

Factual Report

Terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières

Auteur: Alwin van der Burg

15-6-2023

I. INTRODUCTIE

Het onderzoek dat in dit factual report is beschreven, is uitgevoerd namens Heijmans B.V. en het SoSEAL innovatie team. Dit onderzoek is uitgevoerd om de ontwikkeling van de innovatie SoSEAL als piping maatregel verder te brengen. Dit is gedaan binnen het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM). SoSEAL is een mengsel van organisch materiaal en aluminium-chloride. Door injectie in het watervoerendpakket onder een dijklichaam kan het de doorlatendheid van het zand sterk reduceren. Hierdoor nemen de horizontale grondwaterstromingen achter de barrière af. Hierdoor wordt de ontwikkeling van een pipe belemmerd en treedt er minder snel piping op. SoSEAL heeft dus als doel om het faalmechanisme piping tegen te gaan, zie Figuur 1 waarin het principe van SoSEAL is gevisualiseerd.



Figuur 1 Schematisatie SoSEAL als piping maatregel

Dit Factual Report presenteert de resultaten en aanbevelingen van het afstudeeronderzoek naar terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières. De onderbouwingen en methodes van het onderzoek zijn uitgebreid beschreven in het *Onderzoeksrapport Terugschrijdende erosie bij SoSEAL Barrières*. Hierin is onderzocht hoe een SoSEAL barrière in staat is om piping tegen te gaan en hoe goed D-Geo Flow dit kan voorspellen. Daarvoor zijn op kleine schaal laboratoriumproeven uitgevoerd in de Rotated box van Deltares, die is afgebeeld in de kop van dit rapport. Daarnaast is met behulp van een numerieke modelstudie onderzocht of de modellering van de pijngroei in D-Geo Flow overeenkomt met de resultaten uit de laboratoriumproeven.

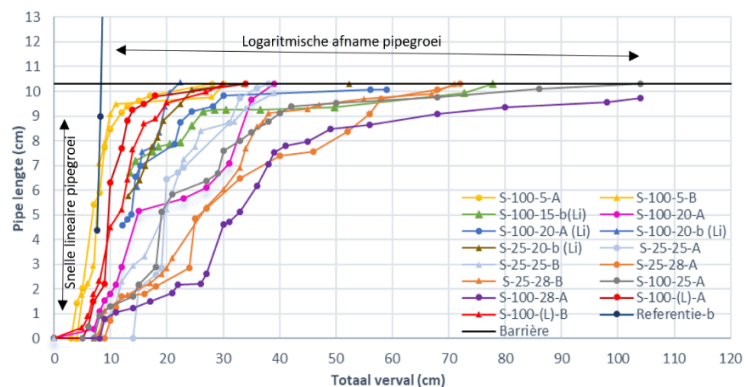
In de verschillende laboratoriumproeven is gevarieerd in de lengte, doorlatendheid en geometrie van de SoSEAL barrières. Tijdens de proeven is het verval stapsgewijs verhoogd, waarna de resulterende pijngroei is gemeten en grafisch is weergegeven. Deze verschillende proeven zijn ook gemodelleerd en doorgerekend in D-Geo Flow. In totaal zijn er elf proeven uitgevoerd en zijn acht proeven overgenomen uit eerder onderzoek van Li (Li, 2022).

II. LABORATORIUMPROEVEN

De pipegroei van de laboratoriumproeven is gemeten en weergegeven in grafieken, waarbij de lengte van de pipe is uitgezet tegen het bijbehorende verval. De grafieken van de verschillende proeven zijn geanalyseerd en met elkaar vergeleken. Hieruit zijn verbanden en conclusies getrokken omtrent de validiteit van de proeven. De proeven hebben unieke proef-ID's gekregen. De proef-ID's zijn opgebouwd aan de hand van de volgende structuur: barrière materiaal (S=SoSEAL) – doorlatendheidsreductie (25 of 100 keer) - barrière lengte (in centimeters) of (L) - eerste proef (a) of tweede proef (b). In het onderstaande hoofdstuk zijn de belangrijkste bevindingen uit de laboratoriumproeven gepresenteerd.

