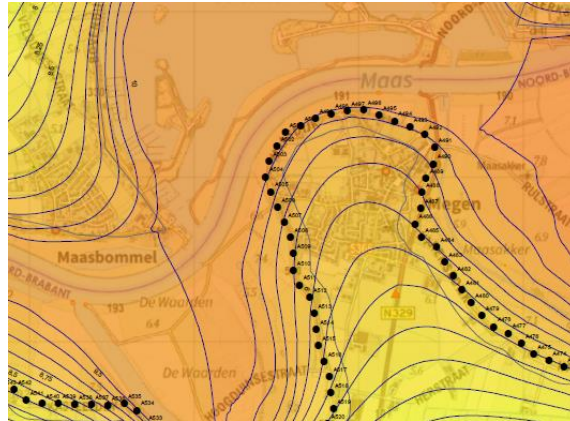
De karakteristieke waarden zoals bepaald met het stochastisch model zijn geschikt als uitgangspunt voor semi-probabilistische analyses van opbarsten, piping en heave. De verwachtingswaarde (50 %) van de stijghoogte en de karakteristieke waarde liggen over het algemeen 40 tot 80 cm uit elkaar. Dit geeft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

Praktijkvoorbeeld Meanderende Maas Parameteronzekerheden als stochast

	Parameter	Variatie-coëfficiënt	Ruimtelijk variabiliteit	Verdelings-type
onzekerheden	- dikte deklaag	0,5		
	- weerstand deklaag	0,4		
	- dikte eerste scheidende laag	0,1		
	- doorlatendheid eerste scheidende laag	0,4		
	- dikte eerste wvp	0,1		
	- doorlatendheid eerste wvp	0,5		
	- dikte tweede wvp	0,1		
	- doorlatendheid tweede wvp	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	<ul style="list-style-type: none"> - 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 dijklag afgeleid en in het achterland een dikke. Dit levert ten aanzien van de stijghoogte in het achterland een conservatief model op. Dit is apart gecontroleerd, zie schematiseringsonzekerheid 			
niet-conservatieve keuzes	<ul style="list-style-type: none"> - 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 dinoboringen. 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 (Ref. TAUW, Kok, Hoogewoud). Het stochastische model wordt doorgerekend voor een groot aantal (N) verschillende parametersets. Met het model worden voor situaties met rivierwaterstanden gelijk aan 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.



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-percentielwaarde 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.

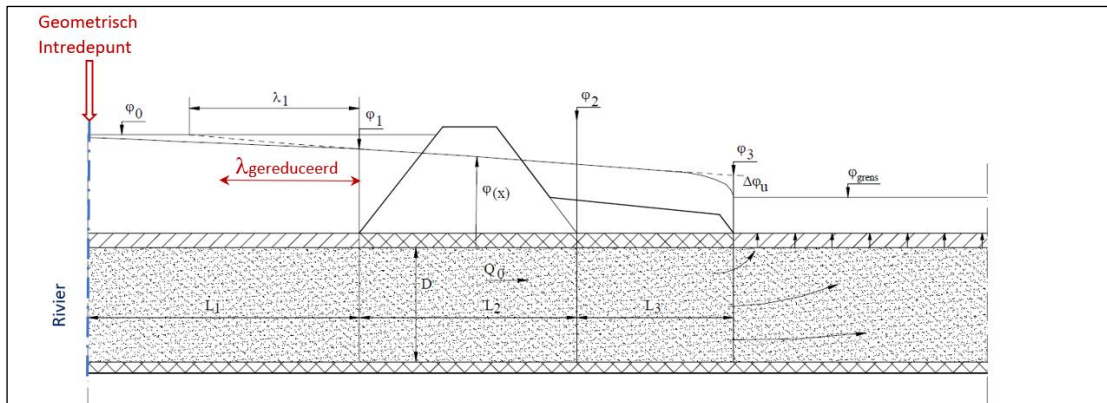
De effectieve voorlandlengte wordt vervolgens berekend met onderstaande formule uit het Technisch rapport Waterspanningen bij dijken³:

$$L_{\text{eff}} = \lambda * \tanh(L/\lambda)$$

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

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.

³ Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 'Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. DWW-2004-057,' 2004



Figuur b4.10 Optreden van de grenspotential 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:

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