



Onderzoek naar terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières

Afstudeeronderzoek Land- en Watermanagement naar terugschrijdende erosie bij
toepassen van verticale SoSEAL barrières

Alwin van der Burg
Datum: 15 juni 2023
Velp



Onderzoek naar terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières

Colofon

Betreft: Onderzoeksrapport afstudeeronderzoek Land- en Watermanagement naar Terugschrijdende erosie bij toepassen van verticale SoSEAL barrières

Status document: Definitief

Datum: 15 juni 2023

Auteur

Naam: Alwin van der Burg

Hogeschool

Naam: Hogeschool Van Hall Larenstein

Adres: Larensteinselaan 26A, 6882 CT Velp

Opleiding: BSc Land- en Watermanagement

Interne begeleider: Jan Willem Agterkamp

Bedrijf

Naam: Heijmans

Adres: Graafsebaan 65, 5248 JT Rosmalen

Externe begeleider: Rens Servais

Bron voorblad: (Heijmans, 2023)



Voorwoord

Voor u ligt het rapport van het onderzoek naar terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières. Tijdens dit afstudeeronderzoek is onderzoek gedaan naar pipegroei bij SoSEAL barrières door middel van kleine schaal laboratoriumproeven. Daarnaast is onderzocht in welke mate de software D-Geo Flow(2D) de pipegroei naar een SoSEAL barrière voorspelt. Dit onderzoeksrapport is een van de onderdelen van het afstudeeronderzoek. Het onderzoeksrapport is geschreven als achtergrond en onderbouwing van het beroepsproduct, *Factual Report Terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrière*.

Het onderzoek is uitgevoerd als afstudeerproject voor de studie Land- en Watermanagement aan de Hogeschool Van Hall Larenstein, Velp. Het is uitgevoerd namens Heijmans B.V. en het SoSEAL innovatie team wat onder andere bestaat uit Lekensamble, Deltares, TU Delf en TAUW. Dit onderzoek is uitgevoerd om de ontwikkeling van de innovatie SoSEAL verder te brengen. Dit is gedaan binnen het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM)

Vanaf jonge leeftijd ben ik geïnteresseerd in water en natuur. Daarom heb ik na mijn middelbare school besloten om een opleiding te volgen waarin ik meer kon leren over dit onderwerp. Gedurende mijn studie is mijn interesse voor dijkversterkingen ontstaan. Tijdens mijn stageperiodes en werk heb ik al veel geleerd over dijkversterkingen en heb ik me voornamelijk beziggehouden met zettingen en stabiliteit van dijken. Omdat deze projecten mij erg aanspraken, wilde ik ook mijn afstudeeronderzoek wijden aan een project binnen de waterveiligheid. In overleg met Rens Servais, Jaap Wierenga en Bram Verbeek van Heijmans zijn we tot dit onderwerp gekomen, waarmee ik mijn kennis over waterkeringen heb kunnen verbreden en verdiepen.

Tijdens het onderzoek waren er verschillende instanties, bedrijven en personen betrokken. Allereerst wil ik Rens Servais bedanken voor zijn uitstekende begeleiding namens Heijmans. Ondanks zijn drukke werkdag nam hij altijd de tijd om met te overleggen, waarbij ik veel heb geleerd. Daarnaast wil ik ook mijn directe collega's bij Heijmans, Jaap Wierenga en Bram Verbeek, bedanken voor de goede en gezellige samenwerking en het mogelijk maken van dit onderzoek.

Tijdens mijn afstudeeronderzoek kreeg ik de mogelijkheid om laboratoriumproeven uit te voeren bij Deltares. Dit was een buitengewoon waardevolle en leerzame ervaring voor mij. Ik wil graag Vera van Beek (Deltares), Marien Harkes (Deltares) en Simon Dehout (TU Delft) bedanken voor de samenwerking en begeleiding tijdens de het onderzoek. Daarnaast wil ik ook Silvia Bersan (HDSR), Jordi de Leau (Tauw) en alle betrokkenen binnen het project Sterke Lekdijk bedanken voor hun samenwerking gedurende mijn afstudeeronderzoek. Tot slot wil ik Jan Willem Agterkamp bedanken voor zijn begeleiding vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein.

Alwin van der Burg
Velp, 15 juni 2023

Begrippenlijst

Begrip	Betekenis	Bron
Actieve wig	Er wordt gesproken van een actieve wig als de grond achter een wand zich in een actieve toestand begeeft. Dit betekent dat de grond daar in beweging is.	(Heemskerk, 2012)
Adsorptie	Bij adsorptie hechten de moleculen van een gas of vloeistof zich aan het oppervlak van een vaste stof of vloeistof, daardoor worden deze moleculen bedekt met een laagje.	(Edelman-Vlam, 1976)
Afbraak	De ontbinding van organisch materiaal in kleinere bestanddelen.	(Edelman-Vlam, 1976)
Complexering	Het proces waarbij meerdere, mogelijk geladen, moleculen samen een nieuwe grotere verbinding vormen.	(Edelman-Vlam, 1976)
Co-precipitatie	Het afvoeren door een neerslag van stoffen die normaal oplosbaar zijn.	(Edelman-Vlam, 1976)
D-Geo Flow	Een software, ontwikkeld door Deltares om het proces van piping te modelleren en toetsen aan de hand van eindige elementen berekeningen van grondwaterstroming.	(Deltares, 2023)
Faalmechanisme	Een mechanisme waardoor een kering kan falen.	(Deltares, 2023)
Floc content	Het percentage SoSEAL vlokken in het mengsel met zand en SoSEAL dit is uitgedrukt in gram vlokken per gram mengsel.	(Li, 2022)
Heave	Heave is de situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen. Dit gebeurt onder invloed van een verticale grondwaterstroming. Dit wordt ook wel de vorming van drijfzand genoemd.	(Van Beek, 2015)
Heavescherm	Een heavescherm is een maatregel tegen piping. Het bestaat uit een waterdichte wand, die verticaal in de watervoerende zandlaag wordt aangebracht.	(Wiggers, 2019)
In-situ	Iets dat ter plaatse in de oorspronkelijke toestand wordt gemaakt.	(Rijkswaterstaat, 2021)
Kwelweg	Een mogelijk pad in de ondergrond die het kwelwater aflegt, van intreepunt tot uitreepunt.	(Rijkswaterstaat, 2021)
Kwelwegverlengende schermen	Een ondoorlatende of minder doorlatende, in de regel verticale, constructie voor de verlenging van de kwelweg.	(Wiggers, 2019)
Meerlaagsheid	Hierbij zijn verschillende grondlagen aanwezig. Het gaat hier voornamelijk om een afwisseling van overwegend horizontaal gelegen watervoerende en waterremmende lagen.	(Wiggers, 2019)
Mixed-in-place	Dit is een methode om SoSEAL te plaatsen waarbij eerst de SoSEAL vlokken worden gemengd met zand waarna het geplaatst wordt op de gewenste plaats.	(Li, 2022)
Permeabiliteit	Geeft de mate van doorlatendheid van een watervoerend pakket. Hoe hoger de permeabiliteit,	(Rijkswaterstaat, 2021)

	des te sneller stroomt het water door het watervoerend pakket.	
(Erosie)Pipes	Pipes zijn de holle ruimtes die onder een waterkering vormen door het eroderen van zand.	(Van Beek, 2015)
Piping	Piping is het verschijnsel waarbij er onder een waterkering een holle pipevormige ruimte ontstaat als gevolg van het erosieproces van een zandmeevoerende wel.	(Van Beek, 2015)
Pipingberm	Een pipingberm is een maatregel tegen piping. Hierbij wordt de kwelweglengte vergroot door een berm van grond aan te brengen.	(Wiggers, 2019)
Podzolgronden	Bodem met een loodgrijze uitspoelingslaag en een donkergekleurde inspoelingslaag. De bodem is ijzer- en humusrijk.	(Edelman-Vlam, 1976)
Podzolisatie	De vorming van podzolgrond.	(Edelman-Vlam, 1976)
SoSEAL	SoSEAL is een verbinding tussen aluminium en organisch materiaal dat door injectie in een zandlaag de doorlatendheid kan reduceren.	(Heijmans, 2023)
Voorlandverbetering	Een voorland verbetering is een aanpassing aan de buitendijkse kant van de dijk in de uiterwaarden. Het gaat om een aanpassing in de grond waardoor de grondlaag waterondoorlatend wordt. Dit verlengt de kwelweglengte en gaat daardoor piping tegen.	(Wiggers, 2019)
Watervoerendpakket	Een bodemlaag die water doorvoert en die aan boven- en onderzijde begrensd wordt door een ondoorlatende laag of door een vrije waterspiegel.	(Rijkswaterstaat, 2021)
Weerstand	Hiermee wordt de weerstand tegen het erosieproces bedoeld. De weerstand wordt in grote mate bepaald door de eigenschappen van de zandlaag en de kwelweglengte.	(Rijkswaterstaat, 2021)

Samenvatting

Dit onderzoek, is uitgevoerd namens Heijmans B.V. en het SoSEAL innovatie team. Dit onderzoek is uitgevoerd om de ontwikkeling van de innovatie SoSEAL als pipingmaatregel verder te brengen. Dit is gedaan binnen het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM). Het hoofddoel van het onderzoek was om de pipegroei naar een SoSEAL-barrière te onderzoeken door middel van kleine schaal laboratoriumproeven, en te beoordelen in hoeverre de software D-Geo Flow (2D) in staat is om dit te voorspellen. Het onderzoek draagt binnen Sterke Lekdijk bij aan de verdere ontwikkeling van SoSEAL als innovatieve methode ter voorkoming van piping.

Als eerst is er een literatuurstudie uitgevoerd waarin de belangrijkste aspecten zijn bestudeerd en toegelicht. Dit betreft: piping, SoSEAL, D-Geo Flow en eerder uitgevoerde onderzoeken. Op basis hiervan zijn lessons-learned geformuleerd die zijn toegepast in het vervolg van het onderzoek. Dit resulteerde in een verbeterde en bewustere uitvoering van de rest van het onderzoek.

Vervolgens is de methode van de laboratoriumproeven opgesteld, gebaseerd op eerder onderzoek van Li (Li, 2022) en in overleg met experts. De proeven zijn uitgevoerd op kleine schaal in de Rotated box bij Deltares. Deze proefopstelling simuleert het watervoerendpakket onder een dijk en wordt gebruikt voor pipingproeven. Tijdens de proeven is gevarieerd in de lengte en geometrie van de SoSEAL-barrière, evenals in de doorlatendheidsreductie van de SoSEAL-barrière ten opzichte van het zand. Door het stapsgewijs opvoeren van het verval is de pipegroei gemeten en in grafieken weergegeven. Deze gegevens zijn geanalyseerd en er zijn verbanden gelegd en conclusies getrokken. De belangrijkste conclusie is dat een SoSEAL-barrière zorgt voor extra weerstand tegen pipegroei, vooral wanneer de pipe dicht bij de barrière komt. Er zijn aanzienlijke verschillen waargenomen bij verschillende lengtes van de SoSEAL barrières. Een langere barrière zorgt voor meer weerstand tegen pipegroei dan een korte barrière. Daarentegen zijn er kleinere verschillen tussen barrières met een doorlatendheidsreductie van 100 en 25 keer waargenomen.

Daarnaast is tijdens de proeven waargenomen dat indien de pipe de SoSEAL barrière bereikt, het verval nog aanzienlijk hoger opgevoerd moet worden totdat deze faalt. Uit de laboratoriumproeven is ook gebleken dat bij het falen van een SoSEAL barrière eerst heave optreedt vóór de barrière. Doordat voor de barrière het zand is weggevoerd als gevolg van heave, vervormd de barrière en kan er een pipe door de barrière groeien. Deze pipe door de barrière zorgt vervolgens voor hydraulische kortsluiting en falen van de barrière. Daarmee is te concluderen dat een mixed-in-place SoSEAL barrière relatief goed erosiebestendig is.

De laboratoriumproeven zijn vervolgens gemodelleerd en doorgerekend in D-Geo Flow (2D). Met de uitkomsten van de modellen zijn ook grafieken van de pipegroei gemaakt. Deze grafieken zijn geanalyseerd en vergeleken met de resultaten van de laboratoriumproeven. Op basis van deze analyses en vergelijkingen is de hoofdvraag beantwoord: *'In welke mate voorspelt D-Geo Flow (2D) de ontwikkeling van een terugschrijdende erosiepipe richting een SoSEAL-barrière in vergelijking met laboratoriumproeven?'* De belangrijkste conclusie is dat D-Geo Flow de pipegroei ten opzichte van de laboratoriumproeven onderschat. Met name bij proeven met een hoge doorlatendheidsreductie onderschat D-Geo Flow de voorspellingen aanzienlijk, terwijl het bij proeven met een lage reductie een betere voorspelling geeft. De verklaringen en onderbouwing van deze bevindingen zijn verder uitgewerkt in dit rapport en het bijbehorende Factual Report.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Begrippenlijst.....	3
Samenvatting.....	5
1 Inleiding	9
1.1 Achtergrond.....	9
1.2 Aanleiding.....	10
1.3 Probleemstelling.....	11
1.4 Doelstelling.....	11
1.5 Afbakening.....	11
1.6 Onderzoeksvragen.....	12
1.7 Beroepsproduct.....	12
1.8 Leeswijzer	12
2 Onderzoeksmethodiek	13
2.1 Literatuurstudie.....	13
2.2 Methode Laboratoriumonderzoek.....	13
2.3 Uitvoeren & analyseren laboratoriumproeven.....	14
2.4 Vergelijking met D-Geo Flow.....	14
2.5 Opstellen eindproducten.....	14
3 Programma van eisen	15
3.1 Randvoorwaarden	15
3.2 Eisen	15
3.3 Uitgangspunten	15
3.4 Wijzigingen ten opzichte van projectplan	16
4 Theoretisch Kader	17
4.1 Faalmechanisme Piping.....	17
4.1.1 Keten van gebeurtenissen	17
4.1.2 Parameters piping	18
4.1.3 Oplossingen	19
4.2 D-Geo Flow 2D.....	20
4.2.1 Grondwatermodel	21
4.2.2 Pipelengte & Kritiek verval	21
4.2.3 Invoerparameters.....	22
4.2.4 Toepassing binnen onderzoek.....	23
4.3 SoSEAL	23
4.3.1 Theoretische werking SoSEAL	23

4.3.2	Aanbrengmethode SoSEAL.....	24
4.3.3	Faalpaden SoSEAL.....	25
4.4	Voorgaande SoSEAL proeven	26
4.5	Lessons-learned.....	28
5	Methode Laboratoriumproeven	30
5.1	Proefopstelling	30
5.2	Materialen	31
5.2.1	B15 zand	31
5.2.2	SoSEAL	32
5.3	Proefprogramma	32
5.4	Opbouw en uitvoering proeven	33
5.4.1	Plaatsen zand.....	33
5.4.2	Plaatsen SoSEAL barrière.....	33
5.4.3	Uitvoering proeven.....	34
6	Uitkomsten laboratoriumproeven	35
6.1	Specificaties proeven.....	35
6.2	Generieke waarnemingen Pipegroei	36
6.3	Pipegroei.....	39
6.3.1	Validiteit proeven	39
6.3.2	Effect van lengte van de barrière	42
6.3.3	Effect van doorlatendheidsreductie.....	44
6.3.4	L-vormige barrière	45
6.4	Deelconclusie laboratoriumproeven	46
7	Uitkomsten D-Geo Flow	47
7.1	Opbouw D-Geo Flow model	47
7.2	Uitkomsten D-Geo Flow	48
7.3	Deelconclusie.....	49
8	Vergelijking laboratoriumproeven en D-Geo Flow.....	50
8.1	Referentieproef (zonder barrière).....	50
8.2	Generiek verband	51
8.3	Lengte van de barrière	53
8.4	Doorlatendheidsreductie	55
8.5	L-vormige barrière.....	57
8.6	Deelconclusie vergelijking	58
	Discussie	59
	Conclusie	60

Aanbeveling	61
Bibliografie	62
Bijlage 1. Afmetingen Rotated box	64
Bijlage 2. Stappenplan SoSEAL maken	65
Bijlage 3. Stappenplan opbouwen proefopstelling	68
Bijlage 4. Observaties laboratoriumproeven	69
Bijlage 5. Gevoeligheidsanalyse grootte uitlaat	89
Bijlage 6. Pipegroei grafieken alle proeven	90

1 Inleiding

Dit onderzoek, is uitgevoerd namens Heijmans B.V. en het SoSEAL innovatie team. Dit onderzoek is uitgevoerd om de ontwikkeling van de innovatie SoSEAL als pipingmaatregel verder te brengen. Dit is uitgevoerd binnen het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM). Sterke Lekdijk is een dijkversterkingsproject dat circa 55 km aan primaire waterkeringen omvat, die versterkt worden in opdracht van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR). Dit traject is opgedeeld in zes deeltrajecten waarvan WAM het meest oostelijke traject is zoals te zien is in Figuur 1–1. Dit project bevindt zich momenteel (15-6-2023) in de planuitwerkingsfase.

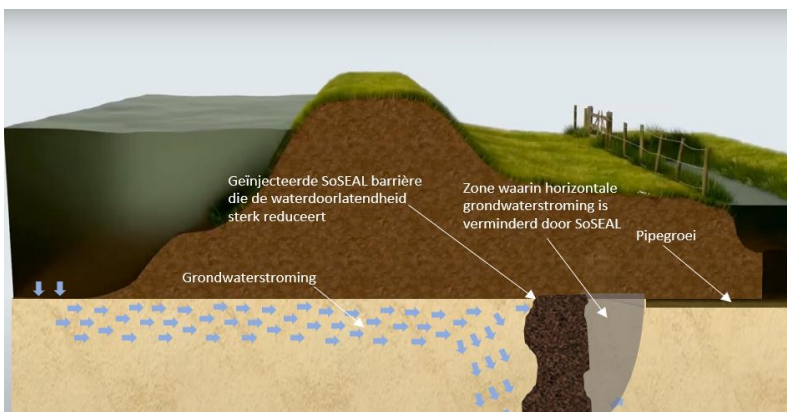


Figuur 1–1 Locatie dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk (Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden, 2023)

Het project Sterke Lekdijk is een innovatie-partnerschap waar innovatiepartners Mourik Infra B.V., Van Oord Nederland B.V. en de combinatie Heijmans Infra B.V. – GMB Civiel B.V. – de Vries en van de Wiel B.V. (Lek ensemble) samenwerken om slimme en nieuwe oplossingen voor dijkversterkingen verder te ontwikkelen (HDSR, 2023).

1.1 Achtergrond

Eén van de nieuwe oplossingen die wordt doorontwikkeld door Sterke Lekdijk is SoSEAL (Soil Sealing by Enhanced Aluminium and DOM Leaching). Het onderzoek richt zich op verticale SoSEAL barrières en draagt bij aan de verdere ontwikkeling van deze innovatie. SoSEAL is in dit project onderzocht als een versterkingsmaatregel tegen het faalmechanisme piping. Piping treedt op wanneer water door het watervoerende pakket onder het dijklichaam stroomt naar een open uitstroompunt in het achterland (van nature aanwezig of ontstaan door opbarsten). Als het water te snel stroomt, kan het zand onder het dijklichaam worden weggespoeld. De holle ruimtes die ontstaan onder de dijk worden pipes genoemd en groeien vanuit het uittredepunt steeds verder richting het intredepunt waar de zandlaag de rivier snijdt, zie Figuur 1–2. Als deze holle pipes de rivier bereiken en vervolgens breder en dieper worden, veroorzaakt dit instabiliteit en verzakking van het dijklichaam, wat kan leiden tot een dijkdoorbraak. Een verticale SoSEAL barrière kan dit proces mogelijk tegengaan.



Figuur 1–2 Schematisatie SoSEAL als pipingmaatregel

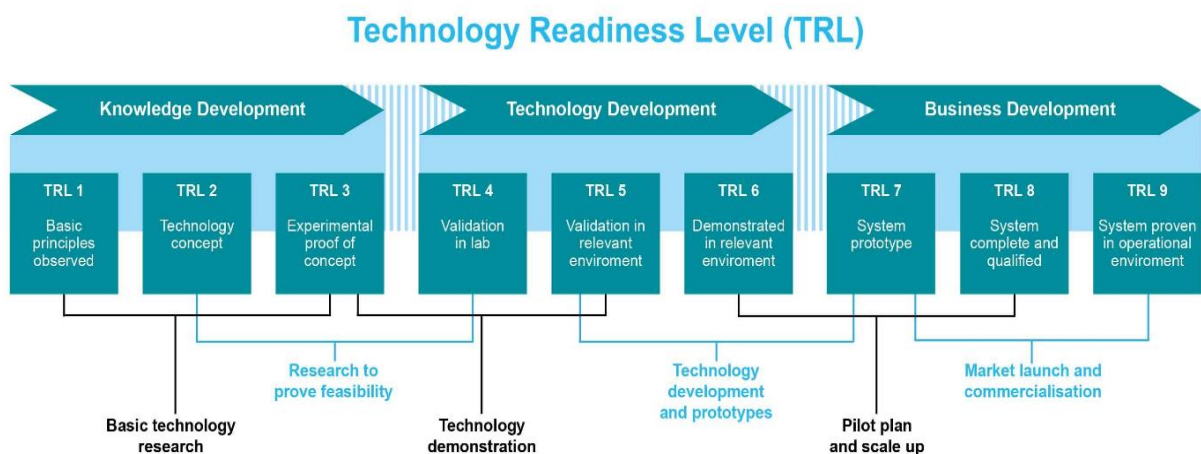
Bij SoSEAL wordt een mengsel van aluminium-chloride en organisch materiaal geïnjecteerd in de watervoerende zandlagen onder het dijklichaam. Het aluminium reageert met de organische stof, waardoor vlokken ontstaan. Deze vlokken verstoppden de poriën tussen de zandkorrels. Daardoor ontstaat er een zone die de doorlatendheid van het zand sterk reduceert. Door de afname van de doorlatendheid en daarmee ook de horizontale stroming achter de SoSEAL barrière, treedt er minder snel piping op. Een gedetailleerde beschrijving van piping en SoSEAL is uitgewerkt in paragraaf 4.3.

1.2 Aanleiding

Door de klimaatverandering, stijgende zeespiegel en toenemende economische belangen achter de waterkeringen is het waarborgen van waterveiligheid in Nederland belangrijker dan ooit. Om deze waterveiligheid ook in de toekomst te kunnen blijven garanderen, zijn er in de komende jaren veel dijkversterkingen nodig. Veel van deze versterkingen zijn nodig vanwege het faalmechanisme piping. Traditionele oplossingen voor piping, zoals het aanleggen van lange bermen in het achterland, verbetering van het voorland of het plaatsen van stalen heaveschermen, brengen vaak aanzienlijke omgevingshinder met zich mee, nemen veel ruimte in beslag, zijn kostbaar en niet duurzaam. Daarom worden er innovatieve pipingmaatregelen ontwikkeld om aan de strengere eisen voor waterkeringen te voldoen. SoSEAL is een van deze innovatieve oplossingen.

Om SoSEAL op grote schaal toe te kunnen passen, moet het voldoen aan Technology Readiness Level 9 (TRL) volgens de richtlijnen van Rijkswaterstaat. Hoe hoger het TRL-niveau hoe meer een innovatie zich technisch en functioneel heeft bewezen en hoe sneller deze innovatie (grootschalig) toepasbaar is (Rijkswaterstaat, 2023). TRL-niveaus worden gebruikt om de ontwikkelingsfase van een nieuwe technologie aan te geven. In Figuur 1–3 is beschreven aan welke eisen de innovatie moet voldoen om het betreffende TRL-niveau te bereiken.

Vanwege de nog bestaande onzekerheden met betrekking tot SoSEAL is verder onderzoek nodig om aan te tonen dat SoSEAL daadwerkelijk effectief is en TRL-level 9 heeft bereikt. Zodra TRL-level 9 is behaald, kan deze technologie op grote schaal worden toegepast. Om tot TRL-level 9 te komen dienen er aanvullende laboratorium- en veldproeven uitgevoerd te worden. Daarbij helpt dit onderzoek om SoSEAL verder te ontwikkelen. Momenteel (15-6-2023) bevindt SoSEAL zich op TRL 6/7 (De Leau, 2023).



Figuur 1–3 eigenschappen TRL-levels (TU Delft, 2023)

1.3 Probleemstelling

De werking en maakbaarheid van SoSEAL zijn nog onvoldoende bewezen om op grote schaal toe te passen. Er zijn nog verschillende kennisleemtes en onzekerheden met betrekking tot een SoSEAL-barrière. Voor het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk zijn er acht onzekerheden geïdentificeerd die nog onvoldoende zijn onderzocht: (De Leau, 2023)

1. Onvoldoende weerstand SoSEAL-barrière bij aanleg.
2. Negatieve effecten op aanleg SoSEAL-barrière door grondwaterstroming.
3. Afname weerstand SoSEAL gedurende levensduur.
4. Slechte ontwikkeling SoSEAL in niet-verzadigde lagen
5. Gaten in deklaag door injecteren, grotere kans op voorloopsheid
6. Onzekerheden ten aanzien van de afstand van de pipe tot de barrière.
7. Scheuren van de SoSEAL-barrière als gevolg van vervorming van de dijk.
8. Te hoge injectiedruk tijdens injecteren leidt tot “fractures” in de deklaag.

In dit onderzoek is in afstemming met het SoSEAL team en Heijmans besloten om specifiek in te gaan op de zesde onzekerheid: *‘Onzekerheid ten aanzien van de afstand van de pipe tot de barrière’*. Deze onzekerheid wordt door het SoSEAL-ontwikkelteam als zeer waarschijnlijk beschouwd en heeft een significante impact als bedreiging. Tijdens dit onderzoek wordt deze onzekerheid nader onderzocht waardoor dit onderzoek bijdraagt aan de verdere ontwikkeling van SoSEAL.

1.4 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is om doormiddel van kleine schaal laboratoriumproeven de ontwikkeling van pipegroei naar een SoSEAL-barrière te bepalen en te onderzoeken in hoeverre de software D-Geo Flow (2D) in staat is om dit te voorspellen. Als D-Geo Flow nauwkeurige voorspellingen kan doen die overeenkomen met de resultaten van laboratoriumproeven, kan de software mogelijk in toekomstige ontwerpfases gebruikt worden om de pipegroei te voorspellen. Dit is een essentieel hulpmiddel bij het ontwerpen van SoSEAL-barrières. Daarmee wordt de ontwikkeling van SoSEAL binnen WAM verder geholpen.

Het onderzoeksrapport heeft daarin als doel om een gedetailleerde beschrijving van elke fase van het onderzoek te geven. Daarnaast zijn de bevindingen op een gestructureerde en onderbouwde manier gepresenteerd. Het beschrijft de methodologie, resultaten en conclusies van het onderzoek en biedt een basis voor de conclusie, discussie, aanbeveling en Factual Report.

1.5 Afbakening

Het onderzoek is afgebakend om de haalbaarheid te waarborgen. De focus is daarbij gelegd op de pipegroei tot aan de SoSEAL barrière. Het daadwerkelijke falen van de barrière is daarom in mindere mate onderzocht. Vooral nog is gekozen voor de toepassing als kwelwegverlengende barrière om de pipegroei te hinderen, en mag de pipe niet tot de barrière groeien. Dit heeft te maken met de erosiebestendigheid en homogeniteit van de SoSEAL barrière, die niet binnen korte termijn aangetoond kunnen worden. Dit is nader toegelicht in paragraaf 4.3. Daarom is de verdere ontwikkeling van de pipegroei na het bereiken van de barrière minder belangrijk geacht, en is ervoor gekozen dit niet uitgebreid in dit onderzoek op te nemen.

