

Factsheet D-Geo Flow

Voor op maat pipinganalyses



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Deltares

HWBP
voor sterke dijken

Datum

23 november 2020

Ons kenmerk

11205758-037-GEO-0001

Aantal pagina's

1 van 25

Onderwerp

Gebruik D-Geo Flow in projecten

Piping is een mechanisme dat vaak de overstromingskans bepaald. D-Geo Flow is een Eindige Elementen Model (EEM) waarin het rekenmodel van Sellmeijer is gekoppeld aan een grondwaterstromingsmodel waarmee een scherpe analyse kan worden uitgevoerd. Deze factsheet beschrijft hoe D-Geo Flow is te gebruiken bij op maat analyses van piping in beoordelings- en versterkingsprojecten.

Wanneer gebruik ik D-Geo Flow?

Gebruik van D-Geo Flow is zinvol:

- als terugschrijdende erosie een relevant mechanisme is dat tot een doorbraak kan leiden;
- als er met de rekenregel van Sellmeijer niet kan worden onderbouwd dat de overstromingskans door piping voldoende klein is; en
- als er locatiespecifieke (geohydrologische) eigenschappen zijn die met de rekenregel van Sellmeijer niet of niet voldoende zijn mee te nemen.

In een dergelijke situatie kan het gebruik van de rekenregel van Sellmeijer leiden tot ongeloofwaardige resultaten bij beoordeling of ontwerp. De rekenregel van Sellmeijer is immers een sterk vereenvoudigde pipinganalyse. D-Geo Flow is een Eindige Elementen Model (EEM) waarin het rekenmodel van Sellmeijer is gekoppeld aan een grondwaterstromingsmodel. D-Geo Flow geeft meer realistische resultaten, omdat de geohydrologische situatie beter wordt beschouwd. Het uitvoeren van een D-Geo Flow berekening kost meer inspanning dan een berekening met de regel van Sellmeijer maar is in de praktijk bijna altijd kosteneffectief

De volgende locatie specifieke eigenschappen kunnen met D-Geo Flow worden meegenomen:

- een laagopbouw met meerdere grondlagen in het watervoerend pakket (meerlaagsheid);
- een verschil tussen verticale en horizontale doorlatendheid in de watervoerende zandlagen (anisotropie);
- een (variërende) weerstand van de deklaag in het voor- en / of achterland.

Als deze locatiespecifieke eigenschappen op de betreffende locaties voorkomen, is het raadzaam om de resultaten van de rekenregel van Sellmeijer kritisch te beschouwen en een analyse met D-Geo Flow uit te voeren.

In bijlage A is meer informatie te vinden over wanneer D-Geo Flow wordt gebruikt in pipinganalyses.

Waar moet ik op letten als ik D-Geo Flow gebruik?

De huidige versie van D-Geo Flow is een prototype. Er wordt gewerkt aan een formele versie van D-Geo Flow als onderdeel van het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium.

De werking van het model in D-Geo Flow is aangetoond en presteert in de praktijk naar behoren. Het onderliggende EEM model met grondwatersimulator en pipingkernel is theoretisch correct en geeft voor het kritiek verval betrouwbare resultaten. Met het gebruik van D-Geo Flow is echter beperkte ervaring en validatie met praktijksituaties. Dit betekent dat D-Geo Flow toepasbaar is voor beoordelen en ontwerpen, maar dat de gebruiker bedachtzaam moet zijn bij het gebruik en de resultaten van D-Geo Flow. Controle van de resultaten door experts is van belang.

Het is mogelijk dat toekomstige veiligheidsanalyses met de uiteindelijke, formele versie van D-Geo Flow afwijkt van huidige analyses met de prototype van D-Geo Flow, omdat er nog geen formele validatie met D-Geo Flow heeft plaatsgevonden. De kans op afwijkingen wordt gereduceerd door het volgen van de aanpak in deze factsheet.

In bijlage B is aanvullende informatie te vinden over de status van de huidige D-Geo Flow (prototype) en op welke aspecten de gebruiker bedachtzaam moet zijn.

Hoe gebruik ik D-Geo Flow voor veiligheidsanalyses?

Het uitvoeren van veiligheidsanalyses voor piping met D-Geo Flow is op hoofdlijnen vergelijkbaar met de rekenregel van Sellmeijer. In beide analyses moet zo goed mogelijk de situatie worden geschematiseerd met de beschikbare gegevens. Voor D-Geo Flow zijn daarbij aanvullende parameters benodigd die de locatiespecifieke (geohydrologische) eigenschappen beschrijven. Daarvoor zijn mogelijk aanvullende (gegevens)bronnen en/of metingen nodig.

Met D-Geo Flow kan het kritiek verval worden berekend. De schadefactor die is afgeleid voor de rekenregel van Sellmeijer kan worden gebruikt voor een eerste veiligheidsanalyse.

Met D-Geo Flow kan ook een pipelengte worden uitgerekend. De pipelengte die wordt berekend is theoretisch en niet gevalideerd aan experimenten. Met resultaten moet voorzichtig worden omgegaan.

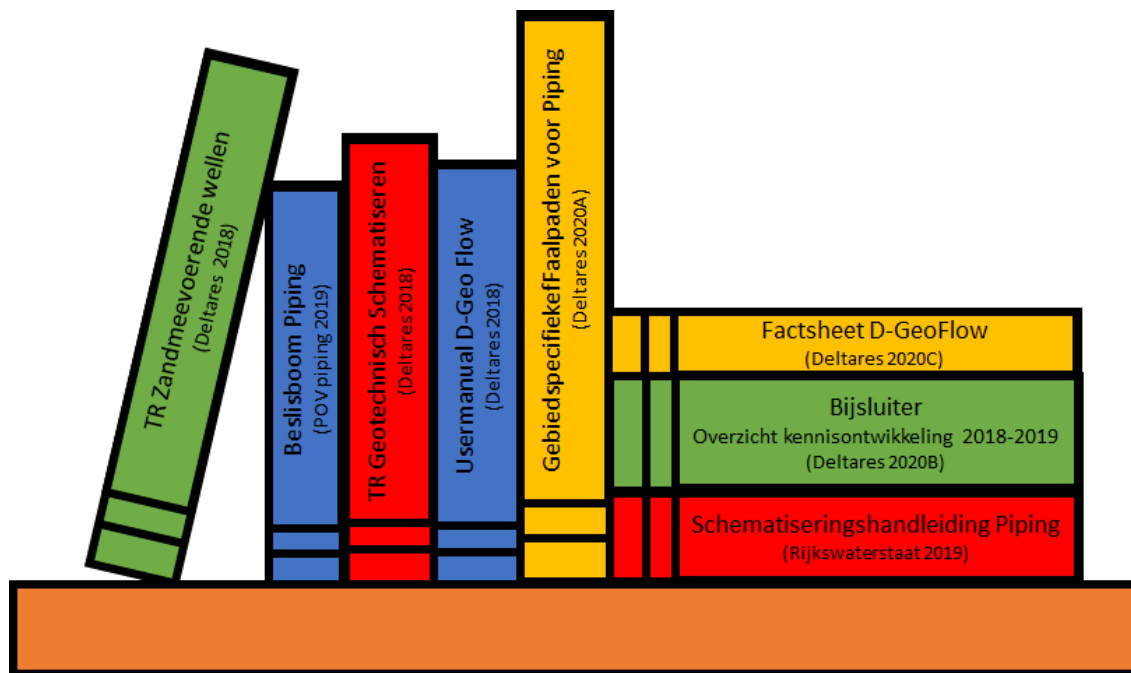
Aandachtspunten bij het gebruik van D-Geo Flow zijn:

- het omgaan met onzekerheden (bij het bepalen van de parameters, bij het berekende kritiek verval of de kritieke pipelengte en bij het bepalen van de overstromingskans)
- het gebruiken van de juiste rekenstellingen bij EEM, zoals randvoorwaarden, rastergrootte van het rekenraster (mesh), stapgrootte van het verval en MPicard getal.

Bijlage C gaat in detail in op al deze punten en geeft handvatten bij deze punten om te komen tot een zo betrouwbaar en duurzaam mogelijke veiligheidsanalyse met (het huidige) D-Geo Flow. Deze bijlage vereist van de lezer technisch inhoudelijke voorkennis op het gebied van veiligheidsanalyses voor Piping.

Wat is de relatie tussen deze factsheet en andere documenten voor pipinganalyses?

De factsheet maakt onderdeel uit van de beschikbare (en vigerende) documenten voor het uitvoeren van pipinganalyses, zie Figuur 1. De handvatten in deze factsheet worden gebruikt samen met de beschikbare documenten.



Figuur 1: Boekenplank voor pipinganalyses

De factsheet is een aanvulling op de gebruikershandleiding D-Geo Flow (Deltares, 2018) en de recent ontwikkelde bijsluiter van kennis uit het Kennis voor Keringen onderzoeksprogramma (Deltares, 2020B). In de bijsluiter is aangegeven welke nieuwe ontwikkelde kennis in D-Geo Flow analyses kan worden toegepast.

Ervaringen met de handvatten om D-Geo Flow te gebruiken in veiligheidsanalyses kunnen ertoe leiden dat onderdelen van deze factsheet tussentijds worden aangescherpt of de software wordt verbeterd. Ervaringen zijn ook nodig om deze handvatten te evalueren tot bestaande praktijk en om uiteindelijk te worden opgenomen in het stelsel van Technische Leidraden.

Vragen rondom de toepassing van D-Geo Flow kunnen aan de Helpdesk Water worden gesteld.

Referenties

De volgende referenties zijn gebruikt in de factsheet en de bijbehorende bijlagen.

Deltares (2016). Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping. Deltares rapport 1220080-002. A. Teixeira, K. Wojciechowska, W. ter Horst

Deltares (2018). D-Geo Flow. D-Geo Flow in Delta Shell - User Manual.
<https://publicwiki.deltares.nl/display/DGeoFlow/Handleiding>

Deltares, Fugro en HKV (2018). KPP Piping – Anisotropie Verkenning meenemen anisotropie in piping analyses. Deltares rapport 11202560-011-GEO-0003.

Deltares (2019). KVK Piping deelproject 014: Anisotropie - Schaaffecten en invloed variaties ter onderbouwing van methodiek om rekenwaarden anisotropie af te leiden. Deltares rapport 11203719-014-GEO-0009. Kanning, Hijma en van Meerten, December 2019.

Deltares (2019A). Use of the 0.3D rule in D-Geo Flow. Deltares memo 11200575-028-GEO-0003. 14 March 2019. <https://publicwiki.deltares.nl/display/DGeoFlow/Handleiding>

Deltares (2019B). KVK Piping deelproject 014: Anisotropie - Schaaffecten en invloed variaties ter onderbouwing van methodiek om rekenwaarden anisotropie af te leiden. Deltares rapport 11203719-014-GEO-0009. Kanning, Hijma en van Meerten, December 2019.