Validiteit van de laboratoriumproeven

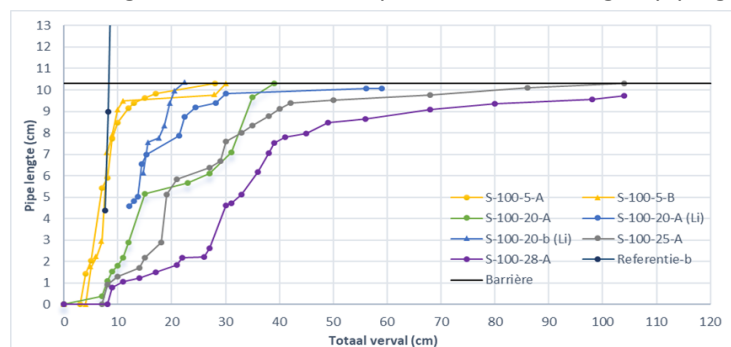
Als eerst is de validiteit van de proeven onderzocht. Dit is gedaan door de relatieve dichtheden van de proeven te vergelijken en de pipegroei in de dubbel uitgevoerde proeven te analyseren. Uit de relatieve dichtheden van het zand in de proeven blijkt dat er twee afwijkende proeven zijn met een aanzienlijk lagere dichtheid van het zand. Dit betreft proef S-25-20-a (Li) en S-100-20-a (Li). Daarom zijn deze proeven niet meegenomen in de verdere analyse. De overige proeven hebben een relatieve droge dichtheid van circa 1700kg/m^3 en wijken nauwelijks van elkaar af. Uit de vergelijking van de dubbel uitgevoerde proeven is gebleken dat alle pipegroei-lijnen dezelfde vorm hebben, dit is afgebeeld in Figuur 2. Er is echter één opvallende uitschieter tussen de proeven, namelijk proef S-100-15-b (weergegeven in het groen). Het is te zien dat deze proef aanzienlijk meer weerstand biedt dan de proeven S-100-20, waarbij een langere barrière en dezelfde doorlatendheidsreductie is toegepast. Om deze reden is besloten om proef S-100-15-b niet verder mee te nemen in de analyse. Omdat er veel consistentie is in de dichtheden en de vorm van pipegroei van de proeven, kan geconcludeerd worden dat de proeven goed zijn uitgevoerd en valide zijn op uitzondering van de weggelaten proeven na.



Figuur 2 Pipegroei uit alle laboratoriumproeven

Effect van de lengte van de SoSEAL barrière

Tijdens de analyse van de resultaten van de laboratoriumproeven is naar verbanden gezocht. Hierin is waargenomen dat de lengte van de barrière een grote invloed heeft op de weerstand tegen piping. Allereerst is daarvoor geconcludeerd dat SoSEAL aanzienlijk meer weerstand biedt dan wanneer er geen barrière aanwezig is, dit is te zien in Figuur 3. In deze grafiek is de referentieproef geplott, waarin geen barrière aanwezig is. Er is duidelijk te zien dat bij de proeven met SoSEAL barrières een hoger verval nodig is om tot eenzelfde pipelengte te komen.



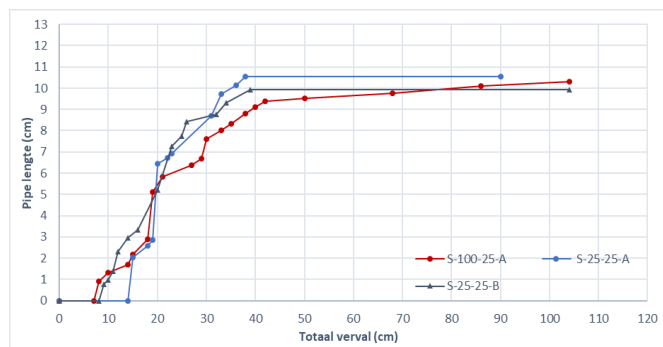
Figuur 3 Pipegroei laboratoriumproeven 100 keer reductie

Bovendien is vastgesteld dat een langere barrière met dezelfde doorlatendheidsreductie de ontwikkeling van de pipe vertraagt. Dit is duidelijk zichtbaar in Figuur 3. Hieruit blijkt dat bij een langere barrière de curve van de pipegroei lager loopt, wat aangeeft dat er een groter verval nodig is om dezelfde lengte van de pipe te bereiken in vergelijking met een kortere barrière. Dit verband kan worden verklaard door de vorming van een grotere en sterkere schaduwzone achter een langere barrière. Door de grotere schaduwzone heeft de barrière een grotere invloed op de grondwaterstroming. Dit resulteert in een uitgebreider en sterker beïnvloed gebied waar de horizontale stroming wordt verminderd. Hierdoor wordt de pipeontwikkeling geremd.