Daarnaast is op kleine schaal gekeken naar piping achter een SoSEAL barrière. Dit is gedaan door zowel kleine schaal laboratoriumproeven uit te voeren als modelleringen te maken die deze laboratoriumproeven nabootsen. Tijdens het modelleren is alleen gebruik gemaakt van D-Geo Flow (2D) versie 2023.1. Er zijn geen andere softwarepakketten onderzocht of 3D berekeningen uitgevoerd.

1.6 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen van dit onderzoek bestaan uit één hoofdvraag en vier deelvragen die dienen als leidraad tijdens het onderzoek. Enkele onderzoeksvragen zijn aangepast ten opzichte van het projectplan, dit is beschreven in paragraaf 3.4. Hieronder zijn de deelvragen weergegeven, samen met het belangrijkste doel van elke deelvraag. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt als volgt:

‘In welke mate voorspelt D-Geo Flow (2D) de ontwikkeling van een terugschrijdende erosiepipe richting een SoSEAL barrière ten opzichte van laboratoriumproeven?’

De hoofdvraag is uitgewerkt aan de hand van vier verschillende deelvragen:

1. Hoe werkt het faalmechanisme piping, de software D-Geo Flow en SoSEAL?
Doel: Kennis en inzicht vergaren in de verschillende relevante onderdelen, om zo het onderzoek beter en bewuster uit te kunnen voeren.
2. Hoe moeten laboratoriumproeven worden uitgevoerd om de pipegroei naar een SoSEAL barrière te kunnen onderzoeken?
Doel: Het opstellen van de uitvoeringsmethode voor de laboratoriumproeven.
3. Wat is de invloed van een SoSEAL barrière op de ontwikkeling van de pipegroei richting de barrière?
Doel: Het uitvoeren van de laboratoriumproeven, en de resultaten hiervan analyseren.
4. In welke mate komen de D-Geo Flow berekeningen overeen met de laboratoriumproeven?
Doel: De voorspellende capaciteit van D-Geo Flow voor de pipegroei bij richting een SoSEAL barrière onderzoeken en het verklaren van eventuele verschillen.

1.7 Beroepsproduct

Naast dit onderzoeksrapport is met de bevindingen uit dit onderzoek een beroepsproduct gemaakt. Dit beroepsproduct is een Factual Report waarin de belangrijkste feiten, conclusies en aanbevelingen uit het onderzoek zijn samengevat. Het dient als een beknopte versie van het onderzoeksrapport en is bedoeld als een overzichtelijke bron van informatie voor het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk en de betrokkenen bij de SoSEAL-ontwikkeling. In het Factual Report is specifiek ingegaan op de bevindingen van de laboratoriumproeven en de vergelijking met D-Geo Flow. De resultaten van het onderzoek zijn gepresenteerd en er zijn aanbevelingen gedaan met betrekking tot mogelijk vervolgonderzoek. Ook is er verder ingegaan op de toepassing van D-Geo Flow als software voor het voorspellen van pipegroei naar een SoSEAL-barrière. Het Factual Report bevat echter geen gedetailleerde onderbouwingen van de conclusies en aanbevelingen. Hiervoor is verwezen naar dit onderzoeksrapport, dat dient als naslagwerk en onderbouwing voor de gepresenteerde bevindingen in het Factual Report.

1.8 Leeswijzer

Het onderzoeksrapport bevat de hoofdstukken die de verschillende aspecten van het onderzoek behandelen. Als eerst is in hoofdstuk 2 de onderzoeksmethodiek beschreven die is toegepast tijdens het uitvoeren van dit onderzoek. Vervolgens zijn in hoofdstuk 3 de belangrijkste eisen en uitgangspunten geformuleerd die van toepassing zijn op dit onderzoek. Ook is beschreven wat er is gewijzigd ten opzichte van het projectplan. Vervolgens is in hoofdstuk 4 het theoretisch kader opgesteld aan de hand van literatuurstudie naar piping, SoSEAL en D-Geo Flow. Vervolgens is de methode van de laboratoriumproeven beschreven in hoofdstuk 5. Daarna zijn de resultaten van de laboratoriumproeven uitgewerkt in hoofdstuk 6. Vervolgens zijn de uitkomsten van de modelleringen in D-Geo Flow beschreven in hoofdstuk 7. Daarna zijn de D-Geo Flow modelleringen en laboratoriumproeven vergeleken in hoofdstuk 8. In de Conclusie en Discussie zijn de belangrijkste conclusies van het onderzoek gepresenteerd en bediscussieerd en zijn er adviezen gegeven voor vervolgonderzoek. Tot slot zijn er aanbevelingen aan het SoSEAL team uitgewerkt in de Aanbeveling.

2 Onderzoeksmethodiek

Het onderzoek is uitgevoerd in verschillende fasen, die zijn afgeleid uit de deelvragen die beschreven staan in paragraaf 1.6. Het is belangrijk op te merken dat gedurende het onderzoek vaak overlap is geweest tussen deze fasen om nieuwe inzichten aan te kunnen vullen. Een schematische weergave van deze fasen is afgebeeld in Figuur 2–1. Hieronder wordt per fase kort ingegaan op de gehanteerde methode.



Figuur 2–1 Schematisatie onderzoeksfasering

2.1 Literatuurstudie

Tijdens de literatuurstudie is de eerste deelvraag van het onderzoek, 'Hoe werkt het faalmechanisme piping, de software D-Geo Flow en SoSEAL?', verder uitgewerkt. Hiervoor zijn diverse rapporten, ontwikkelnotities en memo's geraadpleegd, en heeft er afstemming plaatsgevonden met experts op het gebied van piping en SoSEAL. Dit betreffen: Rens Servais (senior-adviseur grond en constructie Heijmans), Silvia Bersan (Technisch specialist geotechniek HDSR) en Vera van Beek (consultant bij Deltares). De belangrijkste informatie is verzameld en beschreven in het theoretisch kader van het onderzoek. Deze literatuurstudie heeft bijgedragen aan het vergroten van de kennis over relevante onderwerpen, waardoor het vervolg van het onderzoek beter en bewuster is uitgevoerd. Daarnaast zijn op basis van de literatuurstudie de belangrijkste lessons-learned geformuleerd. Deze lessen beschrijven beknopt wat er is geleerd en hoe ze van belang zijn geweest voor het verdere verloop van het onderzoek.

2.2 Methode Laboratoriumonderzoek

Tijdens het opstellen van de methode van het laboratoriumonderzoek is de tweede deelvraag uitgewerkt: 'Hoe moeten laboratoriumproeven worden uitgevoerd om de pipegroei naar een SoSEAL barrière te kunnen bestuderen?' De methode voor de laboratoriumproeven is opgesteld in samenspraak met Simon Dehout (onderzoeker bij de TU Delft), Marien Harkes (lab coördinator bij Deltares) en Vera van Beek. In de verschillende proeven is gevarieerd in lengte en doorlatendheidsreductie van de SoSEAL barrières. Bij elke proef is het verval stapsgewijs verhoogd om de vorming van piping te bestuderen. De methode van de proeven is afgeleid van eerdere laboratoriumproeven, met name het onderzoek van Li (Li, 2022), waarin SoSEAL barrières op dezelfde wijze zijn uitgevoerd. Omdat de methode van de proeven een belangrijk en groot deel van het onderzoek vormt, is dit apart uitgewerkt in hoofdstuk 5.

2.3 Uitvoeren & analyseren laboratoriumproeven

Tijdens het uitvoeren en analyseren van de laboratoriumproeven is de derde deelvraag uitgewerkt: *‘Wat is de invloed van SoSEAL barrière op de ontwikkeling van de pipegroei richting de barrière?’* Bij het opstarten van de laboratoriumproeven zijn Simon Dehout en Marien Harkes betrokken. Gedurende het hele proces van de laboratoriumonderzoeken heeft Vera van Beek de laboratoriumproeven begeleid. Na het uitvoeren van de proeven zijn de pipelengtes van de verschillende proeven geplot in grafieken tegen het aanwezige verval. Daarnaast is de relatieve dichtheid van de het zand en de SoSEAL in de proeven berekend en is de validiteit van de proeven onderzocht en onderbouwd. Ook zijn aan de hand van de resultaten verbanden en conclusies opgesteld. Deze verbanden en conclusies zijn ook onderbouwd.

2.4 Vergelijking met D-Geo Flow

Tijdens het vergelijken van de laboratoriumuitkomsten met de D-Geo Flow modellen is de vierde deelvraag nader uitgewerkt: *‘In welke mate komen de D-Geo Flow berekeningen overeen met de laboratoriumproeven?’* Als eerst zijn de modellen opgebouwd in D-Geo Flow die de laboratoriumproeven nabootsen. Deze zijn vervolgens doorgerekend, dit is gedaan voor elke proef. Vervolgens is de pipegroei van de proeven vergeleken met de pipegroei uit D-Geo Flow. Deze vergelijking is gemaakt door de pipegroei van de modellen en de proeven in één grafiek uit te zetten tegen het verval. Op basis daarvan zijn verbanden gelegd en conclusies getrokken, die wederom zijn verklaard.

2.5 Opstellen eindproducten

Tijdens het opstellen van de eindproducten is de hoofdvraag van het onderzoek beantwoord: *In welke mate voorspelt D-Geo Flow (2D) de ontwikkeling van een terugschrijdende erosiepipe richting een SoSEAL barrière ten opzichte van laboratoriumproeven?* Dit is gedaan door de conclusie en discussie in het onderzoeksrapport te beschrijven. Hierin zijn de belangrijkste verbanden verklaard en is de validiteit van het onderzoek besproken. Daarnaast is aangegeven wat mogelijke relevante vervolgstudies zijn. In het Factual Report zijn deze conclusies overzichtelijk weergegeven. Dit is gedaan door de conclusies op te sommen en te onderbouwen met behulp van grafieken. Ook zijn er aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

3 Programma van eisen

In dit hoofdstuk zijn de randvoorwaarden, eisen, uitgangspunten en wijzigingen ten opzichte van het projectplan beschreven. Het beschrijven hiervan is essentieel om het onderzoek in de juiste context te plaatsen. Daarnaast zijn de keuzes opgesomd die van invloed zijn op de resultaten en conclusies van het onderzoek. Tot slot zijn de aanpassingen ten opzichte van het oorspronkelijke projectplan toegelicht.

3.1 Randvoorwaarden

- Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd binnen het tijdsbestek van 6 februari 2023 tot en met 16 juni 2023.
- Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Heijmans B.V. voor het dijkversterkingsproject Sterke Lekdijk.
- Deltares stelt gedurende de afstudeerperiode het laboratorium beschikbaar voor het uitvoeren van de proeven.
- De Rotated box van Deltares met bijbehorende meetapparatuur is beschikbaar voor het uitvoeren van de laboratoriumproeven.
- De materialen van de SoSEAL zijn aangeleverd door TU Delft en het SoSEAL mengsel is zelf gemaakt bij Deltares.
- In het onderzoeksrapport is onderverdeling gemaakt in hoofdstukken, paragrafen en subparagrafen om de leesbaarheid van het rapport te versterken. Dit is afgestemd met de opdrachtgever.
- De doorlatendheidsreductie van de SoSEAL is eerder onderzocht en daarom bekend.
- Deltares zorgt voor de beschikbaarheid van voldoende Baskarp 15 zand.
- Tijdens het opstarten van de eerste twee proeven is hulp van Marien Harkes en Simon Dehout beschikbaar.

3.2 Eisen

- Tijdens de afstudeerstage is een projectaanpak, onderzoeksrapport en een beroepsproduct gemaakt.
- Het beroepsproduct bestaat uit een Factual Report met daarin de belangrijkste bevindingen en aanbevelingen uit het onderzoek, uitgewerkt in de vorm van een Factual Report.
- Het onderzoeksrapport is een volledige uitwerking van het onderzoek en dient als achterliggend document van het Factual Report Terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières.
- Door Deltares is een aangepaste versie van D-Geo Flow aangeleverd, deze aangepaste versie maakt het mogelijk om fijnere berekeningen te maken.

3.3 Uitgangspunten

- SoSEAL is onderzocht als kwelwegverlengende maatregel en niet als heavescherm. De focus ligt daarmee op de pipegroei.
- Tijdens het onderzoek is de nadruk gelegd op de pipegroei tot de barrière, het doorbreken van de barrière is beperkt opgenomen in dit onderzoek.
- D-Geo Flow 2D versie 2023.01 is gebruikt als software om de pipegroei te modelleren.
- Bij het schrijven van het onderzoeksrapport en het beroepsproduct zijn betrouwbare bronnen gebruikt. Hierbij is gelet op de actualiteit en auteur.
- In afstemming met de opdrachtgever is besloten om de grafieken groot, in de tekst te presenteren om verbanden en conclusies duidelijk te presenteren.

3.4 Wijzigingen ten opzichte van projectplan

Tijdens het uitvoeren van het onderzoek is de scope veranderd ten opzichte van het oorspronkelijke projectplan. Er zijn drie belangrijke wijzigingen ten opzichte van het projectplan.

1. Verschillende typen SoSEAL barrières: Naast SoSEAL barrières die meer dan 2/3 van het watervoerende pakket afsluiten, zijn ook kortere barrières en L-vormige barrières onderzocht. Hierdoor zijn er meer barrières beproefd en is er een beter beeld verkregen van de invloed op de pipegroei. De L-vormige barrière is onderzocht omdat het SoSEAL-team dit als een realistische vorm ziet om het risico op doorgaande gaten tussen de barrière te verkleinen.
2. Modelleren van reeds uitgevoerde SoSEAL proeven: Naast het modelleren en vergelijken van de uitgevoerde laboratoriumproeven, zijn ook de reeds uitgevoerde SoSEAL proeven van Li gemodelleerd en opgenomen in het onderzoek. Dit zorgt voor een compleet beeld van de mate waarin D-Geo Flow de pipegroei kan voorspellen.
3. De waterdrukmetingen zijn niet geanalyseerd in dit onderzoek: Na afstemming met de opdrachtgever is besloten om dit niet op te nemen in dit onderzoek. Hier is voor gekozen omdat het SoSEAL ontwikkelteam met name meer inzicht wilde krijgen in verschillende barrières en de pipegroei naar de barrières. Daarom is er meer tijd gestopt in het uitvoeren en analyseren van meer proeven en zijn de waterdrukmetingen niet meegenomen in dit onderzoek. Ook is de analyse van de waterdrukmetingen een separaat onderdeel en kan later uitgevoerd worden. Het belang van het analyseren van de waterdrukmetingen is echter wel erkend en daarom is aanbevolen om dit nader te analyseren in toekomstig onderzoek.

4 Theoretisch Kader

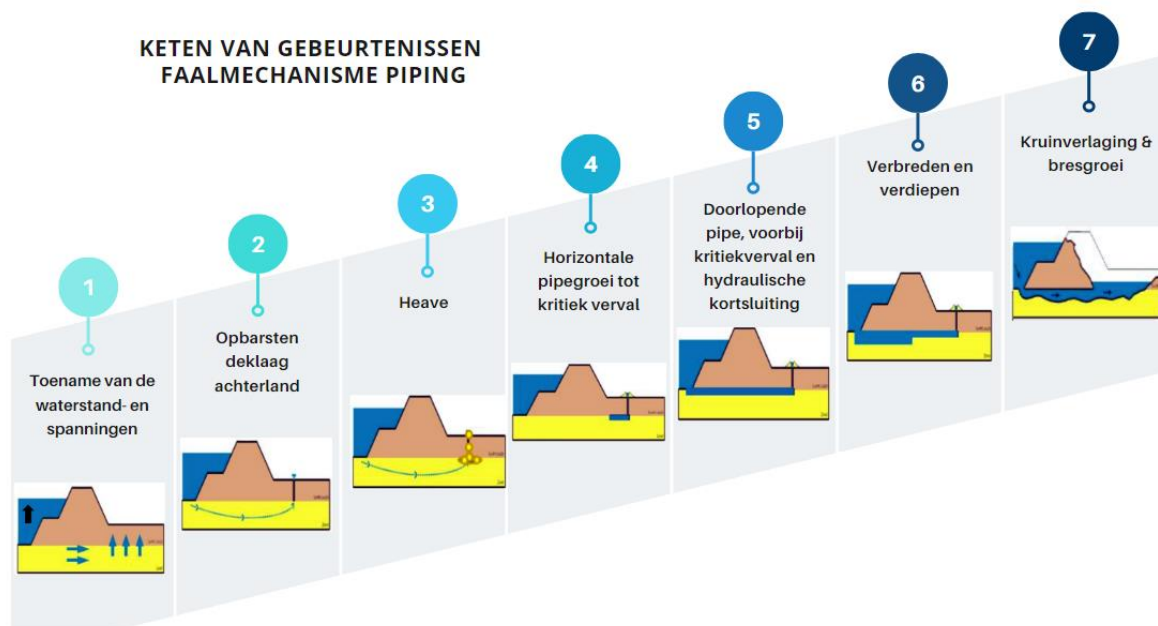
In dit hoofdstuk is het theoretisch kader van het onderzoek uitgewerkt. Daarvoor is een literatuurstudie uitgevoerd waarin verschillende literatuur is beschouwd met betrekking tot het faalmechanisme piping, D-Geo Flow en SoSEAL. Met het onderzoek en de beschrijving van deze aspecten is de eerste deelvraag beantwoord: *Hoe werkt het faalmechanisme piping, de software D-Geo Flow en SoSEAL?* Hierdoor is het vervolg van het onderzoek gericht en bewuster uitgevoerd. De belangrijkste aspecten uit de literatuurstudie zijn samengevat in de lessons-learned. Deze lessons-learned zijn geïmplementeerd in het verdere verloop van het onderzoek.

4.1 Faalmechanisme Piping

Omdat tijdens dit onderzoek een deel van het faalmechanisme piping wordt onderzocht is piping in deze paragraaf nader toegelicht. Piping is een intern erosiemechanisme waarbij holle ruimtes (pipes) worden gevormd onder een waterkerende constructie als gevolg van het eroderen van zand door grondwaterstroming (Van Beek, 2015). In deze paragraaf is ingegaan op piping en bijbehorende processen. Als eerst is de keten van gebeurtenissen voordat piping leidt tot falen van de waterkering beschreven. Vervolgens zijn de belangrijkste pipingparameters beschreven. Tot slot is kort ingegaan op oplossingsmaatregelen tegen piping.

4.1.1 Keten van gebeurtenissen

Voordat piping tot een dijkdoorbraak kan leiden moeten er verschillende processen ingang gezet worden en gebeurtenissen optreden. Deze keten van gebeurtenissen zijn hieronder per fase geïllustreerd en toegelicht. Dit schema is gebaseerd op de memo 'rode draad overstrooming door piping' (Rijkswaterstaat, 2021). De eerste vier gebeurtenissen worden de initiële mechanismes genoemd. Deze mechanismes moeten vooraf optreden voordat er sprake is van piping. Indien deze mechanismes niet optreden kan er ook geen piping plaatsvinden. De overige gebeurtenissen zijn het vervolgproces, die leiden tot een dijkdoorbraak. Zie Figuur 4–1 voor een illustratie van deze gebeurtenissen.

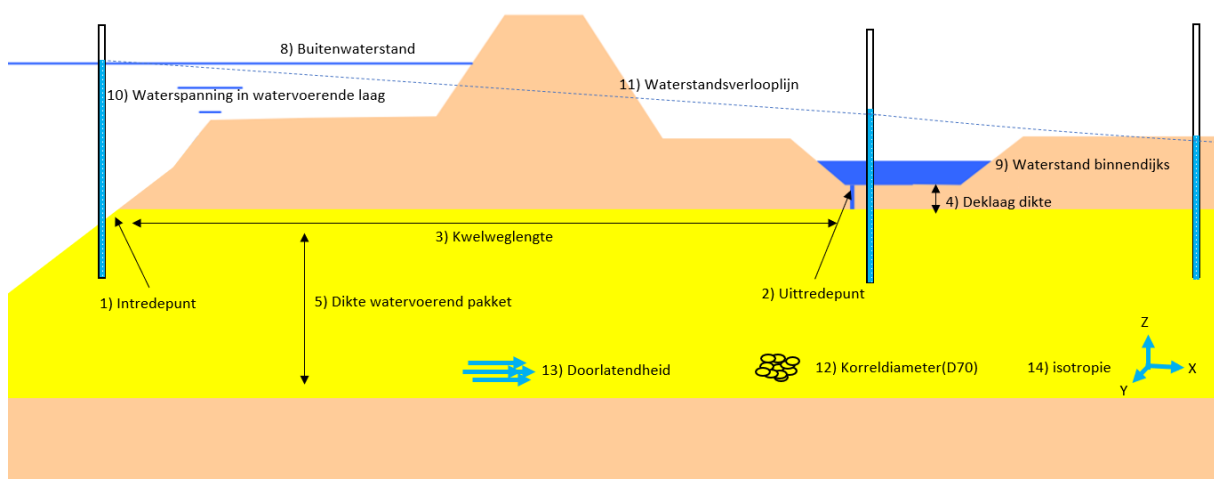


Figuur 4–1 Schematisatie keten van gebeurtenissen piping, gebaseerd op (Rijkswaterstaat, 2021)

1. **Toename van de waterstand- en spanningen:** Het eerste proces is het toenemen van de rivierwaterstand waardoor de waterspanning in het watervoerend pakket stijgt.
2. **Opbarsten deklaag achterland:** Het opbarsten van de deklaag hangt af van de waterspanningen en de dikte & samenstelling van de deklaag. Het opbarsten is de vorming van een scheur in de deklaag. In sommige gevallen is dit gat al aanwezig, bijvoorbeeld bij een kwelsloot.
3. **Heave:** Bij voldoende verticale stroming kan er drijfzand ontstaan en kunnen zandkorrels naar het maaiveld worden getransporteerd. Dit proces wordt heave genoemd.
4. **Horizontale pipegroei tot kritiek verval:** Afhankelijk van onder meer waterstanden, grondopbouw, doorlatendheden en korreldiameter(s) van het watervoerendpakket kan een horizontale pipe ontstaan. Het kritiek verval is het verval waarbij de pipegroei niet meer tot evenwicht komt en de pipe zal doorgroeien tot het intredepunt.
5. **Doorlopende pipe, voorbij kritiek verval en hydraulische kortsluiting:** Indien het verval boven het kritieke verval uitkomt kan de pipe zich door ontwikkelen tot het intredepunt. Het kan nog aanzienlijk lang duren voordat een doorgaande pipe tussen het intrede- en uittredepunt is gevormd.
6. **Verbreden en verdiepen:** Indien er een doorlopende pipe is gevormd verbreed en verdiept deze pipe zich door de toenemende stroomsnelheid in de pipe.
7. **Kruinverlaging en bresgroei:** Wanneer de pipe zo groot is dat deze instort zal het dijklichaam mee zakken. Water dat over de dijk en door scheuren in de dijk stroomt veroorzaakt erosie en uiteindelijk een bres. (Rijkswaterstaat, 2021)

4.1.2 Parameters piping

Er zijn verschillende parameters die van belang zijn bij piping. De belangrijkste parameters zijn in deze paragraaf toegelicht. Deze gegevens zijn grotendeels afkomstig uit de schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk (Rijkswaterstaat, 2021). De belangrijkste parameters zijn hieronder eerst geïllustreerd in Figuur 4–2.



Figuur 4–2 Schematisatie parameters piping

1. **Intredepunt:** Het intredepunt is het dichtst bij de dijk gelegen punt waar de watervoerende zandlaag in direct contact staat met het buitenwater.
2. **Uittredepunt:** Het uittredepunt is de locatie waar de kwelstroom aan het maaiveld komt. Dit is vaak de positie waar de deklaag het dunst is of niet aanwezig is (zoals een kwelsloot). Het maatgevende uittredepunt ligt het dichtst bij de binnentoe van het dijklichaam.

3. **Kwelweglengte:** Dit is de afstand tussen het intrede- en uittredepunt van de kwelstroming die onder het dijklichaam loopt.
4. **Dikte deklaag:** Dit is de dikte van de afsluitende klei- of veenlaag die aan het maaiveld is gelegen. Vaak is de dikte van de deklaag de afstand tussen het maaiveld en het watervoerend pakket.
5. **Dikte watervoerendpakket:** Dit is de dikte van de zandlaag die waterdoorlatend is. Er kunnen meerdere watervoerendepakketten aanwezig zijn in de ondergrond. Indien dit het geval is worden deze lagen afzonderlijk van elkaar beschouwd. De dikte is de afstand tussen de onderzijde van de deklaag en de onderkant van het watervoerend pakket.
6. **Verzadigd volumegewicht deklaag:** Dit is het volume gewicht van de volledig verzadigde grond die aanwezig is in de deklaag. Dit wordt uitgedrukt in KN/m^3 .
7. **Buitenwaterstand (hydraulische belasting):** Bij het beoordelen van de dijk wordt de buitenwaterstand gehanteerd die van toepassing is bij de norm. Naast de waterstand is het verval van belang, dit is het verschil tussen de binnen- en buitenwaterstand.
8. **Waterstand binnendijs (slootpeil):** De binnenwaterstand is de waterstand in het water aan de binnenzijde van het kunstwerk tijdens maatgevende omstandigheden.
9. **Waterspanningen in watervoerende lagen:** Dit is de waterspanning in de zandlaag onder de dijk. De hoogte van de spanning wordt in grote mate bepaald door de buitenwaterstand.
10. **Waterstandsverloop (hydraulische belasting):** Dit is het verloop van de waterspanning in de watervoerende laag.
11. **Korrel diameter (D_{70}):** Dit is de korrelgrootte van het zand in de watervoerende laag. De korrelgrootte wordt uitgedrukt in de diameter van de korrels in mm of μm . De korrelverdeling wordt bepaald doormiddel van een zeefkromme. Voor piping wordt de korrelgrootte uitgedrukt in de D_{70} . Dit betekent dat 70% van de korrels gelijk of kleiner zijn dan deze diameter.
12. **Doorlatendheid zandlaag:** De specifieke doorlatendheid van een grondlaag is het debiet per seconde per 1m^2 doorstromend oppervlak, bij een verhang van 1m. Dit wordt uitgedrukt in meters per seconde (m/s) of meters per dag (m/d).
13. **Isotropie:** Isotropie is de mate waarin een materiaal dezelfde eigenschappen heeft in alle richtingen. Een materiaal wordt isotroop genoemd als de materiaaleigenschappen niet van de richting afhangen. Als de eigenschappen wel van de richting afhangen, is het materiaal anisotroop. In het geval van waterkeringen gaat dit vaak om de doorlatendheid van het watervoerendpakket. (Rijkswaterstaat, 2021)

4.1.3 Oplossingen

Om de kans op overstroming door piping te verkleinen, kunnen verschillende maatregelen worden genomen. De Project overstijgende Verkenning Piping (POV piping) onderscheidt vier categorieën versterkingsmaatregelen:

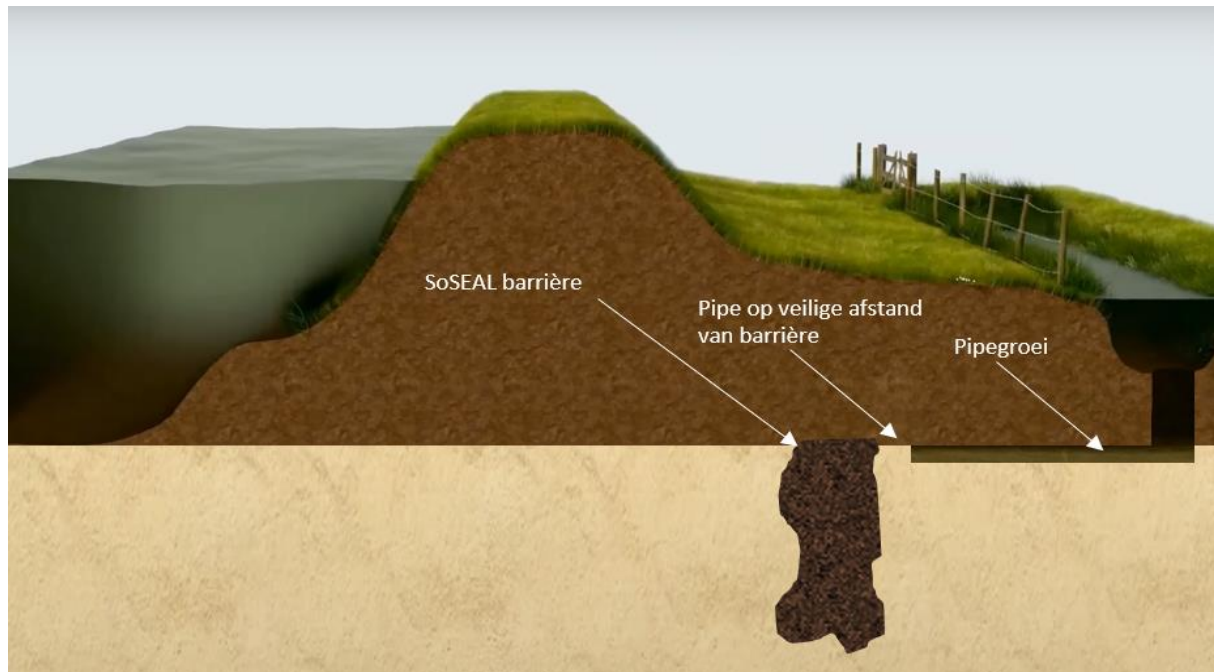
1. Horizontale kwelwegverlenging
2. Verticale kwelwegverlenging en heaveschermen
3. Drainageoplossingen
4. Filteroplossingen (Wiggers, 2019)

SoSEAL valt onder de tweede categorie: verticale kwelwegverlenging en heaveschermen. In dit onderzoek is specifiek gekeken naar SoSEAL als verticale kwelwegverlenging, waarbij de pipe op afstand van de barrière moet blijven.

