



Tijdsafhankelijk rekenen voor het faalmechanisme piping

Een onderzoek naar de toegevoegde waarde van het gebruik van het programma
D-Geo Flow voor Wetterskip Fryslân

Iris van Klaarbergen

Juni 2019

Tijdsafhankelijk rekenen voor het faalmechanisme piping

Een onderzoek naar de toegevoegde waarde van het gebruik van het programma D-Geo Flow voor Wetterskip Fryslân

Iris van Klaarbergen

Studentnummer: S1862685

Afstudeeropdracht BSc Civiele Techniek

Universiteit Twente

Begeleider: Vera van Bergeijk, Msc

Tweede beoordelaar: Dr. Marc van Buiten

Wetterskip Fryslân

Begeleiders: Anne Steegstra en Kevin van der Giessen

Opdrachtperiode:

8 april 2019 tot 5 juli 2019



**UNIVERSITY
OF TWENTE.**

Voorwoord

Dit verslag is geschreven voor de eindopdracht van de bachelor civiele techniek aan Universiteit Twente. De eindopdracht is geschreven tijdens een afstudeerstage bij Wetterskip Fryslân. Dit is het waterschap met het beheergebied provincie Friesland en een deel van het Groninger Westerkwartier. Het hoofdkantoor is gelegen in Leeuwarden. Wetterskip Fryslân was erg geïnteresseerd in het programma D-Geo Flow. Ook ik ben erg benieuwd geworden naar dit nieuwe rekenprogramma voor het faalmechanisme piping in dijken en daarom heb ik besloten deze opdracht aan te nemen.

Tijdens de periode dat ik bij Wetterkip Fryslân aan de slag ben geweest, heb ik erg veel kunnen leren en ben ik goed begeleid. De collega's gaven mij een kijkje in de werkzaamheden die zij deden voor de organisatie. De sfeer was erg fijn, daarom raad ik het zeker aan om bij dit bedrijf een stage te lopen. Het viel mij op dat iedereen tijd voor elkaar vrij maakt om elkaar verder te helpen.

Ik bedank mijn begeleiders bij Wetterskip Fryslân, Kevin van der Giessen en Anne Steegstra. Kevin en Anne hebben mij goed begeleid tijdens mijn stage en hebben mij ook andere aspecten van het werk bij Wetterskip Fryslân laten zien. Ze stonden altijd open voor vragen en hebben mij daarmee erg goed geholpen. Ook wil ik Vera van Bergeijk, de begeleider vanuit Universiteit Twente, bedanken voor de fijne begeleiding bij het uitvoeren van mijn afstudeeronderzoek. Vera gaf mij goed bruikbare feedback en was altijd bereid mij te helpen met de vragen en problemen waar ik tegen aan liep.

Iris van Klaarbergen

Leeuwarden, Juni 2019

Samenvatting

Piping is een faalmechanisme voor dijken, waarbij een kanaaltje (pipe) onder de dijk vormt. Om de faalkans voor piping te kunnen bepalen, worden op dit moment de rekenregels van Sellmeijer gebruikt. Deze rekenregels zijn ontworpen en gevalideerd voor rivierdijken, maar niet voor zeedijken. Toch worden deze rekenregels ook voor zeedijken gebruikt, ook al hebben zeedijken te maken met andere omstandigheden dan rivierdijken. Een belangrijk verschil is de tijdsduur waarmee het hoge water tegen de dijk aan staat. Bij een rivierdijk houdt een hoge waterstand vijf tot tien dagen aan, terwijl bij een zeedijk een hoge waterstand niet langer dan drie dagen aanhoudt en gedomineerd wordt door storm en het getij. Dat de rekenregels van Sellmeijer toch gebruikt worden voor zeedijken kan resulteren in een beoordeling van een dijk met een veel hogere faalkans voor piping dan de dijk in realiteit heeft. Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat er in de huidige berekeningen gebruik wordt gemaakt van een stationaire waterstand. De consequentie is dat de dijken mogelijk onnodig verbeterd moeten worden en dat kost geld. Daarom is Wetterskip Fryslân geïnteresseerd in het gebruik van het programma D-Geo Flow, een rekenprogramma dat de tijdsafhankelijke waterstand voor piping wel meeneemt. Met dit onderzoek wordt bepaald of het programma D-Geo Flow een goede toevoeging kan zijn voor de rekenmethode die op dit moment gebruikt wordt voor piping bij Wetterskip Fryslân. Daarom is het doel van dit onderzoek om te bepalen hoe de faalkans van het faalmechanisme piping beïnvloed wordt door het gebruik van het programma D-Geo Flow, vergeleken met de huidige rekenmethode die gebruikt wordt bij Wetterskip Fryslân.

Dijkprofiel 0020 van de dijk van Ameland zal gebruikt worden om een berekening uit te voeren in D-Geo Flow. Deze berekening in D-Geo Flow zal vergeleken worden met de berekening voor dijkprofiel 0020 van de huidige methode. De rekenmethode die Wetterskip Fryslân op dit moment gebruikt is vastgelegd in de 'Schematiseringshandleiding piping' (Rijkswaterstaat, 2017b). Er wordt onderscheid gemaakt tussen een eenvoudige toets, een gedetailleerde toets en een toets op maat. In dit onderzoek ligt de focus op de gedetailleerde toets, dit is de rekenmethode die vergeleken wordt met D-Geo Flow. De berekeningen van de huidige methode worden uitgevoerd in het programma Riskeer, waarin deze gedetailleerde toets is vastgelegd. Aan de hand van rekenregels wordt de kans op falen door piping gevonden. De faalkans die resulteert uit de berekening voor het maatgevende hoogwater van NAP + 4,26 m is 1/20.161 jaar. Uit de berekening met een verhoogde waterstand van NAP + 5 m resulteert een faalkans van 1/2.913 jaar.

Het programma D-Geo Flow neemt een aantal extra aspecten mee in de berekening ten opzichte van de rekenmethode van Riskeer: een tijdsafhankelijke hydraulische belasting, de samendrukbaarheid van het korrelskelet en het grondwater en de verandering van de freatische lijn (Noordam, 2017). Daarnaast bevat D-Geo Flow een complexe ondergrondse en meerlaagse configuratiedefinitie in de gebruikersomgeving en grafische en numerieke resultaten van de uitkomsten van de grondwaterstromingen en pipe ontwikkelingen over de tijd. In dit onderzoek ligt de focus op de functie 'toepassing tijdsafhankelijke hydraulische belastingen'.

In D-Geo Flow zijn berekeningen gemaakt met en zonder het gebruik van het grondwaterstromingsmodel, omdat dit een nog niet gevalideerd model is. Het programma D-Geo Flow gaf de volgende resultaten: De faalkans die uit de berekening voor profiel 0020 komt, is zonder het gebruik van het grondwaterstromingsmodel met een stationaire waterstand 1/3050 jaar en met een tijdsafhankelijke waterstand 1/2844 jaar. Met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel is het resultaat voor een stationaire waterstand 1/1145 jaar en voor een tijdsafhankelijke waterstand 1/2850 jaar.

De faalkans waaraan een dijkprofiel van Ameland moet voldoen is 1/96.045 jaar. Wanneer de resultaten van de methodes met elkaar vergeleken worden, wordt een verschil als significant gezien wanneer het in een andere categorie van het toetsoordeel terecht komt. Er zijn geen zekere significante verschillen te zien wanneer de uitkomsten van de twee methodes in dit onderzoek met elkaar vergeleken worden. Wel is er een relatief groot verschil te zien wanneer de uitkomsten van de berekeningen met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel met elkaar vergeleken worden.

Een belangrijk verschil in de methodes, wat zou kunnen verklaren dat er geen significant verschil te zien is tussen de resultaten, is de manier waarop de faalkans berekend wordt. Voor de huidige rekenmethode is de berekening tot de faalkans een gekalibreerde berekening die speciaal ontwikkeld is voor die methode. Echter, de berekening die gebruikt wordt om het kritieke verval uit D-Geo Flow om te rekenen naar een faalkans is niet gekalibreerd voor het rekenmodel van D-Geo Flow (van Beek & Lam, 2018). Doordat deze manier van omrekenen van een kritiek verval naar een faalkans niet gekalibreerd is voor D-Geo Flow, is het erg onzeker of de resulterende faalkans kloppend en passend bij de uitkomst is. Ook is de faaldefinitie van de methodes verschillend. Riskeer ziet het beginnen van terugschrijdende erosie als falen, terwijl D-Geo Flow het overschrijden van het kritieke verval als falen ziet. Het meenemen van dit verschil kan een veel groter verschil in faalkans veroorzaken. Helaas neemt de manier van omrekenen van de uitkomst van D-Geo Flow naar een faalkans dit verschil in faaldefinitie niet mee.

Dat er geen significant verschil te zien is zonder het gebruik van het grondwaterstromingsmodel wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het vermoeden dat de methodes op dat moment op een soortgelijke manier rekenen. Het verschil dat wel te zien is in de berekeningen met het grondwaterstromingsmodel kan verklaard worden doordat de vertraging van het water in de grondlagen en de (negatieve) consolidatie van de grondlagen meegenomen wordt in de berekeningen.

Concluderend kan er gezegd worden dat het gebruik van het programma D-Geo Flow op dit moment nog geen goede toevoeging is voor Wetterskip Fryslân. In de toekomst zal het gebruik van het programma echter wel van toegevoegde waarde kunnen zijn. Wanneer het grondwaterstromingsmodel gevalideerd is en de waardes van de samendrukbaarheid van de grondlagen beter bepaald kunnen worden, zal het programma een representatiever resultaat kunnen geven. Hierdoor kan de resulterende faalkans waarschijnlijk wel een significant verschil opleveren wanneer het vergeleken wordt met de faalkans die uit de huidige rekenmethode komt.

Een onderzoek naar het grondwaterstromingsmodel en de samendrukbaarheid van grondlagen wordt aangeraden voor vervolgonderzoek. Ook zal het goed zijn wanneer er meer dijkprofielen berekend zullen worden in D-Geo Flow om een betere vergelijking te kunnen maken met de huidige rekenmethode. Als laatste zou een vervolgonderzoek naar de manier van het omrekenen van de uitkomst van D-Geo Flow naar een faalkans een goede aanvulling zijn.

Wanneer Wetterskip Fryslân gaat werken met D-Geo Flow zijn er een aantal aspecten van belang om te weten. Het is goed om rekening te houden met de lange runtijden (circa 30 minuten), de manier van opslaan en openen van bestanden, de manier van het invoeren van de gegevens van een onderbroken grondlaag of een erg dunne grondlaag, het moment waarop het programma aangeeft dat een dijk faalt en de manier waarop de uitkomst van het programma omgerekend kan worden naar een faalkans. Ook is het goed om bewust te zijn van de parameters die gevoelig zijn in het programma en het feit dat het grondwaterstromingsmodel nog niet gevalideerd is, waardoor nog afgeraden wordt om het te gebruiken. Een toelichting hiervan wordt in dit rapport gegeven.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond.....	7
1.2	Probleemstelling.....	8
1.3	Doel	8
1.4	Onderzoeksvragen.....	9
1.5	Methodologie	9
1.6	Structuur van het verslag	11
2	Het faalmechanisme piping.....	12
2.1	Benodigde eigenschappen dijk voor optreden piping.....	12
2.2	Piping in deelmechanismen	13
2.3	Invloed tijdsafhankelijkheid waterstand	14
3	Eigenschappen dijk Ameland.....	16
3.1	Algemene eigenschappen	16
3.2	Eigenschappen Riskeer	18
3.3	Eigenschappen D-Geo Flow	19
4	Huidige rekenmethode bij Wetterskip Fryslân.....	22
4.1	Methode	22
4.2	Toepassing dijk Ameland	24
4.3	Resultaten.....	24
5	D-Geo Flow	25
5.1	Methode	25
5.2	Toepassing dijk Ameland	27
5.3	Resultaten.....	27
6	Discussie	31
6.1	Vergelijking van de faalkansen	31
6.2	Vergelijking methodes.....	32
6.3	Mogelijke beperkingen van het onderzoek.....	33
7	Conclusie	34
8	Aanbevelingen	36
8.1	Aandachtspunten D-Geo Flow	36
8.2	Vervolgonderzoek	37
	Referenties	38
	Lijst met symbolen	40
	Bijlage A. Categoriegrenzen toetsoordeel per vak per toetsspoor	I

Bijlage B. Dijkvakindeling Ameland	II
Bijlage C. Positie profiel 0020 in de dijk van Ameland	III
Bijlage D. Omschrijvingen SOS-eenheden	IV
Bijlage E. Maatgevend hoog water en polderpeil per vak	V
Bijlage F. Waterstandsverloop tegen dijkprofiel 0020	VI
Bijlage G. Schematisatie dijkprofiel 0020 in Riskeer	VII
Bijlage H. Resulterende faalkansen per dijkvak van Ameland	VIII
Bijlage I. Stappen bij het invoeren van een dijkprofiel in D-Geo Flow	IX
Bijlage J. Schematisatie dijkprofiel 0020 in D-Geo Flow	X
Bijlage K. Resultaten scenario 1	XI
Bijlage L. Resultaten scenario 2	XIII
Bijlage M. Resultaten scenario 3	XV
Bijlage N. Resultaten scenario 4	XVIII
Bijlage O. Resultaten scenario 5	XXI
Bijlage P. Resultaten scenario 6	XXII
Bijlage Q. Resultaten gevoeligheidsanalyse D-Geo Flow	XXIII

1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de achtergrond, de probleemstelling, het doel, de onderzoeksvragen en de methodologie van het onderzoek beschreven. Als laatste is de structuur van het verslag toegelicht.

1.1 Achtergrond

Nederland is altijd al druk bezig met de bescherming tegen het water. Een belangrijk onderdeel hiervan is het bouwen en onderhouden van dijken. Veel dijken zijn al eeuwenoud, waardoor er na aanleg constant sprake is van reparaties en verbeteringen. In het begin hadden dijken vooral een defensieve functie, ze werden gebouwd om de bewoners van het land tegen hoogwater te beschermen. Deze bouw is begonnen met lage dijken bestaande uit kleizoden in de tiende eeuw. Vanaf de tiende eeuw zijn er meer en meer dijken gebouwd en werd er geïnnoveerd op het gebied van waterveiligheid. Dit ging door tot de twintigste eeuw met de Deltawerken en vandaag de dag worden de dijken nog steeds verbeterd (van 't Veen, 2013).

De focus op veiligheid blijft ook in de huidige tijd het belangrijkste aspect, maar vanaf de twaalfde eeuw kreeg de bouw van dijken ook een offensieve functie. Men begon zich te richten op landaanwinning, en daarbij vooral op het aanwinnen van landbouwgrond. Dit begon met kleine stukken met eb drooggevallen grond, maar vanaf de 16^e eeuw werden hele meren drooggelegd (van 't Veen, 2013). De gewonnen grond moet natuurlijk ook beschermd worden tegen overstromingen, waardoor ook hier de dijken een beschermende functie hebben. Tegenwoordig worden er (bijna) geen nieuwe dijken meer aangelegd, maar worden vooral bestaande dijken verbeterd.

Voordat een dijk verbeterd wordt, moet er eerst uitgezocht worden of dit nodig is. De regels en normen hierover zijn vastgelegd in de Waterwet (Rijksoverheid, 2019b). Sinds januari 2017 moet volgens de Waterwet de beoordeling van de veiligheid van de primaire keringen door de keringsbeheerders gedaan worden op basis van de overstromingskansen van een kering. Deze beoordeling moet gedaan worden op basis van de normen die in de wet vastgesteld zijn. Wanneer de kering niet aan de norm van de overstromingskansen voldoet, moet deze versterkt worden en wordt deze opgenomen in het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Deze overstromingskansnormen zijn per dijktraject vastgelegd en zijn gebaseerd op de basisveiligheid die we in Nederland hebben. Bij deze basisveiligheid hoort ook een maximale kans op overlijden door een overstroming voor elke Nederlander van eens per honderdduizend jaar (Rijksoverheid, z.d.-a).

BEDREIGINGEN VOOR DE DIJK



Figuur 1 - Hoofd-faalmechanismen. (Wetterskip Fryslân, z.d.-a)

Dijken kunnen op verschillende manieren bezwijken. De kans op bezwijken van dijken moet voldoen aan de overstromingskansnormen. Aan het bezwijken van dijken kunnen verschillende faalmechanismen ten grondslag liggen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen vier hoofd-faalmechanismen: (1) overslag/overloop, (2) instabiliteit (afschuiving), (3) erosie van de bekleding en (4) piping (Deltares, z.d.). Deze vier hoofd-faalmechanismen zijn te zien in Figuur 1, waarbij een korte omschrijving wordt gegeven. Om de kans op het voorkomen van deze faalmechanismen te kunnen berekenen zijn er allerlei rekenregels opgezet. Voor elk faalmechanisme zijn deze regels anders. In dit verslag zal er verder ingegaan worden op het faalmechanisme piping.

1.2 Probleemstelling

Om de faalkans voor het faalmechanisme piping te kunnen bepalen, worden op dit moment de rekenregels van Sellmeijer gebruikt (Sellmeijer, López de la Cruz, van Beek, & Knoeff, 2011). Dit is de manier van rekenen die op dit moment het dichtst bij de werkelijkheid komt. Deze rekenregels zijn ontworpen en gevalideerd voor rivierdijken, maar niet voor zeedijken. Toch worden de rekenregels ook voor zeedijken gebruikt. Zeedijken hebben te maken met andere omstandigheden dan rivierdijken. Een belangrijk en opvallend verschil is de tijdsduur waarmee het hoge water tegen de dijk aan staat. Het is bekend dat waterstanden bij een zeedijk doorgaans veel minder lang standhouden dan bij een rivierdijk. Bij de rivierdijken houdt de hoge waterstand vijf tot tien dagen aan. De stormopzet bij een zeedijk houdt in de regel niet langer dan drie dagen aan en de hoge waterstanden niet langer dan twaalf uur en vijftwintig minuten (het getij). Het gevolg hiervan is dat bij zeedijken de waterspanningen in het watervoerende pakket geen stationaire toestand bereiken (Sluis, Sirks, Koelewijn, & Veenstra, 2016). Echter, het rekenmodel van Sellmeijer maakt gebruik van stationaire stromingssituaties, waarbij de hydraulische/hydrologische randvoorwaarden langdurig aanhouden zoals bij een rivierdijk.

Het gebruik van de rekenregels van Sellmeijer voor zeedijken kan een probleem zijn. Het kan resulteren in een beoordeling van een dijk met een veel hogere faalkans dan de dijk in realiteit heeft. De consequentie is dat meer dijken niet aan de normen voldoen en als niet veilig beoordeeld worden terwijl dat waarschijnlijk niet nodig is. Wanneer deze faalkansen niet aan de norm voldoen, moet de dijk verbeterd worden en dat kost (onnodig) veel geld. De overschatte faalkansen bij zeedijken is een uitdaging bij het beoordelen van dijken voor piping en daarom wordt er gezocht naar betere rekenmethodes voor piping. Voor zover het met de rekenregels van Sellmeijer mogelijk is, wordt de faalkans voor de dijken zo representatief mogelijk berekend door de waardes van de (grond)eigenschappen van de dijk aan te passen voor de situatie. Toch worden vooralsnog veel keringen afgekeurd op piping terwijl de verwachting voor getijdengebieden is dat piping veel minder snel zal optreden dan in rivierengebieden. Het meenemen van het tijdsafhankelijke waterstandsverloop in een rekenregel geeft daarom vermoedelijk een representatiever resultaat.

Op dit moment gebruikt Wetterskip Fryslân de rekenmethode op basis van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) (Rijksoverheid, 2019a). Deze rekenmethode is vastgelegd in een software programma: Riskeer. Dit is een methode die het rijk toelevert aan de waterschappen om dijkbeoordelingen uit te kunnen voeren. In het WBI (en Riskeer) worden de rekenregels van Sellmeijer gebruikt om de faalkansen voor piping te bepalen. Wetterskip Fryslân heeft het vermoeden dat de huidige rekenregels niet representatief zijn voor getijdengebieden doordat deze geen rekening houden met de stormopzet aan zee. De software D-Geo Flow is ontwikkeld om complexere situaties als zeedijken te kunnen beoordelen voor piping (Berg, 2019). Ook hierin wordt gebruik gemaakt van de rekenregels van Sellmeijer, maar in deze software wordt ook een grondwaterstromingsmodel meegenomen en de tijdsafhankelijke waterstand kan ingevoerd worden.

1.3 Doel

Wetterskip Fryslân wil weten of het een toegevoegde waarde kan hebben om D-Geo Flow te gaan gebruiken bij het beoordelen van de zeedijken. Wanneer het klopt dat de resultaten van het programma dicht bij de werkelijke faalkansen komen en wanneer daardoor de faalkansen lager worden, hoeft Wetterskip Fryslân minder dijken als onvoldoende te beschouwen voor piping. Daardoor zouden minder dijken verbeterd hoeven worden en dat bespaart geld. In dat geval zou het gebruik van het programma een toegevoegde waarde hebben voor Wetterskip Fryslân.

Met dit in gedachten, is het doel van dit onderzoek om erachter te komen of het programma D-Geo Flow een goede toevoeging kan zijn aan de rekenmethode die op dit moment wordt gebruikt voor piping bij Wetterskip Fryslân. Om hier achter te komen, moet er een onderzoek gedaan worden waarin gekeken wordt of het gebruik van het programma D-Geo Flow de faalkans van piping beïnvloedt. Daarom is het doel van dit onderzoek om te bepalen of er een significant andere faalkans resulteert uit een D-Geo Flow berekening in vergelijking met een berekening uit Riskeer.

Om dit doel te kunnen bereiken wordt gebruik gemaakt van een dijkprofiel van de dijk van Ameland. Voor deze dijk zijn recent berekeningen gemaakt door Wetterskip Fryslân, waarmee een berekening in D-Geo Flow vergeleken kan worden.

1.4 Onderzoeksvragen

Om het doel te bereiken, zal de hoofdvraag zijn:

“Hoe wordt de faalkans van het faalmechanisme piping beïnvloed door het gebruik van het programma D-Geo Flow, vergeleken met de huidige rekenmethode die gebruikt wordt bij Wetterskip Fryslân?”

Daarnaast zijn er deelvragen, die helpen om de hoofdvraag te beantwoorden. De deelvragen zijn:

Deelvraag 1: “Wat is het faalmechanisme piping?”

Deelvraag 2: “Wat zijn de eigenschappen van de dijk van Ameland?”

Deelvraag 3: “Hoe wordt piping momenteel berekend bij Wetterskip Fryslân (rekenregels en software) en wat zijn de faalkansen voor piping voor de dijk van Ameland bij deze methode?”

Deelvraag 4: “Hoe wordt piping berekend (rekenregels en software) in D-Geo Flow en wat zijn de faalkansen voor piping voor de dijk van Ameland bij deze methode?”

Deelvraag 5: “Welke verschillen kunnen er gezien worden tussen de resultaten van de huidige rekenmethode bij Wetterskip Fryslân en de resultaten van de rekenmethode in D-Geo Flow en hoe kunnen deze verschillen verklaard worden?”

1.5 Methodologie

Om de deelvragen en hoofdvraag te kunnen beantwoorden, moet een benadering gekozen worden. In deze paragraaf wordt de methodologie per vraag beschreven.

Deelvraag 1: “Wat is het faalmechanisme piping?”

Deze vraag wordt beantwoord door middel van een literatuuronderzoek. Er is veel literatuur over piping beschikbaar. Eerst wordt er literatuur gezocht, daarna wordt de literatuur bestudeerd en worden relevante delen uit deze bronnen samengevoegd om een antwoord op de vraag te kunnen geven. Het proces van piping wordt uitgelegd, waarna de benodigde eigenschappen van een dijk om piping te doen voorkomen genoemd worden en als laatste wordt de invloed van een tijdsafhankelijke waterstand gegeven.

Deelvraag 2: “Wat zijn de eigenschappen van de dijk van Ameland?”

In dit onderzoek wordt gekeken naar één profiel van de dijk van Ameland. Hier is voor gekozen vanwege de beperkte hoeveelheid tijd die er voor het uitvoeren van het onderzoek is. Het profiel wat gekozen is, is profiel 0020. Dit is een profiel dat net niet voldoet aan de veiligheidsnormen met de huidige rekenmethode van Wetterskip Fryslân. Doordat dit profiel net niet voldoet aan de veiligheidsnormen, kan daarmee een nuttige vergelijking gemaakt worden tussen de rekenmethodes. Er kan dan goed gezien worden of de faalkans kleiner wordt en of de dijk wel voldoet aan de normen

met de rekenmethode van D-Geo Flow. Het antwoord op deze deelvraag zal dan ook toegepast zijn op profiel 0020.

Deze vraag wordt net als deelvraag 1 beantwoord op basis van een literatuuronderzoek. Daarnaast wordt deze vraag beantwoord met behulp van data, zoals het waterstandsverloop van de Waddenzee en de eigenschappen van de grondsoorten. Veel informatie over de eigenschappen van de dijk van Ameland is al beschikbaar bij Wetterskip Fryslân, hier wordt gebruik van gemaakt.

Eerst wordt de data en literatuur gezocht, daarna wordt deze data en literatuur bestudeerd en de benodigde informatie wordt genoteerd, zodat de vraag beantwoord kan worden. Het antwoord zal alle eigenschappen moeten bevatten die nodig zijn voor deelvraag 3 en 4.

Deelvraag 3: “Hoe wordt piping momenteel berekend bij Wetterskip Fryslân (rekenregels en software) en wat zijn de faalkansen voor piping voor de dijk van Ameland bij deze methode?”

Om deze vraag te beantwoorden, worden de berekeningen van Wetterskip Fryslân voor piping die gedaan zijn voor Ameland bestudeerd. De focus ligt ook bij deze vraag op dijkprofiel 0020. De berekeningen worden aangeleverd door Wetterskip Fryslân. De stappen die genomen zijn en de software die gebruikt is, worden bestudeerd en een uitleg daarvan wordt geschreven om antwoord te geven op de vraag. Daarna worden de resultaten van de berekeningen bestudeerd om de faalkans voor dijkprofiel 0020 te kunnen geven. Er zal een faalkans bij een maatgevend hoogwater van NAP + 4.26 m gegeven worden en een faalkans bij een nog hogere waterstand van NAP + 5 m. Dit is nodig om de methodes in verschillende scenario's met elkaar te kunnen vergelijken.