Deltares (2020A). Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping. Deltares concept rapport 11205284-001-ZWS-0002. Rosenbrand, E., Knoeff, H., Hijma, M., van Onselen, E., augustus 2020

Deltares (2020B). KVK Piping 2018-2019: bijsluiter. Overzicht kennisontwikkeling KVK 2018-2019 voor beheerders en ontwerpers. Rosenbrand en Knoeff, 11205262-020-GEO-0001. Concept rapport

Deltares (2020C). Factsheet D-Geo Flow - Voor op maat piping analyses. 11205758-037-GEO-0001. Augustus 2020 – dit document

ENW (2012). Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:bd8f4337-6519-474d-abb6-236c8574f19f/datastream/OBJ/download>

POV Piping (2017). Beslisboom Piping. Factsheet. Meer nuance in de pipingopgave.
https://www.pov-piping.nl/couch/uploads/file/factsheet-beslisboom-piping_los.pdf

Rijkswaterstaat (2019). Schematiseringshandleiding piping. Versie 28 november 2019.
<https://www.helpdeskwater.nl/@205752/piping-wbi-2017/>

A Wanneer wordt D-Geo Flow gebruikt in pipinganalyses?

Deze bijlage beschrijft aan de hand van een stroomschema wanneer in een pipinganalyse voor een beoordeling of versterkingsproject het zinvol is om een analyse met D-Geo Flow uit te voeren (paragraaf A.2). In het stroomschema voor een pipinganalyse komt ook de rekenregel van Sellmeijer. Beide methoden zijn afgeleid van het rekenmodel van Sellmeijer. Voor een betere duiding gaan we in paragraaf A.1 eerst in op de relatie tussen D-Geo Flow met het rekenmodel van Sellmeijer.

A.1 D-Geo Flow in relatie tot het rekenmodel van Sellmeijer

Voor het analyseren van het mechanisme heeft Sellmeijer in 1988 een rekenmodel ontwikkeld waarmee een kritiek verval over de kering wordt berekend. Dit model gaat uit van een krachterevenwicht op korrels in de pipe. Het kritiek verval over de kering is het verschil tussen binnen- en buitenwaterstand waarbij korrels nog net in evenwicht zijn en geen doorgaande pipe kan ontstaan welke uiteindelijk tot een doorbraak kan leiden. De combinatie van de stroming naar de pipe, de mobiliserende kracht, en de zandeigenschappen die weerstand bieden aan korreltransport bepalen het kritieke verval.

Voor eenvoudige toepassing van het rekenmodel is een sterk vereenvoudigde rekenregel afgeleid. Sterk vereenvoudigd wil zeggen: horizontale laagscheiding tussen zand en deklaag, slechts 1 homogene grondlaag in het watervoerend pakket, geen verschil tussen verticale en horizontale doorlatendheid (anisotropie), een beperkte mogelijkheid voor meenemen van de weerstand van voorland en geen tijdsafhankelijk verval over de kering. In de praktijksituatie zijn deze aspecten mogelijk wel relevant en dan niet sterk te vereenvoudigen. Wanneer in dergelijke situaties deze aspecten wel in rekeningen worden gebracht, zal de overstromingskans door piping (vaak ordes) kleiner worden berekend.

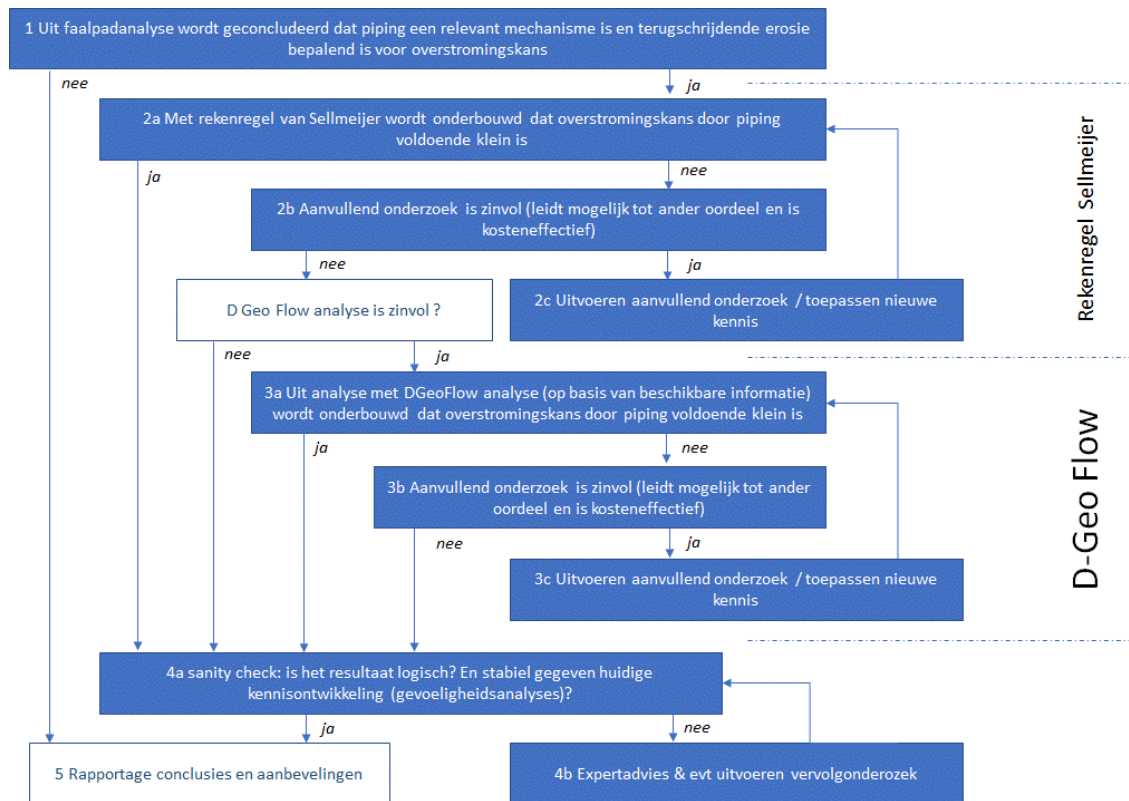
D-Geo Flow is een Eindige Elementen Model (EEM) waarin het rekenmodel van Sellmeijer is gekoppeld aan een grondwaterstromingsmodel. In tegenstelling tot de sterk vereenvoudigde rekenregel kan met het model de geohydrologische situatie goed worden geschematiseerd. Hierdoor kan een op maat pipinganalyse worden gemaakt voor een scherpere bepaling van de overstromingskans.

A.2 De plek van D-Geo Flow in de stroomschema voor een pipinganalyse

Figuur 2 beschrijft schematisch een - van grof naar fijn - werkwijze voor een pipinganalyse. De volgende 4 stappen zijn onderscheiden:

1. Bepaling relevantie en aanpak
2. Gedetailleerde analyse met de rekenregel van Sellmeijer
3. Op maat analyse / locatiespecifieke analyse met D-Geo Flow
4. Geavanceerde analyses, eventueel met DgFlow

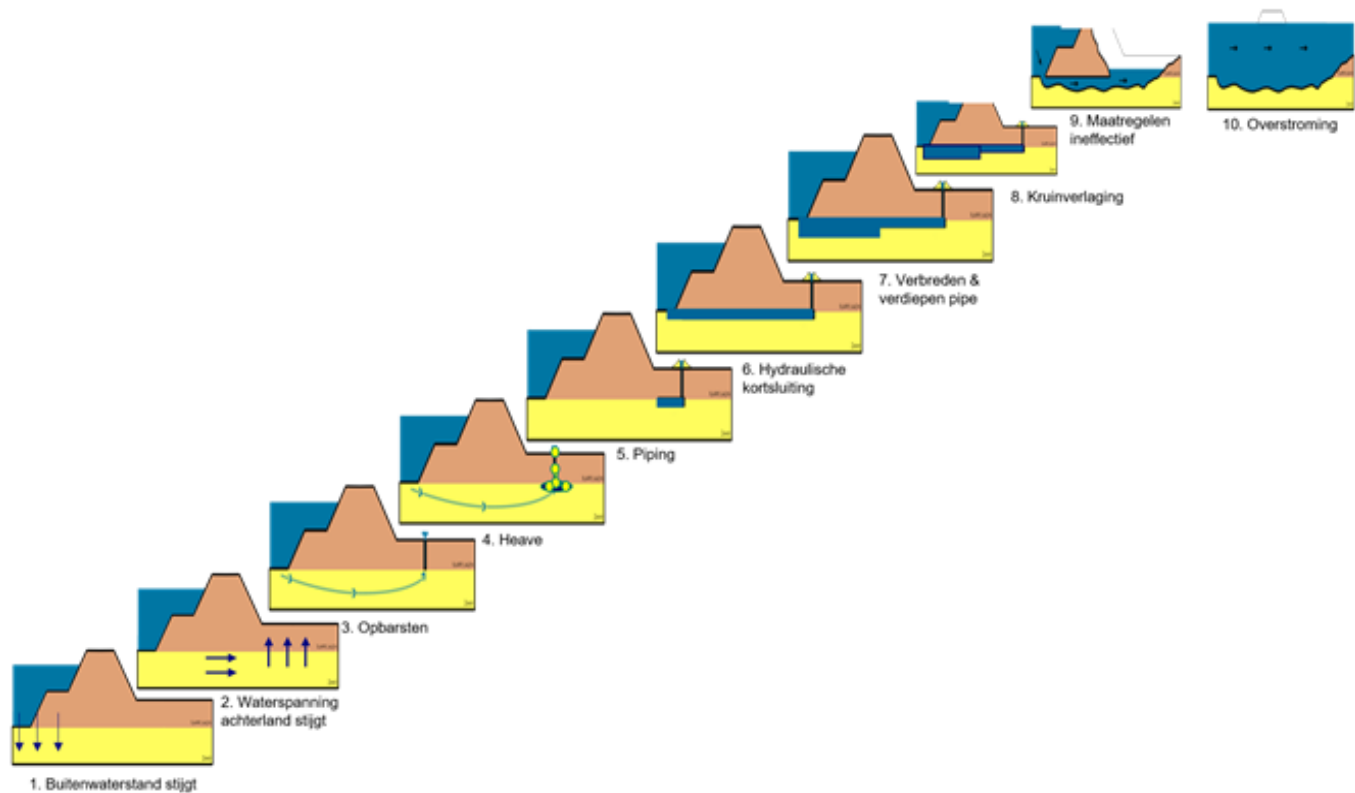
In navolgende tekst zijn de stappen nader toegelicht. De werkwijze is geen voorschrift en het schema is een hulpmiddel om aan te geven wanneer een analyse met D-Geo Flow zinvol is. Soms is het evident dat stappen niet zinvol zijn.