Bij verticale kwelwegverlenging en heaveschermen wordt verticaal een scherm of substantie aangebracht om de doorlatendheid te verlagen, waardoor piping wordt tegengegaan. Het verschil tussen verticale kwelwegverlenging en heaveschermen is in dit onderzoek als volgt geïnterpreteerd:

Bij kwelwegverlenging moeten de pipes op een veilige afstand van de barrière blijven, terwijl bij heaveschermen de pipes het scherm mogen bereiken en het scherm wordt getoetst op heave.

De meest gebruikelijke methode is het verticaal aanbrengen van stalen damwanden in het watervoerende, pipinggevoelige pakket. Zoals hierboven beschreven is dit vaak een kostbare en niet duurzame oplossing. Daarom worden er momenteel veel innovaties doorontwikkeld, waar SoSEAL er een van is. In Figuur 4–3 is weergegeven hoe SoSEAL als verticale kwelwegverlenging in de ondergrond aanwezig is.



Figuur 4–3 Schematisatie SoSEAL als verticale kwelwegverlenging

4.2 D-Geo Flow 2D

In dit onderzoek is de validiteit van de software D-Geo Flow (2D) onderzocht. Door de software eerst te begrijpen zijn de berekeningen in de software beter en bewuster gemaakt. D-Geo Flow is ontwikkeld door Deltares en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu om gedetailleerde berekeningen uit te voeren voor het faalmechanisme piping.

Bij een beoordeling van een waterkering wordt vaak eerst de analytische rekenregel van Selmeijer gebruikt om het faalmechanisme piping te beoordelen. Dit komt omdat het toepassen van D-Geo Flow over het algemeen meer inspanning vraagt en relatief nieuw is. D-Geo Flow is interessant omdat de rekenregel van Selmeijer vaak de overstromingskans (sterk) overschat. Dit komt doordat locatie-specifieke eigenschappen worden uitgemiddeld of niet worden meegenomen in de rekenregel. Enkele voorbeelden van dergelijke eigenschappen zijn voorlandweerstand, anisotropie en meerlaagsheid. Op een specifieke locatie kunnen deze aspecten bepalend zijn voor het optreden van piping.

D-Geo Flow bestaat uit een eindige elementen model dat het mogelijk maakt om een 2D geometrie met meerdere lagen, anisotropie en gedeeltelijk doorlatend voor- en achterland te schematiseren. Daarmee kunnen gedetailleerdere berekeningen gemaakt worden, die in de meeste gevallen een gunstigere uitkomst hebben. (Deltares, 2020)

D-Geo Flow is opgebouwd als een eindige-elementenmodel dat het model van Selmeijer koppelt aan het grondwaterstromingsmodel van Darcy. Het stelt gebruikers in staat om grafische en fysische resultaten van grondwaterstroming, kritiek verval en pipeontwikkeling te verkrijgen.

De grondwaterstroming naar de pipe wordt berekend met een eindige elementen berekening. Aan de hand van de stroming naar de pipe-elementen, de stroming door de pipe en het korrelevenwicht in de pipe bepaald of de pipe kan groeien. In elk element van het rekenmesh wordt de grondwaterstroming berekend. Het is belangrijk om de grootte van dit rekenmesh handmatig in te stellen voor zowel de grondlagen als het pipetraject. Het kiezen van een fijnere mesh resulteert in een gedetailleerdere berekening. Wel zorgt een fijnere mesh voor een langere rekentijd.

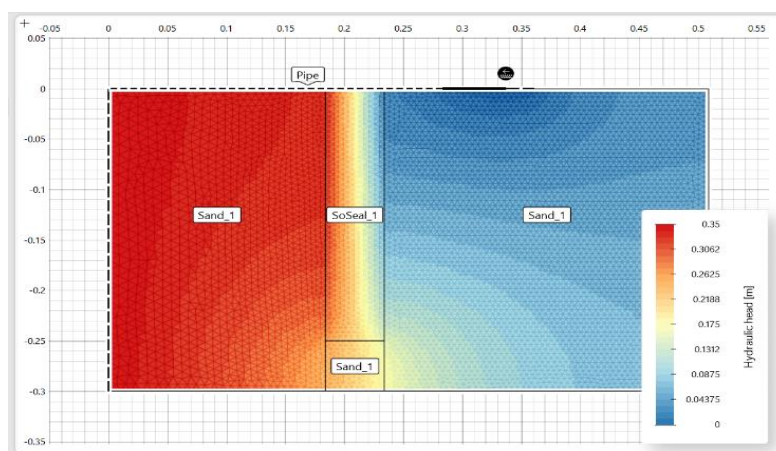
4.2.1 Grondwatermodel

In het grondwatermodel van D-Geo Flow worden verschillende resultaten berekend in elk element van het rekenmesh, zoals de stijghoogte, totale waterspanningen en debiet. Deze uitkomsten zijn essentieel voor het bepalen van de pipelengte en het kritieke verval. Het grondwatermodel is gebaseerd op een generalisatie van het Darcy-model, dat de stroming van water door poreuze massa beschrijft. Dit model houdt rekening met factoren zoals de hydraulische doorlatendheid van de grondlagen.

Voor de stroming in de pipe maakt D-Geo Flow gebruik van het model van Poisseuille. Dit model beschrijft de laminaire stroming van vloeistoffen voor een oneindig brede ondiepe pipe en wordt toegepast om de stroming bij de kop van de pipe te berekenen. Voor een gedetailleerde uitwerking en integratie van het grondwatermodel, wordt verwezen naar de handleiding van D-Geo Flow (Deltares, 2023). Dit document biedt een volledige beschrijving van het grondwatermodel en de bijbehorende technische details.

4.2.2 Pipelengte & Kritiek verval

In D-Geo Flow wordt het model van Sellmeijer gebruikt om de pipelengte en het kritieke verval te berekenen, zie Figuur 4–4 voor een voorbeeld model uit D-Geo Flow. Dit model maakt gebruik van een krachteenwicht van korrels in elk element van de pipe. Het krachteenwicht wordt bepaald door de grondwaterstroming (aandrijvend) en de weerstand van de zandkorrels (weerstand biedend). Als de grondwaterstroming een grotere kracht uitoefent dan de weerstand van de zandkorrels, kunnen de zandkorrels worden getransporteerd en ontstaat er een pipe. D-Geo Flow deelt de ingevoerde pipe op in lijnelementen. Het programma berekent of het krachteenwicht op de korrels overschreden wordt. Als het criterium voor korrelevenwicht overschreden wordt, ‘opent’ het element en vormt er een pipe in dat specifieke element. Voor alle geopende lijnelementen wordt vervolgens de fictieve diepte aangepast totdat de korrels juist in evenwicht zijn. Vervolgens gaat het programma naar het volgende element bovenstrooms van de pipe en herhaalt het proces van het berekenen van het



Figuur 4–4 Voorbeeld D-Geo Flow model (Deltares, 2023)

krachteenwicht. Dit wordt herhaald totdat de erosiepipe tot evenwicht komt en niet meer langer wordt of totdat de erosiepipe het intredepunt bereikt en daarmee het kritieke verval overschrijdt. Het evenwicht in de pipegroei ontstaat omdat de pipegroei wordt bepaald door de stroming naar de kop van de pipe. De stroming naar de kop van de pipe wordt bepaald door twee tegenwerkende fenomenen:

1. Als de pipe langer wordt neemt de stroming naar de kop van de pipe toe, want door de beperkte drukval in de pipe neemt de lokale gradiënt bovenstrooms van de pipe toe.
2. Als de pipe langer wordt neemt het uitstroomoppervlak toe, waardoor het water gespreider weg kan stromen. Hierdoor neemt de lokale gradiënt bovenstrooms van de pipe af.

Wanneer de pipe nog kort is, voert effect twee de bovenhand. Bij een korte pipe is de toename van het uitstroomoppervlak bij pipe verlenging relatief groot, waardoor de lokale gradiënt bovenstrooms van de pipe afneemt en er evenwicht ontstaat. Ergens is er een kantelpunt, waarbij de verlenging van de pipe tot relatief weinig vergroting van het uitstroomoppervlak zorgt, maar er wel toename is van de lokale gradiënt doordat het verval verdeeld wordt over de resterende lengte van de pipe. Dit wordt ook wel het kritiek verval genoemd. Voor situaties met barrière speelt er nog een effect: naarmate dichterbij de barrière komt, kom je in de schaduwzone van de barrière waar de stroming naar de pipe lager is. Bij toename van de pipelengte neemt de gradiënt net bovenstrooms van de pipe dus af. Voor een volledige uitwerking van de achterliggende rekenmodellen zie: (Deltares, 2023).

4.2.3 Invoerparameters

Om een D-Geo Flow berekening uit te kunnen voeren moeten er verschillende parameters worden ingevoerd. Deze parameters staan in Tabel 4-1 toegelicht.

Parameter	Eenheid	Toelichting
Geometry	[-]	Doormiddel van de invoer van de geometrie kunnen er verschillende grondlagen in D-Geo Flow worden aangemaakt.
Water boundaries	[m]	Door randvoorwaarden toe te voegen kan aangegeven worden hoe het programma om moet gaan met de randen van het model. Voor pipingberekeningen wordt vaak gekozen voor 'constant head boundaries' die een waterdruk opgeven en 'closed boundaries' die een afsluitende laag nabootsen.
Element size mesh/pipe	[m]	In het model kan gekozen worden hoe fijn het rekenmesh moet zijn. Dit kan zowel in de grondlagen als in de pipe. Hoe fijner het mesh wordt gedefinieerd hoe meer berekeningen er worden gemaakt. Dat betekent ook dat de uitkomsten preciezer zijn. Echter zorgt een fijner rekenmesh ook voor een langere rekentijd.
Hydraulic conductivity (k)	[m/dag]	In het model kunnen voor de verschillende grondlagen, verschillende doorlatendheden worden ingevoerd. Ook kan isotropie worden meegenomen doordat er een verticale en horizontale doorlatendheid ingevoerd kan worden.
Particle size (D₇₀) in de pipe	[mm]	Dit is de korrelgrootte van het zand waarin de pipe zich ontwikkelt. Dit is uitgedrukt in de D ₇₀ van de korrels.
Pipe trajectory	[-]	Om de pipelengte te kunnen berekenen moet er een horizontale route van de pipe worden gedefinieerd. Dit is de route waar vooraf wordt verwacht dat er piping optreedt.
Critical head	[m]	Om het kritieke verval te bepalen moet er een laag en hoog verval worden ingevoerd. Ook moet er een stap grootte worden gedefinieerd. Hierbinnen wordt het kritieke verval uitgerekend.

Tabel 4-1 Toelichting invoerparameters D-Geo Flow

4.2.4 Toepassing binnen onderzoek

In het onderzoek is gekeken naar de voorspellende capaciteit van D-Geo Flow (2D) voor de pipegroei naar een SoSEAL barrière. Er zijn onzekerheden met betrekking tot de berekende pipelengte door D-Geo Flow, omdat deze theoretisch zijn en niet gevalideerd zijn aan experimenten. Om deze onzekerheid te verminderen, zijn er laboratoriumproeven met SoSEAL barrières op kleine schaal uitgevoerd. Vervolgens zijn deze proeven gemodelleerd in D-Geo Flow en zijn de resultaten vergeleken.

Aangezien de laboratoriumproeven op kleine schaal zijn uitgevoerd, zijn er ook berekeningen op kleine schaal nodig om de resultaten te kunnen vergelijken. De huidige versie van D-Geo Flow (Versie 2022.01) biedt echter niet de mogelijkheid om het rekenmesh fijn genoeg in te stellen voor een nauwkeurige vergelijking. Daarom is er een aangepaste versie van D-Geo Flow gebruikt voor de modelleringen, waarbij alleen de range van de mesh-grootte is aangepast. Het rekenhart van D-Geo Flow functioneerde hetzelfde als in Versie 2022.01. Hierdoor is het mogelijk om gedetailleerde berekeningen uit te voeren.

Om de pipevorming van een laboratoriumproef in D-Geo Flow te kunnen simuleren, zijn er veel berekeningen gemaakt omdat het verval tijdens de proeven stapsgewijs is verhoogd. Elke stap is doorgerekend in D-Geo Flow. Daarom is tijdens de modelleringen gebruikgemaakt van de Probabilistic Toolkit van Deltares en een Python-script. Met behulp van deze Toolkit en het script is het mogelijk om geautomatiseerd berekeningen in D-Geo Flow uit te voeren. Door een bereik en stapgrootte van het verval op te geven, is voor elke stap een berekening uitgevoerd, waaruit pipelengtes komen.

4.3 SoSEAL

Omdat dit onderzoek bijdraagt aan de doorontwikkeling van de productinnovatie SoSEAL is er in deze paragraaf nader ingegaan op SoSEAL. Als eerst is de theoretische werking van SoSEAL beschreven. Vervolgens is beschreven hoe een SoSEAL barrière aangebracht kan worden en op welke wijze deze kan falen. Tot slot is ook beschreven wat de onzekerheden zijn van een SoSEAL barrière.

4.3.1 Theoretische werking SoSEAL

SoSEAL is gebaseerd op de natuurlijke podzolgronden, zie Figuur 4–5. Het ontstaan van podzolgronden vindt plaats door een proces genaamd podzolisatie. Tijdens dit proces treedt verzuring op in de bovenste humusrijke laag van de bodem, wat resulteert in het oplossen van een deel van het organisch materiaal. Het verzuurde organische materiaal spoelt vervolgens dieper de bodem in door infiltrerend regenwater. Tijdens dit inspoelingsproces worden metalen, zoals ijzer en aluminium, gemobiliseerd vanuit de inspoelingslaag en samen met de humus naar diepere bodemlagen getransporteerd. Door verschillende biochemische processen, zoals complexering, afbraak, co-precipitatie en adsorptie, ontstaat op een bepaalde diepte in de bodem een neerslag van organisch aluminium en/of ijzer. Deze neerslag vermindert de doorlatendheid van de bodem, waardoor een bijna ondoorlatende laag ontstaat. Deze ondoorlatende laag fungeert als een barrière voor grondwaterstroming (Sterke Lekdijk, 2023).

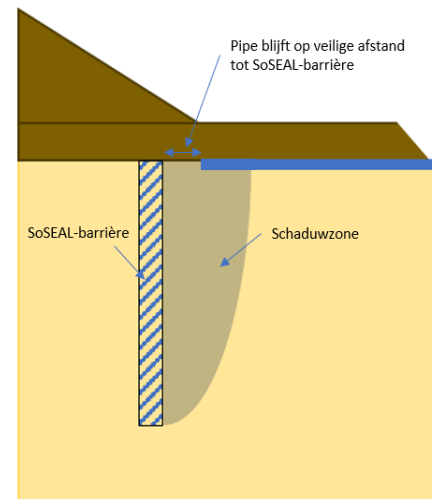


Figuur 4–5 Podzolgrond (De Veluweaar, 2014)

Dit milieuvriendelijke en duurzame podzolproces wordt kunstmatig nagebootst met SoSEAL. Bij SoSeal injectie wordt verticaal, organisch materiaal (OM) en Aluminium (Al) in de watervoerende zandlaag geïnjecteerd. Het organisch materiaal reageert met aluminium waardoor vlokken ontstaan, die de

poriën tussen het zand verstoppen. Daardoor wordt de doorlatendheid verlaagd. Door de verlaagde doorlatendheid wordt een waterremmende barrière gevormd. Daardoor nemen de grondwaterstromen, net achter de barrière af en daarmee wordt de kans op het ontstaan van doorgaande pipes onder de dijk verminderd. SoSEAL biedt verschillende voordelen ten opzichte van traditionele methoden. Zo kan het relatief snel worden aangebracht, kan het in-situ worden toegepast en biedt het de mogelijkheid om kabels en leidingen te behouden. Bovendien zijn zowel de aanbrengmethode als de gebruikte materialen duurzamer en goedkoper in vergelijking met traditionele oplossingen.

Zoals eerder uitgelegd wordt door de SoSEAL barrière meer weerstand in het watervoerendpakket toegevoegd waardoor de grondwaterstroming achter de barrière (schaduwzone) wordt verminderd. Dit heeft als gevolg dat de pipegroei wordt geremd. Zoals eerder gesteld in de afbakening in paragraaf 1.5 is in dit onderzoek SoSEAL onderzocht als kwelwegverlengende barrière en niet als heavescherm. In tegenstelling tot een heavescherm mag bij SoSEAL de erosiepipe vooralsnog niet tot de barrière groeien, zie Figuur 4–6. Dit komt doordat de erosiebestendigheid en homogeniteit van SoSEAL op korte termijn niet aangetoond kan worden. Er kan erosie van de SoSEAL barrière optreden als er een pipe vormt tot het scherm. Dit komt omdat er dan stroming langs de barrière plaatsvindt, het water en de zandkorrels die daarmee worden verplaatst schuren tegen de barrière wat mogelijk kan leiden tot gaten. Indien er gaten in de barrière worden gevormd kan de pipe zich verder ontwikkelen, wat kan leiden tot falen van het dijklichaam.



Figuur 4–6 Schematisatie SoSEAL barrière

Daarom kan een SoSEAL barrière vooralsnog enkel worden ingezet als kwelwegverlengende maatregel waarbij de pipe niet tot de barrière mag groeien. Dit kan bereikt worden door de barrière lang genoeg te dimensioneren en/of voldoende doorlatendheidsreductie te geven ten opzichte van het omliggende zand. De barrière vergroot daarmee de weerstand tegen stroming waardoor er een schaduwzone ontstaat achter de barrière waar de pipegroei stopt. In dit geval bereikt de pipe de barrière niet en kan de barrière niet eroderen. De pipegroei naar een SoSEAL barrière en de modellering daarvan is in dit onderzoek nader onderzocht.

4.3.2 Aanbrengmethode SoSEAL

Voor de toepassing van SoSeal is de manier van aanbrengen cruciaal. SoSEAL wordt doormiddel van een injectie in de ondergrond aangebracht. In hoofdlijnen zijn er twee opties voor de injectie in de ondergrond. De eerste injectiemethode is via directe injectie in de ondergrond. Daarbij wordt SoSEAL aangebracht door middel van een injectieersysteem. Hierbij brengt het injectieersysteem in Figuur 4–8 het SoSEAL-mengsel aan in het watervoerend pakket door middel van een injectiestang met vier injectieozzles die is afgebeeld in Figuur 4–7. Dit wordt gedaan door de injectiestang eerst op de gewenste diepte te drukken. Op de gewenste diepte wordt gestart met de injectie. Elke keer als een bepaalde hoeveelheid SoSEAL-mengsel geïnjecteerd is, wordt de injectielans een stukje omhooggetrokken, waarna er opnieuw wordt geïnjecteerd. Dit wordt herhaald totdat de injectielans in de deklaag zit, waarna de injectie is afgerond.

Een tweede methode is om de SoSEAL te injecteren in vooraf geplaatste filters. Deze methode vertoont veel gelijkenissen met de eerste methode. Het verschil is dat bij deze methode wordt geïnjecteerd in vooraf weggedrukte, vaste filters. De lengte van het injectiefilter is daarbij een belangrijke factor. Hoe langer het filter, hoe groter de heterogeniteit in de barrière. Omdat bij het werken met vaste filters op meerdere punten tegelijk kan worden geïnjecteerd, is de uitvoering potentieel goedkoper dan bij directe injectie. Echter, bij directe injectie kan flexibel worden geïnjecteerd op basis van een injectiedruk. De beste aanbrengmethode wordt momenteel nader uitgewerkt aan de hand van veld- en laboratoriumproeven. Tijdens de laboratoriumproeven in dit onderzoek is een aangepaste methode toegepast, genaamd de mixed-in-place methode. Deze methode is anders ten opzichte van de injectiemethodes en is nader uitgewerkt in subparagraaf 5.2.2.

Het SoSEAL-mengsel dat wordt geïnjecteerd bestaat uit een mix van aluminiumchloride (Al) en organisch materiaal (OM). Deze stoffen worden gemengd met gefilterd water en vormen vlokken. Door het injecteren verstopten de SoSEAL-vlokjes de poriën tussen de zandkorrels en klonteren tot grotere vlokken samen, waardoor er een barrière tegen stromend water ontstaat. (Sterke Lekdijk, 2022)

Het injecteren gebeurt zonder ingrijpende grondverstoring en met minimale overlast voor de omgeving. Zo vormt SoSEAL een uniek en kostenbesparend alternatief voor traditionele oplossingen (Heijmans, 2023). Een SoSEAL-barrière kan relatief eenvoudig en goedkoop worden aangebracht tot circa 20 meter onder het maaiveld. Indien een diepere barrière nodig is, brengt dit meer kosten met zich mee en worden de onzekerheden groter.



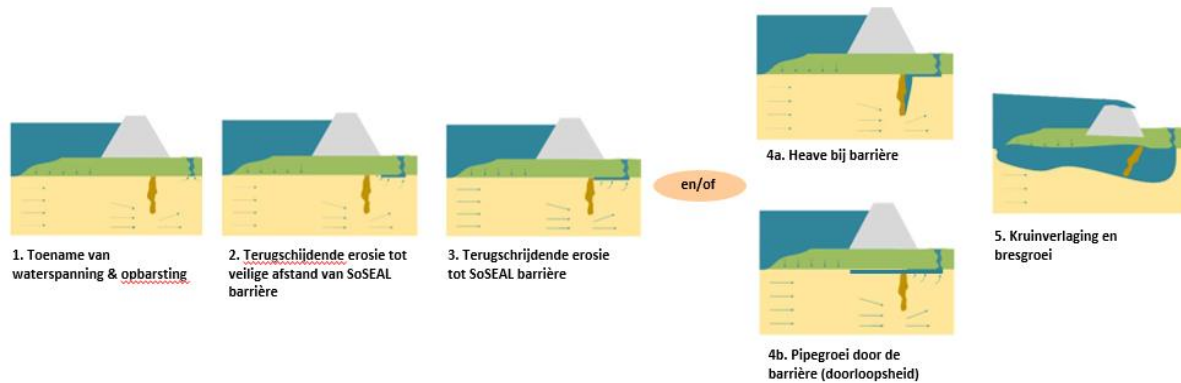
Figuur 4-8 Injectie installatie (TAUW, 2023)



Figuur 4-7 SoSEAL Injectiestang (Heijmans, 2023)

4.3.3 Faalpaden SoSEAL

Een faalpad beschrijft een lineaire opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot een overstrooming. Op deze wijze zijn de fysische processen gestructureerd beschreven en de belangrijkste parameters geïdentificeerd die invloed hebben op het faalpad. Indien SoSEAL wordt aangebracht als versterkingsmaatregel tegen piping, wordt het faalpad ten opzichte van piping aangevuld met meerdere stappen. De verschillende stappen bij de aanwezigheid van een SoSEAL-barrière zijn geïllustreerd in Figuur 4-9. Fase 1 en fase 5 zijn hetzelfde als beschreven in subparagraaf 4.1.1 en zijn daarom hieronder niet uitgewerkt. De overige fases zijn beschreven onder Figuur 4-9.



Figuur 4–9 Faalpad SoSEAL barrière als kwelwegverlengende maatregel

- 2. Terugschrijdende erosie tot veilige afstand van SoSEAL barrière:** Terugschrijdende erosie tot een veilige afstand van de SoSEAL-barrière is geen afzonderlijk fysisch proces, maar is als gebeurtenis toegevoegd vanwege kennisonzekerheden. Zoals eerder vermeld in subparagraaf 4.3.1, is een SoSEAL-barrière in dit onderzoek alleen onderzocht als kwelwegverlengende maatregel en mag de pipe het scherm niet bereiken. Deze stap in het faalpad is daarom van groot belang voor dit onderzoek.
- 3. Terugschrijdende erosie tot SoSEAL barrière:** Indien de pipe de barrière bereikt, is er sprake van terugschrijdende erosie tot aan de SoSEAL-barrière. De barrière voorkomt verdere ontwikkeling van de pipe totdat het verval te groot wordt. Daarna kan de barrière falen door stap 4a en/of 4b.
- 4. a Heave bij barrière:** Ter hoogte van de barrière kan heave ontstaan als gevolg van verticale stroming. Doordat de waterspanningen hoger of gelijk zijn aan de totaalspanningen, is er geen effectieve spanning tussen de korrels en geen korrelspanning meer. Omdat er dus eigenlijk geen contact is tussen de korrels, heeft het zand ook geen sterkte meer en kan de barrière falen.
b Pipegroei door de barrière: Het is ook mogelijk dat bij SoSEAL-barrières pipes door de barrière heen groeien. Indien de barrière erodeert, kan de pipe zich verder ontwikkelen en uiteindelijk een gat in de barrière vormen. Ook kunnen er gaten in de barrière ontstaan door fouten in de uitvoering, vervorming of de ontwikkeling van SoSEAL in de tijd. Een combinatie van heave en pipegroei is ook mogelijk.

Om het falen van de barrière te voorkomen, moet deze voldoende lang gedimensioneerd worden en voldoende doorlatendheidsreductie bieden. Dit onderzoek draagt daaraan bij door een beter inzicht te geven in de pipegroei naar een SoSEAL-barrière en of software dit kan voorspellen.