Invloed van de doorlatendheid van de SoSEAL barrière

Het tweede verband dat is waargenomen, is dat de doorlatendheidsreductie van de SoSEAL barrière minder invloed heeft op de initiële pipegroei, maar een grotere rol speelt naarmate de pipegroei dichterbij de barrière komt. Dit is waargenomen in de grafiek in Figuur 4 waarin de proeven met een

lengte van 25 cm maar verschillende doorlatendheidsreducties zijn weergegeven. In het beginstadium van de pipegroei, wanneer de pipe zich nog op afstand van de barrière bevindt, is er weinig verschil te zien tussen de barrières met verschillende doorlatendheidsreducties. Echter, naarmate de pipegroei dichterbij de barrière komt, worden de verschillen tussen de barrières met een doorlatendheidsreductie van 100 en 25 groter. Dit wijst erop dat een hogere



Figuur 4 Pipegroei laboratoriumproeven 25 cm barrières

doorlatendheidsreductie resulteert in een grotere weerstand tegen de pipegroei wanneer de pipe de barrière nadert. De voornaamste verklaring voor dit verband is dat de groei van de pipe voornamelijk afhankelijk is van de horizontale grondwaterstroming. In de nabijheid van de barrière zorgt de SoSEAL barrière voor een reductie van de horizontale stroming. De grootte van deze horizontale reductie is afhankelijk van de doorlatendheidsreductie van de barrière. Verder van de barrière wordt de stroming onder de barrière door dominantier en heeft de doorlatendheid van de SoSEAL barrière minder invloed op de pipeontwikkeling. Dit verklaart waarom de pipegroei van de verschillende proeven in het begin gelijkloopt en pas later verschillen vertonen.

Falen van de barrière

Het falen van de barrières is bij vier proeven opgetreden, dit betreft de proeven: S-100-5-a&b en S-100-(L)-a&b. Bij deze vier proeven traden vrijwel dezelfde processen op. Vóór het falen van de barrières zijn er meerdere pipes gevormd die de barrière bereikten, maar was er nog geen erosie aan de barrière waarneembaar. Het verval is nog aanzienlijk verhoogd totdat er in plaats van pipes een vlak ontstond dat zand richting de uitlaat afvoerde. Dit vlak wijst op het optreden van heave. Als gevolg van heave reduceerde de steundruk, doordat zand achter de barrière is weggevoerd. Hierdoor vervormde de barrière richting de uitlaat, zie Figuur 5. Als gevolg van deze vervorming kon er relatief snel een pipe door de barrière groeien, waardoor er hydraulische kortsluiting ontstond. Dit resulteerde in een extreem hoog debiet en zandtransport, en daarmee faalde de barrières.



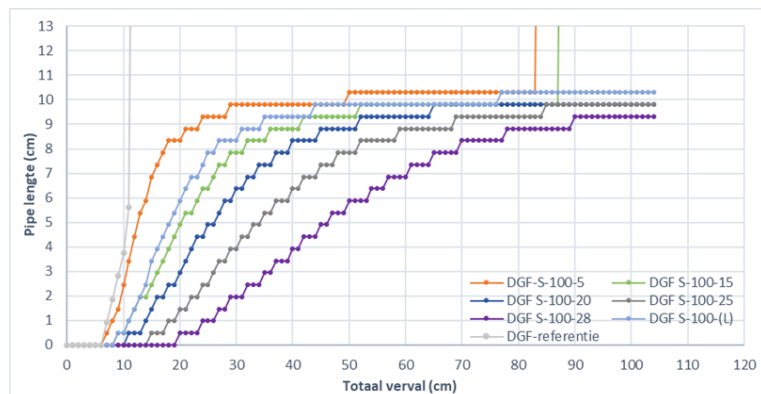
Figuur 5 Falen van de SoSEAL barrière

III. D-GEO FLOW

In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste bevindingen uit de D-Geo Flow modellen toegelicht. Voor iedere laboratoriumproef is een bijpassend D-Geo Flow model gemaakt die de proefopstelling in 2D schematiseert. Uit de modellen is de pipegroei geplot in grafieken waarbij wederom de lengte van de pipe is uitgezet tegen het bijbehorende verval. Uit de analyse van deze grafieken zijn twee verbanden waargenomen. Deze verbanden zijn hieronder toegelicht.