Figuur 2: Van grof naar fijn werkwijze pipinganalyse

Stap 1: Bepaling relevantie en aanpak

In een faalpadanalyse wordt nagegaan welke mechanismen achtereenvolgens moeten optreden om op een specifieke locatie een overstroming te veroorzaken. Wanneer een van de mechanismen in het faalpad niet kan optreden, is piping niet relevant. Mits daardoor vervolgmecanismen ook niet op kunnen treden. Opgemerkt wordt dat het mechanisme opbarsten niet op hoeft te treden in situaties met een onderbroken of afwezige deklaag, aangezien dan direct het mechanisme terugschrijdende erosie op kan treden. Een kwalitatieve faalpadanalyse onderbouwt de aanpak van de pipinganalyse. Een analyse van terugschrijdende erosie is alleen relevant wanneer dit het maatgevende mechanisme is in het faalpad. Wanneer kan worden onderbouwd dat piping niet relevant is of terugschrijdende erosie niet bepalend voor de kans op piping, is een nadere analyse met het model van Sellmeijer en D-Geo Flow niet zinvol. Generieke faalpadanalyses voor piping voor de verschillende gebieden in Nederland zijn gegeven in Deltares (2020A). Figuur 3 geeft een voorbeeld van een generiek faalpad voor piping.



Figuur 3: Generiek faalpad piping

In deze werkwijze kijken we alleen naar het mechanisme terugschrijdende erosie door piping, niet naar opbarsten en heave. Daarbij opgemerkt dat numerieke berekeningen met een grondwaterstromingsmodel ook voor een scherpere analyse voor opbarsten en heave kunnen worden gebruikt.

Voorbeelden van situaties waarbij terugschrijdende erosie niet maatgevend is:

- Situaties waarbij de duur van een hoogwater te kort is om een doorgaande pipe te veroorzaken.
- Situaties waarbij noodmaatregelen kunnen worden genomen. De kans op een succesvolle maatregel is bepalend.
- Situaties waarbij achterland niet kan opbarsten of geen stabiel opbarstkanaal kan ontstaan.

Stap 2: Gedetailleerde analyse met de rekenregel van Sellmeijer

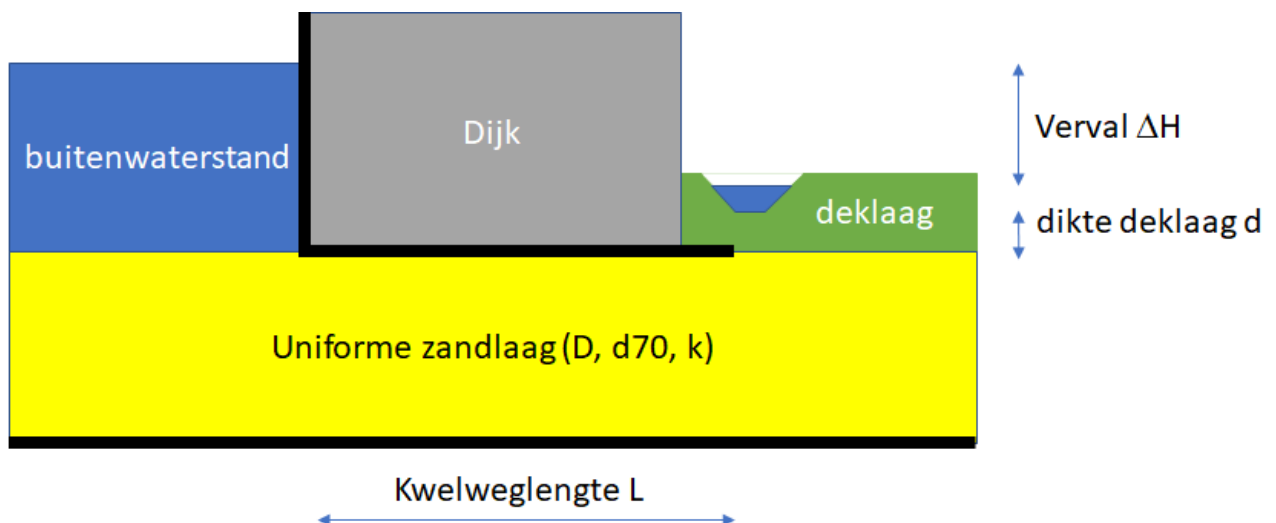
Een analyse met D-Geo Flow vraagt in het algemeen een grotere inspanning dan het toepassen van de rekenregel van Sellmeijer. Wanneer met de rekenregel van Sellmeijer wordt aangetoond dat er geen veiligheids- of versterkingsopgave bestaat, is een analyse met D-Geo Flow niet zinvol. Het is moeilijk om met de rekenregel van Sellmeijer een pipingopgave aan te tonen. Alleen wanneer de werkelijkheid overeenkomt met de schematisatie van de rekenregel, kan met deze regel worden aangetoond dat er een pipingopgave is. In de meeste gevallen wordt bij toepassing van de rekenregel van Sellmeijer de overstromingskans (sterk) overschat, omdat locatiespecifieke eigenschappen die het optreden van piping beïnvloeden zijn uitgemiddeld of niet worden meegenomen. Aspecten, zoals voorland, anisotropie en meerlaagsheid, die op een locatie bepalend kunnen zijn voor terugschrijdende erosie zijn in de rekenregel sterk vereenvoudigd of ontbreken (zie Figuur 4 voor de schematisatie van de rekenregel).

Enkele opmerkingen bij gedetailleerde analyse met de rekenregel van Sellmeijer:

- Het is mogelijk om de rekenregel in een spreadsheet of GIS omgeving te programmeren en automatisch voor elke locatie in het achterland de pipinggevoeligheid te bepalen. Ook voor

deze berekeningen is nauwkeurige analyse achteraf noodzakelijk om verkeerde conclusies te voorkomen. Doordat er gezocht wordt naar zwakste plekken en maatgevende profielen, wordt afgeweken van de uitgedacht werkwijze bij het veiligheidsformat. Het lengte-effect dat uitgaat van homogene vakken en minimale vaklengte wordt dan waarschijnlijk overschat, waardoor de eis die aan piping wordt gesteld te streng is.

- Wanneer met de beschikbare informatie niet kan worden onderbouwd dat aan de eisen wordt voldaan, is het mogelijk om door extra informatie in te winnen een nauwkeuriger schematisatie (en analyse) te maken. Daarbij kan worden gedacht aan bepaling van de leklengte van het voorland met peilbuizen en lokale bepaling van de doorlatendheid. Met gevoeligheidsanalyses kan (vooraf) de meerwaarde en het potentieel effect van extra informatie worden bepaald en afgewogen tegen de meerwaarde van een analyse met D-Geo Flow. Verzamelen van extra informatie kost vaak veel tijd en is relatief duur.
- In het geval we een veiligheidsoordeel bepalen op basis van een kritiek verval, wordt hier de kalibratiere relatie voor gebruikt. Door direct de faalkans van een doorsnede of traject te bepalen kan een scherper overstromingskans worden berekend dan via de kalibratiere relatie. Daarbij wordt opgemerkt dat dit niet per definitie een realistischer overstromingskans is omdat de rekenregel van Sellmeijer voor veel locaties niet per definitie een representatief model is. Voor locaties waar voorland, meerlaagsheid, anisotropie of tijdsafhankelijkheid een rol spelen kan het verstandiger zijn om deze aspecten eerst te beschouwen.



Figuur 4: Schematisatie rekenregel Sellmeijer

Stap 3: Op maat analyse met D-Geo Flow

In D-Geo Flow kan met een aantal locatiespecifieke aspecten nauwkeuriger rekening worden gehouden. Het betreft: meerlaagsheid, anisotropie en geohydrologisch effect van voorland en achterland. De tijdsafhankelijkheid kan nog niet worden beoordeeld met D-Geo Flow, maar kan in het faalpad wel een rol spelen. Tijdsafhankelijkheid kan meegenomen worden in stap 4. In onderstaande tabel is de verwachting van het mogelijke relatieve belang voor de kans op piping per gebied weergegeven. Onderbouwing van de tabel is gegeven in (Deltares, 2020B).

Tabel 1: Indicatie belang voor overstromingskans door terugschrijdende erosie (0 onbelangrijk, + gemiddeld belang, ++ groot belang)

Aspect	Mogelijk belang			
	Bovenrivieren	Benedenrivieren	Getijden	Grindmaas
Anisotropie	+	+	++	+
Meerlaagsheid	+	+	++	+
Geohydrologisch effect voorland	++	++	++	+
Geohydrologisch effect achterland*	0	0	0	0

* voor de huidige 2D werkwijze terugschrijdende erosie heeft het achterland geen belang, in een 3D stromingssituatie speelt dit wel degelijk een rol.

Daarbij wordt opgemerkt:

- Een goede mesh-generatie (generatie van het rekenraster) is de basis voor een betrouwbare analyse met D-Geo Flow. Met name de verfijning van de mesh in de directe omgeving van de pipe is van belang. Ook wanneer sprake is van relatief dunne lagen, orde dikte 3 m of minder, is het van belang te letten op een voldoende fijne mesh in die lagen. Voor meer detail, zie bijlage C.
- Door extra informatie in te winnen kan een nauwkeuriger schematisatie (en analyse) worden gemaakt. Daarbij kan worden gedacht aan bepaling van doorlatendheid, of anisotropiefactor, of een verbeterde geohydrologische schematisatie op basis van aanvullende boringen en sondering waarbij doorlatendheden en intreeweestanden, kunnen worden gekalibreerd met peilbuizen.
- Wanneer voorland aanwezig is moet worden gecontroleerd of de pipe onder het voorland doorgroeit. Hiervoor wordt in bijlage D een handvat gegeven.
- Het wordt afgeraden om vanuit een D-Geo Flow berekening een correctiefactor voor de rekenregel van Sellmeijer te bepalen voor ontwerp en beoordeling.

Stap 2 en 3 worden vanzelfsprekend iteratief doorlopen, waarbij wordt gestart met een grove analyse op basis van bestaande informatie (stap a). Wanneer met de grove analyse niet aan de criteria wordt voldaan, wordt in stap b overwogen of een scherpere analyse in stap c met aanvullende informatie mogelijk en zinvol is. Een scherpere analyse is mogelijk en zinvol, wanneer wordt verwacht dat dit tot een ander handelingsperspectief leidt. Dit wordt onderbouwd met gevoeligheidsanalyses. Ook kan in overleg met een expert worden overwogen om in stap c een probabilistische analyse uit te voeren. Een probabilistische analyse is veelal minder conservatief. Een vervolganalyse is niet zinvol wanneer een andere methode eenvoudiger tot een scherper antwoord leidt. Na een nadere analyse in stap c wordt in stap a opnieuw gekeken of aan de criteria wordt voldaan.