4.4 Voorgaande SoSEAL proeven

Om het TRL-niveau (Technology Readiness Level) van 6 á 7 te bereiken, zoals vermeld in paragraaf 1.2, zijn al verschillende laboratorium- en veldproeven uitgevoerd om de werking en haalbaarheid van SoSEAL te onderzoeken. Hieronder zijn de meest relevante proeven voor dit onderzoek opgesomd.

- Laboratoriumproeven 1D en 2D (2014-2017)
- Veldproeven dijkversterking Schoonhovenseveer-Langerak (2016-2017)
- Proeftoepassing kwelscherm waterbassin de Gijster (2018)
- Mixed-in-place permeability reductive (2021)
- Small scale laboratoriumproeven (2021)
- Veldproef Amerongen (2023)
- Laboratoriumproeven Injectiemethode (2023)

Het meest relevante uitgevoerde onderzoek, voor dit onderzoek is het laboratoriumonderzoek uitgevoerd door Li in 2021. Dit onderzoek richtte zich op de toepasbaarheid van een SoSEAL-barrière en werd uitgevoerd op kleine schaal in de Rotated box van Deltares.

Het belangrijkste doel van dit onderzoek was om de hypothese aan te tonen dat een doorlatendheidsreducerende barrière pipegroei effectief kan tegengaan. Daarnaast zijn ook andere aspecten onderzocht die relevant zijn of invloed hebben op dit doel. Er zijn doorlatendheidsproeven uitgevoerd en er is een numerieke modelstudie uitgevoerd met behulp van een onderzoeksversie van D-Geo Flow en COMSOL. De bevindingen uit dit onderzoek zijn van belang aangezien het huidige onderzoek een aanvulling vormt op het werk van Li. Andere proeven die minder raakvlakken hebben met dit onderzoek zijn daarom niet nader behandelt.

Om de hypothesen te onderzoeken, zijn er drie series pipingtesten uitgevoerd in de Rotated box bij Deltares. De uitwerking van de proefopstelling staat uitgewerkt in paragraaf 5.1. Deze testen zijn gericht op het simuleren van verschillende doorlatendheden van de SoSEAL-barrière om de invloed ervan op de ontwikkeling van de pipe aan te tonen. De drie verschillende series zijn als volgt ingedeeld:

1. **Serie 1 (referentietest):** Deze serie heeft de ontwikkeling van een pipe in een homogene zandlaag getest, waarbij geen barrière aanwezig was. Dit diende als referentie voor het vergelijken van de resultaten met de andere series.
2. **Serie 2 (referentietest invloed van slecht doorlatende laag):** In deze serie is een slecht doorlatende barrière gesimuleerd met behulp van materialen met een slechte doorlatendheid, variërend van slib tot klei. Dit is gedaan om de invloed van een slecht doorlatende laag op de pipe ontwikkeling te onderzoeken.
3. **Serie 3 (Hydraulische doorlatendheid SoSEAL):** In deze serie is het effect van een ex-situ gemaakte, homogene SoSEAL-barrière onderzocht. Hierbij is gekeken naar de hydraulische doorlatendheid van de SoSEAL-barrière en hoe deze van invloed is op de ontwikkeling van de pipe.

In Tabel 4-2 staan alle specificaties van de proeven die zijn uitgevoerd door Li. De proef-ID's zijn opgebouwd volgens de volgende structuur: barrière materiaal– doorlatendheidsreductie (25 of 100) - barrière lengte (in centimeters) of L - eerste proef (a) of tweede proef (b).

Test Series	Test ID	Material of barrier	Permeability of barrier	Height of barrier
Serie 1: Homogeneous sand	R-a	Not applicable	Not applicable	Not applicable
	R-b	Not applicable	Not applicable	Not applicable
Serie 2: Clayey barrier	C-100-20-a	Clayey sand	100 times reduction	20 cm
	C-100-20-b	Clayey sand	100 times reduction	20 cm
	C-25-20-a	Clayey sand	25 times reduction	20 cm
	C-25-20-b	Clayey sand	25 times reduction	20 cm
	C-100-15-a	Clayey sand	100 times reduction	15 cm
	C-100-15-b	Clayey sand	100 times reduction	15 cm
Serie 3: SoSEAL barrier	S-100-20-a	SoSEAL	100 times reduction	20 cm
	S-100-20-b	SoSEAL	100 times reduction	20 cm
	S-25-20-a	SoSEAL	25 times reduction	20 cm
	S-25-20-b	SoSEAL	25 times reduction	20 cm
	S-100-15-a	SoSEAL	100 times reduction	15 cm
	S-100-15-b	SoSEAL	100 times reduction	15 cm

Tabel 4-2 Laboratoriumproeven Li

Uit het onderzoek is gebleken dat een slecht doorlatende laag de ontwikkeling van pipegroei sterk kan verminderen, waarmee de eerste twee hypothesen van het onderzoek zijn bevestigd. Verder gebleken dat de pipe de barrière bereikt bij een hoger verval dan bij de referentietest. Het verval dat nodig is om hydraulische kortsluiting te veroorzaken bij de aanwezigheid van een barrière is 3.67 tot 7.43 keer hoger dan in situaties zonder barrière. Dit is afhankelijk van de lengte en doorlatendheidsreductie van de barrière. Bovendien is gebleken dat SoSEAL effectiever werkt tegen piping dan kleibarrières met dezelfde lengtes en doorlatendheden. Bij proeven met een doorlatendheidsreductie van 100 keer zijn weinig verschillen in de resultaten waargenomen, terwijl er wel verschillen zijn waargenomen bij een reductie van 25 keer. Dit kan worden verklaard doordat kleine afwijkingen in de doorlatendheid bij een reductie van 25 keer wel gevolgen heeft, terwijl deze minder effect hebben bij een reductie van 100 keer. Het is daarom belangrijk om de proeven zorgvuldig op te bouwen, met speciale aandacht voor het maken van het SoSEAL-mengsel en het plaatsen van de barrière.

Uit de numerieke modelstudie is gebleken dat D-Geo Flow de pipegroei beter kan voorspellen dan COMSOL. Echter, D-Geo Flow onderschatte de pipegroei bij aanwezigheid van een SoSEAL-barrière minimaal. Aangezien deze studie is uitgevoerd met een onderzoeksversie van D-Geo Flow en niet alle proeven geëvalueerd zijn, zijn de proeven opnieuw gemodelleerd in D-Geo Flow (V2022.01) om dit opnieuw te analyseren.

4.5 Lessons-learned

In Tabel 4-3 zijn de lessons-learned opgesteld uit het theoretisch kader. Deze lessons-learned zijn beknopt samengevat en voorzien van de betreffende subparagraaf waarin dit is beschreven. Vervolgens is ook beschreven hoe deze les is toegepast in het vervolg van het onderzoek.

Les	Is in verder onderzoek toegepast in:
Literatuurstudie	
Een pipe groeit stapsgewijs en kan na ontwikkeling tot evenwicht komen. Indien er geen evenwicht meer gevonden wordt is er sprake van hydraulische kortsluiting. Het verval waarbij dit optreedt wordt het kritieke verval genoemd, zie subparagraaf 4.2.2.	Tijdens het uitvoeren van de proeven is gewacht totdat de pipe na elke verval toename in evenwicht is gekomen voordat het verval verder is opgevoerd.
SoSEAL wordt in praktijk aangebracht door middel van een injectiesysteem. Dit is een andere methode dan tijdens de laboratoriumproeven wordt gehanteerd, zie subparagraaf 4.3.2.	Hierdoor is het niet mogelijk om ten aanzien van homogeniteit of erodeerbaarheid van de barrière, met de resultaten uit dit onderzoek iets kwalitatiefs te zeggen over de praktijksituatie. Wel geeft dit een indicatie.
Het bezwijken van de barrière kan doormiddel van heave of een doorgroeiende pipe, zie subparagraaf 4.3.3.	Tijdens het uitvoeren van de proeven is bestudeerd of er eerst een pipe door de barrière is gegroeid of dat deze is bezwiken als gevolg van heave.
Tijdens dit onderzoek is gebruikt gemaakt van een nieuwe, aangepaste versie van D-Geo Flow (v2022.01), omdat de standaardversie niet gedetailleerd genoeg kan rekenen. Zie subparagraaf 4.2.2.	Deze versie is gebruikt tijdens de modelleringen van de proeven. Hierin zijn de berekeningen zo gedetailleerd mogelijk uitgevoerd.
In D-Geo Flow kan maar één D_{70} van het zand worden ingevoerd. Mede daardoor is de pipegroei door de SoSEAL barrière niet representatief, zie subparagraaf 4.2.3.	Hierdoor kunnen de modelleringen niet gebruikt worden om iets te zeggen over het doorbreken van de barrière.

D-Geo Flow sommen kunnen geautomatiseerd doorgerekend worden doormiddel van de Probalistic Toolkit, zie subparagraaf 4.2.4.	De Probalistic Toolkit is toegepast om de modellen door te rekenen.
<i>Onderzoek Li</i>	
De laboratoriumproeven dienen in duplo uitgevoerd te worden zodat deze vergeleken kunnen worden. Daarmee wordt meer validiteit gecreëerd. Echter is dit niet nodig bij SoSEAL barrières met een hoge doorlatendheidsreductie omdat kleine verschillen hierin van minimale invloed zijn op het resultaat. Zie paragraaf 4.4.	Hierdoor is het proefprogramma in paragraaf 5.3 aangepast, en zijn niet alle proeven in duplo uitgevoerd.
Dit onderzoek is een vervolg op het onderzoek van Li. Daarom heeft dit onderzoek veel gelijkenissen. Zie paragraaf 4.4.	Omdat de onderzoeken op elkaar lijken is de methode van de laboratoriumproeven in hoofdstuk 5 afgeleid uit het onderzoek van Li.
Tijdens de laboratoriumproeven dient het zand en de SoSEAL erg zorgvuldig verdicht te worden om een homogeen en reproduceerbaar proef te creëren. Het zand en de SoSEAL barrière worden onder water aangebracht om lucht in de box te voorkomen. Daarvoor dient ook ontlucht water gebruikt te worden. Zie paragraaf 4.4.	Dit is tijdens het opbouwen van de proeven toegepast conform de methode in paragraaf 5.4.
De software D-Geo Flow is 2D en gaat daarom niet uit van een werkelijke situatie waarin 3D effecten van toepassing zijn. Zie paragraaf 4.2.	Met een smalle box (Rotated box) wordt geprobeerd een 2D effect na te bootsen. Hierdoor kunnen de uitkomsten tussen de modellen en de proeven vergeleken worden.

Tabel 4-3 Lessons-learned literatuurstudie

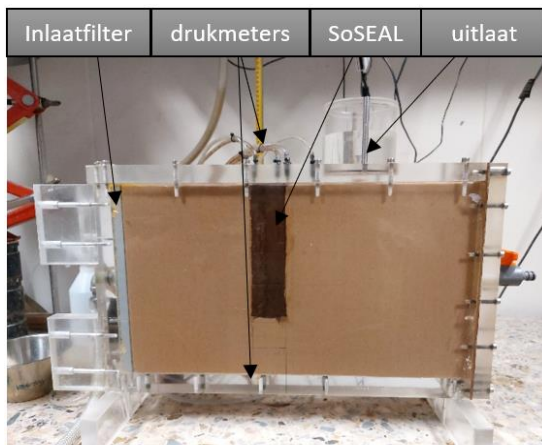
5 Methode Laboratoriumproeven

In dit hoofdstuk is de methode uitgewerkt die is gehanteerd tijdens het uitvoeren van de laboratoriumproeven. Hiermee is de tweede deelvraag beantwoord: *"Hoe moeten laboratoriumproeven worden uitgevoerd om de pipegroei naar een SoSEAL-barrière te kunnen onderzoeken?"* Deze methode is afgeleid van het onderzoek van Li (Li, 2022), waarin vergelijkbare proeven zijn uitgevoerd.

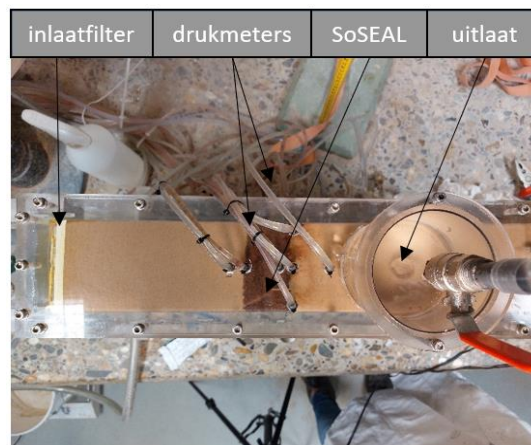
Allereerst zijn de proefopstelling en de gebruikte materialen beschreven die tijdens de proeven zijn gebruikt. Vervolgens is het proefprogramma beschreven, waarin is aangegeven welke specifieke proeven zijn uitgevoerd. Daarna is verder ingegaan op de opbouw en uitvoering van de proeven.

5.1 Proefopstelling

Tijdens de proeven is gebruikgemaakt van de Rotated box van Deltares. De Rotated box is een proefopstelling die is ontwikkeld door Deltares om piping te onderzoeken. In vergelijking met traditionele opstellingen voor pipingproeven heeft de Rotated box een grotere hoogte, waardoor het mogelijk is om verticale barrières te testen. Zie Figuur 5–2 voor een zijaanzicht en Figuur 5–1 voor een bovenaanzicht van de proefopstelling.



Figuur 5–2 Zijaanzicht Rotated box



Figuur 5–1 Bovenaanzicht Rotated box

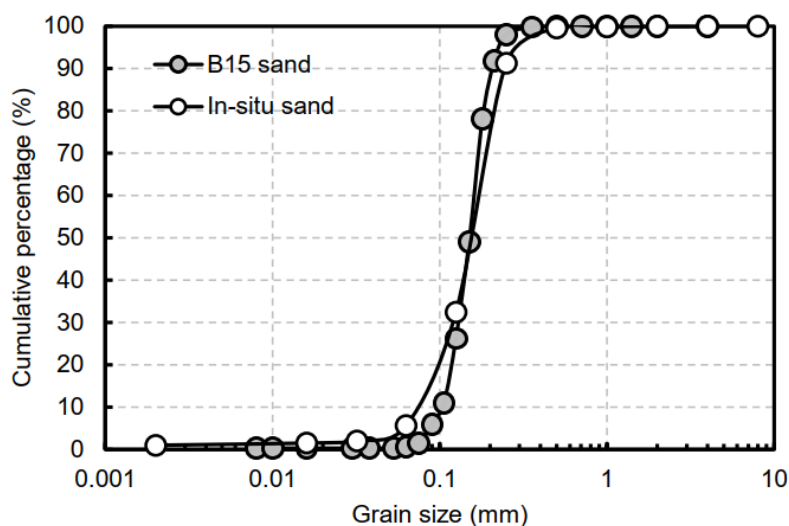
De afmetingen van de Rotated box zijn als volgt: de lengte, breedte en hoogte van de box zijn: 50 cm, 10 cm en 30 cm (binnenmaat). De kwelweglengte van de inlaat tot de uitlaat is 33,7 cm en de afstand van de uitlaat tot de barrière is 10,3 cm. Om de deklaag na te bootsen, is een transparante perspex plaat aan de bovenkant van de box geplaatst. Deze plaat is aan de binnenkant bedekt met een laagje siliconengel om wrijving te creëren tussen het zand en de gladde plaat, om zo de weerstand van de deklaag te simuleren. Bij de inlaat van de box is een filter geïnstalleerd om het instromende water gelijkmatig over de hoogte van de zandlaag te verdelen. Bovenaan de box is een cirkelvormige uitlaat gemaakt. Drukmetingen zijn aan de bovenkant, onderkant en zijkanten van de box geplaatst om de stijghoogtes op verschillende diepten te monitoren. Een gedetailleerde opbouw van de Rotated box is te vinden in Bijlage 1.

5.2 Materialen

Tijdens de laboratoriumproeven is de Rotated box gevuld met zand en SoSEAL-barrières. Het gebruikte zand is Baskarp 15 zand, verder B15 zand. Dit zand is gebruikt om het watervoerend pakket na te bootsen. Voor de barrière is gekozen voor mixed-in-place SoSEAL. Dit betekent dat de SoSEAL-barrières ter plaatse zijn gemaakt door SoSEAL-vlokken te mengen met B15 zand. Deze werkwijze is toegepast om de gewenste eigenschappen van de barrières te verkrijgen. De specificaties van deze materialen, zoals korrelgrootte, doorlatendheid en samenstelling, zijn hieronder nader toegelicht.

5.2.1 B15 zand

De selectie van het zand is gebaseerd op de beschikbare korrelgrootteverdelingen ter plaatse van de eerder uitgevoerde veldproeflocatie van WAM. Het zand op die locatie heeft voornamelijk korrels met een grootte tussen de 63 en 200 μm , met een kleine fractie slib. Om een representatief achtergrondmateriaal te creëren, is B15 zand gekozen vanwege de vergelijkbare korrelgrootteverdeling met het zand van de veldproef bij WAM. De zeefkromme van B15 zand en het zand op de WAM locatie zijn weergegeven in Figuur 5–3. Dit geeft een visuele vergelijking van de korrelgroottes tussen beide zandsoorten. De karakteristieke korrelgroottes van B15 zand zijn opgenomen in Tabel 5-1.



Figuur 5–3 Zeefkromme B15 en in-situ zand (Li, 2022)

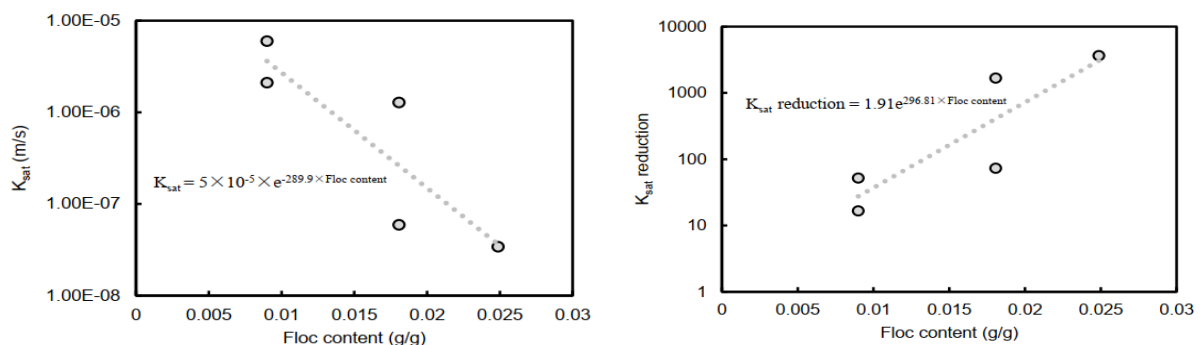
D ₁₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₇₀ (mm)	D ₆₀ / D ₁₀ (mm)	D ₉₀ /D ₁₀ (mm)	C _c
0,103	0,111	0,151	0,161	0,171	1,6	2,0	1,01

Tabel 5-1 Karakteristieke korrelgrote B15 zand (Li, 2022)

5.2.2 SoSEAL

De SoSEAL-barrières zijn gemaakt met behulp van de mix-and-place methode. Hierbij zijn twee stoffen, namelijk Humin-P 775 (OM) en aluminiumchloride-hexahydraat (Al), met elkaar gemengd. Deze stoffen reageren met elkaar en vormen nieuwe verbindingen, die de SoSEAL-vlokken vormen. De SoSEAL-vlokken zijn vervolgens gemengd met B15 zand om de gewenste doorlatendheidsreductie te bereiken.

Om de gewenste doorlatendheidsreductie van de SoSEAL-barrière te verkrijgen, moet er een specifiek percentage vlokken in de SoSEAL-mix aanwezig zijn. Dit percentage wordt ook wel de floc-content genoemd. Tijdens de laboratoriumproeven zijn barrières gemaakt die 25 en 100 keer minder doorlatend zijn dan B15 zand. Om een reductie van 25 keer te bereiken, moet de floc-content in de SoSEAL-mix 1% zijn. Voor een reductie van 100 keer moet de floc-content 1,5% zijn. Dit is onderzocht door Li, zoals te zien is in Figuur 5–4. In Bijlage 2 staat een gedetailleerd stappenplan waarin is uitgelegd hoe de SoSEAL is gemaakt. Dit stappenplan biedt een uitgebreide beschrijving van de processen en handelingen die nodig zijn om de SoSEAL-barrières met de gewenste doorlatendheidsreductie te maken. Echter kan de doorlatendheidsreductie afwijken ten opzichte van de gewenste reductie. De doorlatendheid die is behaald bij de proeven is niet onderzocht en het wordt daarom aanbevolen dit nader te onderzoeken.



Figuur 5–4 Doorlatendheidsreducties SoSEAL (Li, 2022)

5.3 Proefprogramma

Tijdens het uitvoeren van de proeven bij Deltares zijn er drie verschillende series pipingproeven uitgevoerd. Door middel van deze verschillende series proeven is er een breder inzicht verkregen in de pipegroei naar SoSEAL-barrières bij verschillende doorlatendheidsreducties en lengtes van de barrière. Hieronder zijn de series beschreven. Deze series zijn samengevat in Tabel 5-2.

1. **Serie 1 (herhalingsproef uit proevenserie Li):** In de eerste serie is de proef S-100-20 van Li eenmalig herhaald. Het doel van deze herhalingsproef is om te verifiëren of de proeven op de juiste wijze zijn uitgevoerd. De resultaten van de herhalingsproef zijn vergeleken met de oorspronkelijke proef van Li, en de bevindingen hiervan zijn beschreven in subparagraaf 6.3.1.
2. **Serie 2 (hydraulische doorlatendheid SoSEAL bij vrijwel volledige afsluiting zandlaag):** In de tweede serie is het effect van een langere mixed-in-place SoSEAL-barrière onderzocht. De proeven met 25 keer doorlatendheidsreductie zijn dubbel uitgevoerd om de resultaten te vergelijken en de validiteit van de proeven aan te tonen. Bij de proeven met 100 keer doorlatendheidsreductie is dit niet gedaan, omdat er weinig variatie is waargenomen in de proeven van Li.
3. **Serie 3 (korte en L-vormige barrières):** In de derde serie zijn korte barrières getest, waarbij een barrière van 5 cm is onderzocht. Het doel is om te bepalen of er een verschil is in de pipegroei tussen korte en lange barrières. Daarnaast zijn er barrières in de vorm van een omgedraaide L getest. Dit is van belang voor de praktische toepassing van SoSEAL. In deze proeven is er geen

variatie in doorlatendheidsreductie toegepast, en is de reductie van 100 keer ten opzichte van het zand gehanteerd.

In Tabel 5-2 staan alle uitgevoerde proeven. De proef-ID's zijn opgebouwd volgens de volgende structuur: barrière materiaal (S=SoSEAL) – doorlatendheidsreductie t.o.v. het zand (25 of 100 keer) - barrière lengte (in centimeters) of L - eerste proef (a) of tweede proef (b).

Proef Serie	Proef ID	Hydraulische doorlatendheid reductie	Barrière lengte (cm)	Dikte barrière (cm)	Opening tussen barrière en onderzijde box (cm)
Serie 1: Herhaling proef	Proef S-100-20-A	100	20	5	10
Serie 2: Vrijwel afsluitende SoSEAL-barrière	Proef S-25-25-A	25	25	5	5
	Proef S-25-25-B	25	25	5	5
	Proef S-100-25-A	100	25	5	5
	Proef S-25-28-A	25	28	5	2
	Proef S-25-28-B	25	28	5	2
	Proef S-100-28-A	100	28	5	2
Serie 3: Korte SoSEAL barrières	Proef S-100-5-A	100	5	5	25
	Proef S-100-5-B	100	5	5	25
	Proef S-100-(L)-A	100	15	10/5	15
	Proef S-100-(L)-B	100	15	10/5	15

Tabel 5-2 Uitgevoerde laboratoriumproeven

5.4 Opbouw en uitvoering proeven

De proefopstelling is opgebouwd door de box te vullen met zand en SoSEAL, zie Figuur 5–2 in paragraaf 5.1. Dit is gedaan terwijl de box in een verticale positie stond, met de inlaat naar beneden gericht. De deksel aan de stroomafwaartse zijde is verwijderd, waardoor de box vanaf de inlaat naar het stroomafwaartse uiteinde is opgebouwd. Eerst is er zand aangebracht tot aan de SoSEAL-barrière. Vervolgens is de SoSEAL-barrière geplaatst met behulp van een schot. Nadat de barrière is geplaatst, is opnieuw zand aangebracht totdat de box volledig gevuld is. Ontlucht water is gebruikt om de box en de stijgbuizen te vullen. In Bijlage 3 staat een stappenplan dat exact beschrijft en hoe de volledige proefopstelling is geprepareerd. In de onderstaande subparagrafen staat nader toegelicht hoe het zand en de SoSEAL-mix in de box zijn aangebracht en hoe de proeven zijn uitgevoerd.

5.4.1 Plaatsen zand

Bij alle proeven is de "wet method" (Van der Poel, 1998) gebruikt om het zand in de box te plaatsen. Daarvoor is eerst een laagje ontlucht water in de box aangebracht. Vervolgens is droog zand in de box gestrooid, terwijl het zand continu is aangestampt totdat de box volledig gevuld is. Op deze manier zijn verzadigde en goed verdichte proeven gemaakt. Het toevoegen van het zand is een continu proces om de vorming van lagen en heterogeniteit binnen de box te voorkomen. Zodra er voldoende zand is toegevoegd, is het overtollige zand van de box afgeschoven en is de box afgesloten.

5.4.2 Plaatsen SoSEAL barrière

De SoSEAL barrière is op een andere manier aangebracht dan het zand. Om de SoSEAL barrière te creëren, is eerst een schot op de gewenste diepte geplaatst. Vervolgens is een aangepaste wet-method toegepast om de barrière op te bouwen. Direct inbrengen van SoSEAL in het water kan namelijk leiden tot ontbinding van de SoSEAL vlokken van het zand. Daarom is er gekozen voor een aangepaste wet-method. Bij deze methode is de SoSEAL in een zeer dun laag water boven het zand geplaatst, waarna er continu water is gespoten op de SoSEAL. Door de SoSEAL constant aan te stampen zijn de

barrièrematerialen gemengd met water en verzadigd. Vervolgens is aan de rechterzijde van de barrière zand toegevoegd volgens subparagraaf 5.4.1. Wanneer het zand net boven de barrière uitsteekt, is het schot voorzichtig omhooggetrokken en verwijderd. Daarna is de box deels gevuld met water en verder aangevuld met zand.

5.4.3 Uitvoering proeven

Na het prepareren van de proeven volgens de beschrijving van voorgaande paragrafen zijn de proeven uitgevoerd. Tijdens de proeven is de uitlaat stapsgewijs verlaagt waardoor het verval is vergroot. Tot de pipe de barrière bereikt is het verval iedere 5 min verhoogd met 1 cm. Indien de pipe de barrière bereikte is het verval verhoogd met 2 cm per 5 min omdat de ontwikkeling na het bereiken van de pipe tot de barrière, buiten de scope van dit onderzoek valt. Indien tijdens de stappen erosie in de proefopstelling is waargenomen, is het verval gelijk gehouden totdat een evenwicht is ontstaan en de pipe zich niet meer verder ontwikkelde.

Tijdens de proeven zijn de volgende meetgegevens geregistreerd:

- Stijghoogte op 21 verschillende plaatsen in de box doormiddel van foto's van stijgbuizen aan het meetbord. Foto's zijn automatisch iedere 10sec gemaakt. De stijghoogte zijn uit deze foto's uitgelezen doormiddel van een python script.
- Metingen van pipegroei doormiddel van foto's van het bovenaanzicht van de box. Foto's zijn automatisch iedere 10sec gemaakt.
- Het debiet doormiddel van een weegschaal onder de afvoer. Foto's zijn automatisch iedere 10sec gemaakt.
- Hoeveelheid zand en SoSEAL aangebracht in (kg).
- Eventuele opmerkingen of bijzonderheden.