Deelvraag 4: “Hoe wordt piping berekend (rekenregels en software) in D-Geo Flow en wat zijn de faalkansen voor piping voor de dijk van Ameland bij deze methode?”

Om deze vraag te beantwoorden, wordt eerst het gebruik van programma D-Geo Flow geleerd. Tijdens het leren van het programma, wordt de rekenmethode van de software beschreven, om het eerste deel van de vraag te beantwoorden.

Nadat het programma geleerd is, wordt dijkprofiel 0020 van Ameland geschematiseerd in het programma. Wanneer dit succesvol is gedaan, zal er een kritiek verval uit het programma resulteren. Dit resultaat geeft aan dat bij dit kritiek verval de dijk zal falen. Het resultaat wordt omgerekend naar een faalkans, zodat het vergeleken kan worden met de andere methode. Om een goede vergelijking te kunnen maken zullen er verschillende berekeningen gemaakt worden in D-Geo Flow. Hiervoor wordt onderscheid gemaakt tussen zes verschillende scenario's waarin een berekening wordt gemaakt met als invoer: (1) Stationaire waterstand van NAP + 4,26 m, (2) Tijdsafhankelijke waterstand met een piek van NAP + 4,26 m, (3) Stationaire waterstand van NAP + 5 m, (4) Tijdsafhankelijke waterstand met een piek van NAP + 5 m, (5) Met grondwaterstromingsmodel en een stationaire waterstand van NAP + 5 m en (6) Met grondwaterstromingsmodel en een tijdsafhankelijke waterstand van NAP + 5 m.

Deelvraag 5: “Welke verschillen kunnen er gezien worden tussen de resultaten van de huidige rekenmethode bij Wetterskip Fryslân en de resultaten van de rekenmethode in D-Geo Flow en hoe kunnen deze verschillen verklaard worden?”

Het antwoord op deze vraag begint met het naast elkaar zetten van de resultaten van de twee methodes. Deze resultaten zijn de faalkans voor dijkprofiel 0020 wanneer het berekend is in Riskeer (de huidige rekenmethode van Wetterskip Fryslân) en de faalkans voor dijkprofiel 0020 wanneer het berekend is met de rekenmethode in het programma D-Geo Flow. Daarna wordt het verschil in deze faalkansen beschreven. Ook wordt er bekeken of, als er een verschil in resultaat is, het een significant

verschil is. Hierbij is een verschil significant wanneer de faalkans in een andere categorie van het toetsoordeel terecht komt. Toetsoordelen per vak voor een toetsspoor (in dit geval piping) worden uitgedrukt in categorieën. De begrenzing van deze categorieën is gerelateerd aan de signaleringswaarde en de ondergrens van het dijktraject. De signaleringswaarde zorgt ervoor dat de beheerders van de waterkering in staat zijn te signaleren wanneer de waterkering in de nabije toekomst dreigt niet meer te voldoen aan de norm. Dit zorgt ervoor dat er voldoende tijd is om de waterkering te verbeteren. De maximaal toelaatbare overstromingskans is de norm waaraan de waterkering te allen tijde moet voldoen, dit is de ondergrenswaarde. Voor Ameland zijn de signalerings- en ondergrenswaarden gelijk aan elkaar. De categoriegrenzen voor de dijk van Ameland zijn te zien in Tabel 1. De regels waarop de grenzen van de categorieën gebaseerd zijn, zijn te zien in Bijlage A. Doordat de signaleringswaarde en ondergrenswaarde voor de dijk van Ameland gelijk zijn, is in categorie III de ondergrens en de bovengrens gelijk zijn. De kleuren van de categorieën geven aan hoe veilig de uitkomst van de faalkans is. De bovengrens van categorie III (1/96.045) geeft de eis op doorsnedeniveau aan. Wanneer de dijk in categorie II valt, wordt de dijk als veilig beoordeeld.

Tabel 1 - Categoriegrenzen per vak dijktraject Ameland (Rijkswaterstaat, 2017a)

Categorie	Ondergrens van de categorie [1/jaar]	Bovengrens van de categorie [1/jaar]
I _v	1/Oneindig	1/2.881.342
II _v	1/2.881.342	1/96.045
III _v	1/96.045	1/96.045
IV _v	1/96.045	1/1.000
V _v	1/1.000	1/33
VI _v	1/33	1/1

Nadat er bekeken is of er een significant verschil is, wordt er een verklaring van deze verschillen gezocht. Er wordt gekeken naar verschillen in de gebruikte rekenregels, verschillen in de gebruikte parameters en verschillen in de manier van het invoeren van de parameters (eigenschappen van de dijk). Als laatste wordt er een gevoeligheidsanalyse gedaan voor een aantal relevante parameters in D-Geo Flow.

Hoofdvraag: “Hoe wordt de faalkans van het faalmechanisme piping beïnvloed door het gebruik van het programma D-Geo Flow, vergeleken met de huidige rekenmethode die gebruikt wordt bij Wetterskip Fryslân?”

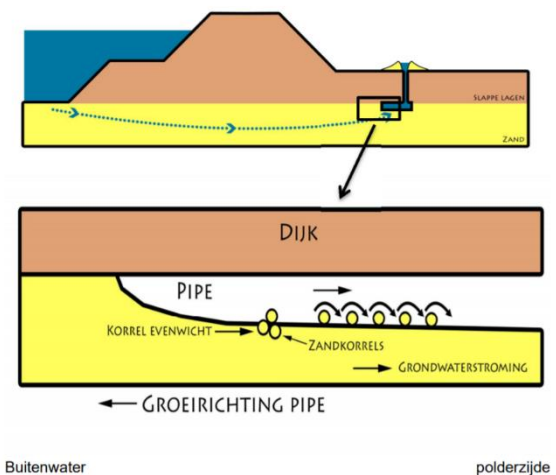
Met de antwoorden op de deelvragen kan gevonden worden hoe de faalkans van het faalmechanisme piping beïnvloed wordt door het gebruik van het programma D-Geo Flow, wanneer het vergeleken wordt met de huidige rekenmethode die gebruikt wordt bij Wetterskip Fryslân. In de hoofdvraag wordt deze bevinding over de invloed van D-Geo Flow gebruikt om een conclusie te trekken of het programma een goede toevoeging kan zijn aan de rekenmethodes die op dit moment gebruikt worden bij Wetterskip Fryslân.

1.6 Structuur van het verslag

De hoofdstukken in dit verslag zijn gebaseerd op het beantwoorden van de deelvragen. Hoofdstuk 1 beschrijft het onderzoek. Hoofdstuk 2 beschrijft het faalmechanisme piping en hoofdstuk 3 de eigenschappen van de dijk van Ameland. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de huidige rekenmethode bij Wetterskip Fryslân en hoofdstuk 5 gaat in op het programma D-Geo Flow. Op deze manier zijn de eerste vier deelvragen behandeld. In hoofdstuk 6 wordt de vijfde deelvraag behandeld door de resultaten van de twee methodes te vergelijken in een discussie. In hoofdstuk 7 wordt de conclusie gegeven door antwoord te geven op de deelvragen en de hoofdvraag. Het rapport wordt afgesloten met de aanbevelingen in hoofdstuk 8. Na de aanbevelingen worden de referenties, een lijst met symbolen en de bijlagen weergegeven.

2 Het faalmechanisme piping

Het faalmechanisme piping is niet lang geleden ontdekt, rond het begin van de negentiende eeuw. In Nederland wordt piping bestudeerd sinds het einde van 1970 (TAW, 1999a). Piping bestaat uit drie deelmechanismen: (1) opbarsten van de deklaag, (2) heave (zandtransport door het opbarstkanaal) en (3) piping (terugschrijdende erosie). Er is pas sprake van piping wanneer alle drie deelmechanismen optreden. Het faalmechanisme kan voorkomen als het verschil in de waterhoogtes aan beide kanten van de dijk groot genoeg is om een waterstroom door de zandlaag onder de dijk te vormen. Het eerste teken van het ontstaan van piping is het opbarsten van de deklaag. In sommige gevallen is er al een opening van de deklaag aanwezig in de vorm van een kwelsloot achter de dijk. Wanneer het opbarsten van de deklaag optreedt, hoeft piping nog niet voor te komen. Daarvoor zal eerst heave moeten ontstaan. Er zal genoeg verticale kracht moeten zijn om zand omhoog te laten komen. Wanneer dit gebeurt is er sprake van een zandmeevoerende wel. Dit betekent nog steeds niet dat zeker is dat piping ontstaat. De waterstroom die onder de dijk door loopt, zal na een tijdje zand mee kunnen voeren, zoals kan worden gezien in Figuur 2. Wanneer dat gebeurt, is er ook sprake van terugschrijdende erosie en begint er een pipe onder de dijk te vormen. Op dit moment is er sprake van piping. Wanneer dit proces niet gestopt wordt, kan er een connectie tussen het buitenwater en het achterland gevormd worden. Wanneer de stroom door de pipe groter wordt, kan er meer en meer zand meegevoerd worden. Dit kan leiden tot het bezwijken van de dijk (Rijksoverheid, z.d.-b). Daarom is het erg belangrijk om bewust te zijn van het faalmechanisme piping en om de faalkans ervan te weten te komen.



Figuur 2 - Faalmechanisme piping. (De Bruijn, 2013)

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op het faalmechanisme piping. Eerst zullen de benodigde eigenschappen van een dijk voor het optreden van piping benoemd worden. Daarna wordt piping in meer detail uitgelegd door dieper in te gaan op de deelmechanismen. Wat een dijk sterk maakt tegen piping wordt daarbij ook benoemd. Als laatste wordt de invloed van de tijdsafhankelijkheid van de waterstand tegen de dijk op piping besproken.

2.1 Benodigde eigenschappen dijk voor optreden piping

Niet bij elke dijk kan piping optreden. Een pipe kan alleen vormen wanneer een dijk aan een aantal eigenschappen voldoet. Ten eerste moet de dijk een erosiegevoelige en watervoerende laag hebben die afgedekt is door een relatief dun deel van samendrukbare lagen uit klei of veen, de deklaag. Daarnaast moet er een opening kunnen ontstaan in de deklaag zodat door die opening water en zand kunnen worden afgevoerd. Verder moet er contact zijn tussen de zandlaag en het buitenwater. Ook moet er een watersverschil tussen het buitenwater en de polder aanwezig zijn, om een grondwaterstroming mogelijk te maken. Als laatste moet de dijk kern het materiaal klei hebben wanneer er geen deklaag aanwezig is. Als de kern van zand is en er geen deklaag aanwezig is, is de dijk niet gevoelig voor piping ('t Hart, De Bruijn, & De Vries, 2016).

2.2 Piping in deelmechanismen

Zoals eerder genoemd valt piping op te delen in drie deelmechanismen: opbarsten van de deklaag, heave en terugschrijdende erosie. Deze drie deelmechanismen moeten allemaal optreden om te kunnen spreken van piping. De sterkte van de dijk voor piping hangt daarom af van de weerstand die de dijk kan bieden tegen de drie deelmechanismen.

2.2.1 Opbarsten van de deklaag en heave

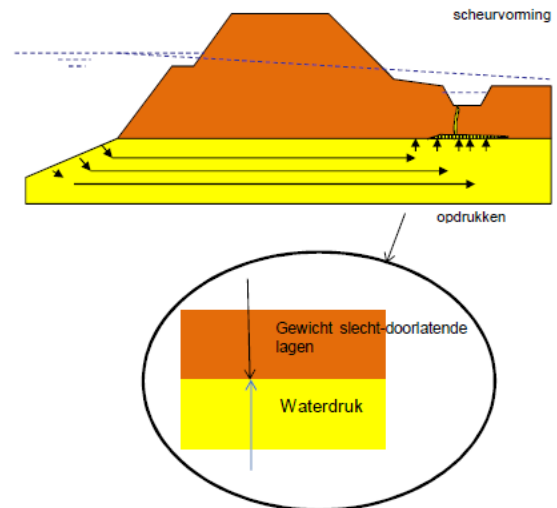
Wanneer de waterdruk onder de deklaag hoger is dan de druk die het gewicht van de deklaag geeft, kan de deklaag scheuren of opbarsten. Dit is te zien in Figuur 3. Hierdoor ontstaat er een uittredepunt in de afdekkende laag. Wanneer de deklaag openbarst, hoeft nog niet direct piping op te treden. Daarvoor moet het water eerst genoeg opwaartse kracht leveren om zandkorrels verticaal omhoog te kunnen stuwen over de dikte van de deklaag. Wanneer de scheur of barst erg klein is, zal al het water in de zandlaag naar dit punt stromen om de druk te verliezen, dit is namelijk het punt van de minste weerstand. Bij een kleine scheur is er al snel genoeg stroming om zand omhoog te voeren. Dit proces, waarin het zand verticaal omhoog stroomt, wordt heave genoemd. Wanneer het water (nog) geen zand meeneemt, is er sprake van een watervoerende wel, een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 4. Wanneer er heave optreedt en het water dus wel zand meevoert, is er sprake van een zandmeevoerende wel (De Bruijn, 2013). Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 5.

2.2.2 Terugschrijdende erosie

Wanneer de waterstand tegen de dijk hoger wordt, zal er steeds meer kans zijn op het ontstaan van zandmeevoerende wellen.

De kracht die het water op het zand uitvoert is dan groter dan de weerstand die het zand kan geven om niet in transport te komen. Hierbij kan op de plaats van opbarsten een zandkrater gezien worden. Dit is het begin van de vorming van een pipingkanaal, door het eerste transport van zandkorrels. Vanaf het moment dat het kanaal terug gaat groeien naar het buitenwater wordt er gesproken over piping. Nadat er een wel is ontstaan, hangt het van het korrelevenwicht af of er zandtransport blijft doorgaan.

Wanneer de krachten op de korrels niet in evenwicht zijn, zal de pipe blijven groeien. In Figuur 5 is te zien dat het evenwicht een samenspel is tussen de zwaartekracht op de korrel en de sleepkracht. De sleepkracht is de kracht die het stromende water op de korrel uitoefent. Als deze sleepkracht groter



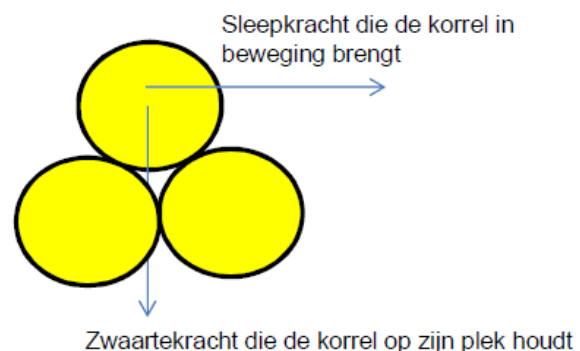
Figuur 3 - Opbarsten van de deklaag (De Bruijn, 2013)



Figuur 4 - Watervoerende wel (De Bruijn, 2013)



Figuur 5 - Zandmeevoerende wel (De Bruijn, 2013)



Figuur 5 - Het korrelevenwicht (De Bruijn, 2013)

is dan de zwaartekracht, wordt de korrel meegesleept. Daarom geldt, hoe groter de korrel, hoe groter de zwaartekracht op de korrel en des te minder snel wordt de korrel meegesleept. Maar wanneer de korrel groter is, zal de doorlatendheid door de korrels ook groter zijn. Hoe beter doorlatend het zand, hoe groter de sleepkracht, want het water stroomt daarin makkelijker en sneller door het zandpakket. Het is een samenspel van deze eigenschappen dat ervoor zorgt dat een pipe wel of niet ontstaat. De pipes die ontstaan zijn erg klein. Er ontstaat niet direct één grotere pipe onder de dijk, er ontstaan kleine vertakkingen. Deze kleine pipes, kunnen op een gegeven moment samenvoegen tot een grote pipe onder de dijk. Wanneer de pipe groter wordt, zal de waterstroom door de pipe ook groter worden. Hierdoor stroomt steeds meer zand mee, waardoor uiteindelijk de dijk kan doorbreken (De Bruijn, 2013).

2.2.3 Sterkte

De sterkte van een dijk tegen piping hangt af van de weerstand die de grond onder de dijk kan bieden tegen de drie deelmechanismen. De weerstand tegen opbarsten hangt af van de dikte en sterkte van de deklaag en de waterdruk onder deze deklaag. Wanneer het gewicht van de deklaag hoger is, zal opbarsten minder snel voorkomen. De deklaag kan meer druk hebben op de dijk als het gewicht groter is en kan daarmee meer waterdruk aan voordat de deklaag zal opbarsten. Voor de sterkte van heave is de drukgradiënt van belang, die aangeeft hoeveel waterdruk er onder de dijk aanwezig is. De gradiënt wordt bepaald door het drukverschil (tussen het buitenwater en het polderpeil), dat gedeeld wordt door de dikte van de deklaag om tot het gradiënt te komen. Wanneer het waterstandsverschil tussen het buitenwater en het polderpeil erg hoog is zal er een hoog drukgradiënt zijn. Een hoog drukgradiënt maakt de dijk minder sterk tegen piping. Dit maakt de dikte van de deklaag een maat om de sterkte van de dijk voor heave te weten. Voor terugschrijdende erosie is de weerstand te meten aan de doorlatendheid van het totale watervoerende pakket en de korreldiameter van de piping-gevoelige zandlaag. Grovere zandkorrels zijn minder gevoelig voor piping dan kleinere zandkorrels, doordat deze korrels meer gewicht en daardoor zwaartekracht hebben. Wanneer de doorlatendheid van het watervoerende pakket groter is, kan het water makkelijker door en naar een pipe stromen. Hierdoor komt er meer kracht op de zandkorrels en kan de pipe sneller groeien ('t Hart, De Bruijn, & De Vries, 2016). Ook de kwelweglengte heeft veel invloed op het ontstaan van terugschrijdende erosie. De kwelweglengte is de lengte van de weg die het kwelwater onder de dijk moet afleggen. Wanneer deze lang is, zal er minder snel een pipe ontstaan en is de dijk dus sterker.

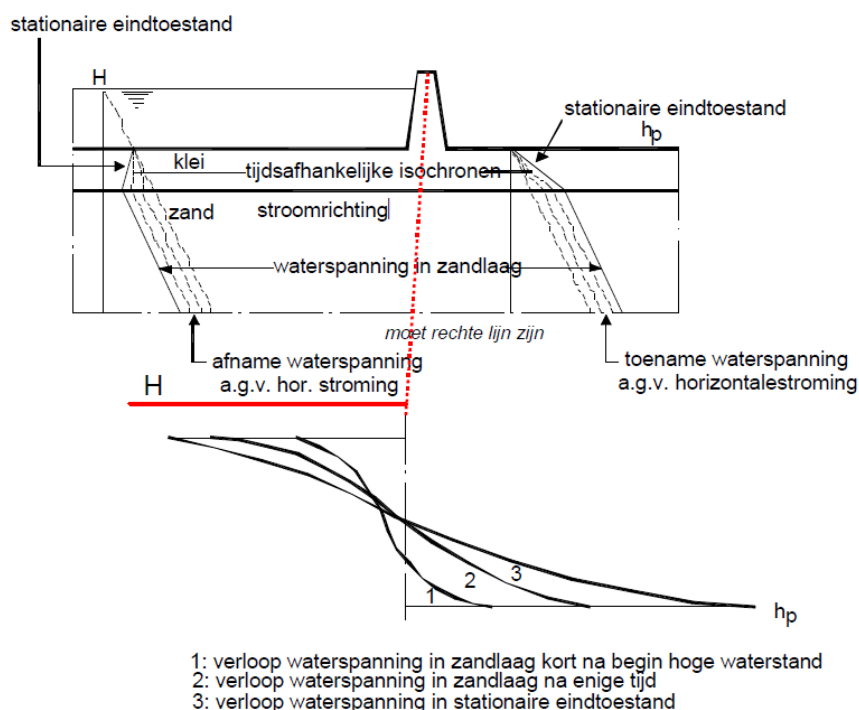
2.3 Invloed tijdsafhankelijkheid waterstand

Zoals genoemd in de probleemstelling, houden hoge waterstanden bij een rivierdijk doorgaans vijf tot tien dagen aan en bij een zeedijk niet langer dan 12 uur (het getij). De tijdsafhankelijkheid van de buitenwaterstand heeft invloed op piping. In deze paragraaf zal ingegaan worden op de effecten van een tijdsafhankelijke buitenwaterstand op piping.

Er zijn een aantal aspecten die invloed hebben op de kans op piping wanneer er gekeken wordt naar de invloed van de tijdsafhankelijkheid van de waterstand. Ten eerste heeft de tijdsafhankelijke waterstand invloed op de snelheid waarmee de dijk verzadigd is met water. Wanneer de hogere waterstand maar erg kort tegen de dijk aanstaat, kan het zo zijn dat er niet genoeg tijd is voor het water om een waterstroom onder de dijk te laten ontstaan. Op de snelheid waarmee een waterstroming onder de dijk kan ontstaan hebben ook aspecten als de doorlatendheid en de korrelgrootte een invloed. Deze aspecten hebben invloed op in hoeverre het water erg makkelijk door de grondlaag kan stromen, waardoor de dijk sneller verzadigd kan raken met het water.

Daarnaast heeft de tijdsafhankelijke waterstand invloed op de consolidatie en de negatieve consolidatie van de grondlagen. De afdekkende grondlaag in het voorland kan consolideren doordat de waterstand hoger wordt. Dit houdt in dat de laag compacter wordt. In de afdekkende laag in het achterland kan negatieve consolidatie plaatsvinden door de fluctuerende waterstanden. Dit houdt in dat de grondlaag uitzet en daarmee minder compact wordt (TAW, 1999b).

Ook heeft de tijdsafhankelijkheid van het water invloed op de manier waarop de grondwaterspanningen onder de waterkering ontwikkelen. Figuur 6 is een schematische weergave van waterspanningen in een dijk langs een verticaal in het voorland en langs een verticaal in het achterland (Deltares, 2012). Wanneer het water stijgt ontstaat er direct een toename in waterspanning in de zandlaag. Daarnaast ontstaat er ook direct een stroming in de zandlaag van de waterzijde naar het achterland. Hierdoor zal de stijging in de waterspanning in de zandlaag lager zijn dan de stijging van de buitenwaterstand. Dit resulteert in een toename van de effectieve spanning in de afdeklaag, wat leidt tot consolidatie van de afdeklaag, waardoor water stroomt uit de afdeklaag naar de zandlaag. Dit kan opgevat worden als een grotere doorlatendheid van de kleilaag. De spreidingslengte is hierdoor kleiner dan in de stationaire toestand, er is sprake van een tijdsafhankelijke spreidingslengte. Deze spreidingslengte is een maat voor de afstand waarover de stijghoogte in een watervoerend pakket verloopt over de waterkering en is daarmee een maat voor de doorlatendheid van de grondlagen. In het achterland is een wateronderspanning aanwezig in de afdeklaag ten opzichte van de stationaire toestand. Hierdoor is de waterspanningsgradiënt groter dan in de stationaire situatie. Ook hier is de spreidingslengte kleiner dan in de stationaire situatie. In het onderste deel van Figuur 6 is weergegeven dat bij deze kortere spreidingslengtes een steiler verloop in de horizontale richting van de waterspanningen in de deklaag hoort. Het effect hiervan is een lagere stijghoogte in de zandlaag op de plaats van een potentiële opbarst locatie (Deltares, 2012). De langere spreidingslengtes worden pas bereikt na een lange tijd, wanneer het water een stationaire situatie bereikt. Om die reden is de kans op opbarsten kleiner wanneer de tijdsafhankelijkheid mee wordt genomen in de berekeningen en daardoor de langere spreidingslengtes niet bereikt worden.



Figuur 6 -Tijdsafhankelijkheid in ontwikkeling van waterspanning in de zandlaag (Deltares, 2012)

3 Eigenschappen dijk Ameland

In dit hoofdstuk zijn de eigenschappen van de dijk van Ameland beschreven. Op basis van deze eigenschappen is de dijk beoordeeld en is in D-Geo Flow de berekening geschematiseerd. Er is onderscheid gemaakt tussen de eigenschappen die nodig zijn voor Riskeer en die nodig zijn voor D-Geo Flow. Er is begonnen met de eigenschappen die voor beide programma's nodig zijn.

3.1 Algemene eigenschappen

De waddenzeedijk van Ameland is de primaire waterkering van dijktraject 2-2. Het dijktraject heeft een lengte van 16,54 km. Deze dijk is recentelijk verbeterd, wat in 2018 is afgerond (Wetterskip Fryslân, z.d.-b). Aan de zeezijde van de dijk is de bekleding vernieuwd met grove breuksteen. Ook is de inspectieweg verhoogd. Daarnaast is de dijk steviger gemaakt met het aanbrengen van een open steenasfalt laag. Dit zijn verbeteringen in de bekleding van de dijk en zijn niet specifiek verbeteringen voor piping. Ook al zijn er recent verbeteringen voor de dijk uitgevoerd, moet de dijk toch opnieuw beoordeeld worden. Waterschappen zijn verplicht dijken elke twaalf jaar te beoordelen op de verschillende faalkansen en zo ook voor piping (Wetterskip Fryslân, 2019b).

3.1.1 Normering

Zoals genoemd in hoofdstuk 1.1, worden de dijken op dit moment beoordeeld door te onderzoeken of ze aan de faalkanseis voldoen. De normering voor dijktraject 2-2 is vastgesteld in de waterwet (Rijksoverheid, 2019b). Het gaat om twee waarden op basis waarvan de veiligheid van primaire waterkeringen beoordeeld kunnen worden, te zien in Tabel 2. Door te beoordelen op de signaleringswaarde zijn de beheerders van de waterkering in staat om te signaleren wanneer de waterkering in de nabije toekomst niet meer dreigt te voldoen aan de norm. Dit zorgt ervoor dat er voldoende tijd is om de waterkering te verbeteren. De maximaal toelaatbare overstromingskans is de norm waaraan de waterkering te allen tijde moet voldoen, dit is de ondergrenswaarde. Voor Ameland zijn deze waarden gelijk aan elkaar.