Stap 4: Sanity Check

In de sanity check wordt gecontroleerd of het resultaat van de pipinganalyse overeenkomt met verwachtingen van beheerders en experts en welke het effect van voorziene kennisontwikkeling op het resultaat is. De faalpadanalyse uit stap 1 kan daarbij behulpzaam zijn. Wanneer de resultaten overeenkomen met de verwachting van de beheerder is een nadere analyse niet zinvol. Wanneer de resultaten niet goed verklaarbaar zijn, kan overwogen worden om de mening van experts te vragen. Zij kunnen resultaten onderbouwen of aanbevelingen geven voor verbetering schematisatie of vervolganalyse.

Op korte termijn (0-2 jaar) wordt verwacht dat handvatten beschikbaar komen waarmee beter rekening kan worden gehouden met:

- 3D effecten;
- weerstand van getijdenafzettingen;
- extra weerstand tegen erosie door aanwezigheid van de fijne fractie;
- extra weerstand ten gevolge van de gradering van het materiaal;
- de drukval ten gevolge van zand in opbarstkanaal (0,3D regel);

- tijdsafhankelijkheid.

De mogelijke impact van deze aspecten is in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 2: Indicatie belang voor overstromingskans door piping (0 onbelangrijk, + gemiddeld belang, ++ groot belang). Belang kan zowel positief als negatief zijn.

Aspect	Mogelijk Belang			
	Bovenrivieren	Benedenrivieren	Getijden	Grindmaas
3D effecten	+	++	++	0
Weerstand opbarstkanaal 0,3D rekenregel	+	++	++	0
Sterkte fijne fractie	+	+	++	0
Gegradeerd materiaal	+	+	+	++
Tijdsafhankelijkheid	0	+	++	0

DgFlow, het onderliggende rekenmodel van D-Geo Flow, bevat meer functionaliteiten dan zichtbaar in de user interface van D-Geo Flow. Met deze functionaliteiten kan al aan een aantal van bovengenoemde effecten worden gerekend. DgFlow kan daarmee worden gebruikt om de potentiële impact op de overstromingskans te bepalen. Deze functionaliteiten zijn niet volledig getest en kunnen alleen door experts worden gebruikt om bijvoorbeeld 3D effecten of tijdsafhankelijke effecten te onderzoeken. DgFlow kan ook worden gekoppeld aan de probabilistische bibliotheek, waardoor probabilistische analyses kunnen worden uitgevoerd om de impact nauwkeuriger te bepalen. Voor de laatste stand van zaken rondom kennisontwikkeling en voor het toepassen van de onderzoeksversie van D-Geo Flow kan contact worden opgenomen met Deltares of RWS-WVL.

B Achtergrond van D-Geo Flow (prototype)

De softwareapplicatie D-Geo Flow is in onderzoeksprogramma's van Deltares en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu ontwikkeld. Door beperkte ervaring en validatie met praktijksituaties is de software op sommige onderdelen minder makkelijk toepasbaar.

D-Geo Flow is geen formeel instrument dat vanuit het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium wordt voorgeschreven. Deze bijlage beschrijft hoe de applicatie in veiligheidsanalyses kan worden toegepast in aanvulling op de hoofdtekst van de factsheet.

B.1 Wat is D-Geo Flow?

D-Geo Flow is de naam voor de grafische user interface die de rekenkernel DgFlow ontsluit. DgFlow is een eindige elementen rekenmodel. De pipingmodule van DgFlow is gebaseerd op het model van Sellmeijer en berekent bij een opgegeven waterstandsverloop de pipe ontwikkeling. Het raster (mesh) van het eindige elementenmodel is gekoppeld aan een pipe bestaande uit lijnelementen. De grondwaterstroming wordt berekend met het model van Darcy en in de pipe wordt de stroming berekend met het model van Poiseuille. De stroming in de pipe elementen wordt gebruikt om het evenwicht van korrels op de bodem van de pipe te berekenen. Vanaf het uitredepunt wordt bepaald of in een pipe element korrels getransporteerd kunnen worden. Zo wordt de pipelengte bij een bepaald verval bepaald. Wanneer het verval en pipelengte wordt bereikt waarbij de pipe niet meer in evenwicht kan komen, is het kritiek verval overschreden.¹

Doordat een eindige elementen model gebruikt wordt om de grondwaterstroming te berekenen is het mogelijk om een 2D geometrie met meerdere lagen, anisotropie en gedeeltelijk doorlatend voor- en achterland te schematiseren.

Een berekening met D-Geo Flow vraagt ten opzichte van een pipinganalyse met de rekenregel van Sellmeijer aanvullend invoer dat met beschikbare documentatie kan worden bepaald:

- Voor de laagopbouw (meerlaagsheid) kan met de theorie van de schematiseringsfactor (ENW, 2012) een representatieve laagopbouw worden gekozen.
- Horizontale doorlatendheid van alle lagen en korreldiameter van de pipinggevoelige laag kunnen worden bepaald conform de schematiseringshandleiding piping (Rijkswaterstaat, 2019).
- In geval van anisotropie wordt voor de verticale doorlatendheid een andere waarde ingevuld dan voor de horizontale doorlatendheid (Deltares, Fugro en HKV, 2018).

B.2 D-Geo Flow in relatie tot het veiligheidsformat

Technisch inhoudelijke informatie over het toe te passen veiligheidsformat is beschreven in bijlage C. In die bijlage is de verwachting onderbouwd dat, bij een goede bepaling van de invoer, de modelonzekerheid voor het kritiek verval uit D-Geo Flow gelijk is aan de modelonzekerheid van de regel van Sellmeijer. Immers het (piping) rekenmodel is gelijk en onzekerheden rondom invoerparameters worden gelijkwaardig meegenomen. Alleen de grondwaterstroming wordt in D-Geo Flow bij een nauwkeuriger schematisatie van de ondergrond berekend. De schadefactor die is afgeleid voor de rekenregel van Sellmeijer kan daarom worden gebruikt voor een eerste veiligheidsanalyse op basis van het kritiek verval met D-Geo Flow. De kalibratiereguleer achter de schadefactor kan op dezelfde manier als bij de rekenregel van Sellmeijer worden gebruikt voor een indicatie van de overstromingskans door piping. Daarbij wordt opgemerkt dat rekenresultaten altijd verklaarbaar moeten zijn en dat probabilistische analyses nodig zijn ter onderbouwing als het handelingsperspectief sterk wordt bepaald door de extra parameters in D-Geo Flow.

¹ Hoewel een tijdsafhankelijke belasting in D-Geo Flow kan worden opgegeven, is de pipegroei instantaan. De optie om tijdsafhankelijk te rekenen is in de update van D-Geo Flow van zomer 2020 uitgeschakeld. Tijdsafhankelijk rekenen kan nog wel in de rekenkernel DgFlow.

Gebruik van schadefactoren en kalibratieregels voor semi-probabilistische pipinganalyses geven altijd een benadering van het kritiek verval en overstromingskans. In de meeste gevallen is deze benadering veilig en conservatief. Dit geldt in gelijke mate voor analyses met de eenvoudige rekenregel als met D-Geo Flow.

In de gevallen waar een scherper antwoord leidt tot een ander handelingsperspectief wordt aanbevolen met gevoeligheidsanalyses de stabiliteit van het rekenresultaat te onderzoeken en indien nodig een probabilistische berekening uit te voeren (in overleg met een expert).

B.3 Met D-Geo Flow berekende pipelengte

Met D-Geo Flow kan ook een pipelengte worden uitgerekend. De pipelengte die wordt berekend is theoretisch en niet gevalideerd aan experimenten. Doordat de pipelengte een tussenresultaat is voor een berekening van het kritiek verval kan wel enige waarde aan de berekende pipelengte worden toegekend, echter omgang hiermee is complex. In bijlage D wordt een handvat gegeven hoe met de onzekerheid rondom pipelengte kan worden omgegaan.

B.4 Overige aandachtspunten

- Situaties waarbij de pipe onder het voorland groeit en verticale stroming door het voorland de pipe voedt, zijn niet experimenteel onderzocht en gevalideerd.
- Voor het bepalen van een anisotropiefactor zijn in het Kennis voor Keringen programma handvatten opgesteld (Deltares, 2019). Uit de literatuur kunnen voor verschillende geologische afzettingen bandbreedtes voor deze factoren worden afgeleid. Lokale bepaling van de anisotropie is onder meer mogelijk met HPT-AMPT sonderingen.
- Conform de licentieovereenkomst van D-Geo Flow is controle van de resultaten door experts van belang.



Figuur 5: Zandmeevoerende wel (bron: beeldbank Rijkswaterstaat)

C Gebruik van D-Geo Flow voor veiligheidsanalyses

In deze bijlage is beschreven hoe D-Geo Flow kan worden toegepast in veiligheidsanalyses van beoordelings- en versterkingsprojecten. Een analyse van D-Geo Flow vraagt andere invoer dan een analyse met de rekenregel. Aangegeven wordt hoe met de onzekerheden rondom aanvullende parameters kan worden omgegaan. Extra aandacht wordt gegeven aan het gebruik van de kalibratieregel die voor de rekenregel is afgeleid.

C.1 Algemeen

In deze bijlage is aangegeven waar D-Geo Flow afwijkt van de rekenregel van Sellmeijer, en welke vragen ontstaan bij het toepassen van D-Geo Flow voor een veiligheidsanalyse. Voor deze vragen wordt handelingsperspectief gegeven. Dit perspectief is gebaseerd op een kwalitatieve inschatting van experts welke nadere kwantitatieve validatie behoeft in geval van twijfel over de keuzes.

C.1.1 Uitgangspunten

Uitgangspunt is dat voor de beoordeling een zo realistisch mogelijke kansschatting, zonder conservatisme, wordt gemaakt. Voor ontwerpen kan bij hoge initiële projectkosten het verstandig zijn om bij onzekerheden iets veiliger te kiezen. Dit geldt vooral als er onzekerheid is over de bijdrage van een parameter aan het kritiek verval in geval deze parameter het kritiek verval sterk bepaald.

Er is in deze bijlage alleen naar terugschrijdende erosie gekeken, verder genoemd piping. Kwelschermen en overige maatregelen worden niet beschouwd. We kijken naar semi-probabilistische analyses waar rekenwaarden worden gebruikt om onzekerheden af te dekken. We gaan uit van correcte schematisaties conform de gangbare richtlijnen (Rijkswaterstaat, 2019) en correct gebruik van D-Geo Flow, conform de handleiding (Deltares, 2018).