6 Uitkomsten laboratoriumproeven

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de laboratoriumproeven geanalyseerd. Tijdens deze analyse zijn inzichten verkregen, wat de invloed van een SoSEAL barrière op de ontwikkeling van de pipegroei is. Hiermee is de derde deelvraag van het onderzoek uitgewerkt: *Wat is de invloed van SoSEAL barrière op de ontwikkeling van de pipegroei richting de barrière?* Naast de uitgevoerde proeven die zijn beschreven in paragraaf 5.3 zijn ook de eerder uitgevoerde proeven uit het onderzoek van Li meegenomen in de analyse.

Als eerst zijn de specificaties van de verschillende proeven beschreven. Ook zijn de algemene waarnemingen met betrekking tot de pipegroei tijdens de proeven uitgewerkt. Vervolgens zijn waargenomen verbanden en conclusies met betrekking tot de pipegroei toegelicht. Deze verbanden en conclusies zijn verklaard en onderbouwd aan de hand van grafieken van de pipegroei uit de verschillende proeven. Deze grafieken zijn ook gebruikt in hoofdstuk 8, waarin de pipegroei van de proeven is vergeleken met de modelleringen in D-Geo Flow. Tot slot is er een deelconclusie van de laboratoriumproeven geformuleerd, waarin de belangrijkste bevindingen en de validiteit van de laboratoriumproeven zijn samengevat.

6.1 Specificaties proeven

De verschillende proeven die zijn uitgevoerd, zijn weergegeven in Tabel 6-1. Deze tabel bevat ook de proeven die zijn uitgevoerd in het voorgaande onderzoek van Li. Voor elke proef zijn de droge dichtheden van het zand en de SoSEAL barrière berekend, en zijn de belangrijkste specificaties uitgewerkt. De dichtheden zijn berekend door het droge gewicht van het zand en de SoSEAL in de box te delen door de inhoud van de box. Bij de aanwezigheid van een barrière is de dichtheid hiervan apart berekend door de barrière te delen door het gewicht van de barrière. In Tabel 6-1 is te zien dat de eerste proef die is uitgevoerd door Li geen barrière bevat. Daarom is dit de referentie test waarin is gekeken hoe de pipe ontwikkelt zonder barrière. De proef-ID's zijn opgebouwd op 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).

	Barrière lengte(cm)	Doorlatenheids reductie	Zand in box (kg)	Dichtheid zand (droog gewicht) (kg/m ³)	SoSEAL in box (kg)	Dichtheid SoSEAL (kg/m ³)	Maximaal verval (m)	Hoogte verval pipegroei tot barrière (m)	Hoogte verval falen barrière (m)	Uitgevoerd door
Referentie test-A	[-]	[-]	25,3	1680,7	[-]	[-]	12,0	[-]	[-]	Li (Li, 2022)
S-100-5-a	5	100	25,2	1681,0	0,50	2014,0	0,48	28	0,48	Alwin v.d. Burg
S-100-5-b	5	100	25,3	1683,2	0,45	1803,6	0,46	30	0,46	Alwin v.d. Burg
S-100-15-a	15	100	24,4	1681,0	[-]	[-]	0,68	[-]	[-]	Li, (Li, 2022)
S-100-15-b	15	100	24,9	1714,8	1,46	1950,7	0,87	78	[-]	Li, (Li, 2022)
S-100-20-a	20	100	22,8	1600,6	1,94	1942,0	0,73	69	[-]	Li, (Li, 2022)
S-100-20-b	20	100	24,3	1705,2	[-]	[-]	0,88	23	[-]	Li, (Li, 2022)
S-100-20-herhaling	20	100	23,9	1676,0	1,75	1754,3	0,72	72	[-]	Alwin v.d. Burg
S-25-20-a	20	25	22,6	1613,1	1,88	1877,1	0,75	52	[-]	Li, (Li, 2022)
S-25-20-b	20	25	24,0	1713,3	1,75	1749,0	1,05	34	[-]	Li, (Li, 2022)
S-100-25-a	25	100	23,8	1699,2	2,33	1866,9	1,04	104	[-]	Alwin v.d. Burg

S-25-25-a	25	25	24,9	1776,1	2,32	1856,1	0,90	38	[-]	Alwin v.d. Burg
S-25-25-b	25	25	23,8	1700,6	2,39	1908,8	1,04	39	[-]	Alwin v.d. Burg
S-100-28-a	28	100	23,5	1698,0	2,45	1756,5	1,04	[-]	[-]	Alwin v.d. Burg
S-25-28-a	28	25	23,5	1693,8	2,58	1845,4	1,04	72	[-]	Alwin v.d. Burg
S-25-28-b	28	25	23,5	1696,2	2,50	1788,0	1,04	71	[-]	Alwin v.d. Burg
S-100-L-a	15	100	24,0	1683,4	1,64	1644,0	0,72	34	0,72	Alwin v.d. Burg
S-100-L-b	15	100	23,9	1678,4	1,72	1719,9	0,76	30	0,76	Alwin v.d. Burg

Tabel 6-1 Specificaties laboratoriumproeven

Aan de hand van de specificaties van de proeven is de validiteit van de proeven geanalyseerd. Voornamelijk door het vergelijken van de droge dichtheden van het zand en de SoSEAL barrière. Aangezien dezelfde materialen zijn gebruikt tijdens de proeven, moeten de proeven ongeveer dezelfde dichtheden hebben om valide te zijn. Kleine verschillen zijn mogelijk als gevolg van variaties in de dikte van de barrières. Tijdens het berekenen van de dichtheden is uitgegaan van een standaardbreedte van 5,0 cm en de bijbehorende lengte van de barrière. Hoewel er tijdens het aanbrengen van de barrières geen significante afwijkingen zijn waargenomen, kan het voorkomen dat er enkele millimeters van de standaardwaarde is afgeweken. Hierdoor kan de werkelijke inhoud van de barrière verschillen van de standaardwaarde, wat resulteert in kleine variaties in de dichtheid van de barrières en het zand.

6.2 Generieke waarnemingen Pipegroei

Tijdens het uitvoeren van de proeven is de pipegroei gemeten en zijn er waarnemingen bijgehouden. De waarnemingen beschrijven kwantitatief hoe de pipegroei tijdens de proeven is verlopen en eventuele bijzonderheden die zijn waargenomen. In Tabel 6-2 zijn de algemene waarnemingen opgesteld die tijdens het uitvoeren van de proeven zijn geobserveerd met betrekking tot de pipegroei tot aan de barrière. In Tabel 6-3 zijn de waarnemingen opgesteld die tijdens het falen van de barrière zijn waargenomen. Alleen de proeven S-100-5-a & b en S-100-(L)a & b zijn gefaald. Bij de overige proeven is de barrière niet gefaald omdat het verval niet hoog genoeg opgevoerd kon worden. In Bijlage 4 is een uitgebreide beschrijving van de pipegroei van iedere proef te vinden, inclusief illustraties.

Beschrijving pipegroei	Figuur
Tijdens alle proeven zijn er meerdere meanderende pipes ontstaan. Deze pipes ontwikkelden zich zowel richting de barrière als richting de achterkant van de box. Dit is weergegeven in Figuur 6-1. Omdat de pipegroei naar achteren van minder belang is voor dit onderzoek, is hier verder niet op ingegaan.	 Figuur 6-1 Pipegroei naar achterkant Rotated box

Bij alle proeven is de groei van de pipe richting de barrière op vrijwel dezelfde manier verlopen. Naarmate het verval stapsgewijs is verhoogd, begon het zand bij de uitlaat te borrelen. Na verdere verhoging van het verval begon de pipe met groeien. Tijdens elke proef ontstonden meerdere pipes binnen de cilinder, zie Figuur 6–2. Vervolgens zijn er drie verschillende situaties opgetreden, waarbij geen verband is gevonden met de eigenschappen van de barrière. Deze drie situaties zijn hieronder opgesomd:

- Eén pipe groeit eerst tot de barrière, waarna de andere pipes pas verder ontwikkelen.
- Twee pipes groeien vrijwel gelijk aan elkaar richting de barrière.
- Eén pipe groeit richting de barrière, splitst op in twee pipes, en deze lopen vrijwel gelijk aan elkaar richting de barrière.

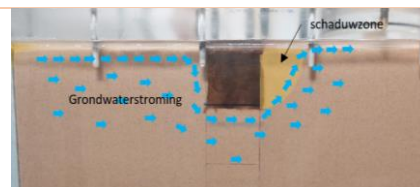
Naarmate de pipe dichterbij de barrière komt, neemt de groeisnelheid van de pipe per verhoging van het verval af en stabiliseert de pipe sneller. Dit kan worden verklaard door de schaduwzone van de SoSEAL barrière. De barrière heeft waterremmende eigenschappen, waardoor er achter de barrière minder horizontale stroming plaatsvindt zoals te zien is in Figuur 6–3. Het water stroomt onder de barrière door, waarbij er meer verticale stroming ontstaat. Door de afname van de horizontale stroming worden de zandkorrels minder snel verplaatst, waardoor de pipe stopt met groeien. Naarmate de pipe dichterbij de barrière komt, neemt de invloed van de barrière op de grondwaterstroming toe. Dit verklaart waarom de pipe minder snel groeit naarmate deze dichterbij de barrière komt.

Tijdens het uitvoeren van de proeven is gebleken dat het lastig is om nauwkeurig vast te stellen wanneer de pipe de barrière heeft bereikt. Dit komt doordat de grens tussen de SoSEAL barrière en het zand niet altijd duidelijk is. Deze onduidelijkheid is echter beperkt tot de laatste halve centimeter voor de barrière, zoals te zien is in Figuur 6–4. Aangezien dit slechts een zeer klein gedeelte betreft, heeft dit geen significante gevolgen voor het onderzoek.

Na het bereiken van de barrière door een van de pipes, stopt deze pipe met groeien in lengte. Wel nemen deze pipes nog toe in de breedte. Vervolgens groeien er meerdere, nieuwe pipes richting de barrière zoals is afgebeeld in Figuur 6–5. Deze nieuwe pipes kunnen breder worden of zich opsplitsen in meerdere pipes, maar ze groeien niet door de barrière. Tijdens de proeven waarbij de barrière niet faalde, was er geen zichtbare erosie van de SoSEAL barrière waarneembaar. Dit geeft een indicatie dat een mixed-in-place SoSEAL barrière relatief goed bestand is tegen erosie.



Figuur 6–2 Meerdere meanderende pipes richting de barrière



Figuur 6–3 Schaduwzone bij SoSEAL barrière

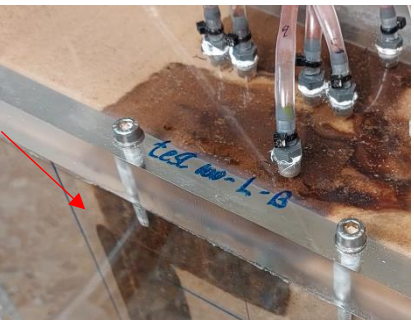


Figuur 6–4 pipegroei reikt barrière



Figuur 6–5 Meerdere pipes tegen barrière, geen erosie van de barrière

Tabel 6-2 Overzicht generieke waarnemingen pipegroei

Falen van de barrière	Figuur
Bij de proeven waarbij een korte barrière van 5 cm en de L-vormige barrière zijn getest, is het verval verhoogd tot de barrière faalde. Het falen van de barrière wordt gedefinieerd als het doorbreken van de barrière, waardoor er een doorlopende verbinding ontstaat tussen de in- en uitlaat van de proefopstelling. Dit resulteert in een extreem groot debiet en zandtransport, zoals weergegeven in Figuur 6–6. Dit falen van de barrière trad niet op bij de andere proeven waarbij de barrières intact bleven. Dit kwam omdat het verval hier niet ver genoeg doorgezet kon worden.	 <i>Figuur 6–6 Falen van de barrière</i>
Vóór het falen van de barrières zijn er meerdere pipes gevormd die de barrière reikte, echter was er nog geen erosie aan de barrière waarneembaar. Naarmate het verval verder is verhoogd ontstond er in plaats van pipes een vlak dat zand richting de uitlaat afvoerde, zie Figuur 6–7. Dit gebeurde niet bij proeven waarbij de barrière niet faalde. Dit proces duurde ongeveer tien minuten. Na deze periode begon er een actieve wig aan de achterkant van de barrière te vormen. Vervolgens groeide er relatief snel een pipe door de barrière, waardoor er hydraulische kortsluiting ontstond.	 <i>Figuur 6–7 Heave achter de barrière</i>
Tijdens het falen van de barrière is waargenomen dat de barrière vervormde. Bij de L-vormige barrière trad deze vervorming alleen op in het bovenste brede deel, terwijl het onderste deel van de L-vormige barrière niet vervormde. Dit wijst erop dat er alleen heave plaatsvond in het bovenste deel van de L-vormige barrière. Als gevolg van heave reduceerde de steundruk, doordat zand achter de barrière werd weggevoerd. Daardoor kon de barrière richting de uitlaat vervormen, zie Figuur 6–8. Dit creëerde ruimte voor de barrière, wat resulteerde in de zichtbare vorming van een actieve wig aan de inlaatkant. Door de vervorming van de barrière kon er een doorlopende pipe door de SoSEAL barrière ontstaan, wat uiteindelijk leidde tot het falen van de barrière.	 <i>Figuur 6–8 Vervorming van de barrière</i>
Tijdens het falen van de barrière traden twee verschillende faalmechanismen op: heave en erosie van de barrière, zoals te zien is in Figuur 6–9. Op basis van de uitgevoerde proeven kan echter niet worden geconcludeerd welk faalmechanisme doorslaggevend was. Het is belangrijk op te merken dat deze bevindingen mogelijk geen verband houden met de werkelijke situatie, omdat de SoSEAL in de proeven op een andere manier is aangebracht dan in de praktijk gebruikelijk is. Wel geeft dit een goede indicatie.	 <i>Figuur 6–9 Heave en eroderen van de barrière</i>

Tabel 6-3 Generieke waarnemingen falen van barrière

6.3 Pipegroei

De pipegroei is gemeten aan de hand van de foto's die automatisch elke tien seconden zijn gemaakt. De lengte van de pipe is loodrecht ten opzichte van de uitlaat gemeten, omdat het met name belangrijk is om te weten hoever de pipe is gegroeid ten opzichte van de uitlaat en de barrière. Dit is weergegeven



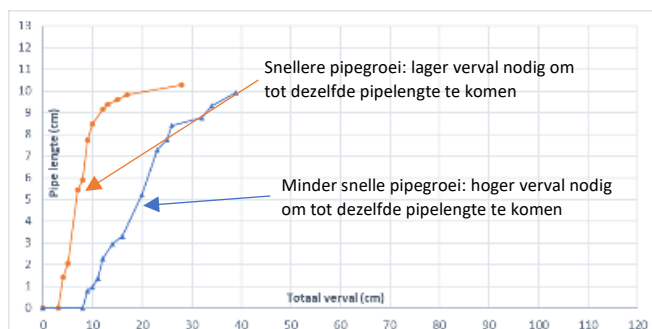
Figuur 6-10 Methode inmeten pipelengte

in Figuur 6-10. De meandering van de pipe is van minder belang voor de ontwikkeling ervan, omdat voornamelijk de stroming in de kop van de pipe bepaald of de pipe verder groeit. Daarom is de afstand van het uittredepunt tot de kop van de pipe het belangrijkste. Bovendien gaat D-Geo Flow uit van een 2D pipe, die niet kan meanderen. Verder is de pipe ingemeten die die het dichtstbij de SoSEAL barrière aanwezig is, omdat deze pipe maatgevend is.

De pipelengte is vervolgens uitgezet tegen het verval om grafieken van de pipegroei te genereren. Aan de hand van deze grafieken zijn conclusies getrokken en verbanden aangetoond, zoals beschreven in de volgende paragrafen. Het is belangrijk op te merken dat de afstand tussen de barrière en de uitlaat 10,3 cm bedraagt, dit is ook weergegeven in de grafieken in de onderstaande paragrafen. In de analyse van de pipegroei zijn de proeven en D-Geo Flow-modellering vaak met elkaar vergeleken. Om consistentie te waarborgen, zijn de termen "snellere" en "minder snelle" pipegroei geïntroduceerd. Deze termen zijn als volgt gedefinieerd:

Minder snelle pipegroei: Bij een proef of modellering waarbij een hoger verval nodig is, en dus meer weerstand biedt of voorspeld tegen piping is de pipegroei minder snel.

Snellere pipegroei: Een proef waarbij een lager verval nodig is en minder weerstand biedt of voorspeld tegen piping, is er een snellere pipegroei. In Figuur 6-11 is dit geïllustreerd.

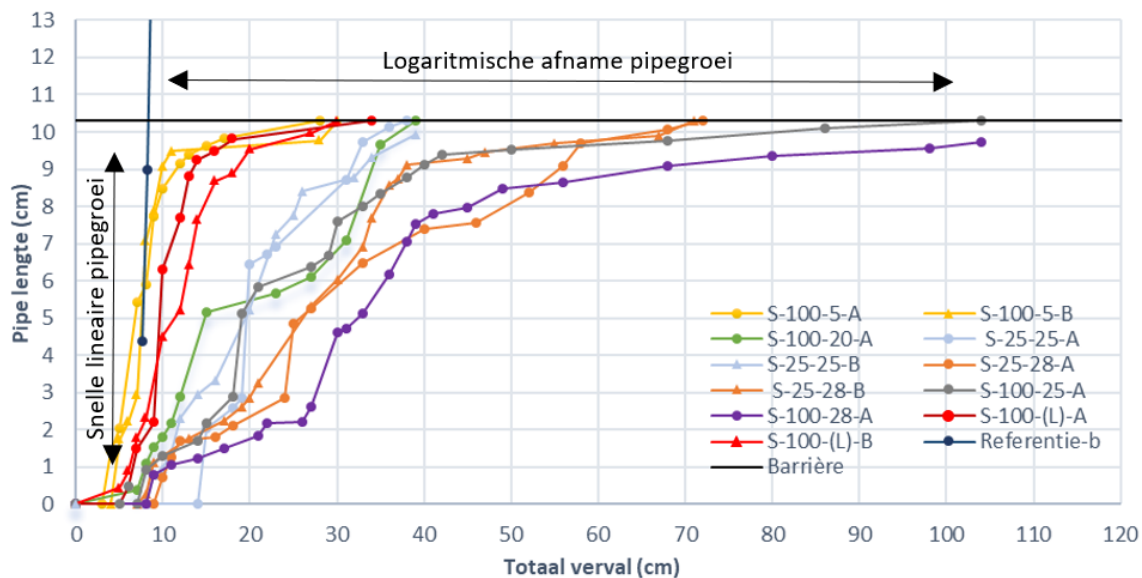


Figuur 6-11 Visualisatie snelle en minder snelle pipegroei

6.3.1 Validiteit proeven

De validiteit van de proeven is onderzocht door de relatieve dichtheden van de proeven te vergelijken en de pipegroei in de dubbel uitgevoerde proeven te analyseren. Uit de specificaties Tabel 6-1 blijkt dat er twee afwijkende proeven zijn met aanzienlijk lagere dichtheid van het zand. Dit betreft proef S-25-20-a (Li) en S-100-20-a (Li). Bij de andere proeven zijn de verschillen in de dichtheid van het zand minimaal. De gemiddelde droge dichtheid van het zand is ongeveer 1700 kg/m³. Omdat de dichtheid van het zand in alle proeven bijna gelijk is, kan worden geconcludeerd dat dezelfde doorlatendheid van het zandpakket is bereikt. Dit toont aan dat deze proeven valide zijn uitgevoerd en representatief zijn. Proeven S-25-20-a (Li) en S-100-20-a (Li) hebben een lagere relatieve dichtheid door onvoldoende verdichting van het zand. In het onderzoeksrapport van Li (Li, 2022) is geconcludeerd dat deze proeven niet representatief zijn. Daarom zijn deze proeven niet meegenomen in de verdere analyse.

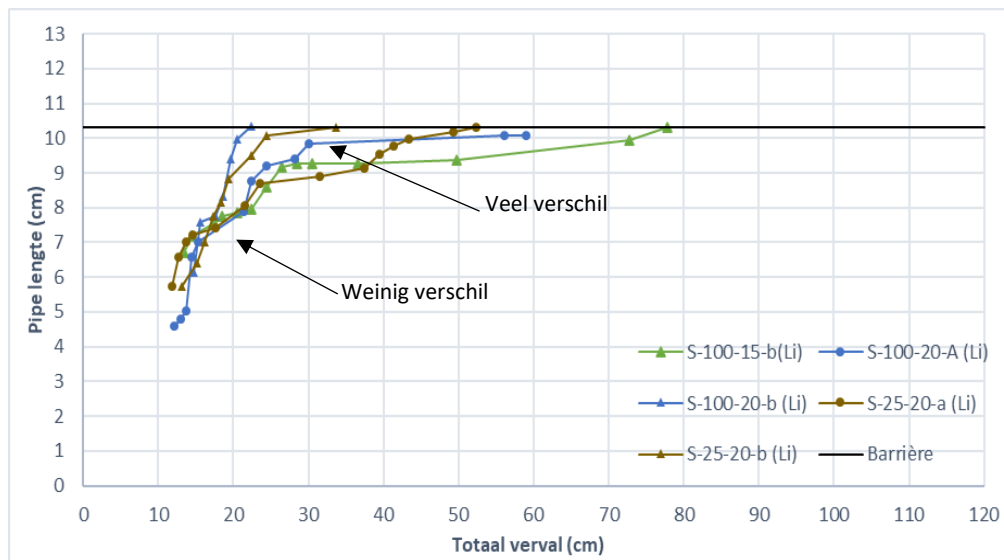
In Figuur 6–12 zijn alle uitgevoerde proeven uit dit onderzoek geplot, samen met de positie van de SoSEAL barrière die is weergegeven door de zwarte horizontale lijn. In de grafiek zijn de duploproeven met dezelfde kleur, maar met een andere markering aangeduid. Het is duidelijk te zien dat de dubbel uitgevoerde proeven vrijwel identiek verlopen en dus dezelfde pipegroei vertonen. Dit wijst erop dat de proeven goed zijn uitgevoerd en valide zijn. Daarnaast vertonen alle lijnen die de pipegroei weergeven in Figuur 6–12 dezelfde vorm. Er is een snelle (lineaire) groei van de pipe in het begin, gevolgd door een exponentiële afname naarmate de pipe dichterbij de barrière komt. Deze consistentie ondersteunt de validiteit van de proeven. Deze vorm kan worden verklaard door de toenemende invloed van de barrière op de horizontale grondwaterstroming. Naarmate de pipe dichterbij de barrière komt neemt de invloed van de barrière op de grondwaterstroming toe, is er minder horizontale grondwaterstroming en wordt de groei van de pipe meer belemmert.



Figuur 6–12 Pipegroei alle uitgevoerde laboratoriumproeven

In Figuur 6–13 zijn de eerder uitgevoerde proeven van Li weergegeven. Hierin is te zien dat de duploproeven (met dezelfde kleur) in het begin goed overeenkomen. Echter, naarmate de pipe dichterbij de barrière komt, zijn er grotere verschillen waarneembaar tussen de duploproeven. Dit suggereert dat de proeven van Li een grotere spreiding hebben.

Een opvallende uitschieter tussen de proeven is S-100-15-b (Li), weergegeven in het groen. In Figuur 6–13 is te zien dat deze proef aanzienlijk meer weerstand biedt dan de proef 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. De overige proeven van Li zijn wel meegenomen.

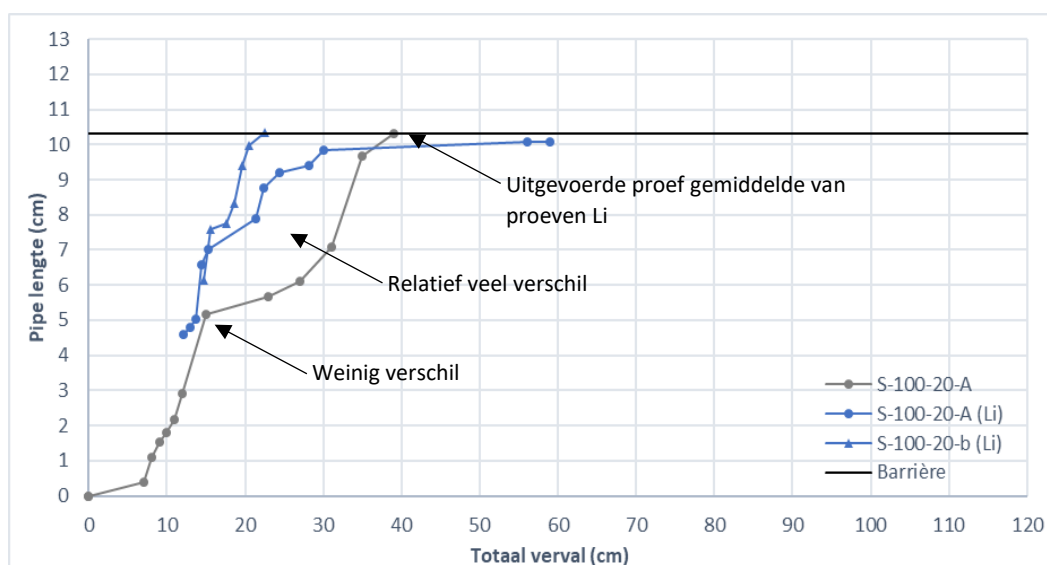


Figuur 6–13 Pipegroei laboratoriumproeven Li

In Figuur 6–14 zijn de proeven S-100-20-a&b (Li) en de herhalingsproef S-100-20-a weergegeven. Deze proeven hebben dezelfde lengte en doorlatendheidsreductie, waardoor deze proeven onderling vergelijkbaar zijn. Uit de grafiek blijkt dat de proeven redelijk goed met elkaar overeenkomen. Er zijn echter enkele verschillen met de herhalingsproef.

Een opvallend verschil is dat het begin van de pipegroei niet is ingemeten bij de proeven van Li, terwijl dit wel is gedaan bij de proeven uit dit onderzoek. Verder is in Figuur 6–14 te zien dat het begin en einde van de pipegroei redelijk overeenkomen, maar dat het verschil vooral in het midden van de pipegroei aanwezig is. Het afwijkende patroon in de herhalingsproef suggereert dat dit specifieke gedeelte mogelijk niet goed is aangebracht of ingemeten. Ondanks dit verschil is besloten om deze herhalingsproef wel mee te nemen in de analyse.