Tabel 2 - Normering dijktraject 2-2 (Wetterskip Fryslân, 2019b)

Dijktraject	Signaleringswaarde [per jaar]	Maximaal toelaatbare kans [per jaar]	Lengte dijktraject [km]
2-2	1/1.000	1/1.000	16,539

Het faalmechanisme piping wordt beoordeeld op basis van de signaleringswaarde. Hiervoor wordt de faalkans op trajectniveau en doorsnedeniveau berekend. De faalkanseis op trajectniveau en doorsnedeniveau voor Ameland is weergegeven in Tabel 3 (Wetterskip Fryslân, 2019b).

Tabel 3 - Faalkanseis op traject- en doorsnedeniveau (Wetterskip Fryslân, 2019b)

Dijktraject	Faalkanseis trajectniveau	Faalkanseis doorsnedeniveau
2-2	1/4.167	1/96.045

3.1.2 Vakindeling

Om een representatieve schematisatie van de dijk voor het desbetreffende faalmechanisme te kunnen maken, wordt een dijkvakindeling gemaakt. Het dijkvak moet voldoende homogene eigenschappen hebben zodat er een representatieve schematisatie gemaakt kan worden voor het gehele vak. Daarnaast wordt voor een representatieve schematisering gebruik gemaakt van kennis van de geologie, geometrie en geohydrologie van de omgeving van de dijk (Rijkswaterstaat, 2017b).

Bij het bepalen van de vakgrenzen wordt van grof naar fijn gewerkt. Er zijn een aantal redenen die altijd tot de keuze van het plaatsen van een grens leiden: (1) de waterkering verandert van

beheerder, (2) een verandering in type kering, (3) een verandering in de normklasse en (4) een verandering van peilgebied (Rijkswaterstaat, 2017b).

Een andere reden voor de keuze van de plaats van een vakgrens is een verschil in belasting of sterkte van de waterkering. Er zijn een aantal eigenschappen die kunnen verschillen tussen locaties, waardoor de belasting of de sterkte van de waterkering verschillend is op de locaties. De eigenschappen die kunnen verschillen zijn (Rijkswaterstaat, 2017b):

- Waterstanden;
- Grondopbouw;
- Aanwezigheid, hoogteligging en aard van het voorland;
- Aanwezigheid sloten en watergangen;
- Maaiveldhoogte binnendijs;
- Geometrie van de dijk;
- Waargenomen wellen;
- Aanwezigheid van kwelschermen, drainage of niet-waterkerende objecten;
- Lokaal onderzoek met peilbuismetingen.

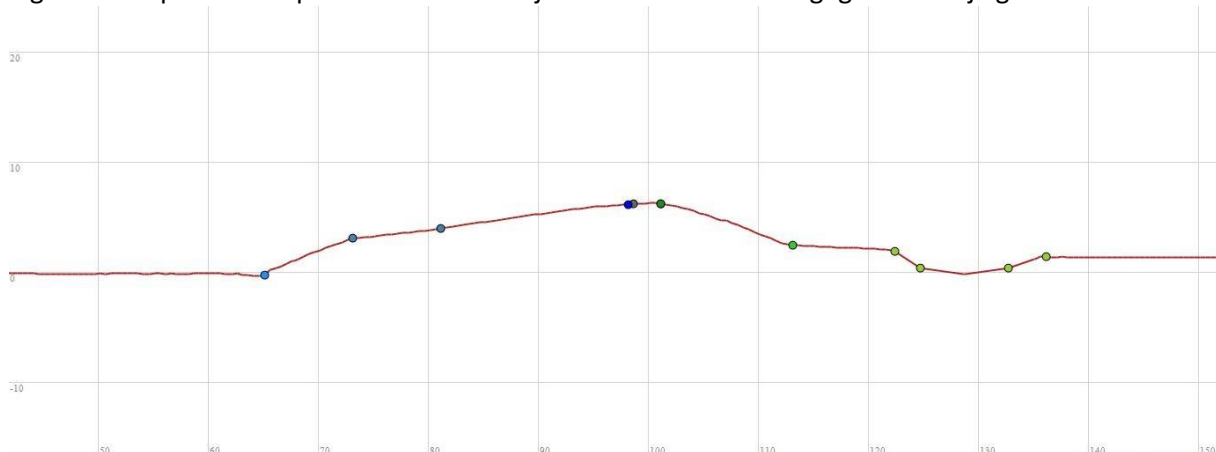
Door de dijkvakgrenzen te optimaliseren op basis van deze gegevens, kunnen de dijkvakken verschillen van lengte. Per dijkvak wordt één dijkprofiel als maatgevend (en representatief) dijkprofiel aangemerkt en geanalyseerd. Er kunnen meerdere profielen per dijkvak geanalyseerd worden. Het maatgevende dijkprofiel wordt gekozen op basis van het profiel waar de kans op piping het grootste is (Rijkswaterstaat, 2017b).

Voor de dijk van Ameland heeft Wetterskip Fryslân in eerste instantie de vakindeling gebaseerd op de ligging van de stochastische ondergrond schematisatie (SOS) segmenten. Deze SOS-segmenten worden beschouwd als dijkvakken. Daarnaast is er rekening gehouden met de vakken met een zanddijk op zandondergrond, waarvoor de kans op piping kan worden uitgesloten. In Bijlage B is de dijkvakindeling weergegeven die voor Ameland gebruikt wordt (Wetterskip Fryslân, 2019b).

3.1.3 Doorsnede

In dit hoofdstuk zullen vanaf nu de eigenschappen van profiel 0020 gegeven worden, dit is het profiel dat gebruikt wordt om de vergelijking tussen de toetsmethoden te kunnen maken, zoals aangegeven is in de methode. De normering en vakindeling gelden in het algemeen voor de gehele dijk. Dijkprofiel 0020 is het maatgevende profiel van vak 6d.

Wetterskip Fryslân beschikt over dwarsprofielen die om de 100 meter loodrecht op de waterkering zijn gegenereerd (Wetterskip Fryslân, 2019b). De doorsnede van profiel 0020 is weergegeven in Figuur 7. De positie van profiel 0020 in de dijk van Ameland is weergegeven in Bijlage C.



Figuur 7 - Doorsnede profiel 0020 met de afstand in meters t.o.v de buitenzijde op de x-as en de hoogte in meters t.o.v NAP op de y-as

3.1.4 Grondsoorten/boringen

De laagopbouw van dijkprofiel 0020 is weergegeven in Tabel 4. Hierin is de naamgeving van de laag, de dikte en bovenkant van de lagen en de watervoerendheid van de lagen gegeven. In Bijlage D zijn de omschrijvingen van de grondsoorten weergegeven.

Tabel 4 - Laagopbouw profiel 0020 (Wetterskip Fryslân, 2019a)

Laag	Naamgeving laag	Grondsoort	Bovenkant[m+NAP]	Dikte [m]	Opmerking
1	Aklei	Opgebracht klei	2.49	0.69	Afsluitend
2	Azand	Zand	1.8	0.6	Freatisch vlak
3	H_Mkw_z&k	Klei zandig en ziltig	1.2	0.8	Afsluitend
4	H_Mg_zf	Zand	0.4	27.9	Watervoerend
5	P_Om_zf	Zand	-27.5	12.5	Watervoerend

3.2 Eigenschappen Riskeer

De eigenschappen die in deze paragraaf genoemd worden zijn nodig voor de berekeningen in de huidige rekenmethode met het programma Riskeer. De eigenschappen die in Riskeer ingevoerd moeten worden zijn:

- Vakindeling;
- Profielschematisaties;
- Stochastische ondergrondmodellen;
- Hydraulische belastingen;
- Dempingsfactor;
- Intredepunt en uittredepunt;
- Grondlaageigenschappen;
 - Aquifer: doorlatendheid en korrelgrootte d_{70} ;
 - Verzadigd gewicht.

De vakindeling, profielschematisatie en ondergrondopbouw zijn genoemd in paragraaf 3.1, omdat deze nodig zijn voor beide rekenmethodes. De rest van de eigenschappen worden in deze paragraaf gegeven.

3.2.1 Hydraulische belastingen

De waterstanden en polderpijlen die in de huidige beoordelingsmethode van Wetterskip Fryslân worden gebruikt zijn weergegeven in Bijlage E. Voor dijkprofiel 0020 zijn de waterstanden van vak 6d gebruikt. Dit is een maatgevend hoogwaterstand van NAP + 4.26 meter en een polderpeil van NAP + 0.60 meter. In de methode wordt gebruik gemaakt van stationaire waterstanden.

3.2.2 Dempingsfactor

De dempingsfactor legt de relatie tussen de hoogte van de stijghoogtepotentiaal bij het potentiële opbarst-/uittredepunt en de buitenwaterstand bij maatgevend hoogwater. Bij een dempingsfactor van 1 is de potentiaal gelijk aan de buitenwaterstand. Bij een dempingsfactor van 0 is de potentiaal gelijk aan het referentieniveau (Rijkswaterstaat, 2017b).

De dempingsfactor is conservatief aangenomen als 1. Dit is zo gedaan omdat het geen zin heeft om deze waarde aan te scherpen, omdat dit te maken heeft met de deelmechanismen opbarsten en heave. Deze deelmechanismen zijn niet bepalend voor de faalkans van dit dijkprofiel, omdat er bij het uittredepunt van de dijk geen deklaag aanwezig is. Het mechanisme terugschrijdende erosie is in dit geval bepalend voor de faalkans (Wetterskip Fryslân, 2019b).

3.2.3 Intredepunt en uittredepunt

Het intredepunt is het dichtst bij de dijk gelegen punt waar de watervoerende zandlaag in direct contact staat met het buitenwater of bij aanwezigheid van een voorland met een beperkte intredeweerstand een punt op enige afstand van de dijk, waarbij de afstand tot de dijk bij fictieve kwelweglengte mag worden gerekend. Het uittredepunt is de locatie waar de kwelstroom aan het

maaiveld komt. Dit punt ligt vaak op natuurlijke wijze vast, wanneer bijvoorbeeld een sloot in de betreffende zandlaag ligt of wanneer de zandlaag tot aan het maaiveld reikt. Wanneer er een afdekkende laag aanwezig is, moet het uittredepunt gekozen worden op de plaats van de opbarstlocatie (Rijkswaterstaat, 2017b).

Het intredepunt is in de huidige rekenmethode voor dijkprofiel 0020 aangenomen op 20 meter buitenwaarts van de buitenteen. Dit is gebaseerd op een de onderzoeken 'Toetsing Waddenzeedijk Ameland Gedetailleerde toets Piping en Microstabiliteit' van GeoDelft (2003) en 'Toepassing vigerende en nieuwe pipingregel op Ameland' van Deltares (2011).

Het uittredepunt is aangenomen bij de teensloot. Indien er geen teensloot aanwezig is, dan is het uittredepunt bij de binnenteen aangenomen (Wetterskip Fryslân, 2019b).

3.2.4 Grondlaageigenschappen

Of een grondlaag doorlatend is, en dus een watervoerende laag (aquifer) is, kan gezien worden door middel van de doorlatendheid (k) en de korrelgrootte (d70), te zien in Tabel 5 (Wetterskip Fryslân, 2019b). Ook is het verzadigd gewicht (γ_{sat}) per grondsoort in deze tabel te zien. De korrelgrootte wordt voor elke laag met dezelfde waarde ingevuld als voor de laag waar de pipe gaat vormen, omdat de rekenmethode alleen met de korrelgrootte voor die laag rekent.

Tabel 5 - Grondsoort, doorlatendheid, korrelgrootte (d70) en verzadigd gewicht (γ_{sat}) voor de SOS-eenheden

SOS-eenheid	Grondsoort	Doorlatendheid (k) [m/dag]	Korrelgrootte (d70) [μ m]	Verzadigd gewicht (γ_{sat}) [kN/m ³]
Aklei	Opgebracht klei	n.v.t.	165	15
Azand	Opgebracht zand	n.v.t.	165	18
H_Mkw_z&k	Klei zandig en ziltig	0.01	165	16
H_Mg_zf	Zand	9.7	165	18
P_Om_zf	Zand	38.9	165	18

3.3 Eigenschappen D-Geo Flow

In deze paragraaf worden de eigenschappen van dijkprofiel 0020 gegeven die nodig zijn voor de berekeningen in het programma D-Geo Flow. De volgende eigenschappen zijn voor het gebruik van D-Geo Flow nodig:

- Profielschematisaties;
- Laagopbouw van het profiel;
- Starttijd, eindtijd en aantal tijdstappen;
- Zwaartekrachtconstante en MPicard;
- Grondlaageigenschappen;
 - Porositeit
 - Samendrukbaarheid
 - Korrel dichtheid
 - Korrelgrootte (d70)
 - White's constante (η)
 - Rolweerstand hoek (θ)
 - Doorlatendheid (Kx en Ky)
- Water parameters;
 - Samendrukbaarheid (β)
 - Dichtheid (ρ)
 - Viscositeit (μ)
- Randvoorwaarden;
 - Waterhoogtes zee
 - Polderpeil
- Locatie van de pipe;
- Rooster (Grid): Grofheid van het gaas (Mesh) en pipe.

De profielschematisatie en grondlaagopbouw van profiel 0020 zijn gegeven in paragraaf 3.1, omdat deze voor beide methodes nodig zijn.

3.3.1 Starttijd, eindtijd en aantal tijdstappen

De starttijd en eindtijd zijn gekozen op basis van de tijdsduur van een stormopzet aan de Waddenzee voor de locatie van dijkprofiel 0020. Deze storm duurt 80 uur, wat drie dagen en acht uur is. Daarom is ervoor gekozen om de starttijd en eindtijd te zetten op 01-01-2019 00:00:00 en 04-01-2019 08:00:00 respectievelijk.

Het aantal tijdstappen dat het programma D-Geo Flow gebruikt voor de berekening beïnvloedt de nauwkeurigheid van de resultaten. Kleinere tijdstappen zullen zorgen voor een nauwkeuriger resultaat, want de stappen waarmee de waterhoogte verhoogd wordt, worden kleiner en daarmee kan er een nauwkeuriger kritiek verval gevonden worden. Maar kleinere tijdstappen zullen ook zorgen voor een langere tijdsduur om berekeningen te maken in het programma. Er moet dus gekozen worden voor een middenweg. Daarom is er gekozen voor tijdstappen van 20 minuten, waardoor het aantal tijdstappen op 240 wordt gezet.

3.3.2 Zwaartekrachtconstante en MPicard

Voor de zwaartekrachtconstante wordt gebruik gemaakt van de standaardwaarde: 9.81 m/s^2 . De MPicard is een invoerwaarde die invloed heeft op de stapgrootte waarin de pipe hoogte aangepast wordt om het equilibrium (evenwicht) te bereiken. Deze stapgrootte wordt bepaald door de volgende formule: $\text{Stapgrootte} = 100 * \frac{d70}{MPicard}$.

Een grotere stapgrootte (en hoogte van het pipe element), dus een kleinere MPicard, resulteert in een lagere nauwkeurigheid maar snellere berekentijden. In dit onderzoek is ervoor gekozen om de MPicard op de waarde te zetten die ook in de gebruikershandleiding van D-Geo Flow wordt gebruikt. Dit is een waarde van 1000.

3.3.3 Grondlaageigenschappen

In Tabel 6 zijn de grondlaageigenschappen weergegeven voor de grondlagen van profiel 0020. Voor de doorlatendheid en korrelgrootte zijn dezelfde waarden genomen als die gebruikt worden in Riskeer. De waardes voor de samendrukbaarheid zijn overgenomen uit het rapport 'Water from low-permeability sediments and land subsidence' (Domenico & Mifflin, 1965). De andere waarden zijn gebaseerd op de voorbeelden in de gebruikershandleiding van D-Geo Flow (Deltares, 2018).

Tabel 6 – Grondlaageigenschappen voor de SOS-eenheden

Grondlaag	Aklei	Azand	H_Mkw_z&k	H_Mg_zf	P_Om_zf
Porositeit [-]	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
Samendrukbaarheid [m^2/N]	2E-6	1E-7	2E-6	1E-7	1E-7
Korrel dichtheid [kg/m^3]	2650	2650	2650	2650	2650
Korrelgrootte d70 [m]	0.0001	0.0001	0.0001	0.000165	0.000165
White's constante η [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Rolweerstand hoek θ [°]	37	37	37	37	37
Doorlatendheid Kx [m/dag]	0.01	0.01	0.01	9.7	38.9
Doorlatendheid Ky [m/dag]	0.01	0.01	0.01	9.7	38.9

3.3.4 Parameters water

De standaard ingevoerde waarden in D-Geo Flow voor de samendrukbaarheid (β : $5\text{E-}10 \text{ m}^2/\text{N}$), de dichtheid (ρ : $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$) en de viscositeit (μ : $0.001 \text{ Ns}/\text{m}^2$) worden gebruikt.

3.3.5 Randvoorwaarden: waterhoogtes

De afbeelding in Bijlage F geeft de waterhoogtes in de tijd bij dijkprofiel locatie 0020 van Ameland. De waterhoogtes horen bij een storm met een herhalingstijd van 1000 jaar. Het polderpeil dat gebruikt wordt voor de berekeningen in D-Geo Flow zal hetzelfde polderpeil zijn als gebruikt in de huidige rekenmethode. Dit is een polderpeil van NAP + 0.60 meter. Om dit waterstandsverloop te kunnen invoeren in D-Geo Flow zijn de pieken uit deze grafiek gebruikt en gekoppeld aan dagen en tijdstippen tussen de starttijd en de eindtijd die in het programma zijn ingevoerd. De invoerwaarden voor D-Geo Flow zijn weergegeven in Tabel 7. Voor de stationaire berekeningen in D-Geo Flow is dezelfde waterstand als in Riskeer gebruikt: NAP + 4.26 m.

3.3.6 Locatie van de pipe

Voor de locatie van de pipe moet de locatie van het intredepunt, de locatie van het uitredepunt en de diepte in de grond van de pipe ingevoerd worden. De waarden van het intrede- en uitredepunt zijn op dezelfde manier gekozen als gedaan is in paragraaf 3.2.3, met als resultaat Start-X = 66.1 m en Exit-X = 124.7 m. De diepte van de pipe in de grond, Y-position = 0.4 m, is gekozen op de plaats van de bovenzijde van de zandlaag, net onder de deklaag, dit is de plek waar de pipe zich het meest waarschijnlijk zal vormen.

3.3.7 Grid

De Grid functie implementeert een soort rooster in de dijk. Dit is nodig voor het grondwaterstromingsmodel. De invoer om een rooster te laten maken is de grofheid van het 'mesh' (gaas) en de pipe. In dit onderzoek is gekozen om de waarden te gebruiken die in de gebruikershandleiding van D-Geo Flow gebruikt worden: grofheid van het gaas = 2.5 m en grofheid van de pipe = 6. Dit houdt in dat de gaas elementen een gemiddelde grootte krijgen van 2.5 meter en de elementen rondom de pipe een verfijning krijgen met een factor van 6.

Tabel 7 - Invoerwaarden waterhoogtes

Datum en tijdstip	Waterhoogte [NAP + m]
1-1-2019 0:00	0.21
1-1-2019 3:00	0.95
1-1-2019 10:00	-0.95
1-1-2019 16:00	1.624
1-1-2019 22:00	0.969
2-1-2019 4:30	3.954
2-1-2019 11:00	3.138
2-1-2019 15:00	4.259
3-1-2019 0:00	0.835
3-1-2019 3:00	1.927
3-1-2019 12:00	-0.95
3-1-2019 16:00	0.95
4-1-2019 0:00	-0.95
4-1-2019 5:00	0.95
4-1-2019 8:00	0.21

4 Huidige rekenmethode bij Wetterskip Fryslân

In dit hoofdstuk is de rekenmethode die Wetterskip Fryslân op dit moment hanteert uitgelegd. Daarna is de toepassing op de dijk van Ameland uitgelegd, en tot slot zijn de resultaten daarvan gegeven in de vorm van een faalkans.

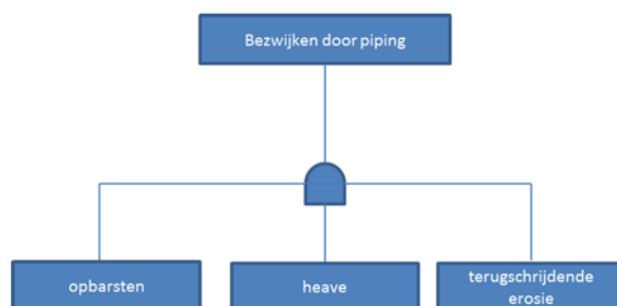
In Nederland zijn de rekenregels voor piping vastgelegd in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) (Rijksoverheid, 2019a). Wanneer men het WBI volgt om een dijk te beoordelen, zal er als eerste een *eenvoudige toets* gedaan worden. In deze toets wordt gecontroleerd op randvoorwaarden, waarna er besloten wordt of het faalmechanisme relevant is voor de specifieke dijk. Wanneer uit de controle komt dat de kans niet verwaarloosbaar klein is, zal er een *gedetailleerde toets* uitgevoerd moeten worden. Hierin zullen de mechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie onderzocht worden. In deze gedetailleerde toets worden de rekenregels van Sellmeijer gebruikt (Sellmeijer, López de la Cruz, van Beek, & Knoeff, 2011). Met de rekenregels van Sellmeijer kan berekend worden of terugschrijdende erosie kan optreden en dus of een pipe kan ontstaan. De resultaten van de gedetailleerde toets zijn faalkansen voor de dijk, waarmee beoordeeld kan worden of de dijk versterkt moet worden. Na de *gedetailleerde toets*, kan er een *toets op maat* uitgevoerd worden. Hierin kan de faalkans beoordeeld worden met locatie specifieke analyses (Rijksoverheid, z.d.-c). Een *toets op maat* is niet verplicht om uit te voeren. In sommige situaties wordt ervoor gekozen om een *toets op maat* toe te passen om een nauwkeuriger resultaat voor een specifieke locatie te krijgen.

In dit onderzoek is de *gedetailleerde toets* van belang. Dit is de toets waarin voor de dijk een faalkans berekend wordt. De methode waarmee dit gedaan wordt, wordt in dit onderzoek vergeleken met de methode waarmee het programma D-Geo Flow werkt. Deze kan gezien worden als een *toets op maat* wanneer het in de methode van het WBI geplaatst zou moeten worden.

4.1 Methode

In de huidige methode wordt verschillende software gebruikt: D-Soil Model om de ondergrond te schematiseren en Riskeer om de stabiliteitsberekeningen te schematiseren en berekenen. De methode die gevolgd wordt door Wetterskip Fryslân is de methode die vastgelegd is in de '*Schematiseringshandleiding piping*' (Rijkswaterstaat, 2017b). Deze is gebaseerd op de regels van het WBI. Eerst wordt er een eenvoudige beoordeling uitgevoerd. Daarna wordt er een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd. De gedetailleerde beoordeling zal in dit hoofdstuk uitgebreider uitgelegd worden, omdat dit de methode is die vergeleken wordt met D-Geo Flow.

In de gedetailleerde beoordeling wordt de kans op optreden van piping bepaald, waarbij de drie deelmechanismen een rol spelen: opbarsten, heave en terugschrijdende erosie, te zien in Figuur 8. In deze toets wordt per vak de kans op falen bepaald door de kleinste van de faalkansen van één van deze drie deelmechanismen te nemen. Dit wordt op deze manier gedaan, omdat alle drie deelmechanismen moeten optreden om piping te doen voorkomen. Deze kans op falen wordt vervolgens vergeleken met de faalkanseis, waardoor beoordeeld kan worden of het dijkvak als veilig gezien kan worden.



Figuur 8 - Beoordelen van piping in de gedetailleerde toets (Rijksoverheid, z.d.-c)

De gedetailleerde beoordeling wordt in het programma Riskeer uitgevoerd. Hierin kunnen alle parameters ingevuld worden, die gegeven zijn in hoofdstuk 3, waarna het programma de faalkansen probabilistisch berekent voor de deelmechanismen. Elk ingemeten dwarsprofiel van de dijk wordt berekend in het programma. Er wordt gerekend met een waterstand van de dichtstbijzijnde hydraulische belastinglocatie. De dijk is ingedeeld in vakken, zoals ook uitgelegd is in hoofdstuk 3. Uit de resultaten van de eerste rekenslag volgt welke doorsnedelocatie de maatgevende locatie voor een vak is.

Riskeer berekent per deelmechanisme de kans op falen. Hiervoor maakt het programma gebruik van formules. Deze formules staan in het rapport “Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid” (Rijkswaterstaat, 2017a) en zijn in de volgende paragrafen kort toegelicht. De betekenis van de symbolen in de formules kan gelezen worden in de *Lijst met symbolen* aan het einde van dit rapport.