Lengte van de barrière

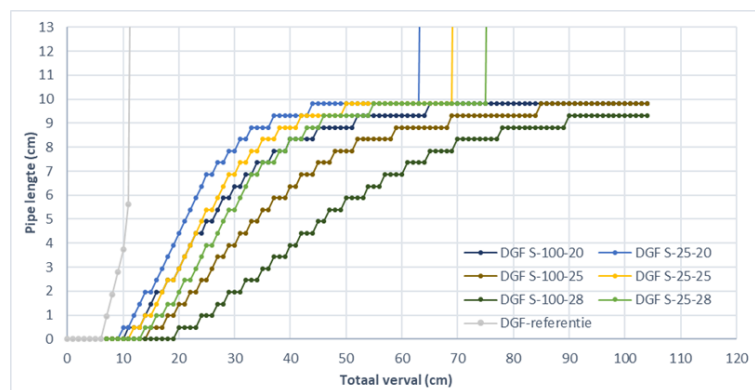
In Figuur 6 zijn de resultaten van de modelleringen weergegeven voor SoSEAL barrières met een doorlatendheidsreductie van 100 keer. Door de vergelijking met de referentieproef zonder barrière (weergegeven in het grijs), is duidelijk zichtbaar dat D-Geo Flow aanzienlijk meer weerstand voorspelt wanneer een SoSEAL barrière aanwezig is. De mate van weerstand hangt onder andere af van de lengte van de SoSEAL barrière. Volgens de berekeningen van D-Geo Flow resulteert een langere barrière in een langzamere ontwikkeling van de pipe. Daarnaast is te zien dat de absolute verschillen tussen de pipegroei groter worden naarmate de barrière langer is.



Figuur 6 Pipegroei D-Geo Flow 100 keer doorlatendheidsreductie

Doorlatendheidsreductie van de barrière

In Figuur 7 zijn de berekeningen van de pipegroei voor verschillende modellen met dezelfde lengte weergegeven. De modellen met dezelfde barrièrelengtes hebben dezelfde kleur. De modellen met een barrière met 100 keer reductie zijn donker weergegeven, de modellen met 25 keer reductie zijn licht weergegeven. Uit de grafiek is duidelijk af te leiden dat D-Geo Flow bij een hogere doorlatendheidsreductie aanzienlijk meer weerstand voorspeld, ongeacht de lengte van de barrière. Met andere woorden, een hogere doorlatendheidsreductie resulteert in een langzamere pipeontwikkeling volgens de berekeningen van D-Geo Flow. Bovendien is in Figuur 7 te zien dat het verschil tussen de modellen groter is bij langere barrières dan bij kortere barrières.



Figuur 7 Pipegroei D-Geo Flow zelfde barrière lengtes

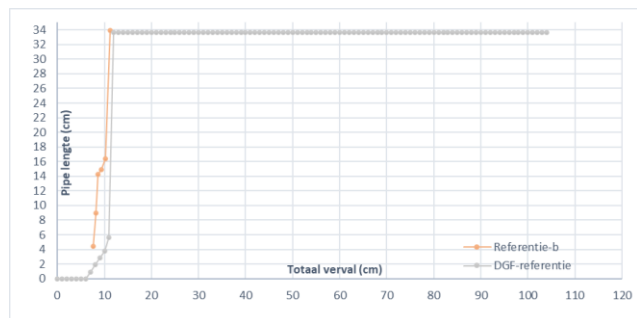
IV. VERGELIJKING D-GEO FLOW & LABORATORIUMPROEVEN

De pipegroei uit de laboratoriumproeven en de modelleringen in D-Geo Flow zijn samengevoegd en weergegeven in verschillende grafieken. Daarnaast zijn de procentuele en absolute verschillen berekend tussen de pipegroei uit de laboratoriumproeven en de voorspellingen van D-Geo Flow. Uit de analyse van deze grafieken zijn verbanden waargenomen en conclusies getrokken. Hieronder zijn deze bevindingen uitgewerkt.