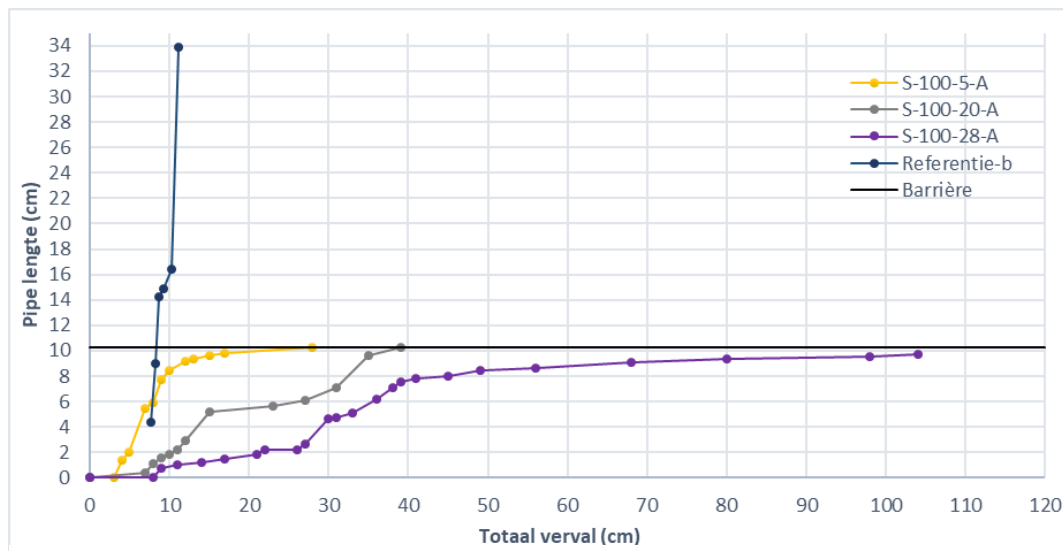
Over het algemeen kan worden geconcludeerd dat de proeven, wanneer ze geen afwijkingen vertonen, representatief zijn ten opzichte van de proeven van Li. De overeenkomsten tussen de proeven suggereren dat de resultaten consistent zijn en dat ze bruikbaar zijn voor verdere analyse.



Figuur 6–14 Pipegroei vergelijking proeven S-100-20

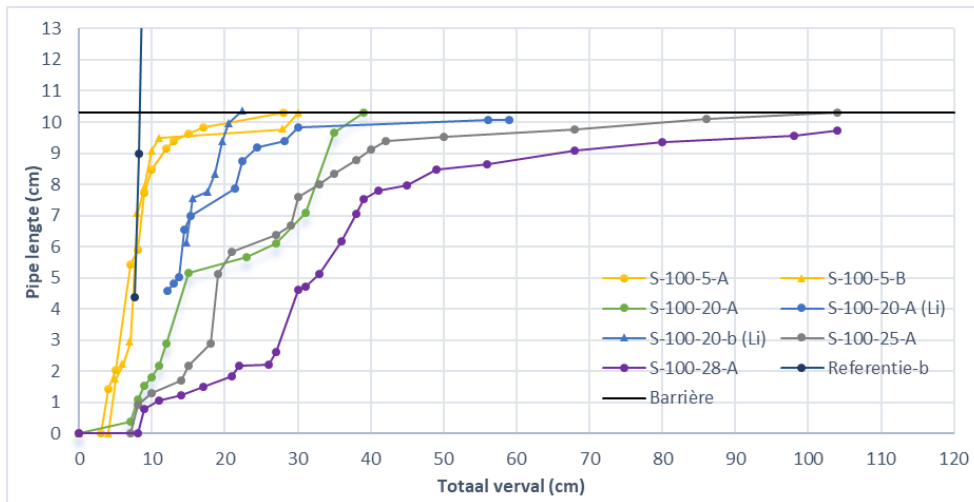
6.3.2 Effect van lengte van de barrière

Uit de uitgevoerde proeven met verschillende doorlatendheden en lengtes van de barrières zijn enkele verbanden waargenomen. Allereerst blijkt uit de vergelijking met de referentieproef dat de SoSEAL barrières aanzienlijk weerstand bieden, waardoor de pipe minder snel groeit. Dit geldt ook voor de korte barrière van 5 cm. Dit is te zien in Figuur 6–15 waarin de referentieproef is vergeleken met proeven met een SoSEAL barrière. Uit de grafiek blijkt dat de pipegroei in de proeven met de SoSEAL barrières opmerkelijk lager lopen dan in de referentieproef. Dit suggereert dat de aanwezigheid van de SoSEAL barrière effectief is in het verminderen van de pipegroei. Het bevestigt de weerstand biedende eigenschappen van de SoSEAL barrières tegen piping.

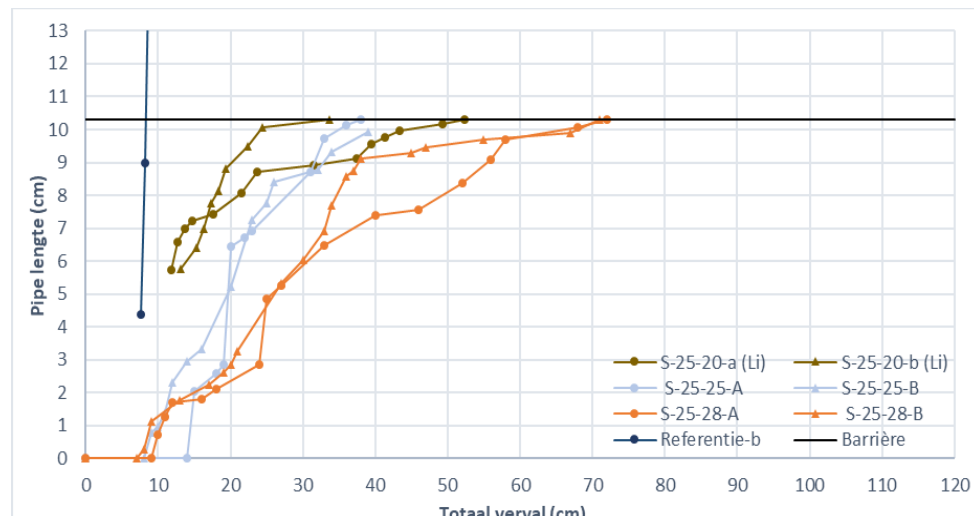


Figuur 6–15 Pipegroei van lange en korte barrières met 100 keer doorlatendheidsreductie

Uit de uitgevoerde proeven is gebleken dat de lengte van de barrières een aanzienlijke invloed heeft op de pipegroei, ongeacht de doorlatendheidsreductie van de barrières. Dit verband is gevisualiseerd in Figuur 6–16 en Figuur 6–17, waarin de resultaten van de proeven met dezelfde doorlatendheidsreductie zijn weergegeven. In deze grafieken is te zien dat bij proeven met dezelfde doorlatendheidsreductie, de pipegroei afneemt naarmate de lengte van de barrière toeneemt. Dit betekent dat langere barrières meer weerstand bieden tegen pipegroei. Dit verband is consistent in de proeven met verschillende doorlatendheidsreducties, wat aangeeft dat de lengte van de barrières een belangrijke factor is bij het beperken van de pipegroei. Deze observatie kan verklaard worden aan de hand van de schaduwzone die ontstaat bij 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. Door de vermindering van de horizontale grondwaterstroming ontwikkelt de pipe minder snel. Bij een bijna volledige afsluiting is er daarnaast ook vermindering van het totale debiet wat door het pakket stroomt.



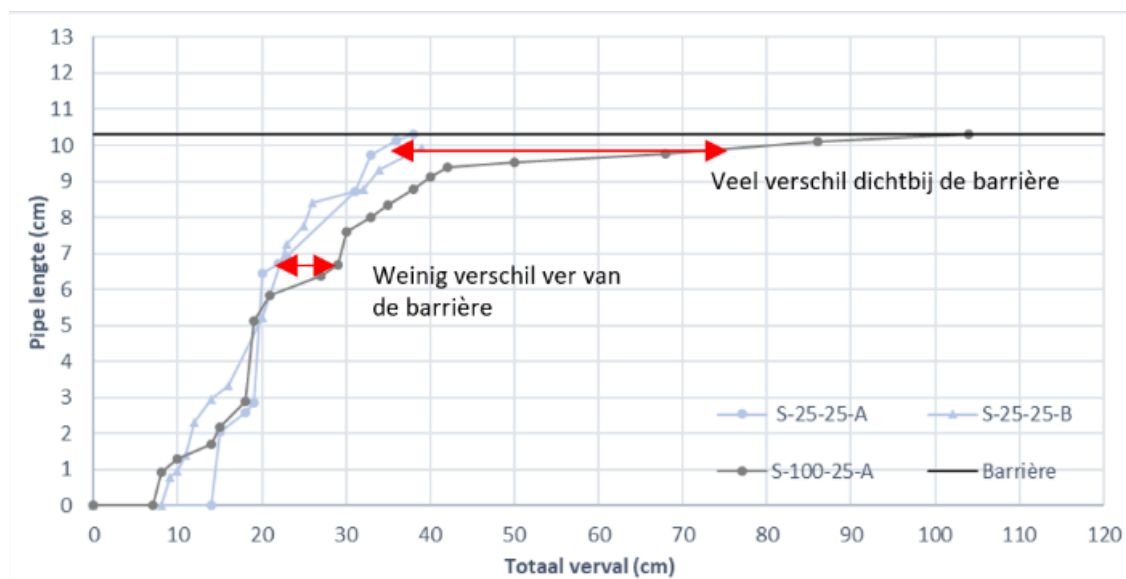
Figuur 6–16 Pipegroei van alle laboratoriumproeven met 100 keer doorlatendheidsreductie



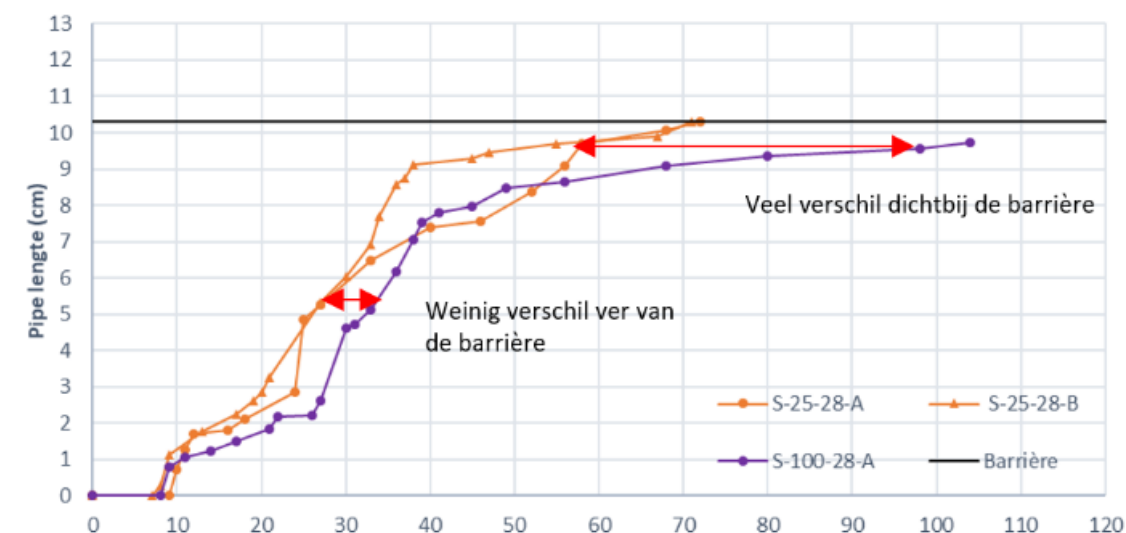
Figuur 6–17 Pipegroei van alle laboratoriumproeven met 25 keer doorlatendheidsreductie

6.3.3 Effect van doorlatendheidsreductie

Er is waargenomen 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 te zien in de grafieken in Figuur 6–18 en Figuur 6–19 waarin proeven met dezelfde barrièrelengtes maar verschillende doorlatendheidsreducties zijn vergeleken. 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 doorlatendheids-reductie van 100 keer en 25 keer groter. De barrières met een reductie van 100 keer laten een minder snelle groei zien dan de barrières met een reductie van 25 keer. Dit wijst erop dat een grotere doorlatendheidsreductie resulteert in een grotere weerstand tegen de pipegroei wanneer deze de barrière nadert.



Figuur 6–18 Pipegroei laboratoriumproeven met 25 cm barrières

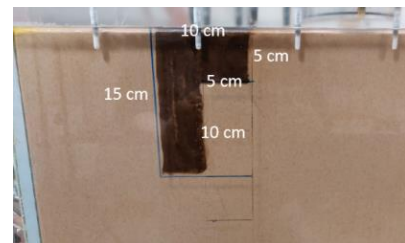


Figuur 6–19 Pipegroei met barrières van 28 cm

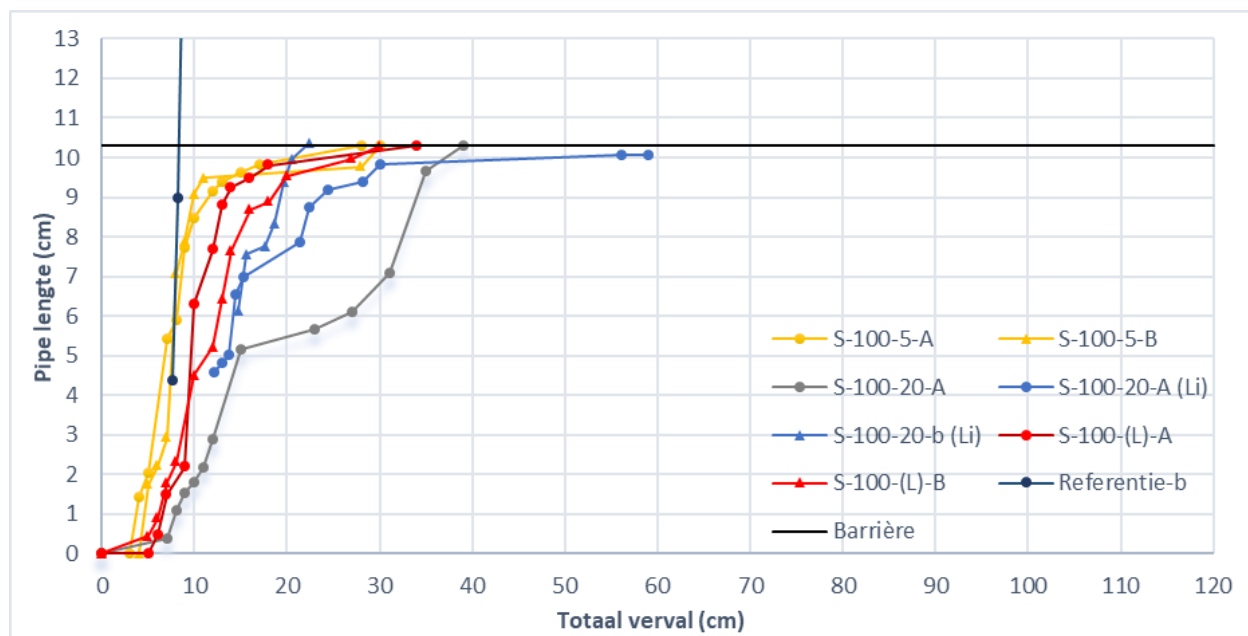
De voornaamste verklaring voor dit verband is dat de groei van de pipe voornamelijk afhankelijk is van de horizontale grondwaterstroming. Achter de barrière kan de horizontale grondwaterstroming op twee manieren worden gevoed: stroming door de barrière heen en stroming onder de barrière door. In de nabijheid van de barrière creëert de SoSEAL een schaduwzone waarbinnen de horizontale stroming geremd wordt. In dit gebied wordt de horizontale grondwaterstroming voornamelijk beïnvloed door de stroming die door de barrière heen loopt. Daarom is de doorlatendheid van de SoSEAL barrière van groter belang voor de pipegroei in dit laatste gedeelte voor de barrière. Aangezien de groei van de pipe dichtbij de barrière logaritmisch afneemt, kan een barrière met een hoge doorlatendheidsreductie aanzienlijke weerstand veroorzaken. Dit is zichtbaar in Figuur 6–19. Dichter bij de uitlaat, wordt de stroming onder de barrière dominant en heeft de doorlatendheid van de SoSEAL barrière minder invloed op de pipeontwikkeling. Dit benadrukt dat het verhogen van de doorlatendheidsreductie van de SoSEAL barrière met name zinvol is als de pipe bijna de barrière bereikt.

6.3.4 L-vormige barrière

In Figuur 6–21 zijn de proeven van de L-vormige barrière in het rood weergegeven. In Figuur 6–20 zijn de afmetingen van de L-vormige barrières weergegeven. Bij de L-vormige barrière proeven is te zien dat de proeven veel gelijkenissen hebben. Daarnaast zijn deze proeven vergeleken met de proef S-100-5 en S-100-20. Uit de vergelijking blijkt dat de pipegroei bij de S-100-(L) proeven minder snel groeit dan bij de S-100-5 proef, maar sneller dan bij de S-100-20 proef. Dit suggereert dat de L-vormige barrière geen extra weerstand biedt ten opzichte van een rechte barrière met een lengte tussen de 5 en 20 cm.



Figuur 6–20 Afmetingen L-vormige barrière



Figuur 6–21 Vergelijking L-vormige barrière met rechte barrières

6.4 Deelconclusie laboratoriumproeven

Uit de analyse van de laboratoriumproeven is gebleken dat de meeste proeven valide zijn. Op basis van de valide proeven zijn er verbanden waargenomen en conclusies getrokken die de derde deelvraag beantwoorden: *Wat is de invloed van een SoSEAL barrière op de ontwikkeling van de pipegroei richting de barrière?* Deze conclusies zijn in hoofdstuk 6 uitgewerkt en zijn hieronder samengevat:

- De pipegroei richting de SoSEAL barrière verloopt via meerdere pipes in een meanderende vorm. Er is echter geen specifiek patroon of verband gevonden in dit groeiproces.
- Uit de vier proeven waarbij de SoSEAL-barrière faalde, is gebleken dat de barrières bezweken als gevolg van een combinatie van het heave-proces en erosie van de barrière. Dit proces is uitgebreid toegelicht in paragraaf 6.2.
- Een SoSEAL barrière zorgt voor extra weerstand tegen pipegroei ten opzichte van de situatie zonder barrière en leidt tot aanzienlijke reductie van de pipegroei. Met name als de pipe dichtbij de barrière komt zorgt dit voor extra weerstand.
- De lengte van de barrière heeft een grote invloed op de pipegroei, ongeacht de doorlatendheidsreductie.
- De doorlatendheidsreductie van de SoSEAL barrière heeft minder invloed op de pipeontwikkeling dan de lengte van de barrière. Hoewel er aanvankelijk beperkte verschillen zijn tussen barrières met een reductie van 100 keer en 25 keer, worden deze verschillen significant groter naarmate de pipe de barrière nadert.

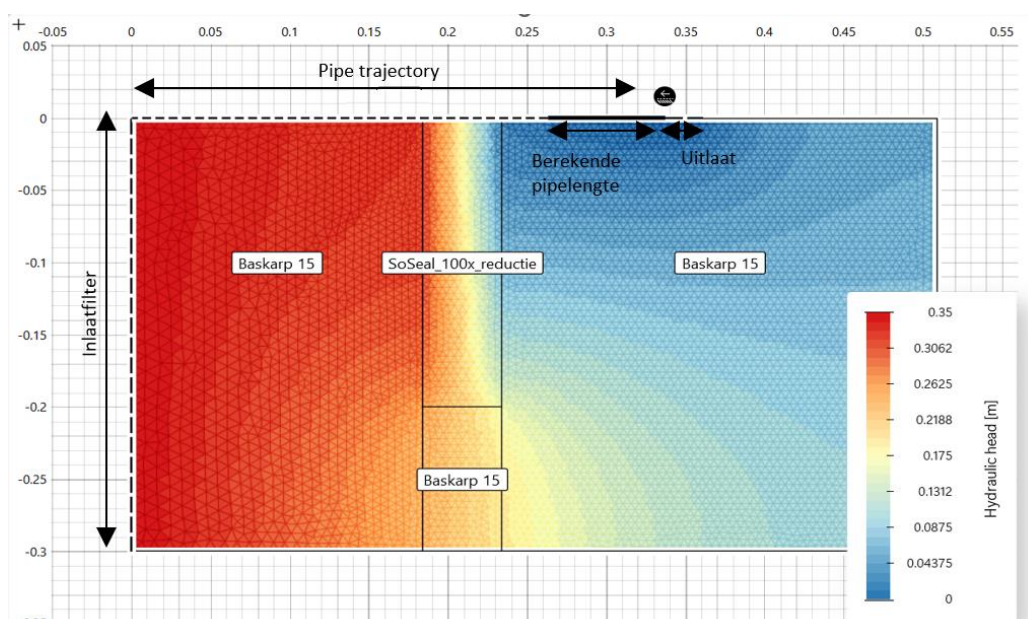
7 Uitkomsten D-Geo Flow

In dit hoofdstuk is de opbouw van de D-Geo Flow modellen en de uitkomsten van de D-Geo Flow berekeningen uitgewerkt. Als eerst is in paragraaf 7.1 de opbouw van de modellen toegelicht, inclusief de parameters en aannames die zijn gebruikt voor de modellering. Vervolgens zijn in paragraaf 7.2 de resultaten van de modelleringen weergegeven en verbanden aangetoond. Tot slot zijn de belangrijkste verbanden samengevat in de deelconclusie in paragraaf 7.3.

7.1 Opbouw D-Geo Flow model

De modelleringen van de laboratoriumproeven zijn uitgevoerd met behulp van de software D-Geo Flow (2D) Versie 2022.01. Het 2D-model is opgebouwd volgens de geometrie van de proefopstelling, zoals weergegeven in Bijlage 1. In het model is het inlaatfilter aan de linkerzijde geschematiseerd als inlaat, de uitlaat is aan de bovenkant van het model geschematiseerd. Het ronde uitlaatgat kan niet als cirkel gemodelleerd worden in een 2D-model. Daarom is de diameter van het gat aangenomen grootte. Om de invloed van deze benadering te onderzoeken, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarvan de resultaten te vinden zijn in Bijlage 5. Hieruit is gebleken dat de verschillen in pipegroei bij een kleiner uitlaatgat minimaal zijn. Daarom hebben deze kleine afwijkingen een beperkte invloed op de resultaten van de modelleringen.

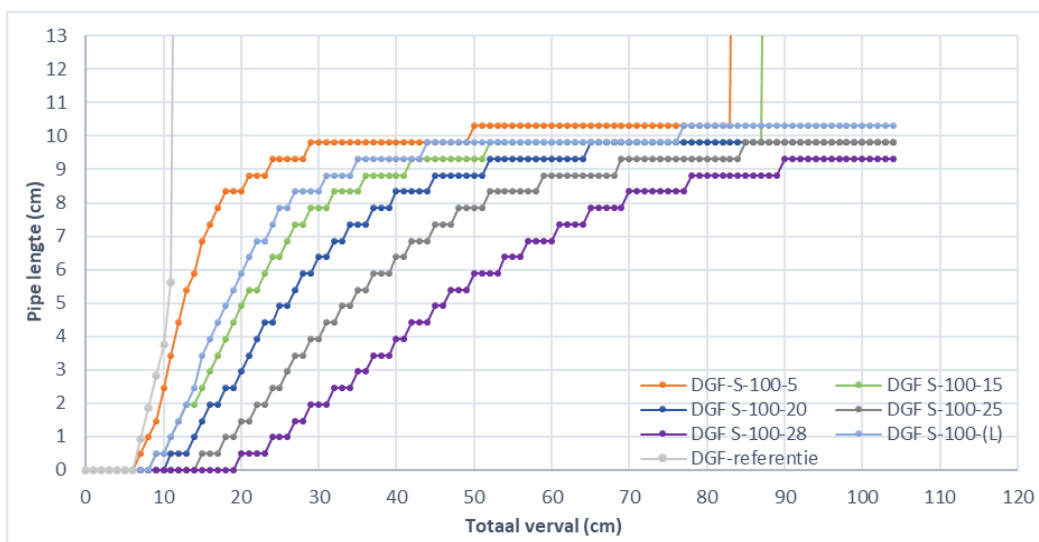
Voor elke laboratoriumproef is een apart model gemaakt met dezelfde geometrie. Het enige verschil tussen de modellen is de lengte en doorlatendheid van de SoSEAL barrière. De geometrie van het model is nauwkeurig vastgesteld conform de beschrijvingen en afmetingen in Bijlage 1. Voor de doorlatendheid van het zand is een waarde van 4,761 m/dag aangenomen, zoals beschreven in subparagraaf 5.2.1. Voor de SoSEAL barrière zijn twee verschillende doorlatendheidsreducties gebruikt: 25 en 100 keer. Dit komt overeen met doorlatendheden van 0,1904 m/dag en 0,04761 m/dag. Het mesh is zo fijn mogelijk ingesteld op 0,5 cm per element om een gedetailleerde berekening te verkrijgen. Op deze manier is een nauwkeurige analyse uitgevoerd. Voor elke proef is de berekening uitgevoerd met een vervalverhoging van 1 cm per stap. De Probabilistic Toolkit van D-Geo Flow is gebruikt om de pipelengte te berekenen voor elke stap in het verval. De waterstand van de in- en uitlaat is op nul gezet, en vervolgens is het verval in stappen van 1 cm verhoogd. Op basis van deze berekeningen zijn de grafieken opgesteld die de pipegroei weergeven.



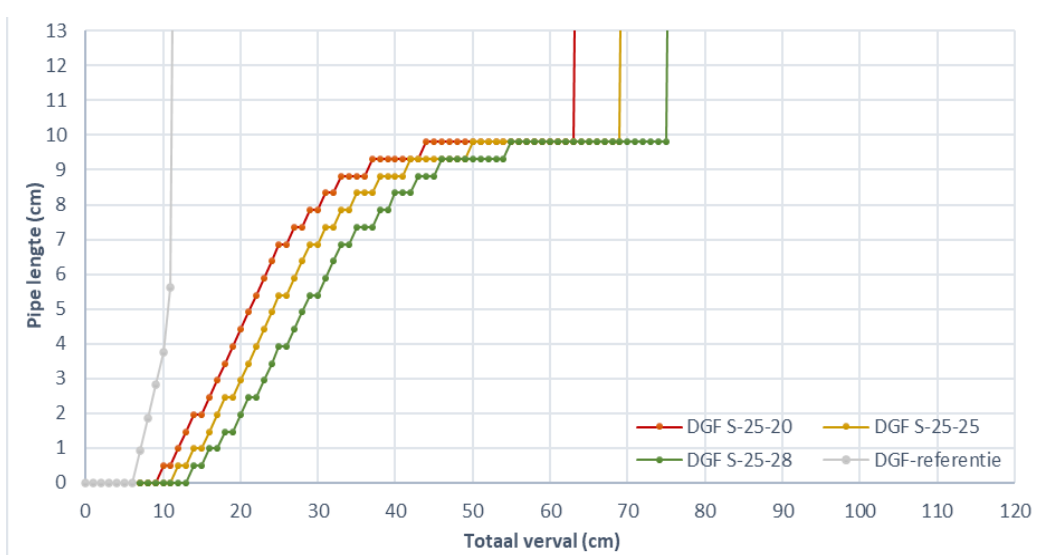
Figuur 7-1 Voorbeeld model D-Geo Flow (2D)

7.2 Uitkomsten D-Geo Flow

Zoals gesteld in paragraaf 7.1 is voor iedere uitgevoerde laboratoriumproef een overeenkomstig D-Geo Flow model doorgerekend. In Figuur 7–3 zijn de D-Geo Flow modellen met een doorlatendheidsreductie van 100 keer weergegeven, in Figuur 7–2 zijn de modellen met een doorlatendheidsreductie van 25 keer weergegeven. De referentieproef, zonder barrière, is weergegeven in het grijs in beide grafieken. In de grafieken is duidelijk te zien dat D-Geo Flow de pipegroei in het begin als een lineaire modelleert. Naarmate de pipe dichterbij de barrière komt neemt de groei logarithmische af. In de grafieken is ook te zien dat D-Geo Flow aanzienlijk meer weerstand voorspelt wanneer er een SoSEAL barrière aanwezig is. De hoeveelheid weerstand hangt onder andere af van de lengte van de SoSEAL barrière. Het is te zien dat een langere SoSEAL barrière meer weerstand veroorzaakt, onafhankelijk van de doorlatendheidsreductie. Een langere barrière resulteert in een minder snelle pipeontwikkeling volgens de berekeningen van D-Geo Flow.