In deze bijlage wordt uitgegaan van D-Geo Flow versie 1.1.48593 zoals per half juli 2020 beschikbaar op <https://www.deltares.nl/nl/software/d-geo-flow/>.

Naast versie 1.1.48593 zijn er mogelijk nog andere versies in de omloop welke qua functionaliteit kunnen afwijken (in eerdere versies kan wel tijdsafhankelijk de grondwaterstroming beschouwd worden, echter doordat de pipingberekening instantaan is, is dit in de nieuwe versie uitgeschakeld). In deze bijlage zijn de meest relevante functionaliteiten beschouwd. Beschikbare functionaliteiten in andere versies worden alleen benoemd, zodat zij kunnen worden meegenomen in een sanity check van rekenresultaten (zie stap 4 uit stroomschema van bijlage A).

C.1.2 Opbouw

In D-Geo Flow worden niet dezelfde parameters gebruikt als in de rekenregel, waardoor theoretisch niet is aangetoond dat de kalibratieregel kan worden gebruikt voor veiligheidsanalyses. In paragraaf C.2 worden de verschillende verschillen tussen rekenregel en D-Geo Flow beschouwd.

Hoe we met de extra parameters en onzekerheden in D-Geo Flow omgaan wordt beschreven in paragraaf C.3. Dit hangt af van:

- Zekerheid over effect parameter op gemodelleerd kritiek verval D-Geo Flow;
- Effecten van parameters op het kritiek verval of kritieke pipelengte;
- Effecten van onzekerheden op veiligheidsanalyse.

In paragraaf C.4 wordt vervolgens ingegaan op het veiligheidsformat voor analyses van het kritieke verval met D-Geo Flow.

C.2 Verschillen rekenregel en D-Geo Flow

C.2.1 Algemeen

In de rekenkernel DgFlow is het rekenmodel van Sellmeijer geprogrammeerd. Het model van Sellmeijer betreft een theoretisch model gebaseerd op korrelevenwicht, grondwaterstroming en stroming door een pipe. De rekenregel van Sellmeijer is van dit model afgeleid voor een vereenvoudigde schematisatie met onder andere rechte laagscheidingen, uitstroom bij een uitstroompunt (een sloot), geen lek naar het achterland en isotroop, ongelaagd zand. De rekenregel is gekalibreerd op basis van experimenten. Daarbij is de rekenregel gefit op kritiek verval (H_c), niet op kritieke kwelweglengte.

De verschillen in kritiek verval volgens een berekening met D-Geo Flow (met een voldoende fijne mesh en de juiste rekeninstellingen) en de regel van Sellmeijer zijn bij gelijke schematisatie verwaarloosbaar. Dit geldt zeker in relatie tot andere (schematiserings)onzekerheden van een pipinganalyse.

C.2.2 Overzicht verschillen rekenregel en D-Geo Flow

Daar waar de gebruikte modellering in D-Geo Flow van de rekenregel verschilt, dient de onzekerheid van de extra functionaliteit op een vergelijkbare manier als het bestaande veiligheidsformat worden meegenomen. De volgende groepen verschillen tussen de rekenregel en D-Geo Flow worden onderscheiden:

- a) Randvoorwaarden
- b) Grondwaterstroming
- c) Erosieweerstand

De verschillen tussen de rekenregel en D-Geo Flow worden in onderstaande tabel beschreven.

Voor sommige aspecten die niet in de rekenregel kunnen worden meegenomen, zijn in de Schematiseringshandleiding (Rijkswaterstaat, 2019) benaderingen gegeven om toch bepaalde effecten mee te nemen bij het gebruik van de rekenregel. Deze zijn ook opgenomen in onderstaande tabel. Opgemerkt wordt dat het effect van de benaderingen op het kritiek verval en kalibratieregul niet voor alle benaderingen is gevalideerd.

In de tabel zijn ook functionaliteiten van DgFlow weergegeven die niet beschikbaar zijn via de user interface van D-Geo Flow. Deze functionaliteiten worden weergegeven, zodat deze kunnen worden meegenomen in de sanity check van rekenresultaten zoals beschreven in stap 4 uit stroomschema van bijlage A. Achtergrondinformatie bij deze nieuwe functionaliteiten is gegeven in de bijsluiters van KVK (Deltares, 2020B); deze worden verder in deze bijlage niet meer beschouwd.

Tabel 3: Aannames en uitgangspunten voor pipinganalyse met rekenregel en D-Geo Flow. Grijs betreffen functionaliteiten die niet in de user interface van D-Geo Flow beschikbaar zijn maar wel in de rekenkernel DgFlow zitten.

#	Parameter	Rekenregel Basis-schematisatie	Schematiserings-benadering in rekenregel	Mogelijkheden D-Geo Flow (GUI en kernel, zie C.2.2)
a	Benedenstroomse randvoorwaarde	Volledig gesloten behalve uittredepunt	-	Verskillende mogelijkheden
a	Voorland en intredeweerstand	Volledig ondoorlatend over kwelweglengte	Equivalentente voorlandlengte	Dikte en doorlatendheid voorland opgeven, sliblaag schematiseren als extra laag
a	Achterland	Gesloten, behalve uittreepunt	-	Dikte en doorlatendheid op te geven

#	Parameter	Rekenregel Basis-schematisatie	Schematiserings-benadering in rekenregel	Mogelijkheden D-Geo Flow (GUI en kernel, zie C.2.2)
b	Uitstroming wel	Open uitstroming	Correcties voor weerstand deklaag (0.3d regel)	Open uitstroming of correctie verval of heave boundary (Deltares, 2019A)
b	Opbouw zand	1 laags	Equivalentente doorlatendheid o.b.v. meerdere horizontale lagen	Meerdere lagen mogelijk, Lagen moeten wel horizontaal doorlopen, en kunnen niet hellen.
b	Doorlatendheid zand	Isotroop	-	Anisotropie mogelijk
a	Buitenwaterstand	Stationair	-	Tijdsafhankelijk
a	2D vs 3D configuratie	2D	-	2D, rekenkernel kan door specialisten worden gebruikt voor 3D analyse
b	Demping en berging zand	Stationair gedrag	-	Berging en demping modelleren
c	Erosiesnelheid	Instantaan		Instantaan, in promotieonderzoek wordt rekenkernel gebruikt voor onderzoek naar analyse erosieproces.

In het vervolg gaan we alleen uit van de meest gangbare functionaliteiten in de user interface, de (grijsgekleurde) mogelijkheden in de rekenkernel worden verder niet beschouwd. Ook uitstroming in de wel wordt verder niet beschouwd; hier zijn twee mogelijkheden voor in D-Geo Flow (Deltares, 2019A) welke in een sanity check verder beschouwd kunnen worden (zie bijlage A)

C.2.3 Beschrijving mogelijkheden en beperkingen rekenkernel DgFlow

De rekenkernel DgFlow is een numerieke implementatie van het pipingmodel van Sellmeijer, waarop ook de rekenregel is gebaseerd. Dit betreft een evenwichtsmodel, welke voornamelijk gevalideerd is op het kritieke verval.

Voor de analyses van pipelengte geldt dat dit aspect van het model van Sellmeijer nooit is gevalideerd. De kritieke pipelengte is in het model een tussenresultaat waarmee het kritieke verval kan worden berekend. Analyse van de kritieke pipelengte is van belang bij een dunne deklaag in het voorland. Hiervoor worden enkele handvatten gegeven in bijlage D.

3D effecten spelen een belangrijke rol bij de berekende pipelengte. De onzekerheid rondom analyses met 3D effecten is groot. Dit is de reden dat deze functionaliteit niet beschikbaar is in de gebruikersversie van D-Geo Flow

In de vorige versie van D-Geo Flow kon een waterstandverloop worden opgegeven en een tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekening worden gemaakt. Omdat in het veiligheidsformat (zie paragraaf C.4) wordt uitgegaan van een rekenwaarde voor de waterstand, is het niet duidelijk welk waterstandverloop representatief is en hoe deze voor veiligheidsanalyses moet worden bepaald.

Daarnaast is het nog niet mogelijk om het erosieproces tijdsafhankelijk te modeleren. Tijdsafhankelijkheid van het erosieproces wordt in een promotiestudie met DgFlow onderzocht. De kennis is nog niet geschikt voor analyses voor beoordeling en ontwerp. Door de grote onzekerheid over de tijdsafhankelijkheid van het erosieproces is het in de nieuwe versie van D-Geo Flow niet

meer mogelijk een tijdsafhankelijke belasting op te geven. Deze functionaliteit (zie paragraaf C.2.2) kan wel worden gebruikt door specialisten onder begeleiding van Deltares.

In het vervolg van deze bijlage wordt voornamelijk ingegaan op de invloed van de parameters welke in de gebruikersversie (zie paragraaf C.1.1) zitten en de invloed hiervan op het kritiek verval. De andere functionaliteiten van DgFlow kunnen door specialisten onder begeleiding van Deltares worden gebruikt.

C.2.4 Rekeninstellingen

Voor analyses met D-Geo Flow zijn ten opzichte van analyses met de rekenregel extra rekeninstellingen nodig. De rekeninstellingen van D-Geo Flow kunnen een grote invloed hebben op het berekende kritieke verval. Voorbeelden hiervan zijn de rastergrootte en het MPicard getal. In de D-Geo Flow handleiding (Deltares, 2018) staat dit verder uitgewerkt.

Voor de rastergrootte is het van belang dat het raster langs de pipe voldoende verfijnd is, in de orde van 0,5 tot 1 m, afhankelijk van de kwelweglengte.

De elementen hoeven niet in het gehele model zo klein te zijn, dit zou voor het modelleren van een praktijksituatie tot ongewenst lange rekentijden leiden. Daarom kan in D-Geo Flow een basis rastergrootte worden gespecificeerd en een factor van verfijning richting de pipe. Hierbij is het wel van belang rekening te houden met de 'kwaliteit' van de elementen bij een hoge verfijningsfactor. Dat kan namelijk leiden tot slecht gevormde elementen met scherpe hoeken, waardoor de berekening ook minder nauwkeurig wordt. Het is ook mogelijk om per ondergrond blok in het model een rastergrootte aan te geven.