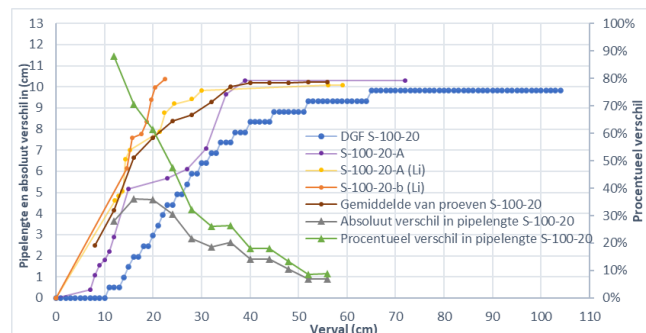
Generieke verbanden

Tijdens de analyse van de pipegroei uit D-Geo Flow en de laboratoriumproeven is vastgesteld dat de vorm van de pipegroei tussen de proeven en modellen vergelijkbaar is, dit is te zien in Figuur 9. Er is te zien dat bij zowel D-Geo Flow als de laboratoriumproeven eerst een snelle, lineaire pipegroei optreedt.

Naarmate de pipe dichterbij de barrière komt, neemt de groei logaritmisch af. Ook is waargenomen dat D-Geo Flow de pipegroei bij een situatie zonder barrière goed kan voorspellen, dit is weergegeven in Figuur 8. Om deze conclusie te onderbouwen, moeten er wel extra proeven uitgevoerd worden, omdat deze conclusie gebaseerd is op één proef. Vervolgens is uit de analyse naar voren gekomen dat bij aanwezigheid van een SoSEAL barrière, D-Geo Flow de pipegroei onderschat ten opzichte van de laboratoriumproeven. Deze observatie is van toepassing op alle uitgevoerde proeven, wat de betrouwbaarheid van deze conclusie versterkt. In Figuur 9 zijn de procentuele en absolute verschillen tussen D-Geo Flow en de laboratoriumproeven proeven weergegeven, van proef S-100-20. In de grafiek is te zien dat D-Geo Flow met name aan het begin de pipegroei onderschat. Naarmate de pipe verder naar het scherm groeit, nemen zowel de procentuele als absolute verschillen af. Er zijn meerdere verklaringen voor de onderschatting van de pipegroei. Deze verklaringen zijn uitgewerkt in paragraaf 8.2 in het onderzoeksrapport.



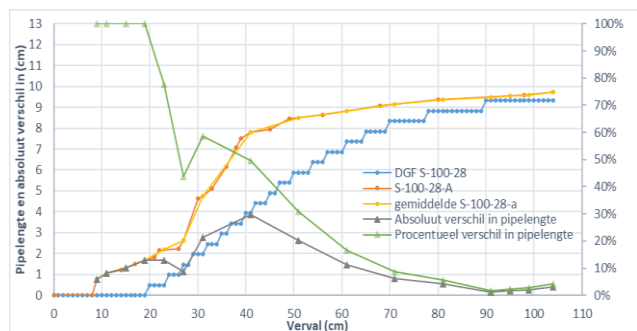
Figuur 8 Pipegroei vergelijking referentieproef



Figuur 9 Pipegroei vergelijking S-100-20

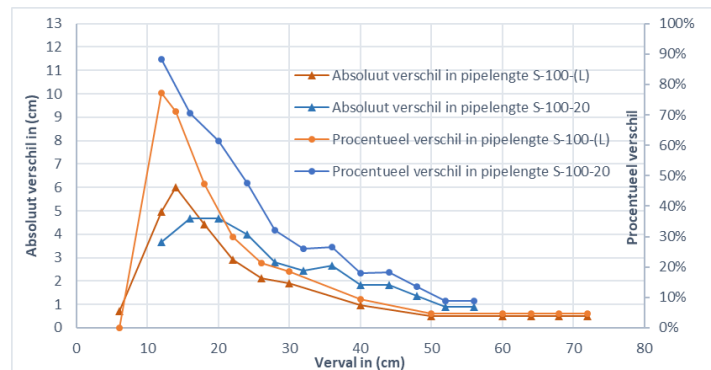
Lengte en vorm van de barrière

In de analyse is ook onderzocht of er verbanden tussen de lengte van de barrière en de voorspellingen van D-Geo Flow zijn. Echter, uit het onderzoek is gebleken dat er geen duidelijke verbanden zijn tussen de lengte van de barrières en de mate van onderschatting in van D-Geo Flow. In Figuur 10 zijn de absolute en procentuele verschillen weergegeven tussen de pipegroei uit de proeven en D-Geo Flow van S-100-28. Dit laat eenzelfde mate van onderschatting zien als in Figuur 9.