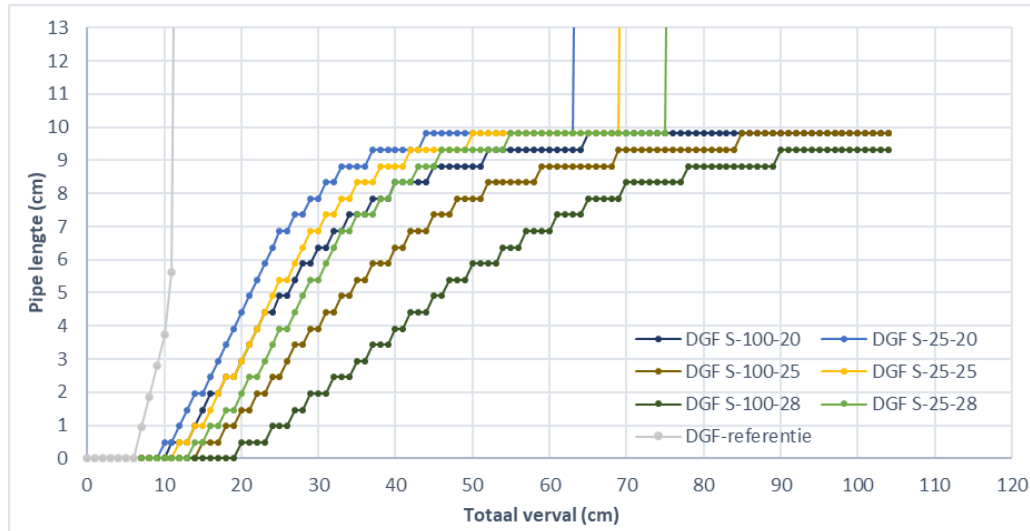


Figuur 7–3 Pipegroei D-Geo Flow 100 keer doorlatendheidsreductie



Figuur 7–2 Pipegroei D-Geo Flow 25 keer doorlatendheidsreductie

In Figuur 7–2 zijn de berekeningen van de pipegroei voor verschillende modellen met dezelfde lengte weergegeven. De modellen met barrières van verschillende doorlatendheidsreducties hebben dezelfde kleur. De modellen met een barrière met 100 keer doorlatendheidsreductie zijn donker weergegeven, terwijl de modellen met 25 keer doorlatendheidsreductie licht zijn weergegeven. Uit deze grafiek is duidelijk af te leiden dat D-Geo Flow bij een hogere doorlatendheidsreductie aanzienlijk meer weerstand voorspeld, ongeacht de lengte van de barrière. Dit patroon geldt voor alle lengtes van de barrières. Bovendien is in Figuur 7–2 te zien dat het verschil tussen de modellen groter is bij langere barrières dan bij kortere barrières.



Figuur 7–4 Pipegroei D-Geo Flow vergelijking van barrière lengtes

7.3 Deelconclusie

Uit de modelleringen van D-Geo Flow zijn een aantal verbanden waargenomen en conclusies getrokken. Deze conclusies zijn meegenomen in hoofdstuk 8 waar de resultaten uit D-Geo Flow zijn vergeleken met de resultaten uit de laboratoriumproeven. De conclusies met betrekking tot de D-Geo Flow modelleringen staan hieronder opgesomd:

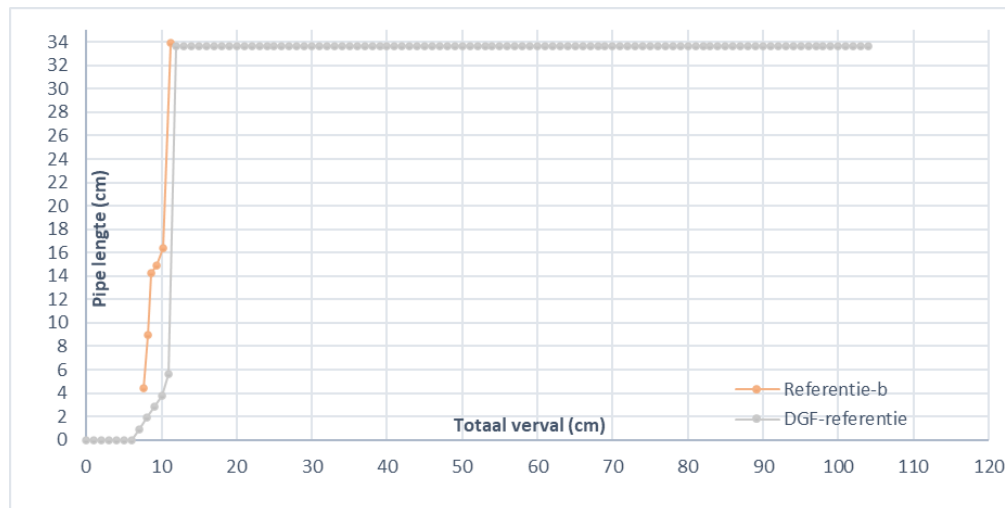
- D-Geo Flow modelleert de pipegroei in het begin als een lineaire groei, gevolgd door een logaritmische afname naarmate de pipe dichterbij de barrière komt.
- D-Geo Flow voorspelt aanzienlijk meer weerstand tegen piping wanneer er een SoSEAL barrière aanwezig is.
- Uit de modelleringen in D-Geo Flow blijkt dat een langere barrière resulteert in een langzamere pipegroei.
- Verder voorspeld D-Geo Flow dat een hogere doorlatendheidsreductie leidt tot een aanzienlijk langzamere pipegroei.

8 Vergelijking laboratoriumproeven en D-Geo Flow

In dit hoofdstuk is de vergelijking gemaakt tussen de proeven uit hoofdstuk 6 en de modelleringen in D-Geo Flow uit hoofdstuk 7. Door de pipegroei van zowel de proeven als de D-Geo Flow-modellen in dezelfde grafieken te plotten, zijn verbanden en conclusies getrokken. Deze verbanden en conclusies zijn uitgewerkt en onderbouwd in de onderstaande paragrafen.

8.1 Referentieproef (zonder barrière)

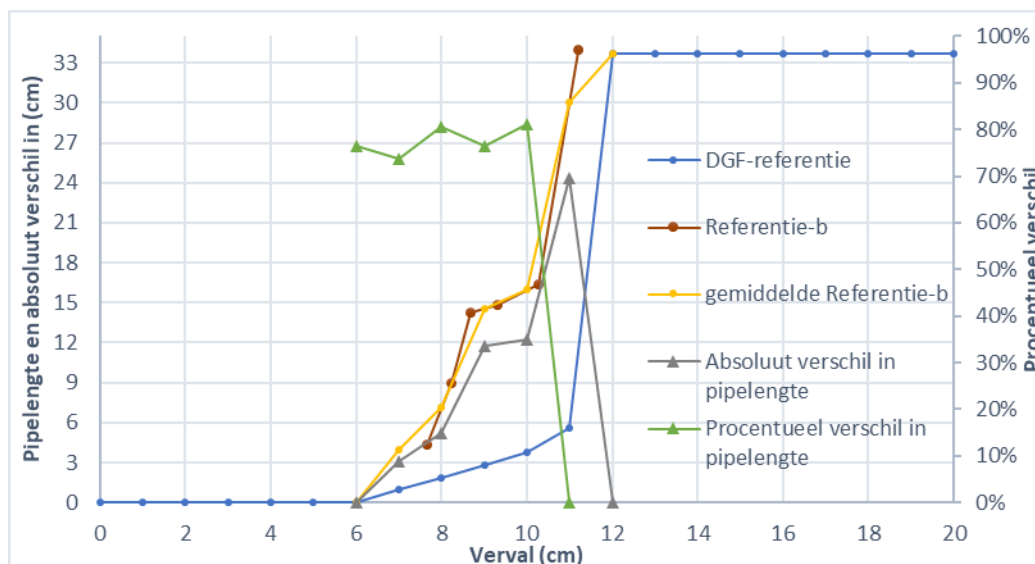
In Figuur 8–1 is de pipegroei van de referentieproef, uitgevoerd door Li, samen met de berekende pipelengte uit D-Geo Flow weergegeven. Uit de grafiek in Figuur 8–1 blijkt dat D-Geo Flow de pipegroei iets onderschat. Naarmate de pipe verder groeit, voorspelt D-Geo Flow echter de pipegroei relatief nauwkeurig. Dit suggereert dat D-Geo Flow in staat is om de pipegroei in een proefopstelling zonder barrière goed in te schatten. Om dit met zekerheid te kunnen stellen, wordt aangeraden aanvullende proeven uit te voeren zonder barrière, zodat de voorspellingen van D-Geo Flow kunnen worden vergeleken met de extra laboratorium resultaten.



Figuur 8–1 Vergelijking pipegroei referentieproef

In Figuur 8–2 zijn zowel de procentuele als absolute verschillen getoond tussen de resultaten van D-Geo Flow en de referentieproef van Li. De grafiek bevat ook de resultaten van D-Geo Flow, de referentieproef en een gemiddelde van de proef. Voor de gemiddelde proef zijn extra punten gecreëerd door interpolatie van de meetpunten. In tegenstelling tot de proefgegevens kunnen deze nieuwe punten wel vergeleken worden met de resultaten van D-Geo Flow.

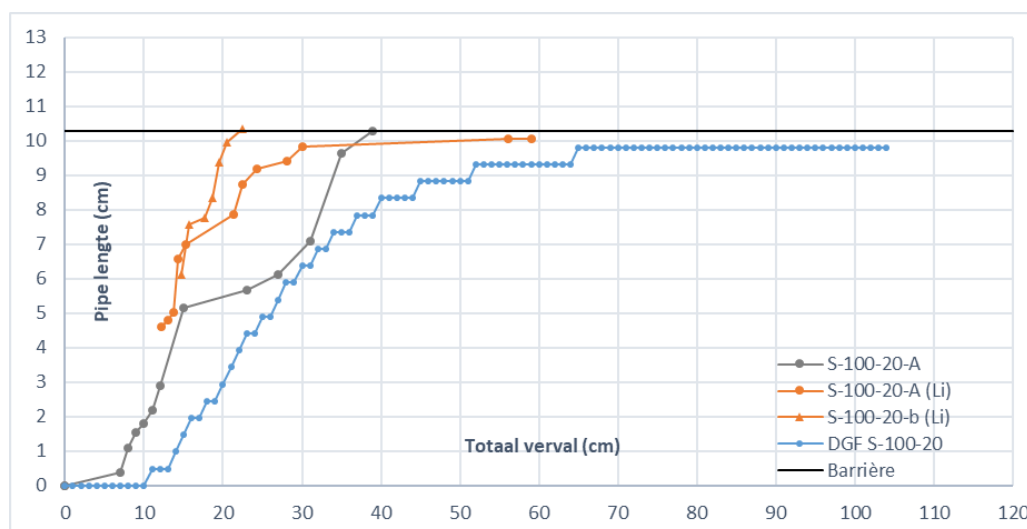
Het absolute verschil is berekend door de resultaten van D-Geo Flow af te trekken van de gemiddelde proef. Het procentuele verschil is berekend door het absolute verschil te delen door de gemiddelde proefwaarde. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor alle geïnterpoleerde punten. Dit ondersteunt de eerdere bevinding dat D-Geo Flow de pipegroei in het begin onderschat, maar naarmate de pipe verder ontwikkelt, de voorspellingen van D-Geo Flow beter overeenkomen met de resultaten uit de laboratoriumproeven.



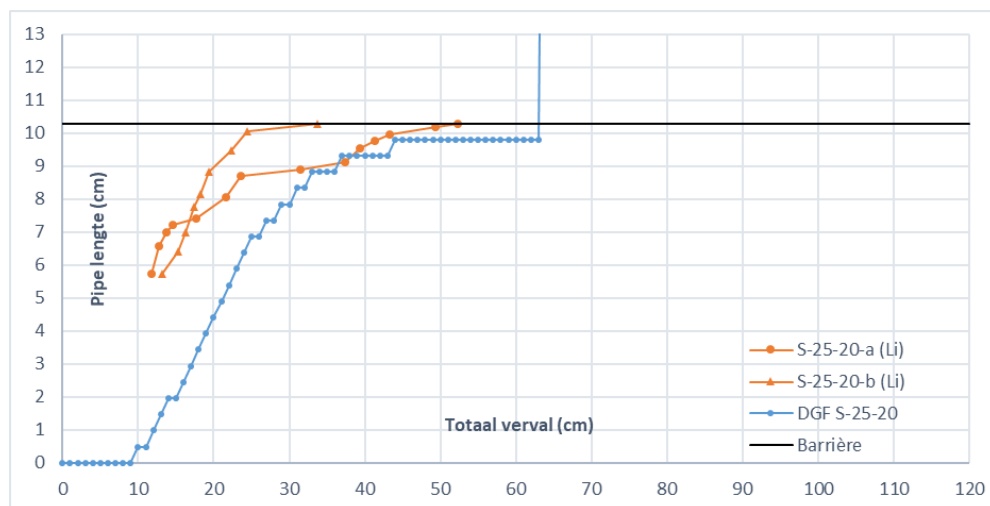
Figuur 8–2 Absolute en procentuele verschillen referentieproef

8.2 Generiek verband

Tijdens de analyse van de pipegroei in de laboratoriumproeven in hoofdstuk 6 en de analyse van de D-Geo Flow in hoofdstuk 7 is vastgesteld dat de vorm van de pipegroei vergelijkbaar is. Dit is te zien in Figuur 8–3 en Figuur 8–4 waarin de proeven en modellen van S-100-20 en S-25-20 zijn weergegeven. Er is te zien dat zowel D-Geo Flow als de laboratoriumproeven eerst een snelle, lineaire pipegroei vertonen. Naarmate de pipe dichterbij de barrière komt, neemt de groei logaritmisch af. Vervolgens is uit de analyse naar voren gekomen dat D-Geo Flow de pipegroei onderschat ten opzichte van de laboratoriumproeven. Deze waarneming is van toepassing op alle uitgevoerde proeven, wat de betrouwbaarheid van de conclusie versterkt. Voorbeelden hiervan zijn te zien in Figuur 8–3 en Figuur 8–4 waar duidelijk zichtbaar is dat D-Geo Flow lager ligt dan de laboratoriumproeven en dus de pipegroei ten opzichte van de laboratoriumproeven onderschat. In Bijlage 6 staan de grafieken van alle proeven weergegeven. Niet iedere proef wordt evenveel onderschat, hier is in de volgende paragrafen nader op ingegaan.

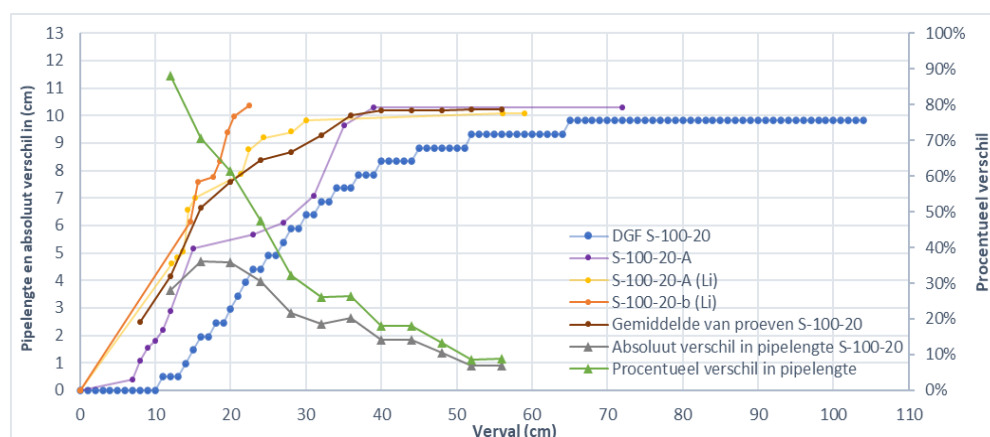


Figuur 8–3 Vergelijking S-100-20

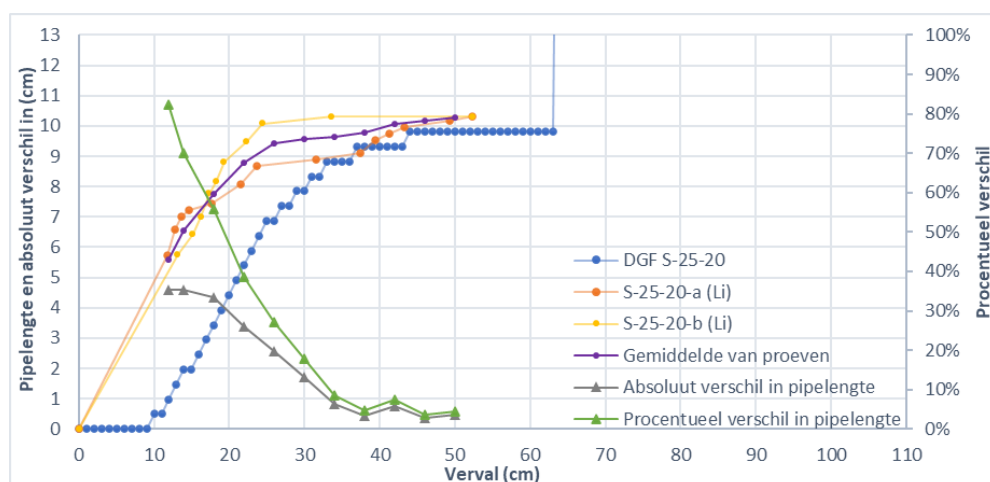


Figuur 8-4 Vergelijking S-25-20

In Figuur 8-5 en Figuur 8-6 zijn de procentuele en absolute verschillen tussen D-Geo Flow en de laboratoriumproeven weergegeven. Net als bij de referentieproef is te zien dat D-Geo Flow met name aan het begin van de proef de pipegroei onderschat. Naarmate de pipe de barrière nadert, nemen zowel de procentuele als absolute verschillen af. Ook is te zien in Figuur 8-5 dat de proef met een doorlatendheidsreductie van 100 keer meer onderschatting vertoont dan de proef met 25 keer reductie. In paragraaf 8.4 is hier nader op ingegaan.



Figuur 8-5 Absolute en procentuele verschillen S-100-20



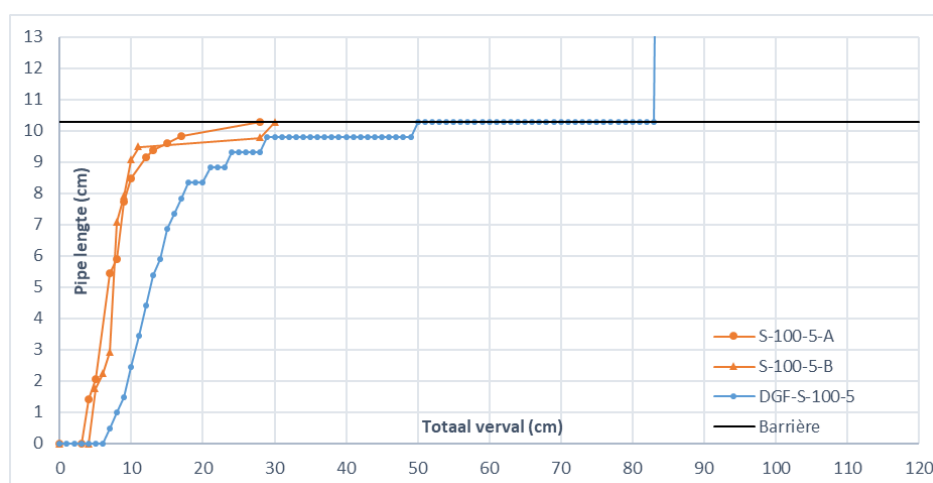
Figuur 8-6 Absolute en procentuele verschillen S-25-20

Er zijn meerdere verklaringen voor de onderschatting van de pipegroei in de D-Geo Flow modelleringen. Het is ook mogelijk dat een combinatie van deze verklaringen van toepassing is. Hieronder zijn de drie meest waarschijnlijke verklaringen toegelicht:

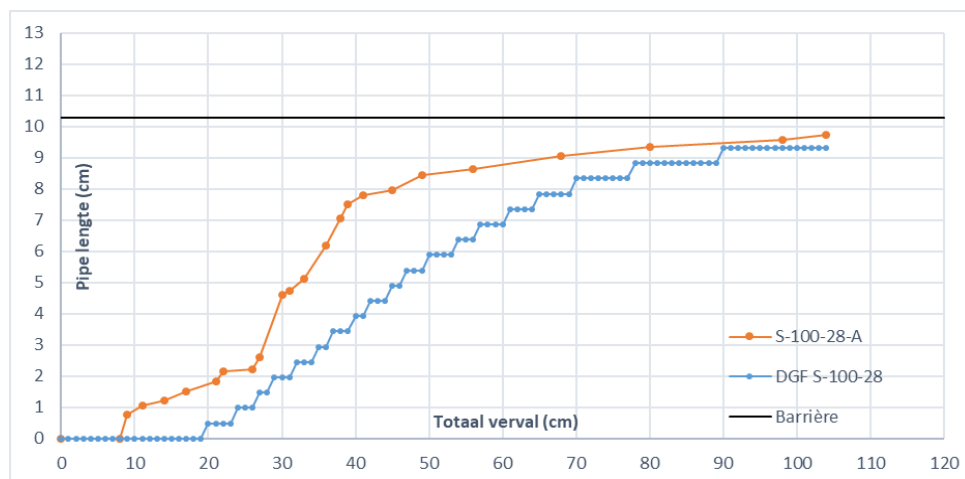
1. De SoSEAL barrières hebben tijdens de proeven mogelijk een andere doorlatendheidsreductie bereikt dan verwacht, waardoor ze verschillen van de modelleringen. Als dit het geval is, zullen de werkelijke doorlatendheden van de proeven afwijken van de ingevoerde doorlatendheden in D-Geo Flow. D-Geo Flow berekent dan niet wat er in de proef is getest, wat kan leiden tot verschillen in de resultaten.
2. Een tweede verklaring is dat de software de pipegroei onderschat. Dit kan te wijten zijn aan het Sellmeijer-model dat uitgaat van horizontale grondwaterstroming. Omdat bij het plaatsen van een SoSEAL barrière minder horizontale en meer verticale stroming ontstaat, kan dit mogelijk niet goed worden meegenomen in de berekening. Bovendien zijn de formules in het model een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, wat kan resulteren in een onderschatting van de pipegroei.
3. Een derde verklaring is het 2D-effect en de invloed van 3D. Aangezien de modelleringen in een 2D-model zijn uitgevoerd en de proeven in 3D zijn uitgevoerd, kan dit invloed hebben op de resultaten. Hoewel het 3D-effect zo klein mogelijk is gehouden vanwege de relatief smalle proefopstelling, is het mogelijk dat het 2D-model bepaalde aspecten van de werkelijke situatie niet volledig kan weergeven, wat leidt tot een onderschatting van de pipegroei. Het wordt daarom aanbevolen om ook 3D-modelleringen uit te voeren om te onderzoeken of deze resultaten beter overeenkomen met de laboratoriumproeven.

8.3 Lengte van de barrière

Naast de algemene bevindingen is er specifiek onderzoek gedaan naar mogelijke verbanden tussen de lengte van de barrières en de voorspellende capaciteit van D-Geo Flow. Echter, uit het onderzoek is gebleken dat er geen duidelijke verbanden zijn tussen de lengte van de barrières en de mate van onderschatting van D-Geo Flow. Dit is geïllustreerd in Figuur 8–7 en Figuur 8–10, waarin de proeven en modelleringen van S-100-5 en S-100-28 zijn weergegeven. Daarin is te zien dat zowel bij korte als lange barrières een vergelijkbare mate van onderschatting van de pipegroei is waargenomen. Deze bevindingen suggereren dat de lengte van de barrières geen significante invloed heeft op de mate van afwijking van D-Geo Flow.

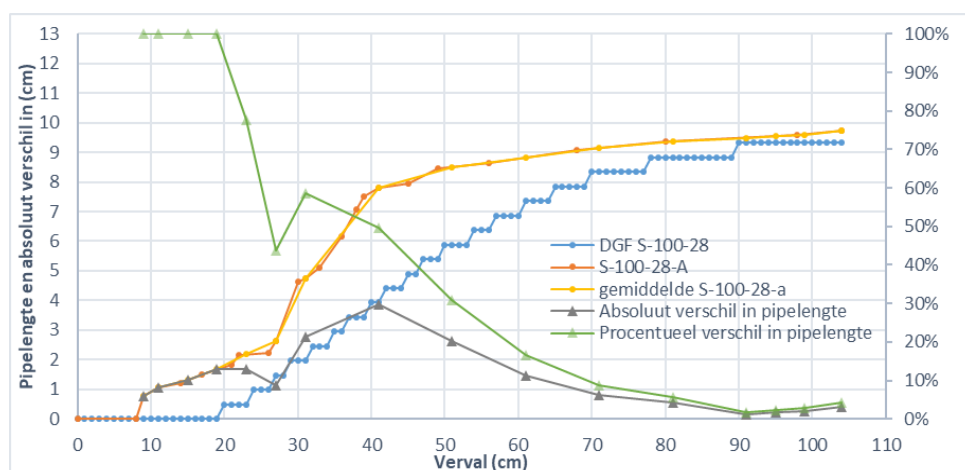


Figuur 8–7 Vergelijking S-100-5

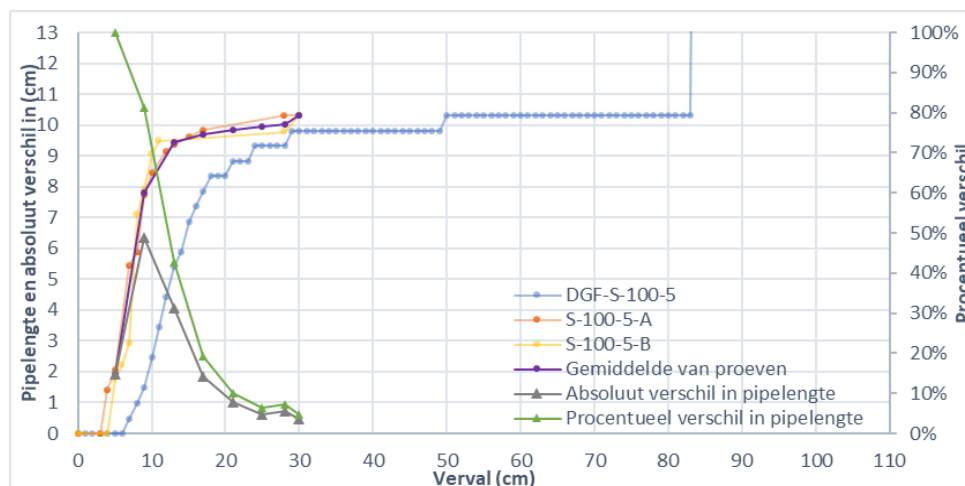


Figuur 8-10 Vergelijking S-100-28

In Figuur 8-8 en Figuur 8-9 zijn de absolute en procentuele verschillen weergegeven tussen de proeven en D-Geo Flow modellen van de proeven S-100-5 en S-100-28. Hieruit blijkt dat D-Geo Flow in het begin de pipegroei onderschat, maar naarmate de pipe dichterbij de barrière komt, deze onderschatting afneemt. Daarnaast is opvallend dat de procentuele onderschatting bij zowel korte als lange barrières ongeveer even groot is, dit is afgebeeld in Figuur 8-8 en Figuur 8-9. Dit suggereert dat D-Geo Flow het effect van een langere of kortere barrière goed kan voorspellen.