4.1.1 Opbarsten

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2, ontstaat opbarsten wanneer de waterdruk in de zandlaag hoger wordt dan het gewicht van de deklaag. Wanneer bekend is dat de deklaag plaatselijk onderbroken wordt door bijvoorbeeld een kwelsloot, wordt de kans op opbarsten meteen op 1 gezet. In Riskeer wordt gebruik gemaakt van een aantal formules om de kans op opbarsten te kunnen bepalen. Per scenario moet de stabiliteitsfactor met betrekking tot opbarsten (F_u) worden bepaald. Deze stabiliteitsfactor is het quotiënt van het kritisch stijghoogteverschil over de deklaag van het optredend stijghoogteverschil (Rijkswaterstaat, 2017a). De volgende formule wordt hiervoor gebruikt:

$$F_u = \frac{\Delta\varphi_{c,u}}{\Delta\varphi}.$$

Het kritisch stijghoogteverschil ($\Delta\varphi_{c,u}$) en het optredend stijghoogteverschil ($\Delta\varphi$) worden berekend met de volgende formules:

$$\Delta\varphi_{c,u} = \frac{D_{deklaag} (\gamma_{sat} - \gamma_{water})}{\gamma_{water}},$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{exit} - h_{exit} = (h - h_{exit}) r_{exit}.$$

Met deze gegevens kan vervolgens de faalkans voor het deelmechanisme opbarsten berekend worden. Dit wordt gedaan met de volgende vergelijking:

$$P_{f,u} = \varphi \left(-\frac{\ln\left(\frac{F_u}{0.48}\right) + 0.27 \beta_{norm}}{0.46} \right).$$

4.1.2 Heave

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2, is het tweede deelmechanisme van piping heave. Hierbij moet de verticale stroming in het opbarstkanaal zo groot zijn dat de zandkorrels uit de watervoerende laag naar het maaiveld worden meegevoerd. Om de kans op heave te berekenen, maakt Riskeer gebruik van een aantal formules (Rijkswaterstaat, 2017a). De eerste formule berekent de stabiliteitsfactor met betrekking tot heave (F_h):

$$F_h = \frac{i_{c,h}}{i}.$$

Het heave gradiënt (i) volgt uit de volgende formule:

$$i = \frac{(h - h_{exit}) r_{exit}}{D_{deklaag}}.$$

Met deze gegevens kan vervolgens de faalkans voor het deelmechanisme heave berekend worden. Dit wordt gedaan met de volgende vergelijking:

$$P_{f,h} = \varphi \left(-\frac{\ln\left(\frac{F_h}{0.37}\right) + 0.3 \beta_{norm}}{0.48} \right).$$

4.1.3 Terugschrijdende erosie

De stabiliteitsfactor, die voor terugschrijdende erosie bepaalt of het mechanisme wel of niet kan optreden, is het quotiënt van het kritieke verval en het optredende verval over de waterkering en wordt berekend met de volgende formule:

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}.$$

Het kritieke verval over de waterkering (ΔH_c) wordt bepaald met de rekenregel van Sellmeijer. In deze regel wordt het kritieke verval uitgedrukt in de verhouding van het kritiek verval en de kwelweglengte, de dikte van het watervoerende pakket en andere eigenschappen van het zandpakket (Rijkswaterstaat, 2017b):

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

Met:

$$F_{resistance} = \eta \frac{\gamma_{sub.particles}}{\gamma_{water}} \tan \theta,$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70.m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70.m}} \right)^{0.4}, \kappa = \frac{v_{water}}{g} k,$$

$$F_{geometry} = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{2.8} + 0.04}.$$

Met deze gegevens kan vervolgens de faalkans voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie berekend worden. Dit wordt gedaan met de volgende vergelijking:

$$P_{f,p} = \varphi \left(-\frac{\ln\left(\frac{F_p}{1.04}\right) + 0.43 \beta_{norm}}{0.37} \right).$$

4.2 Toepassing dijk Ameland

Voor de gedetailleerde beoordeling van de dijk van Ameland zijn de eigenschappen van de dijk, die te lezen zijn in hoofdstuk 3, in Riskeer verwerkt. De schematisatie van profiel 0020 in Riskeer is weergegeven in Bijlage G.

4.3 Resultaten

De resulterende faalkansen per dijkvak voor de dijk van Ameland zijn weergegeven in Bijlage H. Voor dijkprofiel 0020 bij een maatgevend hoogwater van NAP + 4,26 meter is de faalkans 1/20.161 jaar (kritiek verval 4,26m), dit is het maatgevende profiel van vak 6d. Voor dijkprofiel 0020 bij een verhoogde waterstand van NAP + 5 meter is de faalkans 1/2.913 jaar (kritiek verval 4,26m).

De faalkanseis op doorsnedeniveau was 1/96.045 jaar, zoals genoemd in hoofdstuk 3. Dijkprofiel 0020 voldoet hier niet aan, met een faalkans van 1/20.161 jaar. Hiermee valt dit profiel in categorie IV. Met de faalkans voor een waterstand van NAP + 5 meter voldoet dijkprofiel 0020 ook niet aan deze eis. Hierbij valt het profiel ook in categorie IV.

5 D-Geo Flow

In dit hoofdstuk is de rekenmethode van het programma D-Geo Flow uitgelegd. Vervolgens is de toepassing op de dijk van Ameland uitgelegd. Tot slot zijn de resultaten daarvan gegeven in de vorm van een faalkans.

5.1 Methode

Het gebruik van D-Geo Flow moet worden gezien als een *toets op maat* wanneer men het stappenplan van het WBI volgt. Het programma is ontwikkeld door Deltares, in samenwerking met Rijkswaterstaat. Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van D-Geo Flow versie 1.0.39057. Dit is de eerste release versie van het programma, wat nog geen formeel vastgestelde release is, waardoor het vooralsnog niet projectmatig toegepast mag worden. Daardoor werkt nog niet alles optimaal, maar wordt het door Deltares gezien als een startpunt voor verdere ontwikkeling. D-Geo Flow bevat een pipingmodule, die gebaseerd is op het model van Sellmeijer, om bij een gegeven waterstandsverloop te kunnen beoordelen of piping kan optreden. Het programma simuleert de ontwikkeling van de pipe, gebaseerd op vergelijkingen voor de stroming in de pipe en het evenwicht van de korrels op de bodem van de pipe gecombineerd met een grondwaterstroming simulator (Noordam, 2017).

In D-Geo Flow kunnen 2D grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd worden met een gelaagde grondopbouw. Hierin worden een aantal aspecten meegenomen: een tijdsafhankelijke hydraulische belasting, de samendrukbaarheid van het korrelskelet en het grondwater, en de verandering van de freatische lijn (Noordam, 2017). Daarnaast bevat het een complexe ondergrondse en meerlaagse configuratiedefinitie in de gebruikersomgeving en grafische en numerieke resultaten van de uitkomsten van de grondwaterstromingen en pipe ontwikkelingen over de tijd. In dit onderzoek ligt de focus op de functie ‘toepassing tijdsafhankelijke hydraulische belastingen’.

5.1.1 Gebruik van het programma

Bij het gebruik van het programma moeten een aantal stappen doorlopen worden. De stappen worden kort genoemd in bijlage I. De manier waarop deze stappen in het programma ingevuld kunnen worden is te lezen in de gebruikshandleiding van D-Geo Flow (Deltares, 2018).

5.1.2 Output

De uitkomsten van de berekeningen worden onderverdeeld in zes visuele tijdsafhankelijke presentaties door middel van tabellen en grafieken (Deltares, 2018):

- ‘Equilibrium Head Drop’
 - In dit onderdeel kan de toegekende verval (head drop) gezien worden met de bijbehorende pipe lengte, tot aan de kritieke pipe lengte. Hiermee kan ook het kritieke verval gezien worden. Het kritieke verval is het laatste verval voordat de pipe onder de gehele dijk door groeit.
- ‘Pipe Element Active’
 - Hierin kan gezien worden hoe de elementjes van de pipe geactiveerd worden in de tijd. Wanneer in het element een pipe deel ontstaan is, wordt deze aangegeven met de waarde “1”. Wanneer in het element nog geen piping is voorgekomen wordt deze aangegeven met de waarde “2”.
- ‘Head in Pipe’
 - Hierin kan gezien worden hoe de hydraulische waterhoogte (head) in de pipe ontwikkeld over de tijd. Ook hier kan de kritieke waterhoogte gezien worden in de tijdstap voordat de pipe elementen allemaal geactiveerd worden.
- ‘Velocity in Pipe’
 - In dit onderdeel kan de snelheid in de pipe elementen gezien worden.
- ‘Pipe Element Length’
 - In dit onderdeel kan de lengte van de pipe over de tijd gezien worden.

5.1.3 Rekenhart D-Geo Flow

Er is nog niet veel informatie beschikbaar over het rekenhart van D-Geo Flow. Dit maakt het moeilijk om de inhoudelijke stappen van de berekeningen te begrijpen. De informatie die wel bekend is, wordt beschreven in deze paragraaf.

Het programma deelt de pipe op in kleine, vierkante elementen. Voor elk element berekent het programma het evenwicht, waarmee er gekeken wordt of er een pipe in het element ontstaat. Wanneer een element niet in evenwicht is, zal het element bezwijken en vormt zich in dat element een pipe. Wanneer deze ontstaat gaat het programma naar de volgende tijdstap en daarmee naar het volgende element. Ook wanneer het element niet bezwijkt, gaat het programma naar de volgende tijdstap, maar zal dan opnieuw naar hetzelfde element kijken. Hierin berekent het opnieuw het evenwicht en gaat indien nodig door naar het volgende element. Wanneer de groei van de gehele pipe het kritieke verval heeft bereikt, zal de gehele pipe in één keer doorgroeien en faalt de dijk. Wanneer het kritieke verval niet bereikt wordt, zal de dijk niet bezwijken en wordt de faalkans als verwaarloosbaar gezien.

Het programma D-Geo Flow maakt gebruik van rekenmodellen. Er zijn vier onderdelen in het programma waar een rekenmodel aan gekoppeld is. Alle modellen hebben invloed op het resultaat: of het pipe element wel of niet bezwijkt en daarmee of de gehele dijk bezwijkt of niet. Het gaat om de volgende onderdelen (van Esch, 2017):

- Grondwaterstromingsmodel;
- Randvoorwaarden;
- Materiaalparameters;
- Piping module.

In het grondwaterstromingsmodel zit de consolidatie en de negatieve consolidatie van grondlagen verwerkt. Hiermee verandert de doorlatendheid van een grondlaag en daarmee de hoeveelheid grondwater dat door een element kan stromen. Dit heeft invloed op het resultaat of een element in evenwicht blijft of niet. Het randvoorwaarden model is een model waarmee de waterstanden geïmplementeerd worden in het programma. Er wordt onderscheid gemaakt tussen delen van de dijk waar geen stroming doorheen kan, delen waar het polderwater staat, delen waar de waterstand tegenaan staat en delen waar het water door de laag heen kan lekken. Het materiaalparameters onderdeel implementeert de eigenschappen van de grondlagen in de berekeningen. In de piping module wordt berekend of de elementen bezwijken aan de hand van de evenwichtsvergelijkingen op de manier die hierboven beschreven is. Per element worden de schuifspanningen, het behoud van de massa, de stroming en de berging beschouwd om te kunnen bepalen of het element in evenwicht is. Daarnaast wordt berekend of het kritieke verval behaald wordt en daarmee de dijk faalt. De andere rekenmodellen hebben ook invloed op deze piping module (van Esch, 2017).

5.1.4 Omrekenen resultaten naar faalkansen

Om de resultaten van D-Geo Flow om te rekenen naar de faalkansen wordt de volgende formule gebruikt (van Beek & Lam, 2009):

$$P_{f,p} = \varphi \left(-\frac{\ln\left(\frac{F_p}{1.04}\right) + 0.43 \beta_{norm}}{0.37} \right).$$

Uit D-Geo Flow komt het kritieke verval (ΔH_c) als resultaat. Hiermee kan de stabiliteitsfactor F_p berekend worden, op dezelfde manier als bij de huidige rekenmethode volgens het WBI:

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}.$$

5.2 Toepassing dijk Ameland

Voor dit onderzoek is, zoals eerder genoemd, profiel 0020 van de dijk van Ameland gebruikt om de uitkomsten van de verschillende methodes met elkaar te vergelijken. Met de invoergegevens die in hoofdstuk 3 genoemd zijn kan het profiel in D-Geo Flow ingevoerd worden. Dit wordt gedaan op de manier die hierboven beschreven is in paragraaf 5.1.1. De geschematiseerde dijk in D-Geo Flow is weergegeven in Bijlage J.

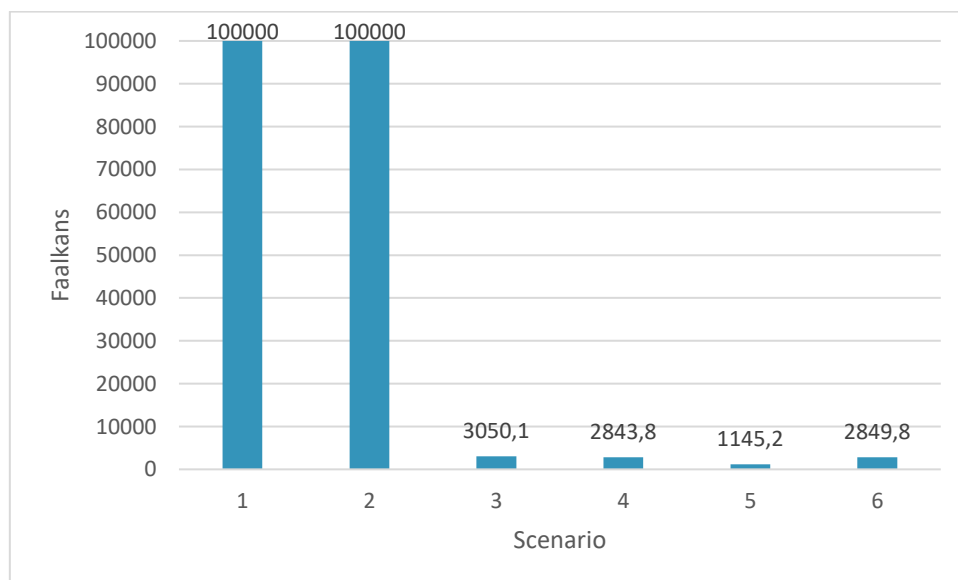
5.3 Resultaten

Tijdens het gebruik van D-Geo Flow en na een aantal contactmomenten met Deltares (ontwikkelaar van het programma D-Geo Flow) is geconstateerd dat het grondwaterstromingsmodel in het programma nog niet gevalideerd is en daarmee wordt afgeraden om dit model te gebruiken. Daarom is ervoor gekozen om de berekeningen te maken zonder het gebruik van het grondwaterstromingsmodel door de samendrukbaarheid van de grondlagen en het water een waarde van 0 te geven. Daarna zijn er, om een inschatting van de invloed van het gebruik van het grondwaterstromingsmodel in te kunnen schatten, ook berekeningen gemaakt mét het gebruik van het grondwaterstromingsmodel.

De resultaten van de berekeningen in D-Geo Flow worden in deze paragraaf beschreven. Er wordt onderscheid gemaakt tussen zes scenario's met verschillende invoer:

- 1) Stationaire waterstand van NAP + 4,26 m
- 2) Tijdsafhankelijke waterstand met een piek van NAP + 4,26 m
- 3) Stationaire waterstand van NAP + 5 m
- 4) Tijdsafhankelijke waterstand met een piek van NAP + 5 m
- 5) Met grondwaterstromingsmodel en een stationaire waterstand van NAP + 5 m
- 6) Met grondwaterstromingsmodel en een tijdsafhankelijke waterstand van NAP + 5 m

De resulterende faalkansen van de berekeningen met deze scenario's zijn weergegeven in Figuur 9. Deze resultaten worden toegelicht in de onderstaande paragrafen. De faalkanseis voor dit profiel is 1/96.045 jaar.



Figuur 9 - Resulterende faalkansen uit D-Geo Flow per scenario

5.3.1 Scenario 1: Stationaire waterstand van NAP + 4,26 m

De invoergegevens van het eerste scenario, samen met de resultaten van het 'equilibrium head drop' is weergegeven in Bijlage K. De uitkomst van deze berekening is dat de dijk bij deze waterstand niet faalt. Er begint wel een pipe te vormen bij een verval van 3,66 m, maar het verval bereikt niet het punt waar een kritiek verval overschreden wordt. Hierdoor kan er geen faalkans berekend worden. Daarom is in Figuur 9 de faalkans voor dit scenario aangenomen op 1/100.000 jaar, welke voldoet aan de faalkanseis.

5.3.2 Scenario 2: Tijdsafhankelijke waterstand met een piek van NAP + 4,26 m

De invoergegevens en de resultaten van het tweede scenario zijn weergegeven in Bijlage L. Ook in dit scenario faalt de dijk niet, maar begint er wel een pipe te vormen bij een verval van 1,89 m. Doordat de waterstanden het kritieke verval niet bereiken, kan er geen faalkans berekend worden en is ook voor dit scenario de faalkans aangenomen op 1/100.000 jaar.

5.3.3 Scenario 3: Stationaire waterstand van NAP + 5 m

Omdat er voor dit onderzoek een faalkans nodig is om een vergelijking tussen de methodes te kunnen maken, zijn er voor scenario 3 tot en met 6 berekeningen gemaakt met een hogere waterstand dan het maatgevend hoogwater. In dit scenario is een waterstand ingevoerd met oploop van 0 tot 5 meter. Hierdoor kan een kritiek verval gevonden worden en daarmee kan een faalkans berekend worden voor dit dijkprofiel. De ingevoerde waterstand en de resultaten van de berekening zijn weergegeven in Bijlage M. De uitkomst van dit scenario is een kritiek verval van 4,27 meter met een faalkans van 1/3050 jaar.

5.3.4 Scenario 4: Tijdsafhankelijke waterstand met een piek van NAP + 5 m

Ook in dit scenario wordt de waterstand verhoogd naar 5 meter om een faalkans te kunnen bepalen. In dit geval, omdat de waterstand variabel is, wordt de hoogste piek verhoogd naar 5 meter. De invoergegevens en resultaten van dit scenario zijn weergegeven in Bijlage N. Net als in scenario 2 begint bij deze berekening een pipe te vormen bij 1,89 meter. Het kritieke verval dat resulteert uit dit scenario is 4,24 meter met een faalkans van 1/2844 meter.

5.3.5 Scenario 5: Met grondwaterstromingsmodel en een stationaire waterstand van NAP + 5 m

In dit scenario zijn berekeningen gedaan met dezelfde invoer als in scenario 3, maar dan met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel. Het resultaat van deze berekening is een kritiek verval van 3,85 meter, wat een faalkans betekent van 1/1145 jaar. De invoergegevens en de resultaten van dit scenario zijn weergegeven in Bijlage O.

5.3.6 Scenario 6: Met grondwaterstromingsmodel en een tijdsafhankelijke waterstand van NAP + 5 m

In dit scenario zijn berekeningen gedaan met dezelfde invoer als in scenario 4, maar dan met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel. De invoergegevens en de resultaten van dit scenario zijn weergegeven in Bijlage P. Het resulterende kritiek verval van deze berekening is 4,24 meter met een faalkans van 1/2850 jaar.

5.3.7 Gevoeligheidsanalyse

Om de gevoeligheid van de invoergegevens in D-Geo Flow te vinden, is een gevoeligheidsanalyse gedaan voor een aantal parameters. De parameters die getest zijn op gevoeligheid zijn: de doorlatendheid, de korrelgrootte, het polderpeil en de waterstand. De berekeningen voor de analyse van deze parameters zijn gedaan op basis van scenario 4 en worden ook met de uitkomst van dat scenario vergeleken. De parameters zijn veranderd voor de twee lagen die belangrijk zijn voor piping,

de kleilaag boven de pipe (H_Mkw_zk) en de zandlaag onder de pipe (H_Mg_zf). De waarden zijn zo veranderd dat de grondlaag voor deze parameter een waarde krijgt die een eigenschap is voor een andere grondsoort. Daarnaast is er een gevoeligheidsanalyse gedaan voor de samendrukbaarheid. De berekeningen voor deze analyse zijn gedaan op basis van scenario 6 en worden met de uitkomst van dat scenario vergeleken. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in Tabel 8. Ook bij deze resultaten is de faalkans aangenomen als 1/100.000 jaar wanneer de dijk in D-Geo Flow niet faalt. De grafieken van de resultaten zijn weergegeven in Bijlage Q.

Tabel 8 - Resultaten gevoeligheidsanalyse voor de parameters doorlatendheid, korrelgrootte, polderpeil, waterstand, en samendrukbaarheid

Doorlatendheid H_Mg_zf				Doorlatendheid H_Mkw_zk			
	Waarde	Kritiek verval	Faalkans		Waarde	Kritiek verval	Faalkans
Verlaagd	0,1	faalt niet	100000	Verlaagd	0,0001	4,2448	2844
Normaal	9,7	4,2448	2844	Normaal	0,01	4,2448	2844
Verhoogd	20	3,469	447	Verhoogd	9	faalt niet	100000
Korrelgrootte H_Mg_zf				Korrelgrootte H_Mkw_zk			
	Waarde	Kritiek verval	Faalkans		Waarde	Kritiek verval	Faalkans
Verlaagd	0,0001	3,469	447	Verlaagd*	0,0001	4,2448	2844
Normaal	0,000165	4,2448	2844	Normaal	0,0001	4,2448	2844
Verhoogd	0,0004	faalt niet	100000	Verhoogd	0,0004	4,2448	2844
Polderpeil				Waterstand piek			
	Waarde	Kritiek verval	Faalkans		Waarde	Kritiek verval	Faalkans
Verlaagd	0	4,2242	2840	Verlaagd	4,26	faalt niet	100000
Normaal	0,6	4,2448	2844	Normaal	5	4,2448	2844
Verhoogd	1,2	faalt niet	100000	Verhoogd	5,74	4,2727	3034
Samendrukbaarheid H_Mg_zf				Samendrukbaarheid H_Mkw_zk			
	Waarde	Kritiek verval	Faalkans		Waarde	Kritiek verval	Faalkans
Verlaagd	1,00E-08	3,9345	1373	Verlaagd	1,00E-07	faalt niet	100000
Normaal	1,00E-07	4,2457	2850	Normaal	2,00E-06	4,2457	2850
Verhoogd	2,00E-06	faalt niet	100000	Verhoogd	1,00E-05	3,9372	1382

*Lagere waarde niet mogelijk

Uit deze analyse kunnen de volgende punten geobserveerd worden:

- **Doorlatendheid.** Er kan gezien worden dat de doorlatendheid erg gevoelig is voor beide lagen. Dit is te verklaren. De doorlatendheid heeft veel invloed op de waterstroming die door de grond kan lopen en heeft daarmee veel invloed op de kans op piping. Met name de doorlatendheid van de zandlaag zal veel invloed hebben.
- **Korrelgrootte.** De korrelgrootte is erg gevoelig voor de zandlaag (H_Mg_zf), maar niet voor de kleilaag (H_Mkw_zk). Ook dit is te verklaren. De korrelgrootte heeft net als de doorlatendheid veel invloed op de waterstroming die door de zandlaag kan lopen en heeft daarmee veel invloed op de kans op piping. Dat de korrelgrootte van de kleilaag niet gevoelig is te verklaren doordat de korrelgrootte alleen voor de piping formule gebruikt wordt. Deze piping formule is alleen van toepassing op de zandlaag. Daardoor is de korrelgrootte van de kleilaag niet gevoelig voor de uitkomst.
- **Polderpeil.** Voor het polderpeil is het model erg gevoelig wanneer het verhoogd wordt, maar niet wanneer het verlaagd wordt. Dit is te verklaren doordat het programma bij het verhogen van het polderpeil het kritieke verval niet meer bereikt. Hierdoor is er geen faalkans meer te vinden (faalkans verwaarloosbaar). Terwijl wanneer het polderpeil verlaagd wordt, het kritieke verval nog steeds bereikt zal worden.

- **Waterstand piek.** Voor de hoogte van de piek van de waterstand is het model gevoelig wanneer de hoogte verlaagd wordt, maar niet gevoelig wanneer de hoogte van de piek verhoogd wordt. Dit is op dezelfde manier te verklaren als voor het polderpeil. Wanneer de waterstand verlaagd wordt, bereikt de berekening het kritieke verval niet meer. Wanneer de waterstand verhoogd wordt, zal het kritieke verval wel bereikt worden. Er moet dus ergens een drempelwaarde overschreden worden, wanneer deze drempelwaarde overschreden is maakt de hoogte van de piek schijnbaar niet veel meer uit.
- **Samendrukbaarheid.** Er kan gezien worden dat het model erg gevoelig is voor de samendrukbaarheid. Dit is te verklaren doordat de samendrukbaarheid erg veel zegt over de (negatieve) consolidatie die in een grondlaag plaats kan vinden. Dit heeft veel invloed op de grondwaterstroming op de plaats van de pipe en heeft daardoor veel invloed op de kans op piping. Grote samendrukbaarheid van de deklaag betekent in eerste instantie ter plaatse van de deklaag een lagere waterspanning in het zandpakket. Water stroomt vanuit zandlaag in deklaag. Wanneer de deklaag verzadigd raakt (door negatieve consolidatie) zal de drukopbouw van de waterspanning in de zandlaag toenemen in de tijd (water uit zandlaag kan nergens meer naar toe). Dit duurt langer als de samendrukbaarheid van de deklaag groot is en/of de laagdikte van de deklaag groot is en daarmee is te verklaren dat de samendrukbaarheid een gevoelige parameter is.

6 Discussie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van beide methodes vergeleken. Eerst worden de belangrijkste resultaten naast elkaar gezet en worden de verschillen daartussen beschreven. Daarna worden de mogelijke oorzaken van deze verschillen beschreven.

6.1 Vergelijking van de faalkansen

Tabel 9 laat de resultaten van de verschillende methodes met de verschillende scenario's zien. Zoals genoemd in de methodologie, wordt een verschil als significant gezien wanneer de faalkans in een andere categorie van het toetsoordeel terecht komt dan de faalkans waarmee deze vergeleken wordt.

Tabel 9 - Resultaten van de methodes per scenario: kritiek verval en faalkans

Methode	Type waterstand	Scenario	Kritiek verval [m]	Faalkans [1/jaar]
Riskeer	Stationair	NAP + 4,26 m	4,26	1/20.161
Riskeer	Stationair	NAP + 5 m	4,26	1/2913
D-Geo Flow	Stationair	1	Faalt niet	1/100.000
D-Geo Flow	Tijdsafhankelijk	2	Faalt niet	1/100.000
D-Geo Flow	Stationair	3	4,275	1/3050
D-Geo Flow	Tijdsafhankelijk	4	4,245	1/2844
D-Geo Flow	Stationair	5	3,858	1/1145
D-Geo Flow	Tijdsafhankelijk	6	4,246	1/2850

Uit Riskeer resulteert een faalkans van 1/20.161 jaar voor dijkprofiel 0020 voor een maatgevend hoogwater van NAP + 4,26 m. Deze faalkans kan vergeleken worden met de faalkans die resulteert uit scenario 1 uit D-Geo Flow, welke niet faalt en daarom aangenomen is op 1/100.000 jaar. Dit is een significant verschil, maar erg onzeker omdat deze faalkans aangenomen is.

Voor een verhoogde waterstand van NAP + 5 m resulteert een faalkans van 1/2913 uit Riskeer. Deze uitkomst kan vergeleken worden met scenario 3 uit D-Geo Flow, welke een faalkans van 1/3050 geeft. Deze faalkansen zijn vergelijkbaar met elkaar, er is geen significant verschil te zien. Omdat beide berekeningen met een stationaire waterstand van NAP + 5 m berekend zijn, laat deze uitkomst zien dat de methodes vergelijkbaar met elkaar zijn voor een berekening stationaire waterstand.