Figuur 10 Absolute en procentuele verschillen S-100-28

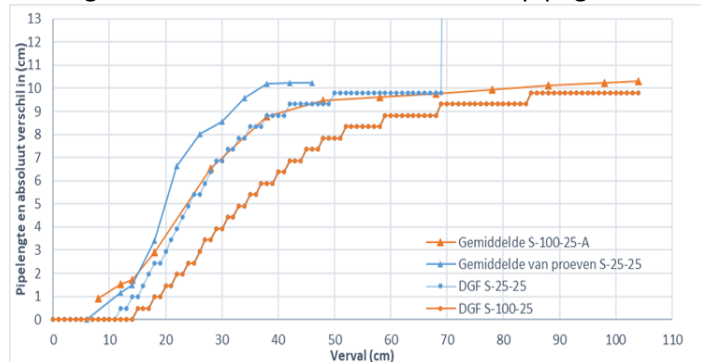
Daarnaast is opvallend dat de procentuele onderschatting bij zowel korte als lange barrières ongeveer even groot is. Dit suggereert dat D-Geo Flow het effect van extra lengte van de barrières wel goed kan voorspellen. Ook is gebleken dat bij een L-vormige barrière D-Geo Flow de pipegroei ook onderschat. De mate van onderschatting is iets kleiner dan bij andere barrières met een doorlatendheidsreductie van 100 keer. Dit is geïllustreerd in Figuur 11, waarin de absolute en procentuele verschillen tussen de proeven en modellen zijn weergegeven van S-100-L en S-100-20. Hieruit kan worden geconcludeerd dat D-Geo Flow de L-vormige barrière op eenzelfde wijze onderschat als een rechte barrière. In het begin is de afwijking groot, maar deze neemt af naarmate de pipe dichter bij de barrière komt. Omdat het verschil tussen S-100-L en S-100-20 niet significant is, heeft de L-vormige barrière een verwaarloosbare invloed op de voorspellende capaciteit van D-Geo Flow en wordt de pipegroei ook bij de L-vormige barrières onderschat.



Figuur 11 Absolute en procentuele verschillen S-100-(L) & S-100-20

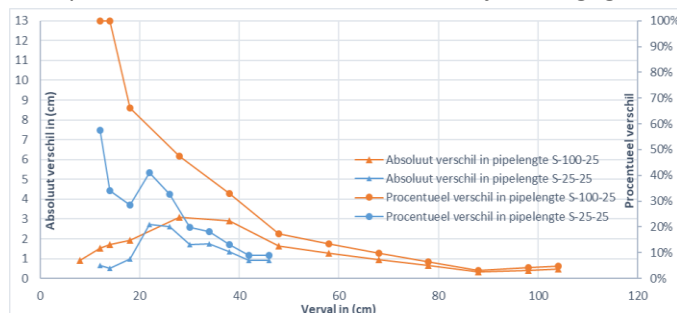
Doorlatendheidsreductie

Tijdens de analyse is wel een verband gevonden tussen de doorlatendheidsreductie van de barrière en de voorspellende capaciteit van D-Geo Flow. In Figuur 12 is te zien dat D-Geo Flow de pipegroei beter voorspelt bij barrières met een lagere doorlatendheidsreductie dan bij barrières met een hogere doorlatendheidsreductie. Dit is te zien in de grafiek in Figuur 12, waarin de pipegroei uit D-Geo Flow bij 25 keer doorlatendheidsreductie dichter bij de proeven ligt dan bij 100 keer doorlatendheidsreductie. Bij beide proeven is de lengte van de barrière 25 cm.



Figuur 12 Pipegroei vergelijking S-100-25 & S-25-25

Uit de eerdere analyse is gebleken dat D-Geo Flow een significant verschil voorspelt op de pipegroei bij een doorlatendheidsreductie van 25 of 100 keer. D-Geo Flow voorspelt een snellere pipegroei bij een doorlatendheidsreductie van 25 keer dan bij 100 keer. Echter, is ook gebleken dat dit verschil nauwelijks terug te zien is in de laboratoriumproeven. Daarom is er minder verschil tussen de laboratoriumproeven en D-Geo Flow. Dit is geïllustreerd in Figuur 13, waar de absolute en procentuele verschillen tussen de modellen en laboratoriumproeven van S-100-25 en S-25-25 zijn weergegeven. Het is duidelijk te zien dat de absolute en procentuele verschillen lager zijn bij een doorlatendheidsreductie van 25 keer dan bij 100 keer. D-Geo Flow onderschat de pipegroei bij 25 keer reductie dus minder dan bij 100 keer reductie. Hiervoor zijn meerdere verklaringen die zijn uitgewerkt in paragraaf 8.4 in het onderzoeksrapport.