Opgemerkt wordt dat het modelleren van de dijk zelf niet nodig hoeft te zijn in gevallen dat deze zeer ondoorlatend is ten opzichte van het watervoerend pakket. Aangezien het dijklichaam zelf vaak knikpunten bevat wordt daardoor de mesh in de onderliggende grondlagen op de locatie van die knikpunten verfijnd, terwijl dit voor de berekening niet nodig is. Dit geldt ook bij een niet geheel ondoorlatende dijk. Het is daarom erg belangrijk om de dijk zo eenvoudig mogelijk te schematiseren.²

Het MPicard getal wordt nader toegelicht in de handleiding, maar heeft ook betrekking op de nauwkeurigheid waarmee resultaten worden uitgerekend. Een lagere waarde leidt tot snellere minder nauwkeurige berekeningen, en een iets conservatiever resultaat. Het kan overwogen worden om met een grovere waarde (500) een gevoeligheidsanalyse te doen naar welke aspecten belangrijk zijn, en vervolgens een fijnere waarde (1000) te hanteren voor de relevante schematisaties. Hogere waarden lijken nauwelijks meerwaarde te bieden op gebied van nauwkeurigheid, en leiden wel tot langere rekentijden.

Daarnaast is de stapgrootte waarmee het verval wordt opgehoogd in D-Geo Flow van belang. Het kritieke verval wordt bepaald door per stap te kijken of de pipe doorgroeit. Het kritieke verval is het hoogste verval waarbij de pipe nog niet tot de bovenstroomse intredepunt groeit. De stapgrootte waarmee het verval wordt verhoogd is daarom belangrijk voor de precisie waarmee het kritiek verval wordt bepaald.

Opgemerkt dat deze stapgrootte ingevoerd wordt door de toename van de waterstand in een bepaalde tijdstuur, in combinatie met de tijdsstapgrootte. Een voorbeeld: de gebruiker voert een randvoorwaarde bovenstrooms van 1 m naar 5 m in 4 dagen in. Een toename van 1 m per dag. Als er 9 tijdsstappen worden gebruikt is 1 tijdsstap 12 uur en wordt het verval per tijdsstap 0,5 m verhoogd. Dan kan het kritieke verval dus niet nauwkeuriger worden bepaald dan met 0,5 m.

² De meest eenvoudige schematisatie is een dichte rand ter plaatse van de dijkbasis.

C.3 Modelonzekerheid D-Geo Flow

C.3.1 Algemeen

De extra functionaliteit in D-Geo Flow leidt tot *extra* onzekerheden ten opzichte van de rekenregel waarmee in analyses van terugschrijdende erosie rekening moet worden gehouden; deze worden hier modelonzekerheid D-Geo Flow genoemd. Voor interpretatie van resultaten van een analyse is het van belang in hoeverre een parameter het kritiek verval of pipelengte beïnvloedt en hoe zeker we zijn over het modelleren van deze parameter. Hoe groter het effect van een parameter op het kritiek verval, des te groter de mogelijke afwijkingen ten opzichte van de kalibratieregels. Dat wordt in deze paragraaf verder uitgewerkt.

C.3.2 Kwalitatieve inschatting onzekerheden

Voor de verschillen tussen rekenregel en D-Geo Flow wordt in onderstaande tabel aangegeven wat het effect is op het kritieke verval. Hoe groter het effect, hoe groter het belang om het betreffende aspect en bijbehorende parameter mee te nemen. De kwalificaties betreffen indicaties van experts. Het effect van de verschillende aspecten is per locatie verschillend. Per locatie kan het effect exact worden bepaald door in een analyse van een basisschematisatie de resultaten van rekenregel te vergelijken met een analyse met D-Geo Flow.

In de laatste kolom van de tabel wordt aangegeven hoe goed we denken dat D-Geo Flow het effect van het betreffende parameter meeneemt. Zoals in paragraaf C.2 besproken, kijken we alleen naar de parameters waarover we grote zekerheid hebben. In het algemeen zijn we zekerder van de prestatie van het model (dus minder modelonzekerheid D-Geo Flow) wanneer de omstandigheden vergelijkbaar zijn met de omstandigheden waaronder het model is gevalideerd:

- De schematisering dicht bij het model van Sellmeijer ligt;
- De beschouwde situatie dichtbij een 2D situatie ligt, bijvoorbeeld in geval van een langssloot met direct verbinding met zandpakket;
- Het effect van sterke parameters (c, zie paragraaf C.2) zijn minder zeker dan van randvoorwaarden of grondwaterstroming (a, b), deze laatste worden dus ook niet meegenomen.

Tabel 4: Invloed parameter op Hc en zekerheid hierover

#	Parameter	Gebruik D-Geo Flow	Effect op Hc
a	Benedenstroomse randvoorwaarde	Verschillende mogelijkheden	Beperkt ¹
a	Voorland en intredeweerstand	Schematiseren als laag met een doorlatendheid	Groot ¹
a	Achterland	Doorlatend achterland	Beperkt ^{1*}
b	Opbouw zand	Gelaagdheid	Potentieel groot ¹
b	Doorlatendheid zand	Anisotropie	Potentieel groot ²

¹ bron Deltares (2020B)

² afhankelijk van grootte van anisotropiefactor, zie Deltares (2019A)

C.3.3 * voor de huidige 2D werkwijze terugschrijdende erosie heeft het achterland geen belang, in een 3D stromingssituatie speelt dit wel degelijk een rol. Indicatie modelonzekerheid D-Geo Flow

Voor bepaling van het kritieke verval met de gebruikersversie van D-Geo Flow is het niet nodig om extra modelonzekerheid mee te nemen, tenzij er bij de controle van de resultaten (stroombanen, stijghoogtes, etc.) onverwachte resultaten worden gevonden *en* mits de rekenwaardes op een juiste manier zijn bepaald. Hiervoor zijn de volgende redenen:

- Met de functionaliteiten die in de gebruikersversie van D-Geo Flow beschikbaar zijn kunnen geohydrologische aspecten beter worden meegenomen. De betrouwbaarheid van de modelering van deze aspecten in D-Geo Flow is groot, omdat de vergelijkingen van

grondwaterstromingen al in veel programma's zijn toegepast en resultaten daarvan zijn geverifieerd aan metingen.

- Wanneer een analyse met D-Geo Flow wordt uitgevoerd met een schematisatie en randvoorwaarden die overeenkomt met de basisschematisatie van de rekenregel van Sellmeijer worden vergelijkbare kritieke vervallen berekend. Een betere modelering van de geohydrologische aspecten leidt niet tot extra modelonzekerheid voor de basisschematisatie.
- De grootste onzekerheden in een veiligheidsanalyse met de rekenregel zijn de waterstand, doorlatendheid en $d70$; dit komt tot uitdrukking via de zogenaamde FORM invloedscoëfficiënten (Deltares, 2016). De extra onzekerheid door toepassing van D-Geo Flow is hiermee vergeleken beperkt voor de meeste parameters; alleen parameters met een groot effect op H_c dienen met extra aandacht te worden beschouwd.

Voor analyses van pipelengte is dit een stuk genuanceerder. Bij gebruik van deze functionaliteit in veiligheidsanalyses moet rekening worden gehouden met de modelonzekerheid. De grote van de modelonzekerheid is echter onbekend omdat dit aspect van het model van Sellmeijer nooit is gevalideerd. De onzekerheid wordt groter naarmate er meer 3D stroming is, zie ook bijlage D voor de omgang met de berekende pipelengte. De mate van 3D stroming hangt af van zowel lek lengte van het achterland als de breedte (loodrecht op het dwarsprofiel) van de piping gevoelige zandbaan. Een 2D situatie is bijvoorbeeld waar geen deklaag in het achterland aanwezig is of waar een sloot aanwezig is die door de deklaag snijdt. Een 3D situatie zou een oneindig brede pipinggevoelige zandbaan en een relatief ondoorlatende deklaag zijn.

C.4 Veiligheidsanalyse met D-Geo Flow

C.4.1 Gebruik D-Geo Flow voor veiligheidsanalyse

Voor een semi probabilistische analyse met de rekenregel van Sellmeijer is een kalibratierelatie afgeleid. Hiervoor is in een veiligheidsformat aangegeven hoe met de verschillende onzekerheden wordt omgegaan. Bij het veiligheidsformat is een overal veiligheidsfactor gekalibreerd als een functie van de geëiste betrouwbaarheid is. De geëiste betrouwbaarheid voor een doorsnede (hier kijken we naar) is afhankelijk van de norm van het traject, faalkansverdeling over de mechanismes en het lengte-effect (Rijkwaterstaat, 2019).

De kalibratierelatie en het veiligheidsformat zijn gebaseerd op de basisschematisatie die hoort bij de rekenregel van Sellmeijer. Afwijkingen hiervan zullen dus ook de kalibratierelatie en veiligheidsformat beïnvloeden. Met de kwalitatieve beschouwing in paragraaf C.3 wordt onderbouwd³ dat bij een correcte schematisering in D-Geo Flow, de extra modelonzekerheid door het meenemen van aanvullende parameters waarschijnlijk beperkt is voor het bepalen van kritiek verval. In deze paragraaf wordt beschouwd hoe kan worden omgegaan met deze extra parameters in een veiligheidsanalyse. Hierin wordt aangegeven op welke werkwijze rekenwaarden kunnen worden bepaald. Als betreffende parameter een groot effect heeft op H_c wordt een probabilistische analyse geadviseerd, zie voorgaande paragrafen.

C.4.2 Veiligheidsformat voor kritiek verval rekenregel

Voor het bepalen van een veiligheidsanalyse dient integraal naar alle onzekerheden te worden gekeken. Het uitgangspunt is om de huidige kalibratieregels te gebruiken voor het bepalen van het kritiek verval en onzekerheden conform het veiligheidsformat bij de rekenregel te verdisconteren.

Met onzekerheden kan op verschillende manieren worden omgegaan, te weten

- Via scenario's of schematiseringsfactor
- Via schematiseringskeuzes
- Via stochasten en rekenwaarden

³ Voor een nauwkeurige kalibratierelatie is een volledige kalibratie nodig.

- Via default keuzes

In het veiligheidsformat wordt afgesproken per parameter hoe de onzekerheden in rekening worden gebracht. In het veiligheidsformat bij de rekenregel van Sellmeijer worden de onzekerheden als volgt meegenomen:

- *Belasting*: De waterstand bij de norm is als rekenwaarde voor de belasting gedefinieerd.
- *Geometrie*: deze wordt meegenomen via een representatieve geometrie in de schematisering.
- *Ondergrondopbouw onzekerheden*: Deze worden afgedekt via ondergrondscenario's conform de WBI en OI handreikingen. Hier wordt verder niet op ingegaan.
- *Eigenschappen ondergrond*: Deze worden als stochast meegenomen en afgedekt via een rekenwaarde. Het betreffen karakteristieke waarden met 5% onder- of overschrijdingskans.
- Default keuzes zijn gemaakt voor eigenschappen water (dichtheid en viscositeit), zwaartekracht en sleepweerstand (coëfficiënt van White).
- *Modelonzekerheid*: De modelonzekerheid wordt als stochast meegenomen en afgedekt met binnen de kalibratierelatie.