Uit de berekening van D-Geo Flow met een tijdsafhankelijke waterstand komt voor scenario 2 een faalkans van 1/100.000 jaar, omdat in deze berekening de dijk niet faalt. Dit is een significant verschil wanneer het met het resultaat van Riskeer vergeleken wordt voor een waterstand van NAP + 4,26, welke een faalkans van 1/20.161 jaar is. Dit laat vermoedelijk zien dat door te rekenen met een tijdsafhankelijke waterstand de faalkans kleiner wordt, maar is niet met zekerheid te zeggen omdat de faalkans van 1/100.000 jaar aangenomen is.

In de berekening uit D-Geo Flow voor scenario 4 faalt het dijkprofiel wel, met een faalkans van 1/2844 jaar. Deze faalkans kan vergeleken worden met de faalkans van 1/2913 jaar die resulteert uit de berekening van Riskeer met een waterstand van NAP + 5 m. Tussen deze faalkansen is geen significant verschil te zien. Dit zegt dat het gebruik van D-Geo Flow met een tijdsafhankelijke waterstand geen verschil geeft voor de faalkans van piping.

Vervolgens kan er een vergelijking gemaakt worden tussen het resultaat van scenario 5, een faalkans van 1/1145 jaar, en de resulterende faalkans uit Riskeer met een waterstand van NAP + 5 m, een faalkans van 1/2913 jaar. Bij scenario 5 is gebruik gemaakt van het grondwaterstromingsmodel. Tussen deze faalkansen is geen significant verschil te zien. Ook het resultaat van scenario 6, een faalkans van 1/2850 jaar, kan vergeleken worden met het resultaat uit Riskeer met een waterstand

van NAP + 5 m, een faalkans van 1/2913 jaar. Ook tussen deze resultaten kan geen significant verschil gezien worden. Met deze vergelijkingen kan gezegd worden dat met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel de faalkans niet erg verlaagd ten opzichte van Riskeer.

Er zijn dus geen zekere significante verschillen te zien wanneer de resultaten met elkaar vergeleken worden. Wel is er een relatief groot verschil te zien wanneer de uitkomsten van de berekeningen met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel (scenario 5 en 6) worden vergeleken met elkaar. Hier is ook een relatief groot verschil te zien in het kritieke verval: een verschil van 0,4 meter.

6.2 Vergelijking methodes

Een belangrijk verschil in tussen de methodes is de manier waarop de faalkans berekend wordt. Voor de huidige rekenmethode is de berekening tot de faalkans een gekalibreerde berekening die speciaal ontwikkeld is voor die methode. Echter, de berekening die gebruikt wordt om het kritieke verval dat uit D-Geo Flow om te rekenen naar een faalkans is niet gekalibreerd voor het rekenmodel van D-Geo Flow (van Beek & Lam, 2018). Doordat deze manier van omrekenen van een kritiek verval naar een faalkans niet gekalibreerd is voor D-Geo Flow, is het erg onzeker of de resulterende faalkans kloppend en passend bij de uitkomst is.

Ook is de faaldefinitie van de methodes verschillend. Riskeer ziet het beginnen van terugschrijdende erosie als falen, terwijl D-Geo Flow het overschrijden van het kritieke verval als falen ziet. Het meenemen van dit verschil kan een veel groter verschil in faalkans veroorzaken. Helaas neemt de manier van omrekenen van de uitkomst van D-Geo Flow naar een faalkans dit verschil in faaldefinitie niet mee.

Dat er geen significant verschil te zien is tussen de verschillende methodes zonder het gebruik van het grondwaterstromingsmodel (scenario 1 t/m 4) zou ook op een andere manier verklaard kunnen worden. Wanneer het grondwaterstromingsmodel niet gebruikt wordt, rekent het programma D-Geo Flow in principe op dezelfde manier als de huidige rekenmethode van Wetterskip Fryslân. De vertraging van het water in de grondlagen en de (negatieve) consolidatie van de grondlagen wordt niet meegenomen in de berekening. Hierdoor wordt de rekenregel van Sellmeijer op dezelfde manier gebruikt als bij de huidige rekenmethode, maar dan per elementje. Wanneer het grondwaterstromingsmodel niet gebruikt wordt is de uitkomst van de berekening met de stationaire waterstand nagenoeg hetzelfde als van de berekening van de tijdsafhankelijke waterstand. Vermoedelijk is het grondwaterstromingsmodel het aspect in het model dat het tijdsafhankelijke effect meeneemt.

Wanneer het grondwaterstromingsmodel wel gebruikt wordt, is er nog steeds geen significant verschil te zien als de tijdsafhankelijke berekening (scenario 6) met de huidige methode vergeleken wordt (waterstand van NAP + 5 m). Een oorzaak hiervan zou kunnen zijn dat het niet zeker is wat de waardes voor de samendrukbaarheid van de lagen is. Uit de gevoeligheidsanalyse resulteerde dat het resultaat in de faalkans erg gevoelig is voor de ingevoerde waarde van de samendrukbaarheid. Ook is het grondwaterstromingsmodel een model dat nog niet gevalideerd is. De uitkomsten van dit model zijn dus nu alleen een indicatie van wat de uitkomst zou kunnen zijn.

Er is wel een relatief groot verschil te zien tussen de stationaire en de tijdsafhankelijke berekening met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel in D-Geo Flow (scenario 5 en 6). De oorzaak hiervan is dat de vertraging van het water in de grondlagen en de (negatieve) consolidatie meegenomen wordt in deze berekeningen. Bij de tijdsafhankelijke waterstand kan het zo zijn dat de waterstanden niet lang genoeg tegen de dijk staan en daardoor niet een groot genoeg grondwaterstroming kan ontstaan om een pipe te doen vormen, wat het tijdsafhankelijke effect is.

6.3 Mogelijke beperkingen van het onderzoek

Het is mogelijk dat de uitkomsten van het onderzoek toevallig voor dit specifieke dijkprofiel op deze manier uitkomen. Ook zou er een specifiek resultaat kunnen zijn wanneer er kleinere tijdstappen gekozen zouden zijn. Daarnaast zijn veel waardes van parameters erg onzeker, zoals bijvoorbeeld de samendrukbaarheid van de grondsoorten, hier zijn nog weinig metingen voor gedaan. Omdat deze parameters wel erg gevoelig zijn voor de uitkomst, zou de uitkomst erg anders kunnen zijn met gebruik van andere parameterwaarden, zoals te zien was in de gevoeligheidsanalyse. Ook is een vergelijking aan de hand van de faalkans een onzekere manier van vergelijken, doordat de manier van omrekenen van een kritiek verval naar een faalkans niet gekalibreerd is voor D-Geo Flow. Hierbij speelt ook nog het verschil in faaldefinitie van de methodes een rol, waar de manier van omrekenen naar een faalkans vanuit D-Geo Flow ook geen rekening mee houdt. Verder is de uitkomst van scenario 5 en 6 onzeker, doordat het grondwaterstromingsmodel nog niet gevalideerd is.

7 Conclusie

In dit hoofdstuk worden eerst samenvattende antwoorden gegeven op de deelvragen en vervolgens wordt de hoofdvraag beantwoord.

Deelvraag 1: “Wat is het faalmechanisme piping?”

Het faalmechanisme piping bestaat uit drie deelmechanismen die alle drie moeten voorkomen om piping te doen optreden. De deelmechanismen zijn: (1) opbarsten, (2) heave en (3) terugschrijdende erosie. De sterkte van de dijk is te zien door te onderzoeken hoe goed de dijk zich tegen deze deelmechanismen kan weerhouden. Er zijn ook een aantal eigenschappen die een dijk moet hebben om in aanmerking te kunnen komen voor piping. Ten eerste moet de dijk een erosiegevoelige en watervoerende laag hebben die afgedekt is door een relatief dun deel van samendrukbare lagen uit klei of veen, de deklaag. Verder moet er contact zijn tussen de zandlaag en het buitenwater. Er moet een watersverschil tussen het buitenwater en de polder zijn.

Deelvraag 2: “Wat zijn de eigenschappen van de dijk van Ameland?”

Het dijktraject van Ameland heeft een faalkans normering van 1/1.000 jaar. Op doorsnedeniveau is dit een faalkanseis van 1/96.045 jaar voor piping. De eigenschappen van de grondlagen, de waterstanden en de andere benodigde eigenschappen voor het gebruik van de rekenmethodes voor dijkprofiel 0020 zijn samengevat in hoofdstuk 3.

Deelvraag 3: “Hoe wordt piping momenteel berekend bij Wetterskip Fryslân (rekenregels en software) en wat zijn de faalkansen voor piping voor de dijk van Ameland bij deze methode?”

Op dit moment wordt de kans op piping bij Wetterskip Fryslân berekend aan de hand van het WBI. In het programma Riskeer zijn de rekenregels die in het WBI staan, vastgelegd. Uit de berekening voor dijkprofiel 0020 in Riskeer met de maatgevende waterstand van NAP + 4,26 m komt een faalkans van 1/20.161 jaar. Uit de berekening met een verhoogde waterstand van NAP + 5 m komt een faalkans van 1/2913 jaar.

Deelvraag 4: “Hoe wordt piping berekend (rekenregels en software) in D-Geo Flow en wat zijn de faalkansen voor piping voor de dijk van Ameland bij deze methode?”

De software D-Geo Flow berekent voor elk element van de pipe of het evenwicht overschreden wordt. Hiervoor gebruikt het programma een piping module, randvoorwaarden, materiaalparameters en een grondwaterstromingsmodel. Het resultaat van een berekening in D-Geo Flow is een kritiek verval. Dit kritieke verval kan omgerekend worden naar een faalkans. De faalkans die uit de berekening voor profiel 0020 komt is zonder het gebruik van het grondwaterstromingsmodel met een stationaire waterstand 1/3050 jaar en met een tijdsafhankelijke waterstand 1/2844 jaar. Met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel is het resultaat voor een stationaire waterstand 1/1145 jaar en voor een tijdsafhankelijke waterstand 1/2850 jaar.

Deelvraag 5: “Welke verschillen kunnen er gezien worden tussen de resultaten van de huidige rekenmethode bij Wetterskip Fryslân en de resultaten van de rekenmethode in D-Geo Flow en hoe kunnen deze verschillen verklaard worden?”

Wanneer de faalkans die resulteert uit de huidige methode vergeleken wordt met de faalkansen die resulteren uit de methode van D-Geo Flow, kunnen er geen significante verschillen gezien worden, omdat de faalkansen niet in een andere categorie van het toetsoordeel terecht komen. Bij de resultaten van scenario 5 en 6, waar het grondwaterstromingsmodel gebruikt wordt, kan er wel een relatief groot verschil gezien worden tussen de berekening met de stationaire waterstand en de

berekening met de tijdsafhankelijke waterstand. Vermoedelijk is het grondwaterstromingsmodel het aspect in het model dat het tijdsafhankelijke effect meeneemt in de berekeningen.

“Hoe wordt de faalkans van het faalmechanisme piping beïnvloed door het gebruik van het programma D-Geo Flow, vergeleken met de huidige rekenmethode die gebruikt wordt bij Wetterskip Fryslân?”

In het geval dat er wordt gekeken naar de significantie van de verschillen tussen de resulterende faalkansen uit de verschillende methodes, kan er geconcludeerd worden dat het programma D-Geo Flow de faalkans niet erg beïnvloedt voor zover dit onderzoek reikt. Dit is het geval wanneer het niet gevalideerde grondwaterstromingsmodel niet gebruikt wordt en de manier van rekenen vergelijkbaar is.

In het geval dat het niet gevalideerde grondwaterstromingsmodel wel gebruikt wordt, lijkt er in de toekomst potentie in het programma te zitten om de faalkans meer met de werkelijkheid overeen te laten komen. Wanneer het grondwaterstromingsmodel wel gebruikt wordt is er een relatief groot verschil tussen een berekening met een stationaire waterstand en een berekening met een tijdsafhankelijke waterstand. Zoals verwacht, is de faalkans veel kleiner als er een berekening met een tijdsafhankelijke waterstand gedaan wordt dan wanneer er een berekening gedaan wordt met een stationaire waterstand. Indien dit grondwatermodel meer wordt ontwikkeld in de toekomst en dit model gevalideerd is, kan het gebruik van D-Geo Flow een meer realistische faalkans vinden dan met de huidige rekenmethode door het meenemen van de vertraging van het water in de grondlagen en de (negatieve) consolidatie van de grondlagen.

Concluderend kan er gezegd worden dat het gebruik van het programma D-Geo Flow op dit moment nog geen goede toevoeging is om te gebruiken voor Wetterskip Fryslân. Maar wanneer het grondwaterstromingsmodel in de toekomst gevalideerd is en er meer zekerheid is over de waardes van de samendrukbaarheid van de grondlagen kan het gebruik van het programma zeker een goede toevoeging zijn om te gebruiken voor Wetterskip Fryslân.

8 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk zijn de aanbevelingen gegeven. Hierin ligt de focus op wat men nodig heeft om het programma D-Geo Flow te gebruiken: onderdelen waar op gelet moet worden bij het gebruik van het programma. Daarnaast zal er ingegaan worden op vervolgonderzoek dat een goede aanvulling zal kunnen zijn aan dit onderzoek.

8.1 Aandachtspunten D-Geo Flow

Tijdens het werken met D-Geo Flow zijn een aantal zaken opgevallen die handig en goed zijn om te weten bij het gebruik van het programma D-Geo Flow:

- **Lange runtijd.** Het programma heeft een lange runtijd. De runs die voor dit onderzoek gedaan zijn duurden ± 30 minuten per run. Hierbij is gebruik gemaakt van 240 tijdstappen. Het is dus belangrijk om een goede middenweg te kiezen tussen de gewilde nauwkeurigheid van de uitkomst en de tijdsduur van het runnen. Meer tijdstappen maakt het resultaat namelijk nauwkeuriger maar de runtijd langer.
- **Opslaan en openen.** Wanneer er een opslagplek voor een bestand gezocht wordt, moet eraan gedacht worden om een plek te kiezen die genoeg ruimte heeft. De opslag bestanden van D-Geo Flow nemen per model ± 160 MB in beslag. Wanneer er opgeslagen wordt op een te kleine plaats, zal het bestand niet goed opgeslagen worden en niet meer geopend kunnen worden. Wanneer men een opgeslagen bestand wil openen, werkt het niet om het via de 'import' functie te doen die in de handleiding beschreven staat. Om het bestand te kunnen openen zal het via 'file' $\rightarrow$ 'open' gedaan moeten worden om het bestand succesvol te kunnen openen.
- **Invoeren gegevens.** Het invoeren van de gegevens kan via de stappen die in de handleiding uitgelegd worden. Toch zijn er een aantal aandachtspunten die niet in de handleiding aangegeven zijn, terwijl het programma wanneer er geen rekening mee gehouden wordt wel foutmeldingen kan geven:
 - **Onderbroken grondlaag.** Wanneer een grondlaag onderbroken wordt, zal er voor een van de twee delen een nieuw materiaal aangemaakt moeten worden. Dit materiaal kan dezelfde eigenschappen hebben als het andere deel van het laag, maar omdat de laag onderbroken wordt, moet het materiaal van een van de twee delen een andere naam en kleur hebben. De naam kan bijvoorbeeld verandert worden naar 'kopie van *originele naam*'. Hierdoor zal het programma het niet meer als een fout zien.
 - **Te dunne grondlaag.** Een te dunne grondlaag geeft een foutmelding. Doordat de laag te dun is kan het gaas (Mesh) niet gevormd worden. Een te dunne grondlaag is een laag die kleiner is dan 0,4 meter.
- **Falen.** Wanneer de waterstand niet hoog genoeg is om het kritieke verval van een dijkprofiel te bereiken, zal er geen uitkomst van het programma zijn. Er zal geen kritiek verval gevonden worden en daarmee wordt de faalkans gezien als verwaarloosbaar. Om een faalkans voor een dijkprofiel te kunnen vinden zal er soms een hogere waterstand ingevoerd moeten worden in het programma dan de waterstand die officieel maatgevend is.
- **Faalkans.** De uitkomst van het programma is niet direct een faalkans, maar een kritiek verval. Dit kritieke verval kan wel omgerekend worden naar een faalkans met een aantal formules (genoemd in paragraaf 5.1.4), maar deze formules zijn niet voor het gebruik van D-Geo Flow gemaakt. Daarom zou dit geen correcte methode kunnen zijn. Wanneer er een methode is ontwikkeld die bij het programma hoort, is het beter om die te gebruiken.
- **Grondwaterstromingsmodel niet gevalideerd.** Zoals genoemd, is het grondwaterstromingsmodel nog niet gevalideerd. Daarom wordt er afgeraden om het model te gebruiken. Om het model niet te gebruiken zullen er voor de samendrukbaarheid van de grondlagen en het water waardes van 0 ingevoerd moeten worden. Ook is er niet veel informatie over de essentie van het grondwaterstromingsmodel. Dit maakt het erg lastig om het effect van het model in te schatten.

- **Gevoelige parameters.** Een aantal parameters die ingevoerd moeten worden in het programma zijn gevoelig voor het resultaat. Dit geldt voor een aantal eigenschappen van zandlaag onder de pipe en de kleilaag boven de pipe. Het gaat om de korrelgrootte, de doorlatendheid en de samendrukbaarheid. Het is dus van belang om de waardes van deze parameters bewust te kiezen. Echter zijn dit eigenschappen waarvan de waardes erg onzeker zijn en moeilijk te onderzoeken zijn voor het waddenzeegebied. Ook de waterstand en het polderpeil hebben invloed op de uitkomst. Wanneer met deze waardes het kritiek verval niet bereikt wordt, zal er geen faalkans als uitkomst komen. De keuze voor de waterstand en het polderpeil zullen dus ook bewust gekozen moeten worden.

8.2 Vervolgonderzoek

Er zijn een aantal opties voor vervolgonderzoek die een goede toevoeging zullen zijn op dit onderzoek. Het eerste vervolgonderzoek zal kunnen zijn om meer dijkprofielen te vergelijken. Daarnaast zal het een goede aanvulling zijn om opnieuw een aantal berekeningen te maken, wanneer het grondwaterstromingsmodel gevalideerd is zodat de resultaten als betrouwbaar verondersteld kunnen worden. Een onderzoek dat daarbij ook een goede toevoeging zal zijn, is een onderzoek naar de waardes van de samendrukbaarheid van grondlagen. Deze waardes zijn nu nog erg onzeker, maar zijn wel erg van invloed op de uitkomst. Daarom zal het goed zijn om meer over deze eigenschap te weten te komen. Ook zal het goed zijn om te onderzoeken of de manier van omrekenen van een kritiek verval uit D-Geo Flow naar een faalkans wel een passende manier is.

Referenties

- Berg, F. v. (2019). *Deltares*. Opgeroepen op mei 6, 2019, van D-Geo Flow: <https://www.deltares.nl/nl/software/d-geo-flow/#features>
- De Bruijn, H. (2013). *Het pipingproces in stripvorm*. Deltares.
- Deltares. (2012). *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. Rijkswaterstaat.
- Deltares. (2018). *D-Geo Flow in Delta Shell User Manual*. Delft: Deltares.
- Deltares. (z.d.). *Faalmechanisme*. Opgeroepen op april 10, 2019, van Wiki Noodmaatregelen: <http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Faalmechanisme>
- Domenico, P., & Mifflin, M. (1965). *Water from Low-Permeability Sediments and Land Subsidence*. Water resources research.
- HKV lijn in water. (2017). *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop*. Lelystad: Rijkswaterstaat WVL.
- Noordam, A. (2017). *Achtergrond D-Geo Flow*. Opgeroepen op mei 10, 2019, van Deltares D-Geo Flow: <https://publicwiki.deltares.nl/display/DGeoFlow/Achtergrond+D-Geo+Flow>
- Rijksoverheid. (2019a). *Over WBI*. Opgeroepen op april 15, 2019, van Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/wbi/>
- Rijksoverheid. (2019b). *Waterwet*. Opgeroepen op mei 27, 2019, van Overheid.nl; Wettenbank: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2018-07-01#Opschrift>
- Rijksoverheid. (z.d.-a). *Nieuwe Normering*. Opgeroepen op april 22, 2019, van Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/nieuwe-normering/>
- Rijksoverheid. (z.d.-b). *Piping*. Opgeroepen op april 16, 2019, van Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma-projecten/piping/>
- Rijksoverheid. (z.d.-c). *Piping*. Opgeroepen op april 16, 2019, van Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/beoordelingsproces/uitvoering/toetssporen/info-toetssporen/piping/>
- Rijkswaterstaat. (2017a). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Rijkswaterstaat. (2017b). *Schematiseringshandleiding piping*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Sellmeijer, H., López de la Cruz, J., van Beek, V. M., & Knoeff, H. (2011). *Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and lkdijk experiments*. Deltares.
- Sluis, J., Sirks, E., Koelewijn, A., & Veenstra, J. (2016). *Effect van tijdsafhankelijkheid op piping bij zeedijken*. Geotechniek.
- 't Hart, R., De Bruijn, H., & De Vries, G. (2016). *Fenomenologische beschrijving: Faalmechanismen WTI*. Deltares.
- TAW. (1999a). *Technical Report on Sand Boils (Piping)*. The Netherlands: Rijkswaterstaat.
- TAW. (1999b). *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

- van Beek, V., & Lam, K. (2009). *Van D-Geo Flow berekening naar beoordeling*. Deltares.
- van Beek, V., & Lam, K. (2018). *Van D-Geo Flow berekening naar beoordeling*. Deltares.
- van Esch, J. (2017). *Rekenhart D-Geo Flow*. Deltares. Opgehaald van Rekenhart D-Geo Flow [Powerpoint]: <https://publicwiki.deltares.nl/display/DGeoFlow/Cursus+programma>
- van 't Veen, C. (2013). *Een toekomst voor dijken*. Amersfoort: Rijkdienst voor het Cultureel Erfgoed.
- Wetterskip Fryslân. (2019a). *Bijlage I - Ondergrondschematisatie 2-2 STPH*.
- Wetterskip Fryslân. (2019b). *Veiligheidsbeoordeling Waddenzeedijk Ameland; Logboek piping, dijktraject 2-2*.
- Wetterskip Fryslân. (z.d.-a). *Bedreigingen*. Opgeroepen op april 15, 2019, van Kijk op de dijk: <https://www.kijkopedijkameland.nl/waarom/bedreigingen/>
- Wetterskip Fryslân. (z.d.-b). *Planning*. Opgeroepen op mei 20, 2019, van Kijk op de dijk: <https://www.kijkopedijkameland.nl/planning/>

Lijst met symbolen

F_u	Stabiliteitsfactor voor het deelmechanisme opbarsten [-].
F_h	Stabiliteitsfactor voor het deelmechanisme heave [-].
F_p	Stabiliteitsfactor voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie [-].
$\Delta\varphi_{c,u}$	Kritisch stijghoogteverschil over de deklaag [m].
$\Delta\varphi$	Optredend stijghoogteverschil over de deklaag [m].
$D_{deklaag}$	Laagdikte van de cohesieve deklaag [m].
γ_{water}	Volumiek gewicht van water [kN/m ³].
γ_{sat}	Verzadigd volumiek gewicht van de cohesieve deklaag [kN/m ³].
φ_{exit}	Stijghoogte in de watervoerende laag bij het uittredepunt ten opzichte van het NAP [m].
h_{exit}	Freatisch niveau of de hoogte van het maaiveld bij het uittredepunt ten opzichte van het NAP [m].
h	Niveau van de buitenwaterstand ten opzichte van het NAP, met een kans van voorkomen gelijk aan de norm [m].
r_{exit}	Dempingsfactor of de responsfactor bij het uittredepunt [-].
φ	Standaard normale verdeling [-].
β_{norm}	Betrouwbaarheidsindex van het dijktraject [-].
$i_{c,h}$	Kritieke heave gradiënt = 0,3 [-].
i	Berekende heave gradiënt [-].
ΔH_c	Kritieke verval over de waterkering [m].
r_c	Reductiefactor voor de weerstand bij het uittredepunt = 0,3 [-].
$P_{f;u}$	Faalkans per vak voor het deelmechanisme opbarsten [1/jaar].
$P_{f;h}$	Faalkans per vak voor het deelmechanisme heave [1/jaar].
$P_{f;p}$	Faalkans per vak voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie [1/jaar].
L	Kwelweglengte van in- tot uittredepunt [m].
$\gamma_{sub.particles}$	Volumegewicht van zandkorrels onder water = 16,5 [kN/m ³].
η	Coëfficiënt van White = 0,25 [-].
d_{70}	70-percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping gevoelige laag [m].
κ	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m ²].
ν	Kinematische viscositeit van water [m ² /s].
g	Zwaartekrachtversnelling = 9,81 [m/s ²].
D	Dikte van de zandlaag [m].
$d_{70.m}$	Referentie d_{70} -waarde = 2,08E-4 [m].
θ	Rolweerstandshoek van de zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer regel = 37 (°)
$P_{f;dsn}$	Faalkans per vak [1/jaar].
$P_{eis;sig}$	Signaleringswaarde van het dijktraject [1/jaar].
$P_{eis;ond}$	Ondergrens van het dijktraject [1/jaar].
$P_{eis;sig;dsn}$	Faalkanseis per doorsnede of kunstwerk [1/jaar].

Bijlage A. Categoriegrenzen toetsoordeel per vak per toetsspoor

De categoriegrenzen voor het toetsoordeel per vak per toetsspoor worden bepaald met de onderstaande tabel. In dit onderzoek wordt gekeken naar het faalmechanisme piping. Het toetsspoor is in dit geval dan ook piping.

Tabel A1 - Categorieën voor het toetsoordeel per vak per toetsspoor (Rijkswaterstaat, 2017a)

Categorie	Aanduiding categorie toetsoordeel per vak per toetsspoor	Begrenzing categorie
I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f;dsn} < \frac{1}{30} P_{eis;sig;dsn}$
II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde	$\frac{1}{30} P_{eis;sig;dsn} < P_{f;dsn} < P_{eis;sig;dsn}$
III _v	Voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	$P_{eis;sig;dsn} < P_{f;dsn} < P_{eis;ond;dsn}$
IV _v	Voldoet mogelijk aan de ondergrens of aan de signaleringswaarde	$P_{eis;ond;dsn} < P_{f;dsn} < P_{eis;ond}$
V _v	Voldoet niet aan de ondergrens	$P_{eis;ond} < P_{f;dsn} < 30 P_{eis;ond}$
VI _v	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f;dsn} > 30 P_{eis;ond}$
VII _v	Nog geen oordeel	-

Bijlage B. Dijkvakindeling Ameland

De dijkvakindeling van de dijk van Ameland wordt weergegeven in Tabel B1.