Figuur 13 Absolute en procentuele verschillen S-100-25 & S-25-25

V. CONCLUSIE & AANBEVELING

Aan de hand van de bevindingen en verbanden die zijn voortgekomen uit dit onderzoek is in dit hoofdstuk de algemene conclusie en aanbeveling gepresenteerd. Als eerst zijn de conclusies beschreven, vervolgens zijn ook de belangrijkste aanbevelingen opgesomd.

Conclusie

Uit de analyse van de proeven is gebleken dat een SoSEAL barrière voor een aanzienlijke reductie van de pipegroei zorgt, met name wanneer de pipe dichtbij de barrière komt. Bovendien is vastgesteld dat de lengte van de barrière een grote invloed heeft op het tegengaan van piping, terwijl een hogere doorlatendheidsreductie alleen in het laatste stukje voor de barrière invloed heeft. De doorlatendheid heeft dus minder invloed op het initiële groeiproces van de pipe. Dit kan van belang zijn indien een SoSEAL barrière in praktijk wordt ontworpen. Afhankelijk van de toegelaten afstand van de pipe tot de barrière kan er geoptimaliseerd worden tussen de doorlatendheidsreductie en lengte van de barrière. Hierdoor is een minder zware SoSEAL barrière benodigd waardoor een SoSEAL barrière meer potentie heeft.

De analyse van de verschillen in pipegroei uit D-Geo Flow en de laboratoriumproeven heeft aangetoond dat D-Geo Flow de pipegroei naar een SoSEAL barrière onderschat. Deze conclusie is van toepassing op vrijwel alle uitgevoerde proeven. Opvallende verschillen zijn waargenomen tussen de proeven met een doorlatendheidsreductie van 25 en 100 keer. D-Geo Flow voorspelt de pipegroei aanzienlijk nauwkeuriger bij barrières met lagere doorlatendheidsreductie dan bij barrières met hogere doorlatendheidsreductie. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat D-Geo Flow meer weerstand berekent bij proeven met een reductie van 100 keer, wat niet in de laboratoriumproeven is waargenomen.

Aanbeveling

- Als eerst wordt aanbevolen om de behaalde doorlatendheid tijdens de laboratoriumproeven te onderzoeken. Deze analyse kan meer verbanden blootleggen met betrekking tot de werkelijke doorlatendheid van de SoSEAL barrière tijdens de proeven en de conclusies daarmee versterken. Dit kan uitgevoerd worden aan de hand van een analyse van de stijgbuizen
- Als tweede wordt aanbevolen om tijdens het ontwerpen van een SoSEAL barrière te streven naar een minimale toegestane afstand tussen de pipe en het scherm. Uit de proeven en modelleringen is gebleken dat de meeste sterkte vooral aanwezig is in het laatste stukje voor de barrière. Het minimaliseren van de benodigde afstand tussen de pipe en het scherm vergroot dus het potentieel van een SoSEAL barrière.
- Als derde aanbeveling wordt voorgesteld om de erosiebestendigheid van de SoSEAL barrière nader te onderzoeken, met name bij het gebruik van de injectiemethode. Uit het onderzoek is gebleken dat de barrière bij de mixed-in-place methode goed erosiebestendig is en aanzienlijke vervalhoogtes kan weerstaan voordat erosie optreedt en de barrière faalt. Als dit ook bij de injectiemethode van toepassing is, biedt dit veelbelovende mogelijkheden voor de praktische toepassingen.
- Ondanks de onderschatting van de pipegroei in D-Geo Flow wordt wel aangeraden om deze software te gebruiken bij eventuele ontwerpen. D-Geo Flow bootst namelijk de vorm en het proces van de pipegroei wel goed na. Om de voorspellende nauwkeurigheid van D-Geo Flow te verbeteren, kan ervoor worden gekozen om met een correctiefactor te werken. Deze factor dient wel nader onderzocht te worden.