Bij dit format is een overall, betrouwbaarheidsniveau-afhankelijke veiligheidsfactor afgeleid.

C.4.3 Omgang met onzekerheid parameters in D-Geo Flow

In deze paragraaf wordt het veiligheidsformat van de rekenregel doorvertaald naar de wijze waarop met parameters die wel in de gebruikersversie van D-Geo Flow zitten, maar niet in de rekenregel kan worden omgegaan. Door aan te sluiten bij het veiligheidsformat van de rekenregel van Sellmeijer geeft de kalibratiereguleer een goede indicatie voor een veiligheidsanalyse met D-Geo Flow.

In Tabel 5, laatste kolom, wordt een voorstel gedaan hoe kan worden omgegaan met de relevante D-Geo Flow parameters uit Tabel 4. Dit volgt de aanpak van onzekerheden in het veiligheidsformat van de rekenregel, namelijk met scenario's/schematiseringsfactor voor discrete onzekerheden en met rekenwaarden voor continue onzekerheden.

Hoe we met de rekenwaarden van de onzekerheden omgaan hangt af van:

- Grootte onzekerheid in parameter (kolom Onzekerheid in Tabel 5);
- Uitmiddelingseffecten. Uitmiddeling (kolom Uitmiddeling In Tabel 5, - beperkte uitmiddeling, + veel uitmiddeling) betreft het verschijnsel dat voor sommige processen niet de lokale (punt)variatie van invloed is op het proces, maar een ruimtelijk gemiddelde. Bijvoorbeeld voor schuifsterkte wordt uitmiddeling in rekening gebracht, omdat niet de lokale schuifsterkte in een glijvlak van belang is, maar de gemiddelde schuifsterkte langs een glijvlak;
- Effecten van parameters op het kritiek verval, zie paragraaf C.3.2;
- Zekerheid over effect parameter op gemodelleerd kritiek verval in D-Geo Flow. Alleen effecten waar voldoende zekerheid over Hc voor is (zie paragraaf C.3.2), worden in de tabel beschouwd.

In Tabel 5 staat een eerste inschatting gegeven van deze effecten en hoe dit de mogelijke rekenwaarde beïnvloedt. Afhankelijk van onzekerheid, uitmiddeling en effect op kritiek verval wordt gekozen voor een karakteristieke waarde met 5% of 95% overschrijdingskans. Voor beperkte onzekerheden, veel uitmiddeling en weinig effect op Hc kan worden volstaan met een rekenwaarde voor het gemiddelde ('verwachting' in tabel). Dit is sterk situatie-afhankelijk en moet dus per project worden ingeschat. De inschattingen van Tabel 5 geven een eerste indicatie.

In geval er een groot effect van een parameter op de veiligheidsanalyse is, is het wenselijk dat de keuzes met een probabilistische analyse worden onderbouwd, zie C.4.1.

Tabel 5: Voorgestelde omgang met onzekerheid in D-Geo Flow effecten en parameters voor veiligheidsanalyse (- klein en + groot)

#	Parameter DGF	Onzekerheid	Uitmiddeling	Effect op Hc ¹	Zekerheid Hc	Omgang met parameters
a	Benedenstroomse randvoorwaarde	-	-	+	++	Afhankelijk van gekozen randvoorwaarde, rekenwaarde bovengrens als stijghoogte polder.
a	Voorland en intrede- weerstand	+	-	+ / -	++	via rekenwaarde, ondergrens of bovengrens afhankelijk van invloed op Hc (positief of negatief)
a	Doorlatendheid en dikte achterland	+	-	-	++	via rekenwaarde, verwachting
b	Gelaagdheid watervoerend pakket en dikte zandlagen	-	-	++	++	Via scenario's ²
b	Anisotropie ³	+ / -	++ / - ³	++ ³	++	Via rekenwaarde, ondergrens of verwachting ³

¹ Het effect van Hc hangt sterk af van de mate van de te beschouwen parameter, bijvoorbeeld anisotropie, zie Deltares (2020A)

² Verschillende mogelijke opbouwen doorrekenen.

³ De onzekerheid en mate van uitmiddeling zijn sterk gebiedsafhankelijk. Mariene afzettingen hebben doorgaans grotere onzekerheid dan rivierafzettingen. Ook is de mate van uitmiddeling bij Mariene afzettingen waarschijnlijk groter omdat de correlatielengte van de anisotropiefactor relatief klein is ten opzichte van de kwelweglengte. In dit geval is een rekenwaarde voor het gemiddelde een logische keuze. Voor bepaling van de rekenwaarde dient rekening te worden gehouden met lokale en regionale proevenverzamelingen (Deltares, 2019B en Deltares 2020A).

Voor anisotropie is al een werkwijzer voor het bepalen van rekenwaarden opgesteld (Deltares, 2019B). Voor deze werkwijzer is geconcludeerd dat:

- Variatie in de parameter groot is;
- De mate van uitmiddeling ook groot is (gebaseerd op metingen en modelleren);
- Het effect van de parameter op het kritiek verval groot is (orde 20% voor het beschouwde geval. Natuurlijk is het effect sterk afhankelijk van de mate van anisotropie, zie Deltares, 2020B)
- Er vrij grote zekerheid over het effect is, omdat het grondwaterstroming betreft.

Daarom is gekozen om te rekenen met een karakteristieke schatting van het gemiddelde. De onzekerheid is voldoende meegenomen in de rekenwaarde van de doorlatendheid.

D-Geo Flow en het onderliggende model van Sellmeijer zijn niet gevalideerd voor het bepalen van een kritieke pipe-lengte. Situaties waarbij de pipe onder het voorland groeit en verticale stroming door het voorland de pipe voedt niet experimenteel is onderzocht en gevalideerd (Deltares, 2020B). Vooral voor het meenemen van het voorland in een pipinganalyse kan dit van belang zijn, aangezien deze bij toepassing van de rekenregel van Sellmeijer is gemaximeerd op 2 keer de dijkbasis voor het mee te nemen kwelweglengte (voorlandlengte is dan dus maximaal 1 keer de dijkbasis).

In bijlage D wordt een handvat gegeven hoe met kritieke pipelengte kan worden omgegaan. Daarbij wordt opgemerkt dat er rondom analyses van pipelengte veel ontwikkelingen zijn en weinig ervaring is. Op basis van ervaringen en kennisontwikkeling zal het handvat worden aangescherpt.

Het in deze paragraaf voorgestelde veiligheidsformat voor het omgaan met aanvullende (onzekere) parameters in D-Geo Flow is een eerste *inschatting* voor het doen van een veiligheidsanalyse; als

deze het handelingsperspectief sterk bepalen is het nodig de keuzes in het veiligheidsformat te onderbouwen met probabilistische analyses. Uiteindelijk is het wenselijk dat er een kalibratie en veiligheidsformat komt voor het gebruik van D-Geo Flow op basis van probabilistische analyses.

D Omgang met pipegroei onder voorland

D.1.1 Inleiding

De berekende kritieke pipelengte (L_c) in D-Geo Flow is van belang voor het meenemen van de intredeweerstand van het voorland voor pipinganalyses. Wanneer de rekenregel van Sellmeijer wordt gebruikt kan voorland maar beperkt meegenomen worden. De pipe mag daarbij niet onder het voorland komen, omdat toestroom van bovenaf naar de pipe niet wordt meegenomen in dat model. Daarnaast kan het alsnog onwenselijk zijn dat de pipe onder het voorland komt omdat dan het risico op kortsluiting bestaat, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van scheuren. Idealiter wordt de kans op kortsluiting expliciet in rekening gebracht op basis van de mate van ontwikkeling van de pipe en de eigenschappen van de deklaag. Hier zijn op dit moment echter nog geen tools voor beschikbaar. Omdat het wegen van de kans op kortsluiting nog vragen oproept, wordt in de beoordeling veelal aangehouden dat de pipe niet onder het voorland mag ontwikkelen. In een situatie met een ondoorlatende deklaag, zoals in de regel wordt aangenomen, zal de kritieke pipe-lengte niet groter zijn dan de helft van de kwelweglengte. Dit heeft geleid tot de regel dat de totale kwelweglengte niet groter mag zijn dan 2x de dijkbasis.

In D-Geo Flow kan het voorland realistischer meegenomen worden dan in de regel. In D-Geo Flow wordt namelijk een kritieke pipelengte berekend, en daarnaast wordt de toestroom vanuit de deklaag wel meegenomen in de grondwaterstromingsberekening. Twee aspecten die wel spelen zijn:

1. Er is nog onbekendheid over de situatie waarbij de pipe gevoed wordt vanuit de deklaag. Hoe goed voorspelt het model de werkelijkheid in deze situatie, gegeven een correcte invoer? Naar verwachting leidt de instroom van bovenaf niet tot een wijziging van het erosieproces, en is de modelonzekerheid niet groter dan zonder instroom door het voorland. **Als er geen risico is op kortsluiting is er geen bezwaar wanneer de pipe onder het voorland uitgroeit** (bij een dikke deklaag zal de instroming ook verwaarloosbaar zijn).
2. Modelonzekerheid met betrekking tot de lengte van de pipe. De voorspelling van pipelengte is nooit gevalideerd, en een tussenantwoord bij de berekening van het kritieke verval. De berekende pipelengte bij het kritieke verval is sterk beïnvloed door de lek lengte van het achterland en 3D effecten. Daarom is de onzekerheid hiervoor groter naarmate de situatie meer 3D is. De berekende kritieke pipelengte is van belang indien er kans op kortsluiting in het voorland bestaat.

De voorliggende tekst schetst een concept raamwerk voor de omgang met de kritieke pipelengte in een analyse met D-Geo Flow wanneer kortsluiting in het voorland kan optreden. Dit betreft een discussiestuk dat op basis van verdere ervaringen doorontwikkeld kan worden. Doel hiervan is om aan de gebruiker aan te geven hoe deze de resultaten van D-Geo Flow kan duiden en om inzicht te bieden wanneer het zin heeft hier nader onderzoek naar te doen.

D.1.2 Stappenplan voor omgang met L_c wanneer kortsluiting in het voorland een risico is

In onderstaande redenering wordt uitgegaan van een voorland met dunne deklaag met zwakke plekken, waardoor het in eerste instantie wenselijk is dat de pipe onder de dijkbasis blijft. Een vergelijkbare denklijn geldt wanneer er op bepaalde afstand van de dijk bijvoorbeeld een sloot is waar kortsluiting op kan treden, echter dan kan de breedte van de dijkbasis (DB) vervangen worden door de afstand tussen het uittredepunt en de sloot (indien tussen de buitenteen en de sloot geen risico op kortsluiting bestaat).