Tabel B1 - Dijkvakindeling traject 2-2

Vaknaam	Metreering van [m]	Metreering tot [m]	Lengte [m]
Vak 1	0	1177,5	1177,5
Vak 2	1177,5	3243,35	2065,85
Vak 3a	3243,35	4612,18	1368,83
Vak 3b	4612,18	5812,33	1200,15
Vak 3c	5812,33	6721,04	908,71
Vak 4a	6721,04	7114,21	393,17
Vak 4b	7114,21	8125,88	1011,67
Vak 5a	8125,88	9614,81	1488,93
Vak 5b	9614,81	10269,8	654,99
Vak 6a	10269,8	11113,98	844,18
Vak 6b	11113,98	12217,23	1103,25
Vak 6c	12217,23	13818,75	1601,52
Vak 6d	13818,75	14818,79	1000,04
Vak 6e	14818,79	15518,79	699,99
Vak 6f	15518,79	16538,05	1019,27

Bijlage C. Positie profiel 0020 in de dijk van Ameland

De positie van dijkprofiel 0020 is zichtbaar in de onderstaande figuren. De positie is aangegeven met een pijl.



Figuur C1 - Dijk van Ameland met de positie van dijkprofiel 0020



Figuur C2 - Dijk van Ameland met de positie van dijkprofiel 0020 ingezoomd

Bijlage D. Omschrijvingen SOS-eenheden

In Tabel D1 zijn de omschrijvingen van de grondsoorten zichtbaar. De naamgeving wordt gegeven met daarbij de omschrijving van het materiaal en de grondsoort.

Tabel D1 – Omschrijving SOS-eenheden

SOS-eenheid	Omschrijving	Grondsoort
Aklei	Uiterst fijn tot matig fijn zand	Opgebrachte klei
Azand	Dijkmateriaal	Zand
H_Mkw_z&k	Afzettingen van kleine getijdenplaat en kweldergeulen	Klei zandig en ziltig
H_Mg_zf	Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand	Zand
P_Om_zf	Fijn zandige en compacte meer- afzettingen	Zand

Bijlage E. Maatgevend hoog water en polderpeil per vak

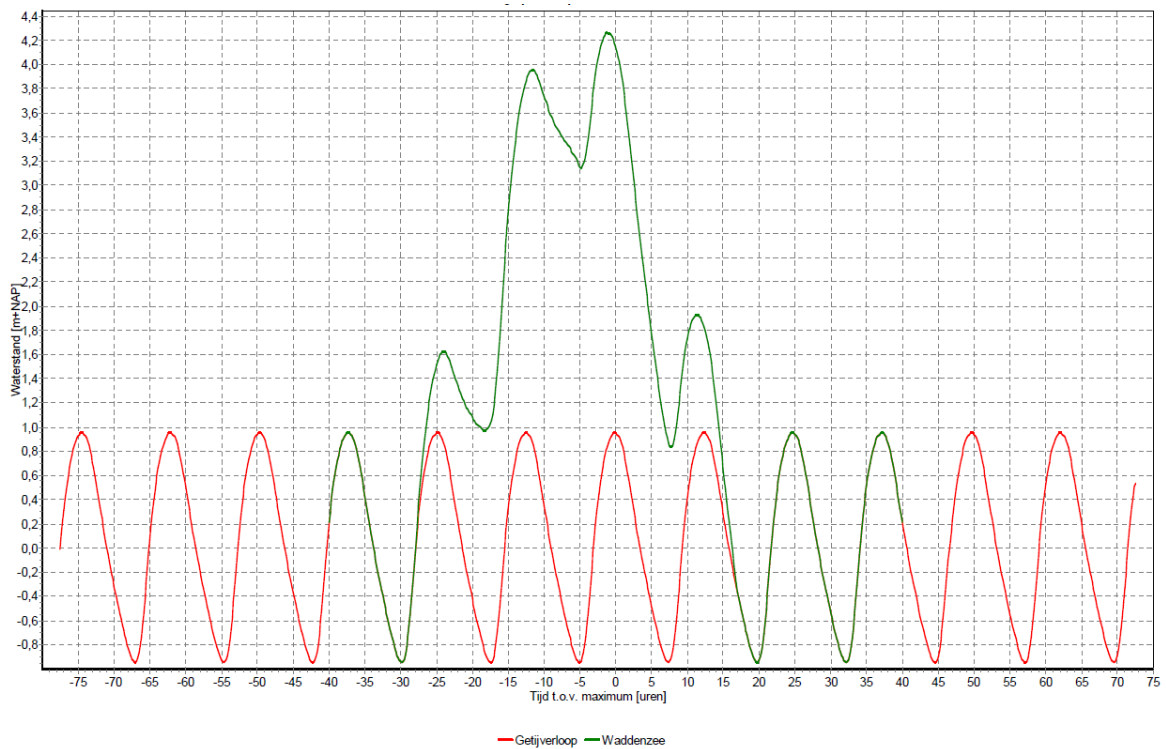
Tabel E1 laat het maatgevend hoog water (MHW) en het polderpeil zien per vak voor de dijk van Ameland. Deze waarden worden gebruikt in de huidige rekenmethode voor piping bij Wetterskip Fryslân.

Tabel E1 - MHW en polderpeil per dijkvak (Wetterskip Fryslân, 2019b)

Dijktraject	Maatgevende som	MHW [m + NAP]	Polderpeil [m + NAP]
Vak 1	2-2_0161	4,16	0,40
Vak 2	2-2_0135	4,19	0,40
Vak 3a	2-2_0126	4,20	0,40
Vak 3b	2-2_0108	4,20	0,40
Vak 3c	2-2_0102	4,19	0,40
Vak 4a	2-2_0098	4,18	0,40
Vak 4b	2-2_0086	4,17	0,78
Vak 5a	2-2_0072	4,20	0,75
Vak 5b	2-2_0064	4,21	0,60
Vak 6a	2-2_0061	4,21	0,60
Vak 6b	2-2_0046	4,24	0,60
Vak 6c	2-2_0044	4,26	0,60
Vak 6d	2-2_0020	4,26	0,60
Vak 6e	2-2_0012	4,26	0,60
Vak 6f	2-2_0011	4,26	0,80

Bijlage F. Waterstandsverloop tegen dijkprofiel 0020

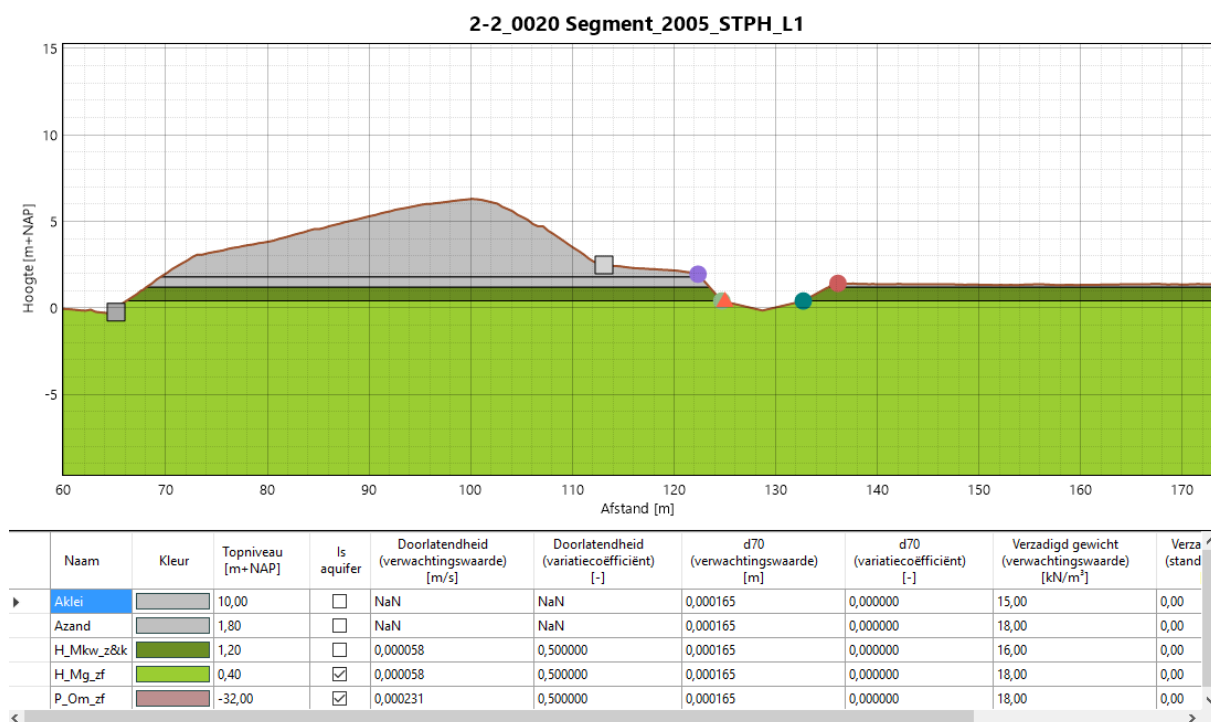
Onderstaande figuur geeft de waterhoogtes in de tijd bij dijkprofiel locatie 0020 van Ameland. De groene lijn geeft het waterstandsverloop bij een storm weer bij een herhalingsjijd van 1000 jaar. Het polderpeil dat gebruikt wordt voor de berekeningen in D-Geo Flow zal hetzelfde polderpeil zijn als gebruikt in de huidige rekenmethode. Dit is een polderpeil van 0,60 meter.



Figuur F1 - Waterstandsverloop tegen dijkprofiel 0020 met de waterstand als functie van de tijd (*HKV lijn in water, 2017*)

Bijlage G. Schematisatie dijkprofiel 0020 in Riskeer

De onderstaande figuur laat de schematisatie van dijkprofiel 0020 in Riskeer zien.



Figuur G1 - Schematisatie dijkprofiel 0020 in Riskeer

Bijlage H. Resulterende faalkansen per dijkvak van Ameland

De resulterende faalkansen per dijkvak voor de dijk van Ameland zijn weergegeven in onderstaande tabel. Bij de vakken waar sprake is van een zandondergrond (vak 3b, 4a, 4b, 5a, 6b) is de faalkans verwaarloosbaar gesteld. Dit is te zien aan de tweede kolom “eenvoudige toets” waar FV is ingevuld. De derde kolom laat de faalkans zien met berekeningen van de gedetailleerde toets per vak, die resulteren uit het programma Riskeer.

Tabel H1 - Resultaten piping Ameland

Vak	Eenvoudige toets	Gedetailleerde toets [1/jaar]
Vak 1	-	1/4.814.455
Vak 2	-	1/1.951.906
Vak 3a	-	1/123.907
Vak 3b	FV	-
Vak 3c	-	1/152.043
Vak 4a	FV	-
Vak 4b	FV	-
Vak 5a	FV	-
Vak 5b	-	1/2.729.872
Vak 6a	-	1/2.190.590
Vak 6b	FV	-
Vak 6c	-	1/87.144
Vak 6d	-	1/20.161
Vak 6e	-	1/81.161
Vak 6f	-	1/135.236

Bijlage I. Stappen bij het invoeren van een dijkprofiel in D-Geo Flow

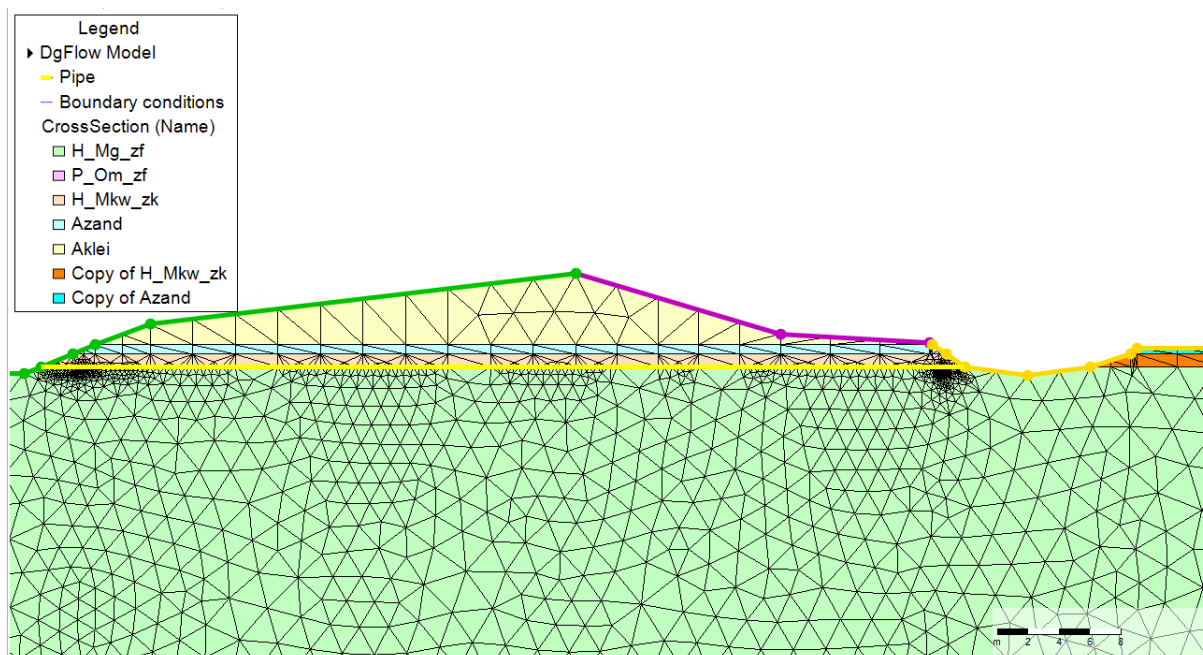
De volgende stappen worden doorgelopen bij het invoeren van een dijkprofiel in D-Geo Flow.

1. Als eerste moet een nieuw project aangemaakt worden.
2. Binnen het nieuwe project wordt er begonnen met het invullen van de parameters: de dagen waarover het programma moet gaan rekenen (de begin- en eindtijd), het aantal tijdstappen die je wil dat het programma uitvoert, de zwaartekracht, de MPicard, de grondsoorten met de bijbehorende eigenschappen per grondsoort en de eigenschappen van water.
3. Hierna moeten boorprofielen in het programma ingevoerd worden. Door op verschillende plaatsen boorprofielen in te voeren, kan een dijkprofiel gevormd worden. Het programma combineert de boorgaten met elkaar om een dijkprofiel te genereren door de grondlagen aan elkaar te koppelen.
4. Vervolgens moeten randvoorwaarden toegekend worden aan het dijkprofiel. Met deze randvoorwaarden kunnen de (tijdsafhankelijke) waterstanden aan de waterzijde van de dijk toegekend worden, het polderpeil aan de polderzijde, een kwelstroming randvoorwaarde aan de achterzijde van de dijk en een 'geen stroming' grenswaarde aan de niet doorlatende lagen.
5. Hierna moet de plaats van de pipe toegekend worden. Dit wordt gedaan door het intredepunt, het uittredepunt en de diepte van de pipe in te voeren.
6. Nadat de pipe is ingevoerd, moet de 'Grid' gegenereerd worden. Hiervoor moet een 'mesh coarseness' en een 'pipe coarseness' ingevoerd worden. Deze waarden geven aan hoe groot de gaas elementen gemiddeld moeten worden. Met deze waarden kan het programma zelf de Grid genereren.

Hierna is alles ingevoerd in het programma en kan het model gerund worden, waarbij het berekeningen kan gaan uitvoeren.

Bijlage J. Schematisatie dijkprofiel 0020 in D-Geo Flow

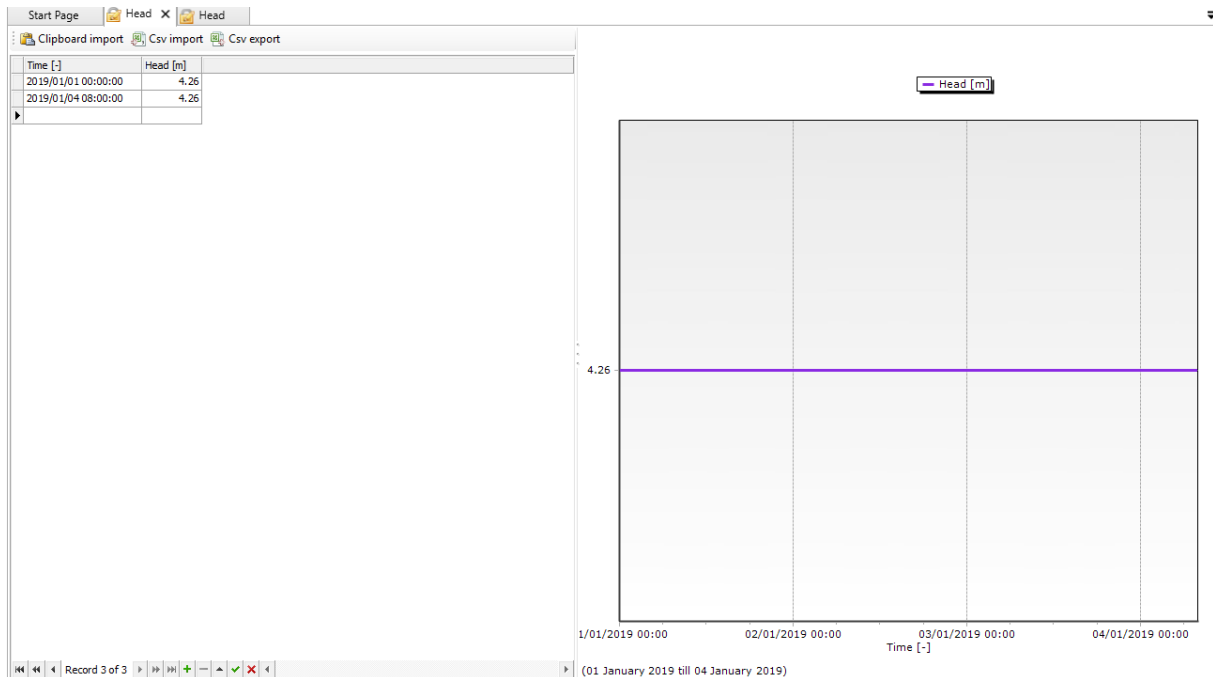
In de onderstaande figuur is de schematisatie van dijkprofiel 0020 in D-Geo Flow zichtbaar.



Figuur J1- Schematisatie dijkprofiel 0020 in D-Geo Flow

Bijlage K. Resultaten scenario 1

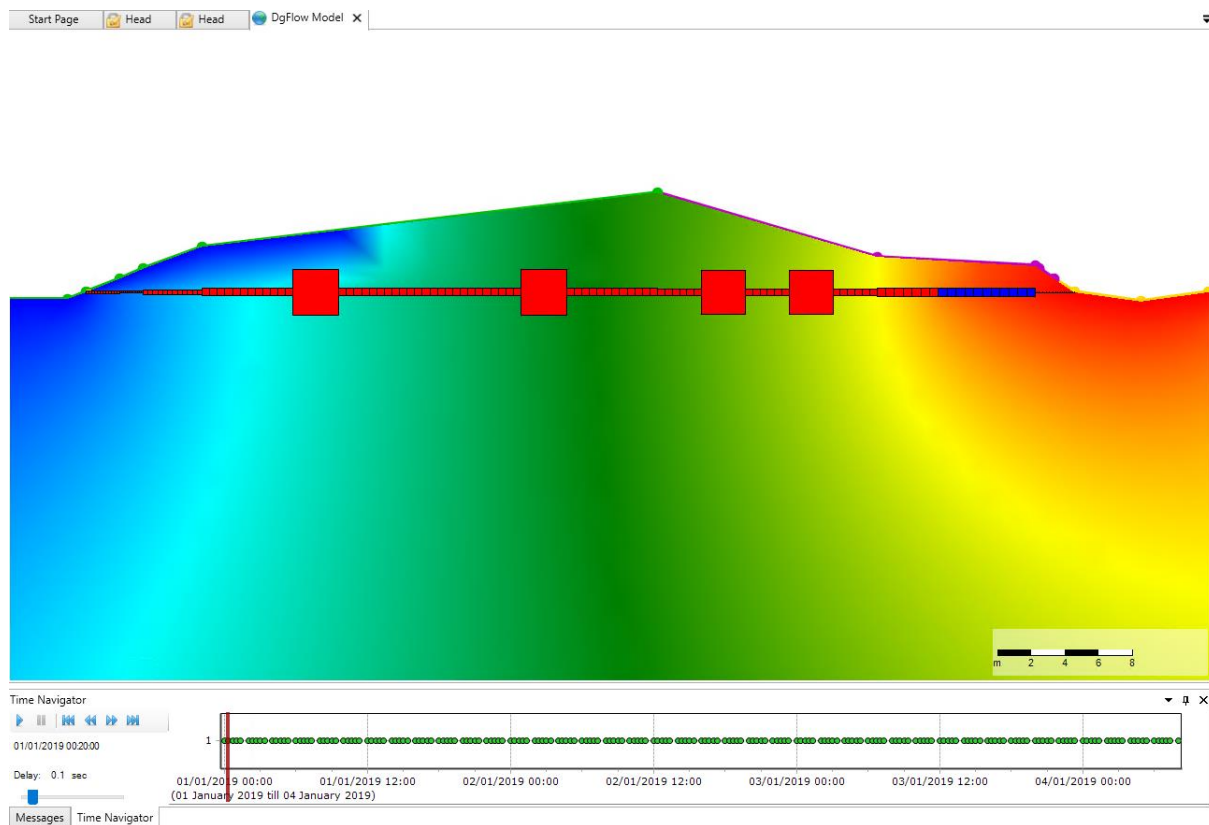
De waterstand die ingevoerd is in D-Geo Flow bij een stationaire waterstand is 4,26 meter. Dit is weergegeven in Figuur K1. Het resultaat van het verval dat de pipe doet vormen is weergegeven in Figuur K2, er is te zien dat bij een verval van 3,66 meter een pipe vormt met een lengte van 8 meter. Er zijn geen hogere vervallen gemeten waarbij de pipe verder groeit, waardoor er geen kritiek verval ontstaat. Het pipe gedeelte dat ontstaan is, is weergegeven in Figuur K3.



Figuur K1 - Invoer waterstand bij een berekening met stationaire waterstand van 4,26 meter in D-Geo Flow



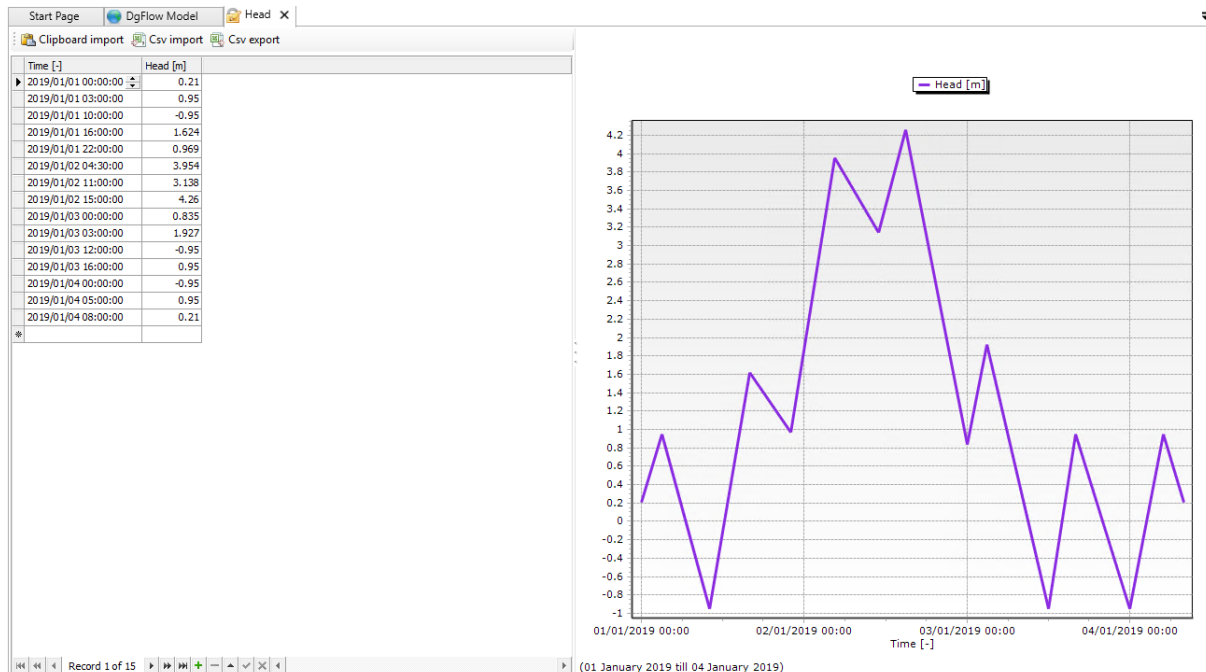
Figuur K2 - Resultaat 'Equilibrium Head drop' met een stationaire waterstand van 4,26 meter in D-Geo Flow



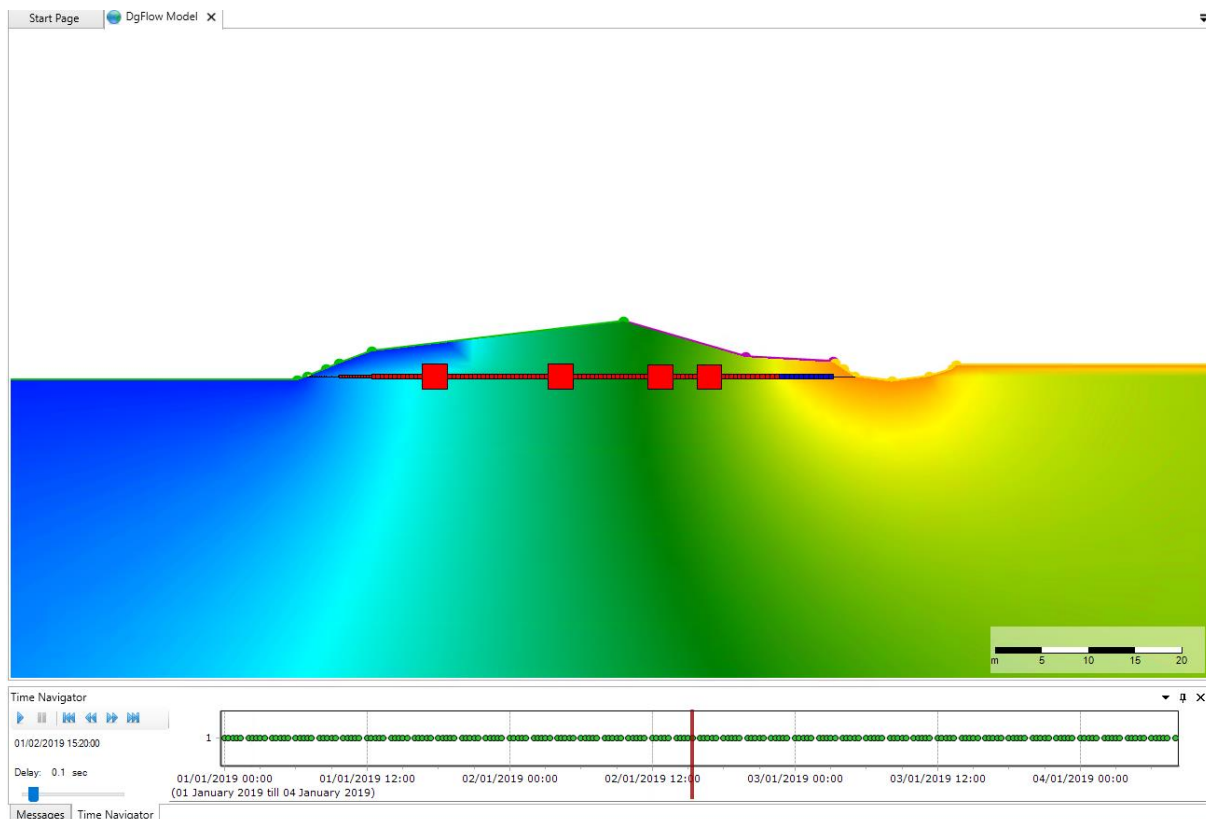
Figuur K3 - Gevormde pipe bij een stationaire waterstand van 4,26 meter

Bijlage L. Resultaten scenario 2

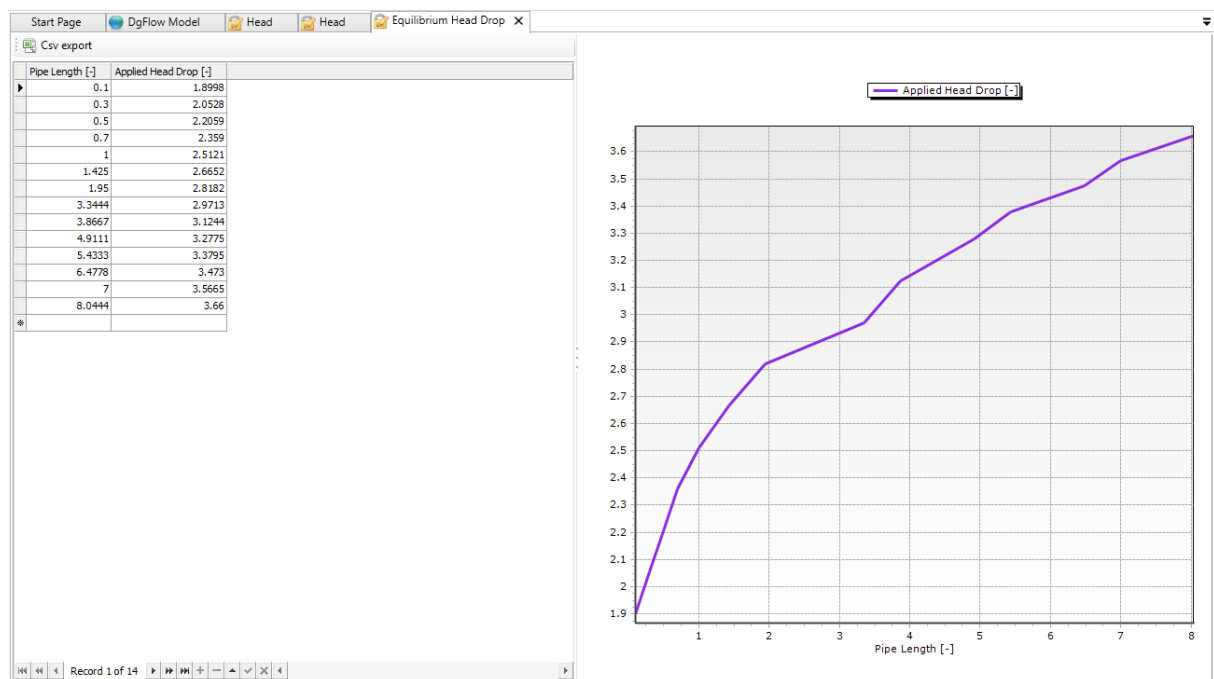
In Figuur L1 is de ingevoerde tijdsafhankelijke waterstand weergegeven. In Figuur L2 is weergegeven tot hoever de pipe is gevormd. De blauwe vakjes geven aan dat er een pipe gevormd is, de rode dat er nog geen pipe gevormd is. In Figuur L3 is het resultaat van de berekening met deze tijdsafhankelijke waterstanden te zien. Er wordt geen kritiek verval bereikt, het dijkprofiel faalt niet.



Figuur L1 - Invoer tijdsafhankelijke waterstanden in D-Geo Flow voor dijkprofiel 0020



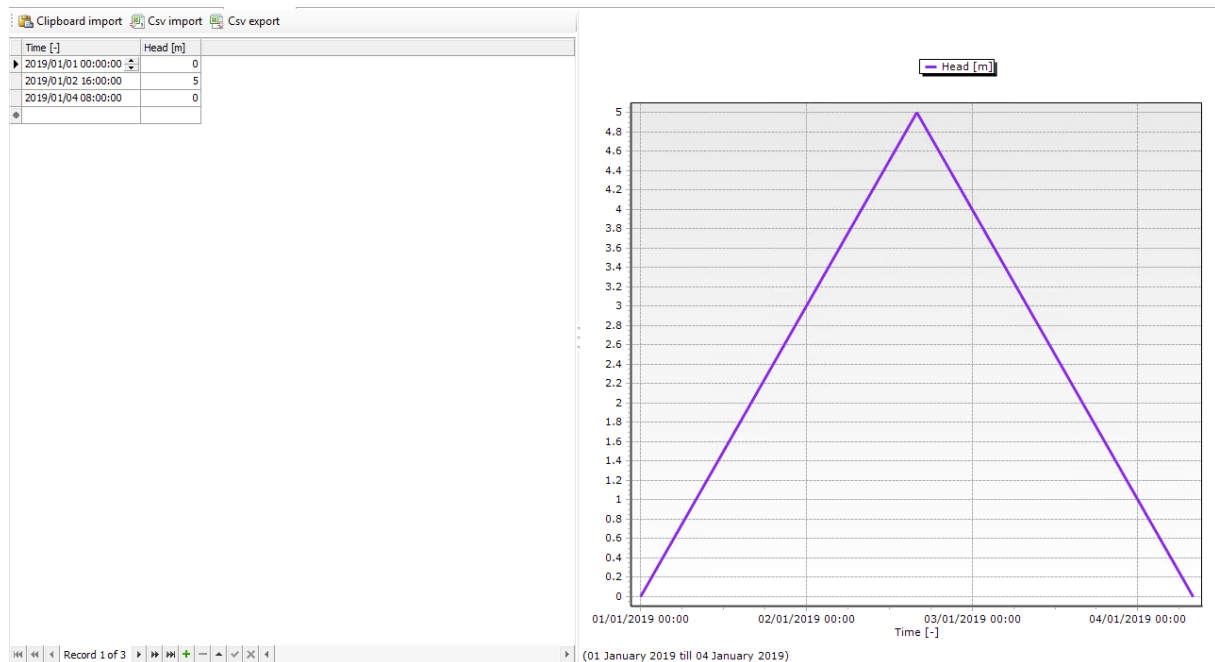
Figuur L2 - Resultaat D-Geo Flow: de gevormde pipe



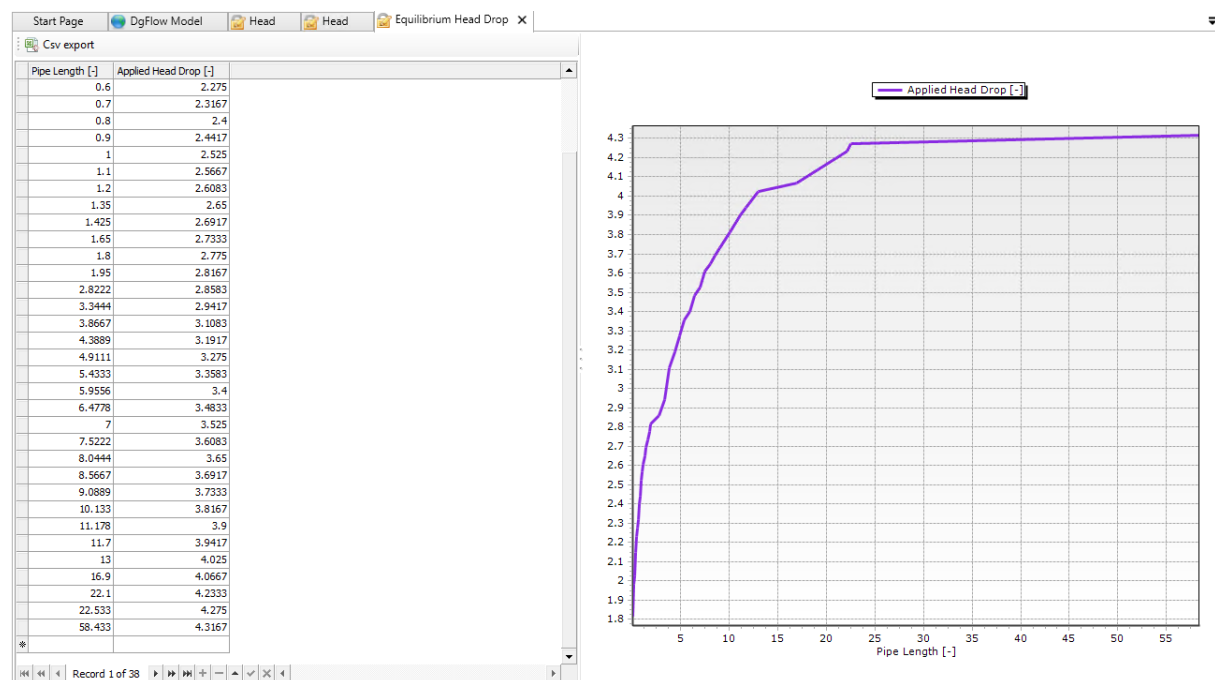
Figuur L3 - Resultaat 'Equilibrium head drop' voor tijdsafhankelijke waterstand D-Geo Flow

Bijlage M. Resultaten scenario 3

De waterstand die is ingevoerd bij deze berekening is een waterstand die oploopt van 0 tot 5 meter in de tijd. Dit is gedaan zodat er een kritiek verval gevonden kan worden. De invoer is weergegeven in Figuur M1. Het resultaat van het verval waarbij de pipe groeit en het kritieke verval waarbij de dijk faalt is weergegeven in Figuur M2. Figuur M3 geeft de gegroeide pipe weer voordat het kritieke verval bereikt is en Figuur M4 laat de tijdstap zien waarbij het kritieke verval bereikt is en de dijk faalt.



Figuur M1 – Invoer waterstand bij een berekening met een oplopende waterstand van 0 tot 5 meter in D-Geo Flow



Figuur M2 - Resultaat 'Equilibrium Head drop' met een oplopende waterstand van 0 tot 5 meter in D-Geo Flow

De faalkans is berekend aan de hand van de formules die beschreven zijn in hoofdstuk 5.1. Dit is als volgt berekend:

Faalkans berekening met kritiek
verval

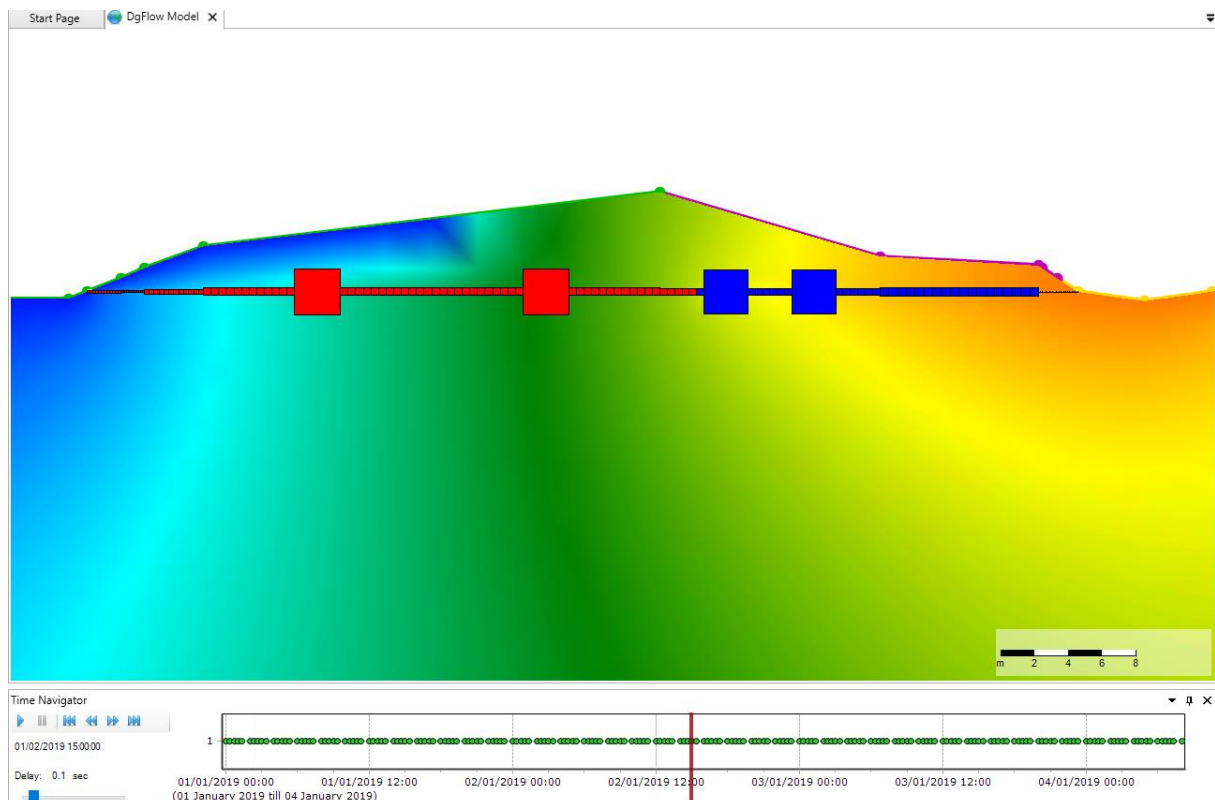
F_p	0,971590909
ΔH_c	4,275
h	5
h_{exit}	0,6
r_c	0,3
D_{deklaag}	0

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}$$

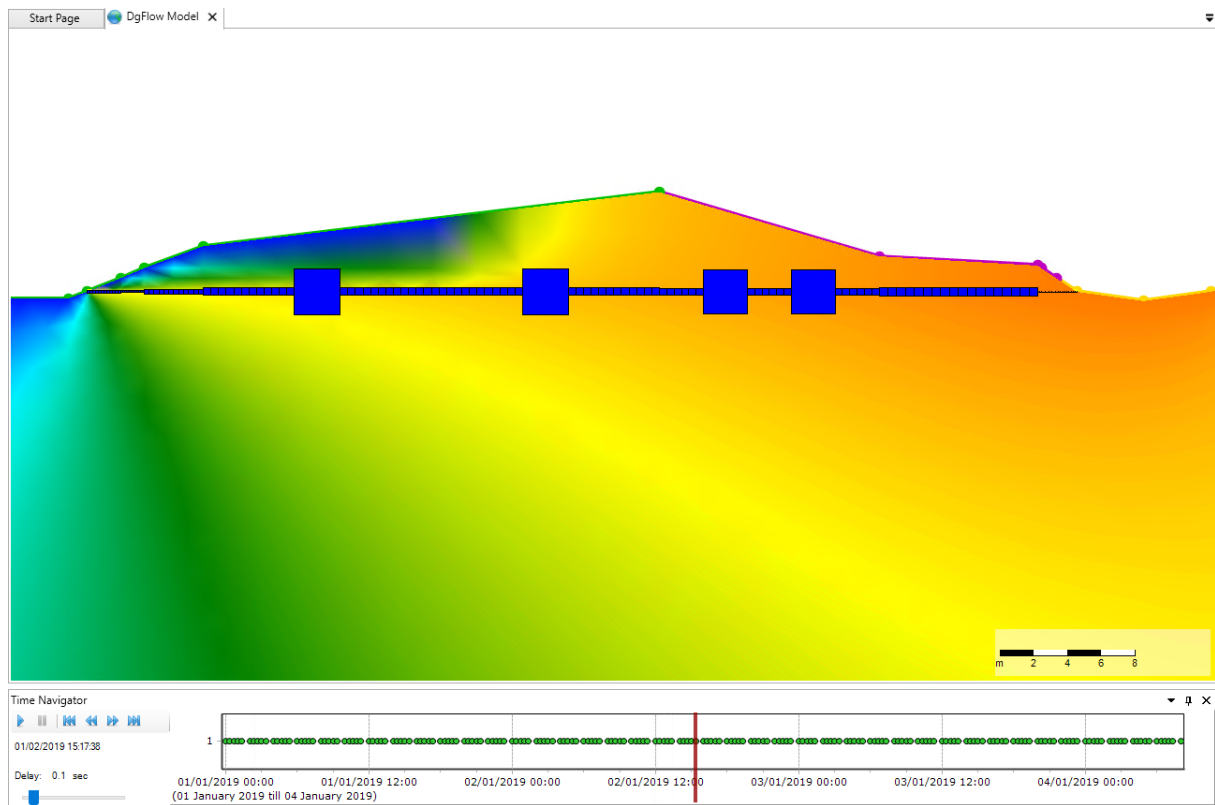
P_{f,p}	0,000327857 is 3050,1072
F_p	0,971590909
φ	normaal verdeling
β_{norm}	3,090232306

$$P_{f,p} = \varphi \left(-\frac{\ln \left(\frac{F_p}{1.04} \right) + 0.43 \beta_{norm}}{0.37} \right)$$

Dus faalkans tijdsafhankelijke waterstand = 1/3050 jaar.



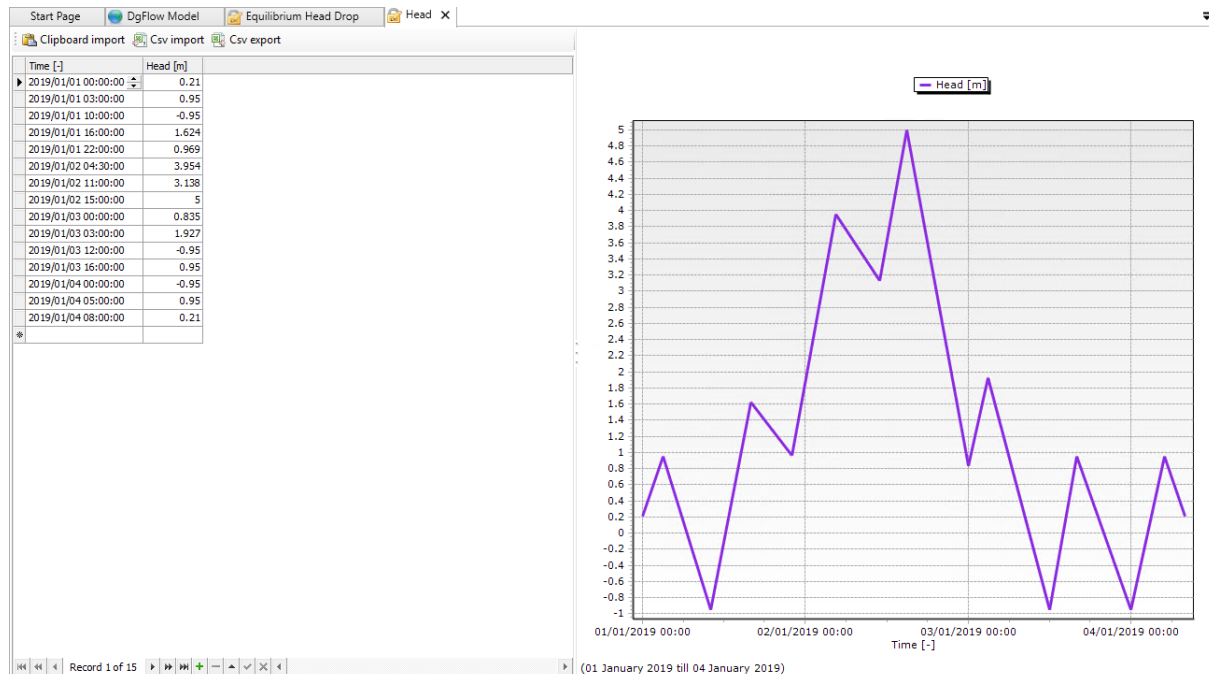
Figuur M3 - De tijdstap voordat het kritieke verval bereikt is met een stationaire oplopende waterstand van 0 tot 5 meter



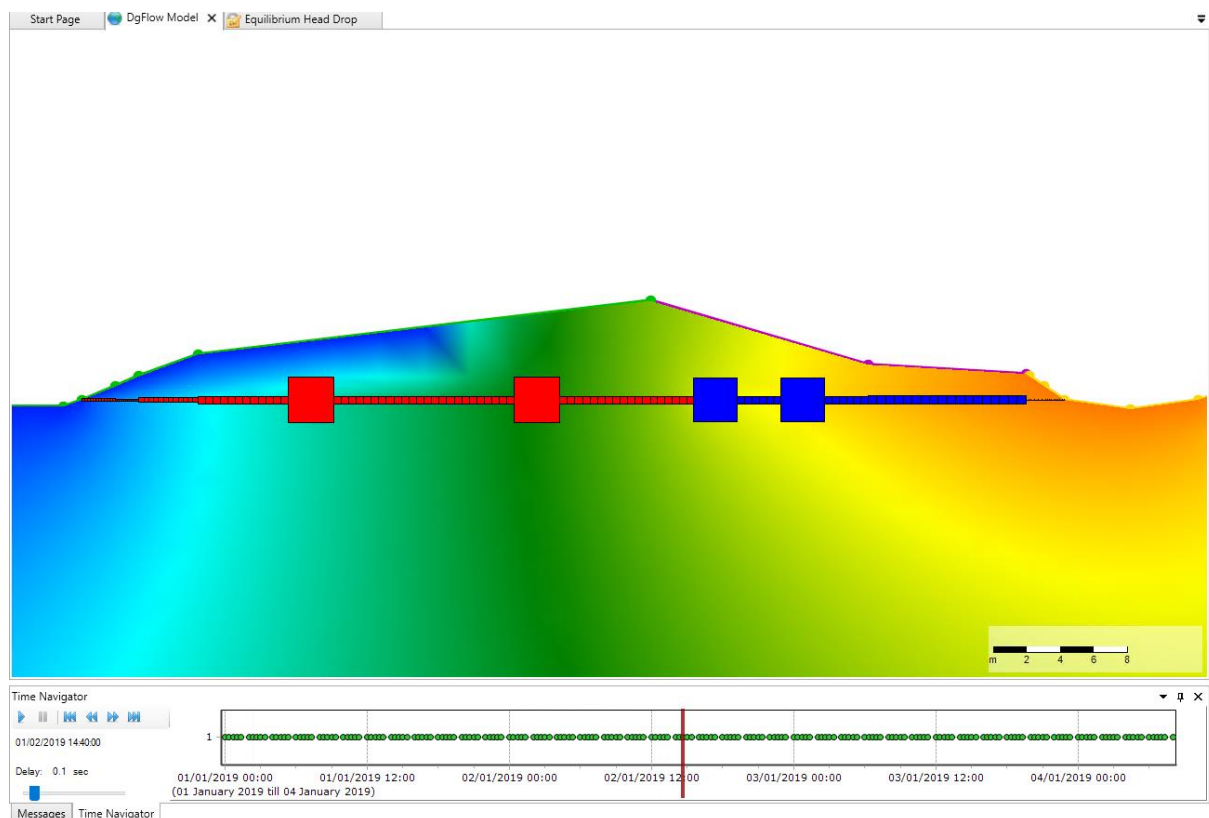
Figuur M4 - De tijdstap waarbij het kritieke verval bereikt is met een stationaire oplopende waterstand van 0 tot 5 meter

Bijlage N. Resultaten scenario 4

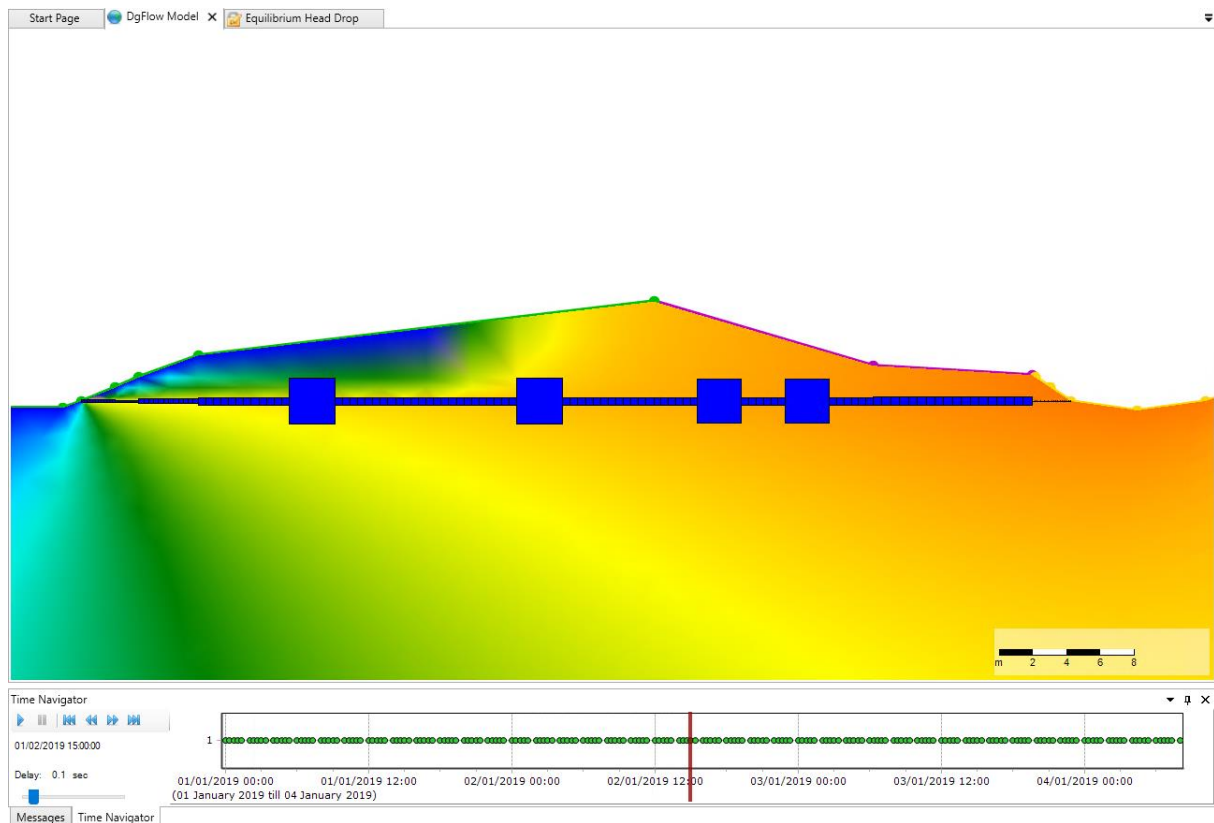
De ingevoerde waterstandsverloop is weergegeven in Figuur N1. Het resultaat in de vorm van de visuele representatie van de pipe is weergegeven in Figuur N2 en Figuur N3. In Figuur N4 is het resultaat van het (kritieke) verval weergegeven.