1. Berekening in D-Geo Flow uitvoeren om kritiek verval (H_c) en de basis pipelengte bij het kritieke verval ($L_{c_{basis}}$) te bepalen (uitgaande van het veiligheidsformat in Bijlage C).

Opgemerkt wordt dat L_c sterk wordt beïnvloed door:

- de meshgrootte langs de pipe.
- afstroming naar het achterland.

Deze effecten zijn voor L_c meer van belang dan voor H_c . Een goede schematisatie en mesh verfijning draagt bij aan het verkleinen van de onzekerheden rondom de berekende L_c .

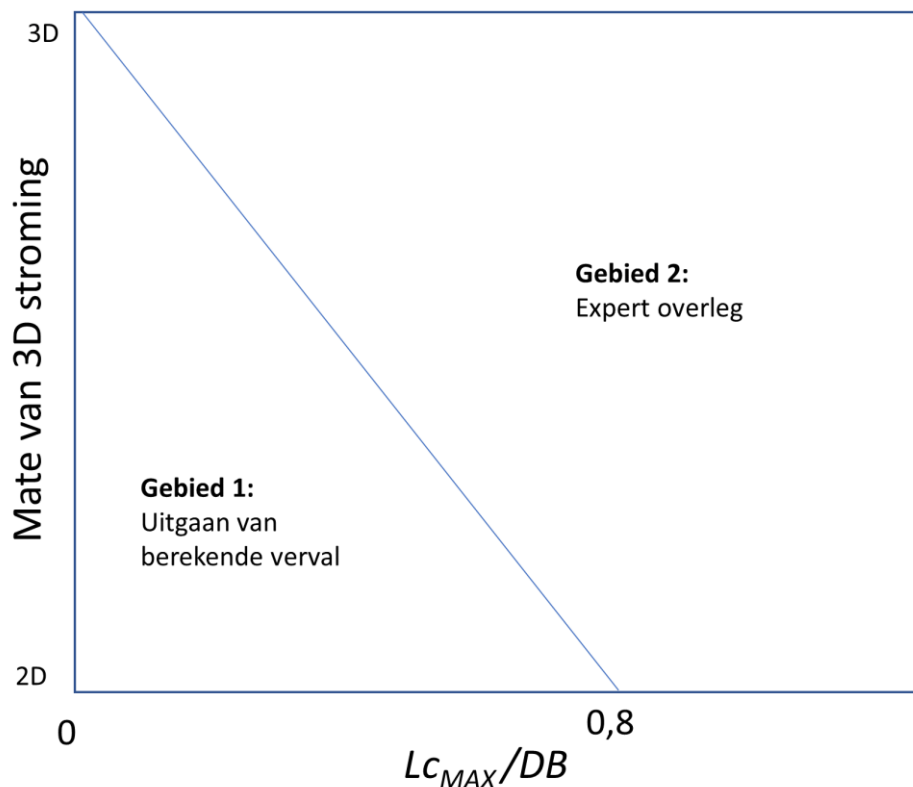
2. Gevoeligheidsanalyse voor het effect van laagopbouw, doorlatendheid, en anisotropie op L_c en bepaling van de maximale L_c , $L_{c_{max}}$ en bijbehorende $H_{c_{max}}$. Hierbij valt te denken aan variaties van ondergrondscenario's voor bodemopbouw, berekeningen met verwachtingswaarden, 95% boven en ondergrenswaarden van de doorlatendheden en anisotropie factoren.

De boven en ondergrenswaarden zijn van belang omdat het effect van de parameters op L_c anders kan zijn dan op H_c . Met andere woorden wat conservatief voor H_c is kan juist leiden tot een lagere L_c en vice versa, dat geldt ook voor ondergrondscenario's.

*De gevoeligheidsanalyse dient voldoende inzicht te bieden in de bandbreedte van de pipelengten die verwacht kan worden, en op basis hiervan kan de maatgevende combinatie parameters voor L_c bepaald worden, die leidt tot de maximale pipelengte $L_{c_{max}}$. (n.b. het kritieke verval bij die lengte $H_{c_{L_{max}}}$ kan hoger zijn dan het H_c in **Stap 1**). Gezien de onzekerheden m.b.t. de pipelengte en de invloed van parameters op de pipelengte, is dit een eerste benadering. Benadrukt wordt dat het valideren van de pipe-lengte en het ontwikkelen van een veiligheidsfilosofie tot een meer gewogen uitkomst kan leiden, waarin combinaties van kritiek verval en pipe-lengte expliciet meegenomen kunnen worden.*

3. De verhouding van $L_{c_{max}}$ ten opzichte van de breedte van de dijkbasis (DB) is van belang voor de omgang met de resultaten. Daarnaast is de mate van 3D stroming in het achterland van belang. Deze beïnvloedt de onzekerheid van de berekende $L_{c_{max}}$. De uitgevoerde berekening gaat immers uit van een 2D stromingspatroon. De mate van 3D stroming hangt af van zowel leklengte van het achterland als de breedte (loodrecht op het dwarsprofiel) van de piping gevoelige zandbaan. Een 2D situatie is bijvoorbeeld waar geen deklaag in het achterland aanwezig is of waar een sloot aanwezig is die door de deklaag snijdt. Een 3D situatie zou een oneindig brede pipinggevoelige zandbaan en een relatief ondoorlatende deklaag zijn.

Onderstaande grafiek geeft aan hoe afhankelijk van deze eigenschappen omgegaan kan worden met het in D-Geo Flow berekende kritieke verval.



Figuur 6: Omgang met kritieke verval in D-Geo Flow in relatie tot berekende maximale pipelengte $L_{c_{max}}$ in relatie tot mate van 3D stroming.

De berekende pipelengte is onzeker, zelfs bij een 2D situatie is de vraag in hoeverre het model betrouwbaar is. Daarom is in bovenstaande figuur een eerste inschatting gemaakt dat de $L_{C_{max}}$ maximaal 0,8 maal de DB kan zijn. Die factor 0,8 is daarbij een eerste inschatting van een modelfactor, die echter nader onderbouwd dient te worden en mogelijk aangepast kan worden.

Er zijn twee gebieden:

Gebied 1. Als het onwaarschijnlijk is dat de pipe bij de parametercombinatie voor $L_{C_{max}}$, onder de dijkbasis uit zal groeien, lijkt het verantwoord om de berekende H_c **van stap 1** te gebruiken voor het bepalen van de faalkans (conform het veiligheidsformat in Bijlage C). Dezelfde overwegingen gelden voor de omgang met het kritieke verval.

Opgemerkt wordt:

- dat de $L_{C_{basis}}$ dan korter kan zijn dan $L_{C_{max}}$. Echter vooralsnog wordt gezien de onzekerheid omtrent pipelengte uitgegaan van $L_{C_{max}}$. Zo kan verval $H_{cL_{max}}$ bij de schematisatie van $L_{C_{max}}$ ook hoger zijn dan H_c . De gesuggereerde aparte omgang met H_c en $L_{C_{max}}$ dient ter ondervanging van kennisonzekerheden, dit kan mogelijk aangescherpt worden. In het kader van 'van grof naar fijn werken' wordt deze aanscherping vooral aanbevolen indien de resultaten in **gebied 2** liggen.
- dat het beschouwen van de resultaten van een D-Geo Flow berekening door een expert in verband met de prototype status van D-Geo Flow altijd aangeraden wordt.

Gebied 2. Als het mogelijk is dat de pipe onder het voorland uitkomt, dient het risico op kortsluiting nader te worden onderzocht. Wanneer de berekende $L_{C_{max}}$ in gebied 2 komt zijn er 2 opties, waarvan het logisch lijkt die in deze volgorde uit te voeren:

1. Bepaling gereduceerd verval waarbij L_c in gebied 1 valt.
2. Expertoverleg over omgang met de resultaten en het risico van kortsluiting

Voor optie 1 is hier een voorstel voor een werkwijze gedaan voor een 2D situatie.

1a. In de resultaten van D-Geo Flow (pipelengte vs. verval grafiek) nagaan wat het verval H_{DB} is waarbij $L_{C_{max}} \leq 0,8DB$.

*Opgemerkt wordt dat dit wordt gedaan voor de parameter combinatie die leidt tot $L_{C_{max}}$ in **Stap 2**.*

1b. De verhouding van dit verval tot het kritieke verval in die parametercombinatie is een reductiefactor R_{Hc} .

$$R_{Hc} = H_{DB} / H_{cL_{max}}$$

1c. R_{Hc} kan toegepast worden op het kritieke verval H_c uit **stap 1** om een gereduceerd kritiek verval te bepalen waarbij het aannemelijk is dat de pipe onder de dijkbasis blijft, en om na te gaan of hiermee de faalkans al voldoende klein is.

$$H_{cR} = R_{Hc} \times H_c$$

*De gesuggereerde aparte omgang met H_c (bepaald in **Stap 1**) en $L_{C_{max}}$ (bepaald in **Stap 2**) dient ter ondervanging van kennisonzekerheden, dit kan mogelijk aangescherpt worden.*

In optie 2: een expertoverleg kan voor een specifieke situatie nader beschouwd worden:

- Wat de mate van onzekerheid rondom de berekende pipelengte is, en in hoeverre er aanscherping mogelijk is in dit opzicht. Door voor verschillende projecten/locaties specifieke aanscherpingen uit te werken kan op termijn ook een generieke aanscherping afgeleid worden.
- In hoeverre de kans op kortsluiting reëel is en of het aannemelijk is dat dit direct bij de buitenteen van de dijk zal gebeuren. Op basis van geologische en geohydrologische inzichten kan een inschatting gemaakt worden van de kans dat zwakke plekken in het voorland ook daadwerkelijk in de baan van de pipe liggen en zorgen voor kortsluiting. Door deze kans expliciet mee te nemen, in plaat van er van uitgaan dat de pipe direct bij de buitenteen kortsluiting maakt, kan de faalkans aangescherpt worden.

D.1.3 Discussie

Bovenstaande stappenplan dient een gebruiker een eerste handvat te bieden voor de omgang met D-Geo Flow in relatie tot de omgang met voorland en de berekende pipelengte. Verdere kennisontwikkeling op gebied van pipelengte en 3D effecten kan leiden tot een aanscherping van de bovenstaande stappen.

Hoewel een gevoeligheidsanalyse zoals in stap 2 beschreven staat een zeker mate van inspanning vergt, is de verwachting dat het beter meenemen van de voorland door middel van D-Geo Flow in veel gevallen kan leiden tot een beduidende aanscherping van de pipingopgave.