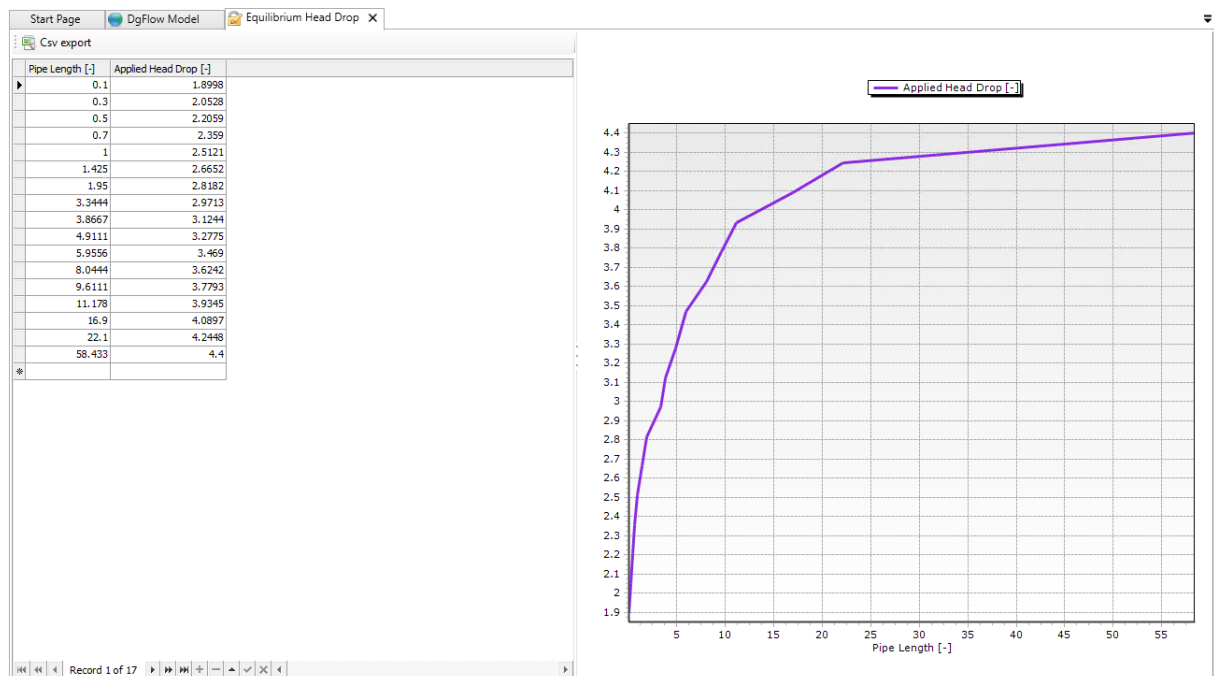
Figuur N1 - Invoer tijdsafhankelijke waterstand met een verhoogde piek van 5 meter in D-Geo Flow



Figuur N2 - Resultaat: de pipe bij de tijdstap voor het kritieke verval



Figuur N3 - Resultaat: de pipe bij de tijdstap na het kritieke verval



Figuur N4 - Resultaat 'Equilibrium head drop' voor tijdsafhankelijke waterstand met een verhoogde piek van 5 meter in D-Geo Flow

De faalkans is berekend aan de hand van de formules die beschreven zijn in hoofdstuk 5.1. Dit is als volgt berekend:

Bijbehorende Faalkans:

F _p	0,964727273
ΔH _c	4,2448
h	5
h _{exit}	0,6
r _c	0,3
D _{deklaag}	0

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}$$

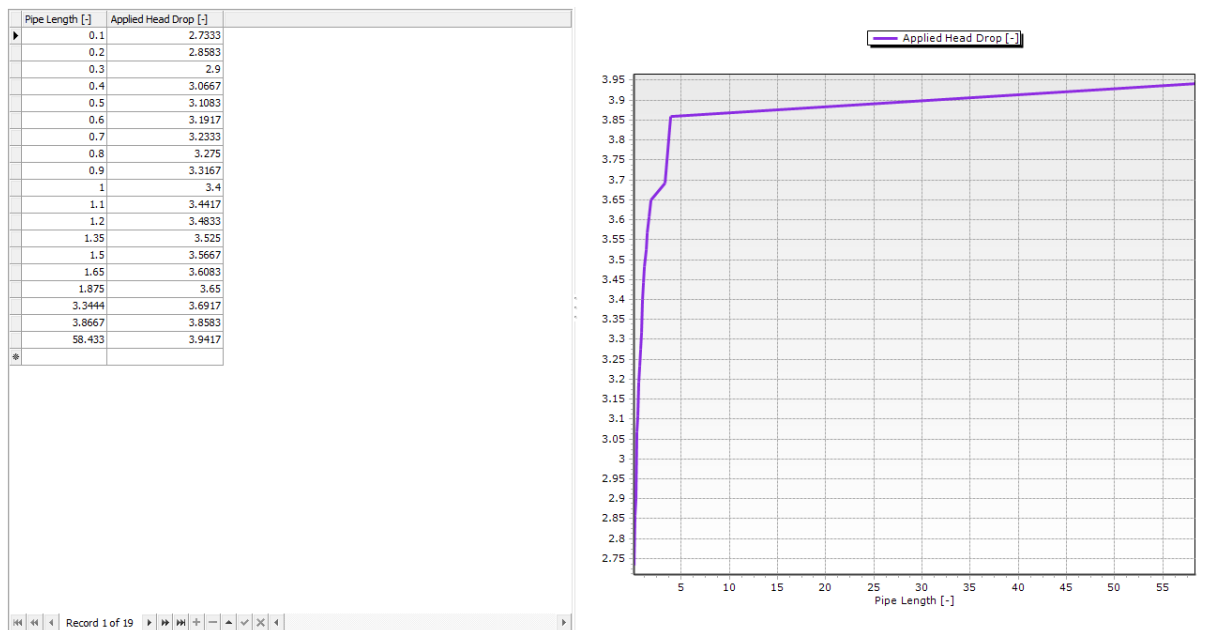
P _{f,p}	0,000351642	is	2843,7995
F _p	0,964727273		
φ	normaal verdeling		
β _{norm}	3,090232306		

$$P_{f,p} = \varphi \left(- \frac{\ln \left(\frac{F_p}{1.04} \right) + 0.43 \beta_{norm}}{0.37} \right)$$

Dus faalkans tijdsafhankelijke waterstand = 1/2844 jaar.

Bijlage O. Resultaten scenario 5

Het resultaat van het (kritieke) verval met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel en een stationaire waterstand is zichtbaar in Figuur O1.



Figuur O1 - Resultaat 'Equilibrium head drop' met het grondwaterstromingsmodel en een stationaire oplopende waterstand van 0 tot 5 meter

De volgende berekeningen zijn gemaakt om deze uitkomst om te rekenen naar een faalkans:

	0,876886	
F_p	4	
ΔH_c	3,8583	
h	5	
h_{exit}	0,6	
r_c	0,3	
D_{deklaa}		
g	0	

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaa})}$$

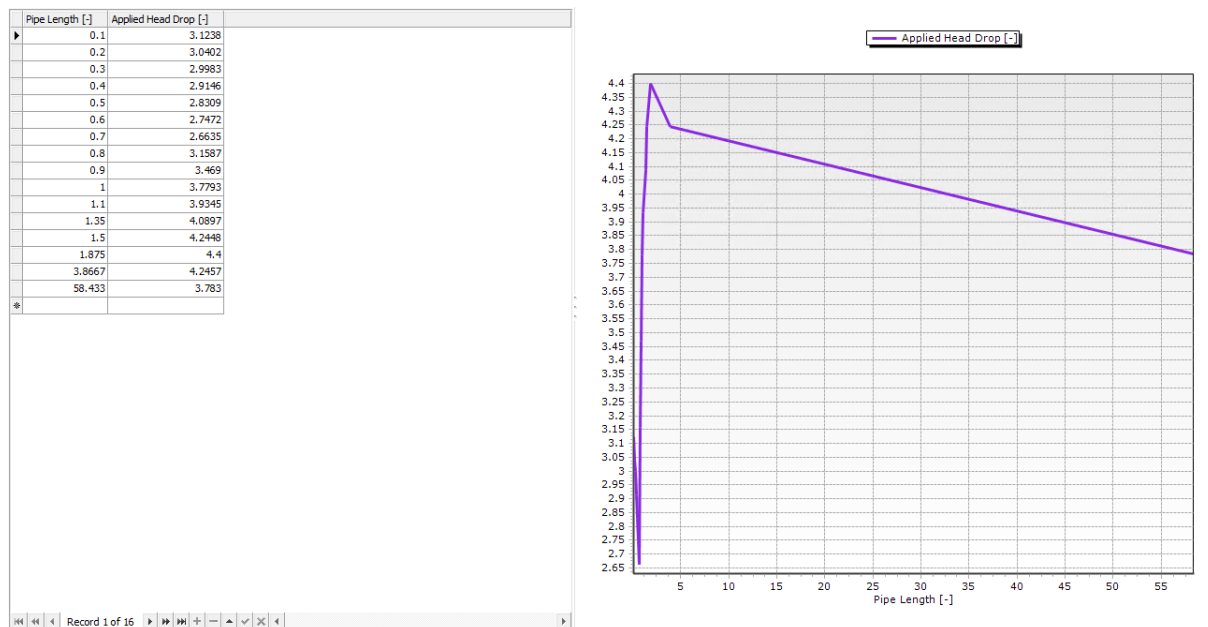
P_{f,p}	0,0008732	is	1145,190
F_p	0,876886		
φ	normaal verdeling		
β_{norm}	3,0902323		

$$P_{f,p} = \varphi \left(- \frac{\ln \left(\frac{F_p}{1.04} \right) + 0.43 \beta_{norm}}{0.37} \right)$$

Dus faalkans tijdsafhankelijke waterstand = 1/1145 jaar.

Bijlage P. Resultaten scenario 6

Het resultaat van het (kritieke) verval met het gebruik van het grondwaterstromingsmodel en een tijdsafhankelijke waterstand is zichtbaar in Figuur P1



Figuur P1 - Resultaat 'Equilibrium head drop' met het grondwaterstromingsmodel en een tijdsafhankelijke waterstand met een piek van 5 meter

De volgende berekeningen zijn gemaakt om deze uitkomst om te rekenen naar een faalkans:

F_p 0,9649318
 ΔH_c 4,2457
 h 5
 h_{exit} 0,6
 r_c 0,3
 $D_{deklaag}$ 0

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}$$

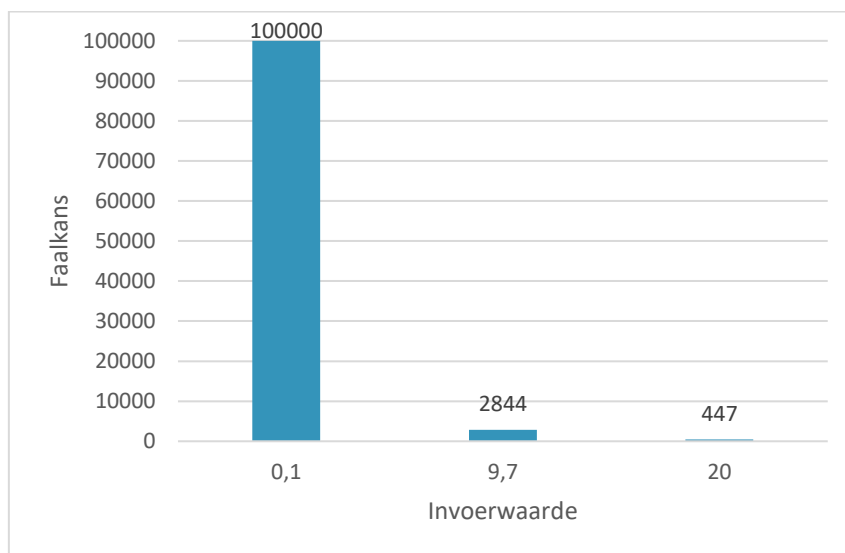
$P_{f,p}$ 0,0003509 is 2849,747
 F_p 0,9649318
 ϕ normaal verdeling
 β_{norm} 3,0902323

$$P_{f,p} = \phi \left(-\frac{\ln \left(\frac{F_p}{1.04} \right) + 0.43 \beta_{norm}}{0.37} \right)$$

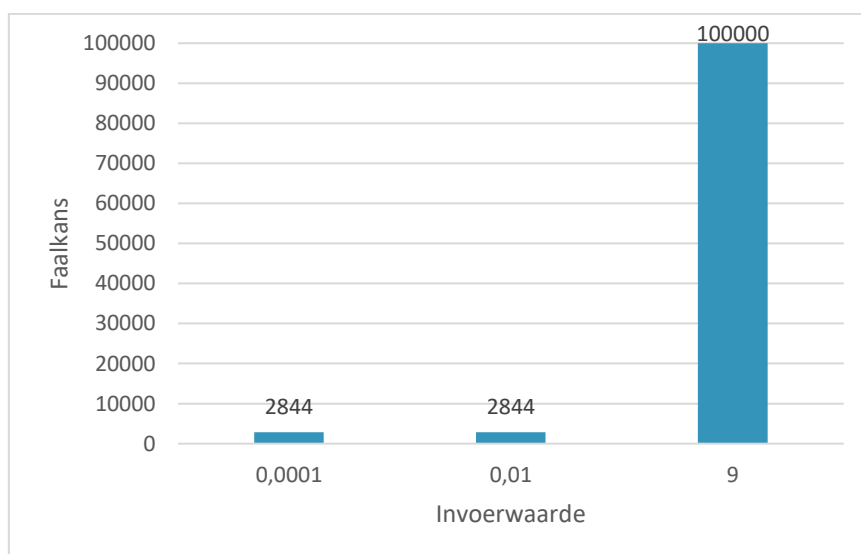
Dus faalkans tijdsafhankelijke waterstand = 1/2850 jaar.

Bijlage Q. Resultaten gevoeligheidsanalyse D-Geo Flow

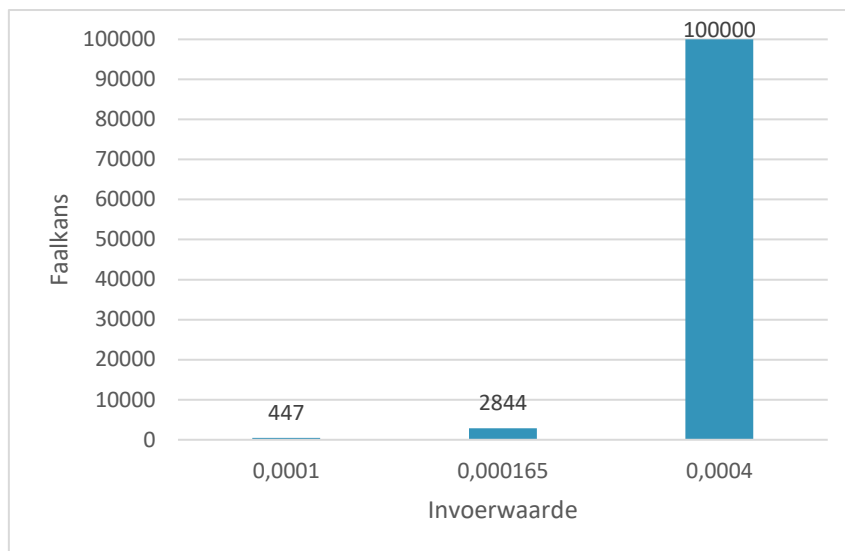
In deze bijlage worden de resultaten in de vorm van grafieken van de gevoeligheidsanalyse gegeven. Er is een gevoeligheidsanalyse gedaan voor de volgende parameters: de doorlatendheid, de korrelgrootte, het polderpeil en de waterstand. Figuur Q1 en Figuur Q2 laten de resultaten van de doorlatendheid zien. Figuur Q3 en Figuur Q4 laten de resultaten van de korrelgrootte zien. Figuur Q5 laat de resultaten van het polderpeil zien en Figuur Q6 de resultaten van de waterstand piek. Figuur Q7 en Figuur Q8 laten de resultaten van de samendrukbaarheid zien.



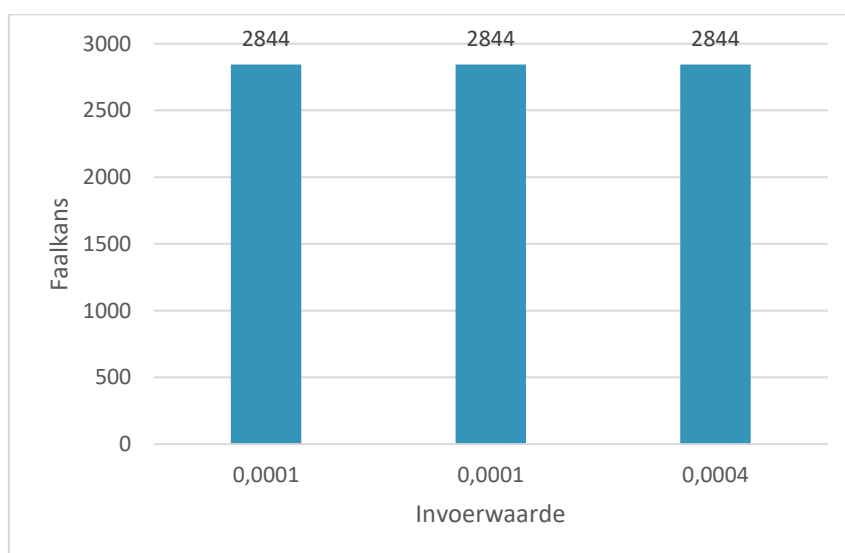
Figuur Q1 - Gevoeligheidsanalyse resultaten doorlatendheid H_Mg_zf



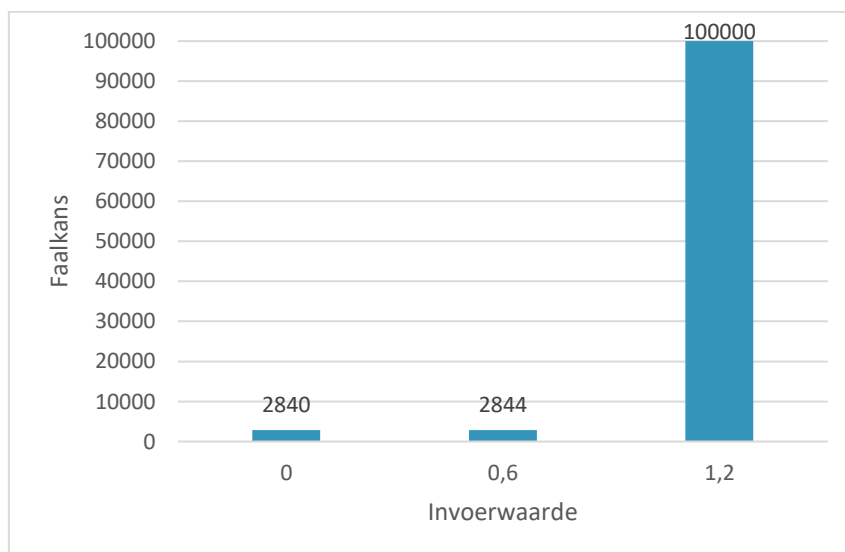
Figuur Q2 - Gevoeligheidsanalyse resultaten doorlatendheid H_Mkw_zk



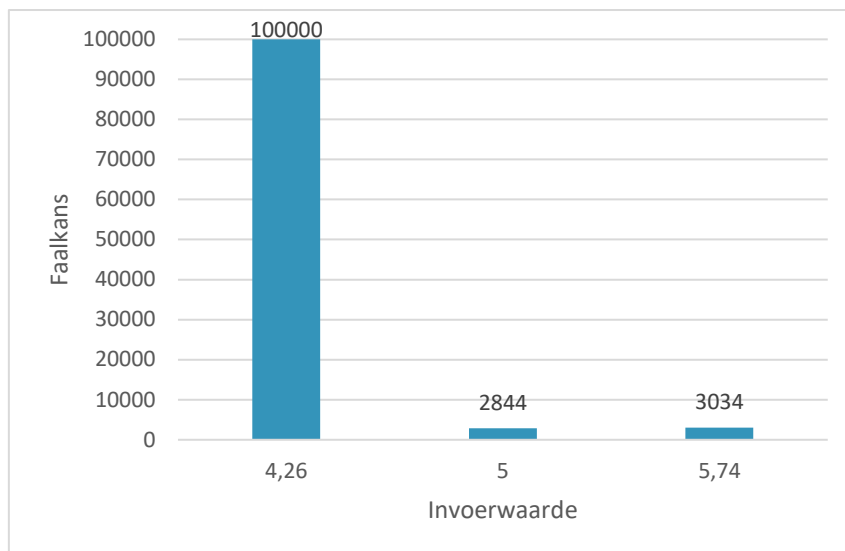
Figuur Q3 - Gevoeligheidsanalyse resultaten korrelgrootte H_Mg_zf



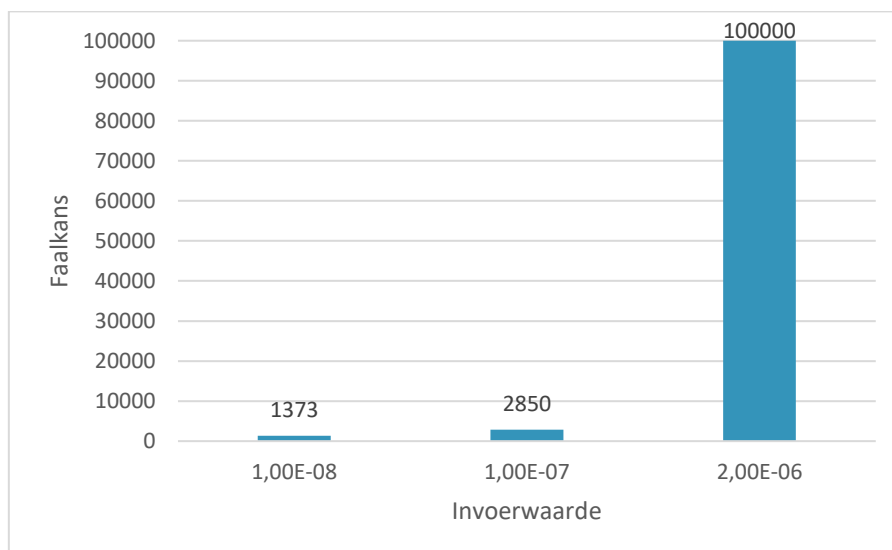
Figuur Q4 - Gevoeligheidsanalyse resultaten korrelgrootte H_Mkw_zk



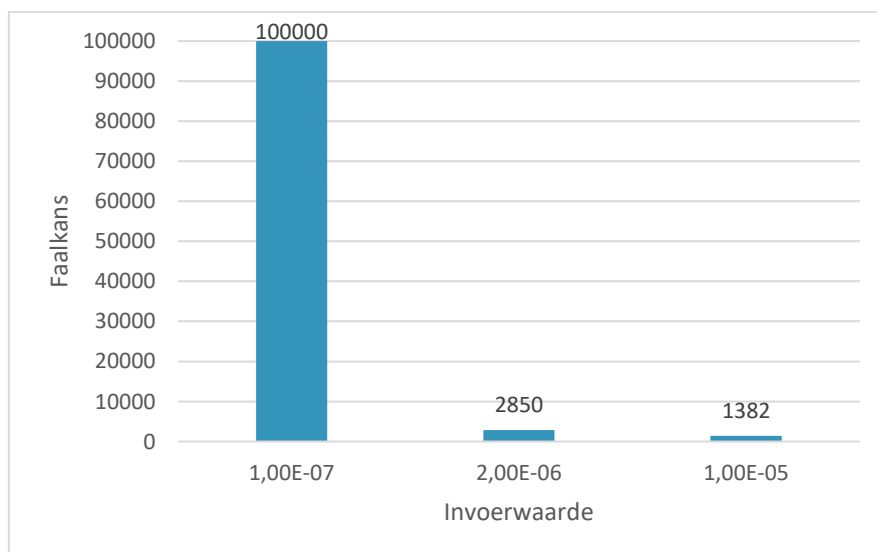
Figuur Q5 - Gevoeligheidsanalyse resultaten polderpeil



Figuur Q6 - Gevoeligheidsanalyse resultaten waterstand piek



Figuur Q7 - Gevoeligheidsanalyse resultaten Samendrukbaarheid H_Mg_zf



Figuur Q8 - Gevoeligheidsanalyse resultaten samendrukbaarheid H_Mkw_zf