Figuur 8-8 Absolute en procentuele verschillen S-100-28

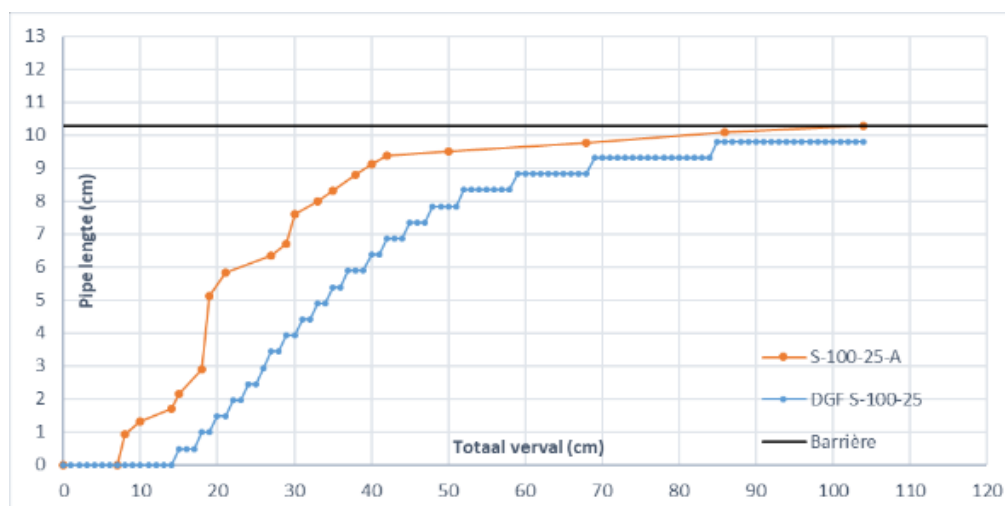


Figuur 8-9 Absolute en procentuele verschillen S-100-5

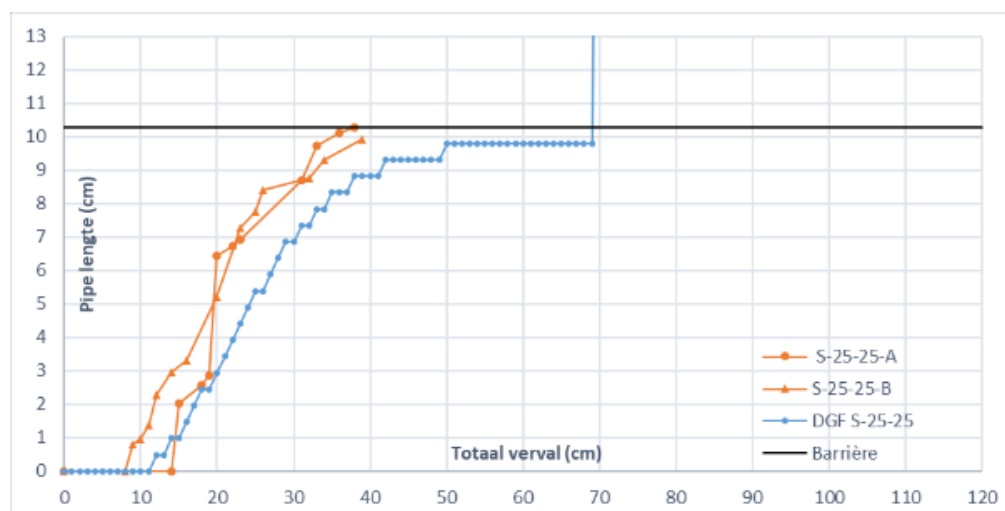
8.4 Doorlatendheidsreductie

Tijdens de analyse is een verband gevonden tussen de doorlatendheidsreductie van de barrière en de voorspellende capaciteit van D-Geo Flow. In Figuur 8–12 en Figuur 8–11 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 geïllustreerd doordat de D-Geo Flow-lijn bij 25 keer reductie (Figuur 8–11) dicht bij de proeven ligt dan bij 100 keer reductie (Figuur 8–12). Bij beide proeven is de lengte van de barrière 25 cm.

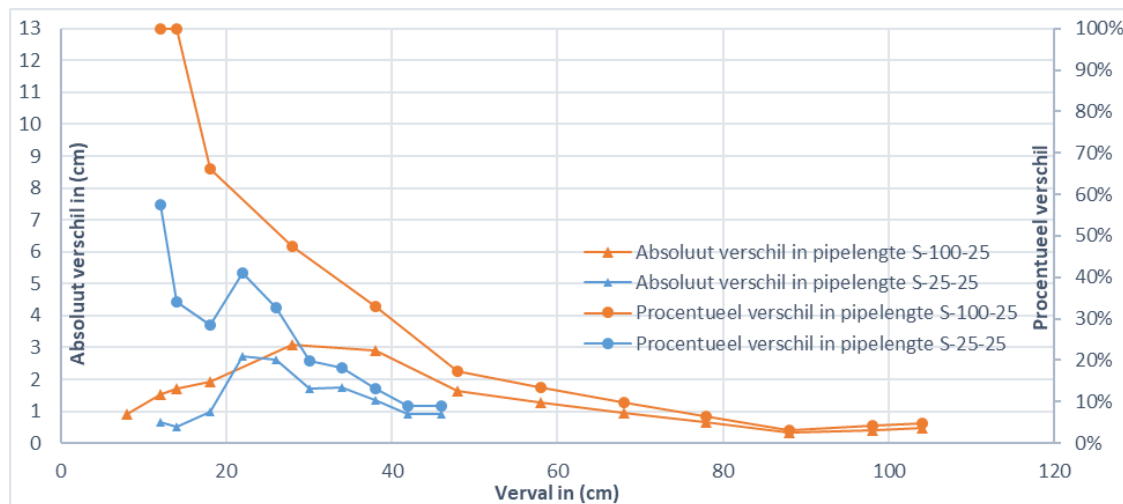
Uit paragraaf 7.2 is gebleken dat D-Geo Flow een significant effect voorspelt op de pipegroei bij dezelfde lengte, maar met een doorlatendheidsreductie van 25 of 100 keer. D-Geo Flow voorspelt een snellere pipegroei bij een doorlatendheidsreductie van 25 keer dan bij 100 keer. In subparagraaf 6.3.3 is 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 goed geïllustreerd in Figuur 8–13, 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.



Figuur 8–12 Vergelijking S-100-25



Figuur 8–11 Vergelijking S-25-25



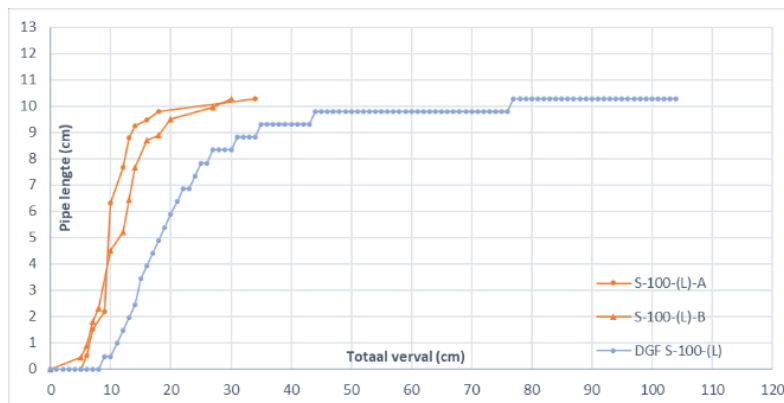
Figuur 8–13 Absolute en procentuele verschillen S-100-25 & S-25-25

D-Geo Flow onderschat de pipegroei bij 25 keer doorlatendheidsreductie dus minder dan bij 100 keer doorlatendheidsreductie. Er zijn meerdere verklaringen voor dit verband. Hieronder zijn de twee meest waarschijnlijke verklaringen toegelicht:

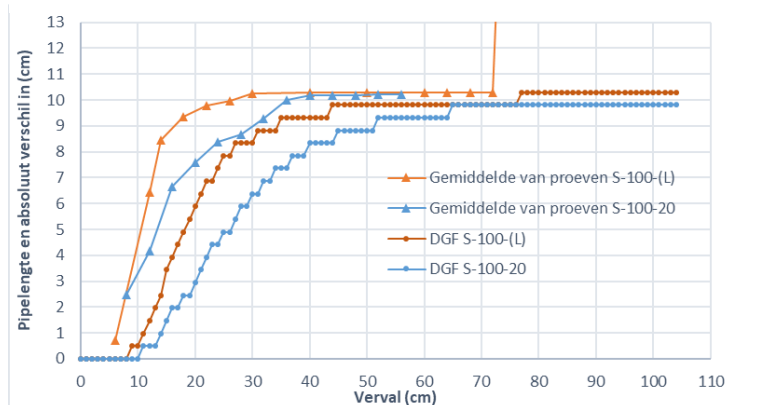
- Niet-behaalde doorlatendheidsreductie: Tijdens de proeven is het mogelijk dat de gewenste doorlatendheidsreductie niet volledig is behaald. Dit kan te wijten zijn aan fouten bij het maken van het SoSEAL mengsel of bij het plaatsen van de barrière. Het is daarom raadzaam om de werkelijke doorlatendheid van de proeven nader te onderzoeken aan de hand van stijgbuismetingen. Dit kan helpen bij het uitsluiten van deze mogelijke afwijkingen.
- Verschil in voorspellende capaciteit: Het verschil in voorspellende capaciteit van D-Geo Flow tussen barrières met een doorlatendheidsreductie van 25 en 100 keer kan mogelijk worden verklaard door het feit dat bij een barrière met een doorlatendheidsreductie van 25 keer meer water door de barrière stroomt, wat resulteert in meer horizontale grondwaterstroming. Zoals eerder uitgelegd in paragraaf 4.2, is het Sellmeijer-model in D-Geo Flow gebaseerd op horizontale stroming en voorspelt het de pipegroei beter in situaties waar meer horizontale stroming plaatsvindt. Aangezien bij een doorlatendheidsreductie van 25 keer meer horizontale stroming optreedt dan bij barrières met 100 keer reductie, is het mogelijk dat D-Geo Flow de pipegroei beter voorspeld bij een doorlatendheidsreductie van 25 keer dan bij 100 keer.

8.5 L-vormige barrière

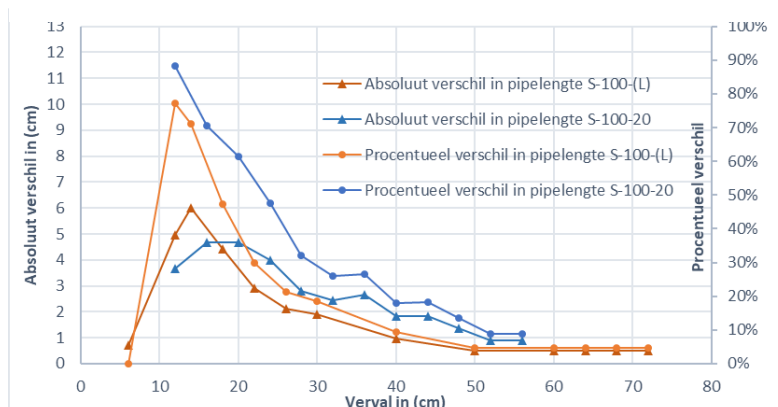
In Figuur 8–16 is de pipegroei weergegeven van de D-Geo Flow-modellering en de laboratoriumproeven met de L-vormige barrières. Uit de grafiek blijkt dat D-Geo Flow ook bij een L-vormige barrière de pipegroei onderschat. De mate van onderschatting is over het algemeen iets kleiner dan bij andere barrières met een doorlatendheidsreductie van 100 keer. Dit is geïllustreerd in Figuur 8–14 waarin de resultaten van S-100-L zijn vergeleken met die van S-100-20. De absolute afwijkingen van beide barrières zijn weergegeven in Figuur 8–15. Hieruit kan worden geconcludeerd dat D-Geo Flow de L-vormige barrière op dezelfde 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 van de afwijking bij 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 barrière onderschat.



Figuur 8–16 Vergelijking S-100-(L)



Figuur 8–14 Vergelijking S-100-(L) & S-100-20



Figuur 8–15 Absolute en procentuele verschillen S-100-(L) & S-100-20

8.6 Deelconclusie vergelijking

Uit de vergelijking tussen D-Geo Flow en de laboratoriumproeven zijn verschillende verbanden waargenomen en conclusies getrokken. Hieronder zijn de belangrijkste verbanden en conclusies opgesomd:

1. D-Geo Flow is goed in staat om de pipegroei in een situatie zonder barrière te voorspellen. In het begin van de pipegroei wordt de groei minimaal onderschat, maar naarmate het verval wordt verhoogd wordt de pipegroei bijna exact voorspeld ten opzichte van de laboratoriumproeven. Echter is deze conclusie gebaseerd op een vergelijking met één laboratoriumproef. Er wordt daarom aangeraden om meerdere proeven zonder barrière uitgevoerd te worden om dit te verifiëren.
2. Over het algemeen onderschat D-Geo Flow de pipegroei uit de proeven. De belangrijkste verklaringen hiervan staan in paragraaf 8.2.
3. Er zijn geen significante verschillen waargenomen tussen de lengte van de SoSEAL barrières en het voorspellend vermogen van D-Geo Flow. Ongeacht de lengte van de barrières vertoont D-Geo Flow een vergelijkbare mate van onderschatting. Het extra lengte-effect dat optreedt tijdens de proeven wanneer er een langere of kortere barrière wordt toegepast, wordt dus relatief goed voorspeld door D-Geo Flow.
4. Aanzienlijke verschillen zijn waargenomen tussen de proeven met een doorlatendheidsreductie van 25 keer en 100 keer. D-Geo Flow voorspelt de pipegroei aanzienlijk beter bij barrières met een lagere doorlatendheidsreductie dan bij barrières met een hogere doorlatendheidsreductie. Dit komt doordat D-Geo Flow meer weerstand berekent bij proeven met 100 keer reductie, terwijl dit niet terug te zien is in de laboratoriumproeven. Verklaringen hiervoor zijn te vinden in paragraaf 8.4.
5. Het grootste verschil tussen de modellen en de proeven ligt in de initiële fase van de pipegroei. Vanaf het begin is er een verschil tussen de modellen en de proeven, maar dit verschil neemt af naarmate de pipegroei dichterbij de SoSEAL barrière komt. Dit is nader uitgelegd in paragraaf 8.3.

Discussie

Tijdens het uitvoeren van het onderzoek is er gestreefd naar een valide onderzoek door verschillende maatregelen te nemen om de kwaliteit en validiteit te waarborgen. Een belangrijke eerste stap was het uitvoeren van een uitgebreide literatuurstudie naar relevante onderwerpen en voorgaand onderzoek. Hierdoor is er een beter begrip ontstaan en is het vervolg van het onderzoek bewuster uitgevoerd. Een belangrijk aspect voor de validiteit van het onderzoek is het uitvoeren van valide laboratoriumproeven. Daarom is er eerst onderzoek gedaan naar de methoden en technieken die zijn gebruikt bij voorgaande proeven. Daarnaast heeft er veel afstemming plaatsgevonden met experts Marien Harkes, Simon Dehout en Vera van Beek.

Om de validiteit van de resultaten te waarborgen zijn er als eerst duplo proeven uitgevoerd, zodat deze vergeleken konden worden. Vervolgens zijn de uitkomsten van de proeven zorgvuldig geanalyseerd. Proeven die niet correct zijn uitgevoerd, zijn niet meegenomen in de analyse, zoals beschreven in subparagraaf 6.3.1. Dit heeft geleid tot een betrouwbaarder onderzoek. Gedurende het gehele onderzoek zijn deelproducten opgeleverd en voorzien van feedback. Dit heeft gezorgd voor tussentijdse reflectie en heeft bijgedragen aan een correcter en completer onderzoek. Bovendien zijn er meer proeven uitgevoerd om betere en bredere inzichten te verkrijgen van de pipegroei naar een SoSEAL-barrière en het voorspellend vermogen van D-Geo Flow. Deze aanvullende proeven hebben bijgedragen aan een meer solide basis voor de conclusies van het onderzoek.

Desalniettemin zijn er enkele beperkingen in dit onderzoek. Een belangrijke beperking is het niet kunnen achterhalen van de werkelijk behaalde doorlatendheidsreductie van de SoSEAL barrières in de laboratoriumproeven. Dit heeft invloed op de betrouwbaarheid van het onderzoek, aangezien afwijkende doorlatendheden kunnen leiden tot afwijkingen ten opzichte van de resultaten van D-Geo Flow.

Een tweede beperking is het niet analyseren van de stijgbuizen, wat buiten de scope van dit onderzoek is gezet. Tijdens het onderzoek is in overleg met het SoSEAL team besloten om de prioriteit te geven aan het uitvoeren van meerdere proeven. Het analyseren van de stijgbuizen kan meer verbanden blootleggen met betrekking tot de doorlatendheid van de SoSEAL barrière en de conclusies daarmee versterken. Er wordt daarom aangeraden om dit in een vervolgonderzoek verder te onderzoeken. Daarnaast wordt aangeraden om meer onderzoek te doen met andere soorten zand om een breder beeld te krijgen hoe piping zich ontwikkelt rondom een SoSEAL-barrière. Ook is het zinvol om aanvullende referentieproeven uit te voeren.

De laatste beperking is dat tijdens de proeven de SoSEAL-barrière aangebracht met de mixed-in-place methode, omdat het niet mogelijk was om de injectiemethode te gebruiken. Met de mixed-in-place methode is de barrière (perfect) geplaatst, terwijl dit niet het geval is met de injectiemethode. Daarom wordt aangeraden om op grotere schaal, waar wel geïnjecteerd kan worden, vervolgonderzoek uit te voeren.

Ten slotte wordt ook aangeraden om het 3D effect nader te onderzoeken. Omdat D-Geo Flow(2D) geen 3D werking meeneemt, terwijl dat in beperkte mate wel in de proeven aanwezig is. Dit is daarom een mogelijke verklaring voor de verschillen tussen de pipegroei uit de laboratoriumproeven en D-Geo Flow. Daarom wordt aangeraden hier een vervolgonderzoek naar te doen, waarin in D-Geo Flow (3D) wordt gemodelleerd.

Conclusie

In dit onderzoek zijn eerst de conclusies getrokken met betrekking tot de pipegroei naar de SoSEAL barrière in de laboratoriumproeven. Dit heeft bijgedragen aan het beantwoorden van de hoofdvraag. Uit de proefresultaten is gebleken dat de 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 de doorlatendheidsreductie van 25 keer of 100 keer alleen weerstand biedt in het laatste deel voor de barrière.

De analyse van de pipegroei in D-Geo Flow en de laboratoriumproeven hebben 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 doorlatendheidsreducties dan bij barrières met hogere doorlatendheidsreducties. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat D-Geo Flow meer weerstand berekent bij proeven met een reductie van 100 keer. Dit is niet in de laboratoriumproeven waargenomen. Er zijn drie verschillende verklaringen voor de verschillen tussen D-Geo Flow en de laboratoriumproeven, deze zijn hieronder toegelicht:

1. De SoSEAL barrières hebben tijdens de proeven een andere doorlatendheidsreductie behaald dan verwacht, waardoor ze verschillen van de modelleringen. Indien dit het geval is, wijken de doorlatendheidsreducties van de proeven af van de ingevoerde doorlatendheidsreductie in D-Geo Flow. D-Geo Flow berekend dan niet wat in de proef is getest en dit kan zorgen voor verschillen in de uitkomsten. Het is daarom essentieel om de werkelijke doorlatendheid van de barrières nader te onderzoeken om dit uit te kunnen sluiten.
2. Een tweede verklaring is dat de software de pipegroei onderschat. Dit kan te wijten zijn aan het Sellmeijer-model dat uitgaat van horizontale grondwaterstroming. Omdat bij het plaatsen van een SoSEAL barrière minder horizontale en meer verticale stroming ontstaat kan dit mogelijk niet goed worden meegenomen in de berekening. Bovendien zijn de formules in het model een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, wat mogelijk resulteert in een onderschatting van de pipegroei.
3. Een derde verklaring is het 2D-effect en de invloed van 3D. Omdat de modelleringen in een 2D-model zijn uitgevoerd en de proeven in 3D zijn uitgevoerd, kan dit invloed hebben op de resultaten. Wel is door de relatief smalle proefopstelling het 3D effect zo klein mogelijk gemaakt. Echter is mogelijk dat het 2D-model bepaalde aspecten van de werkelijke situatie niet volledig kan weergeven, wat leidt tot een onderschatting van de pipegroei. Het is daarom aanbevolen om ook 3D-modelleringen uit te voeren om te onderzoeken of deze resultaten beter overeenkomen met de laboratoriumproeven.

Met deze verbanden en conclusies is het antwoord op de hoofdvraag geformuleerd: *‘In welke mate voorspelt D-Geo Flow (2D) de ontwikkeling van een terugschrijdende erosiepipe richting een SoSEAL barrière ten opzichte van laboratoriumproeven?’* Op basis van de verkregen conclusies en verbanden kan worden geconcludeerd dat D-Geo Flow de pipegroei van de laboratoriumproeven onderschat. Vooral bij proeven met een hoge doorlatendheidsreductie worden de laboratorium resultaten door D-Geo Flow aanzienlijk onderschat, terwijl bij proeven met een lage reductie D-Geo Flow een betere voorspelling geeft.

Aanbeveling

Op basis van de bevindingen uit dit onderzoek zijn er verschillende aanbevelingen gedaan voor het vervolg van de SoSEAL ontwikkeling.

Als eerst wordt aanbevolen om tijdens het ontwerpen van een SoSEAL barrière te streven naar een kleine toegestane afstand tussen de pipe en de barrière. Dit kan worden bepaald door middel van het veiligheidsraamwerk dat momenteel wordt uitgewerkt door het SoSEAL team. Het is belangrijk om voldoende tijd en middelen te investeren in het vaststellen van een veilige afstand, zodat de onzekerheden worden geminimaliseerd en de pipe zo dicht mogelijk bij de barrière mag komen. Uit de analyse van de pipegroei in hoofdstuk 6 is namelijk gebleken dat de SoSEAL barrière met name effectief is in het laatste gedeelte voor de barrière. Als de pipe dichtbij de barrière wordt toegestaan, wordt de pipegroei meer belemmerd. Dit betekent dat indien de pipe dichtbij de barrière mag komen een minder sterke barrière nodig is en de barrière korter en/of minder doorlatend mag zijn. Dit heeft niet alleen kostenvoordelen, maar maakt de uitvoering ook haalbaarder. Het minimaliseren van de benodigde afstand tussen de pipe en het scherm vergroot dus het potentieel van een SoSEAL barrière.

Als tweede aanbeveling wordt voorgesteld om de erosiebestendigheid van de SoSEAL barrière verder 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 zo is bij de injectiemethode, biedt dit veelbelovende mogelijkheden voor praktische toepassingen.

Daarnaast wordt sterk aanbevolen om vervolgonderzoek uit te voeren op basis van de resultaten van dit onderzoek. Deze vervolgonderzoeken kunnen verklaringen bevestigen of uitsluiten, waardoor de conclusies van dit onderzoek met meer zekerheid gepresenteerd kan worden. De specifieke vervolgonderzoeken zijn hieronder opgesomd en zijn beschreven in de Discussie.

-

Ondanks de onderschatting van de pipegroei in D-Geo Flow wordt aangeraden om deze software te gebruiken bij eventuele ontwerpen. D-Geo Flow bootst namelijk de vorm en het proces van de pipegroei nauwkeurig na. Om de voorspellende nauwkeurigheid van D-Geo Flow te verbeteren, kan ervoor worden gekozen om met een correctiefactor te werken. Deze mogelijke correctiefactor dient dan wel nader onderzocht te worden.

Naast inhoudelijke aanbevelingen wordt aanbevolen om het Factual Report terugschrijdende erosie bij SoSEAL barrières te gebruiken bij de verspreiding van dit onderzoek. Het Factual Report bevat een beknopte samenvatting van de verbanden en conclusies die uit de bevindingen in dit onderzoek zijn gehaald. Met dit Factual Report zijn de resultaten snel toegankelijk. Voor verdere details en onderbouwing wordt verwezen naar het volledige onderzoeksrapport.

Bibliografie

- De Leau, J. (2022). *Project Specifieke Ontwerprichtlijn SoSEAL 80%*. Houten: Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.
- De Veluenaar. (2014, mei 6). *geomorfologie-van-lunteren-en-omgeving*. Opgehaald van De Veluenaar: <https://www.de-veluenaar.nl/2014/05/06/geomorfologie-van-lunteren-en-omgeving-deel-6/>
- Deltares. (2015). *WTI Verschilanalyse Piping*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2015). *WTI Verschilanalyse Piping*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2020). *Factsheet D-Geo Flow voor op maat pipinganalyses*. Delft: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Deltares. (2023, april 26). *Deltares/sterktenoodmaatregelen*. Opgehaald van faalmechanisme: <https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Faalmechanisme>
- Deltares. (2023, februari 13). *software/d-geo-flow*. Opgehaald van Deltares.nl: <https://www.deltares.nl/nl/software/d-geo-flow/>
- Edelman-Vlam, H. d. (1976). *De Nederlandse bodem in kleur*. Wageningen: Univertiteit Wageningen.
- HDSR. (2023, januari 31). *sterke-lekdijk/nieuws*. Opgehaald van hdsr: <https://www.hdsr.nl/buurt/sterke-lekdijk/nieuws/persberichten/emissieloze/>
- Heemskerk, E. (2012). *L-vormige keermuren*. Delft: TU Delft.
- Heijmans. (2023, februari 8). *Bodemsanering/SoSEAL*. Opgehaald van Heijmans N.V.: <https://www.heijmans.nl/nl/producten-diensten/infra/bodem-ondergrond/bodemsanering/soseal/>
- Heijmans. (2023, januari 23). *SoSeal*. Opgehaald van Heijmans: <https://www.heijmans.nl/nl/producten-diensten/infra/bodem-ondergrond/bodemsanering/soseal/>
- Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden. (2023, april 6). *hdsr.nl*. Opgehaald van Sterke-lekdijk: <https://www.hdsr.nl/buurt/sterke-lekdijk/wijk-duurstede/>
- Kaptein, M. (2021). *Mixed in place permeability reductive layer Through AI and OM precipitation*. Delft: TU Delft.
- Klaarbergen, I. v. (2019). *Tijdsafhankelijk rekenen voor het*. Enschede: Universiteit Twente.
- Li, L. (2022). *Applicability of a SoSEAL Barrier to Mitigate Backward Erosion Piping*. Houten: Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.
- Rijkswaterstaat. (2021). *Memo rode draad overstrooming door piping*. Utrecht: Deltares.
- Rijkswaterstaat. (2021). *Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk*. Utrecht: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2023, 6 7). *uitleg-trl*. Opgehaald van rwsinnoveert: <https://rwsinnoveert.nl/uitleg-trl/uitleg-trl/>
- Sterke Lekdijk . (2023). *Toelichting SS-2 maakbaarheid SoSEAL*. Houten: HDSR.

Sterke Lekdijk. (2022). *Ontwikkelplan SoSEAL*. Houten: Sterke Lekdijk.

Sterke Lekdijk. (2022). *Ontwikkelplan SoSEAL*. Houten: Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden.

TAUW. (2023, juni 11). *nieuws-SoSEAL*. Opgehaald van Tauw.nl: <https://www.tauw.nl/nieuws/soseal-natuurlijk-en-kostenbesparend-alternatief-in-de-strijd-tegen-water.html>

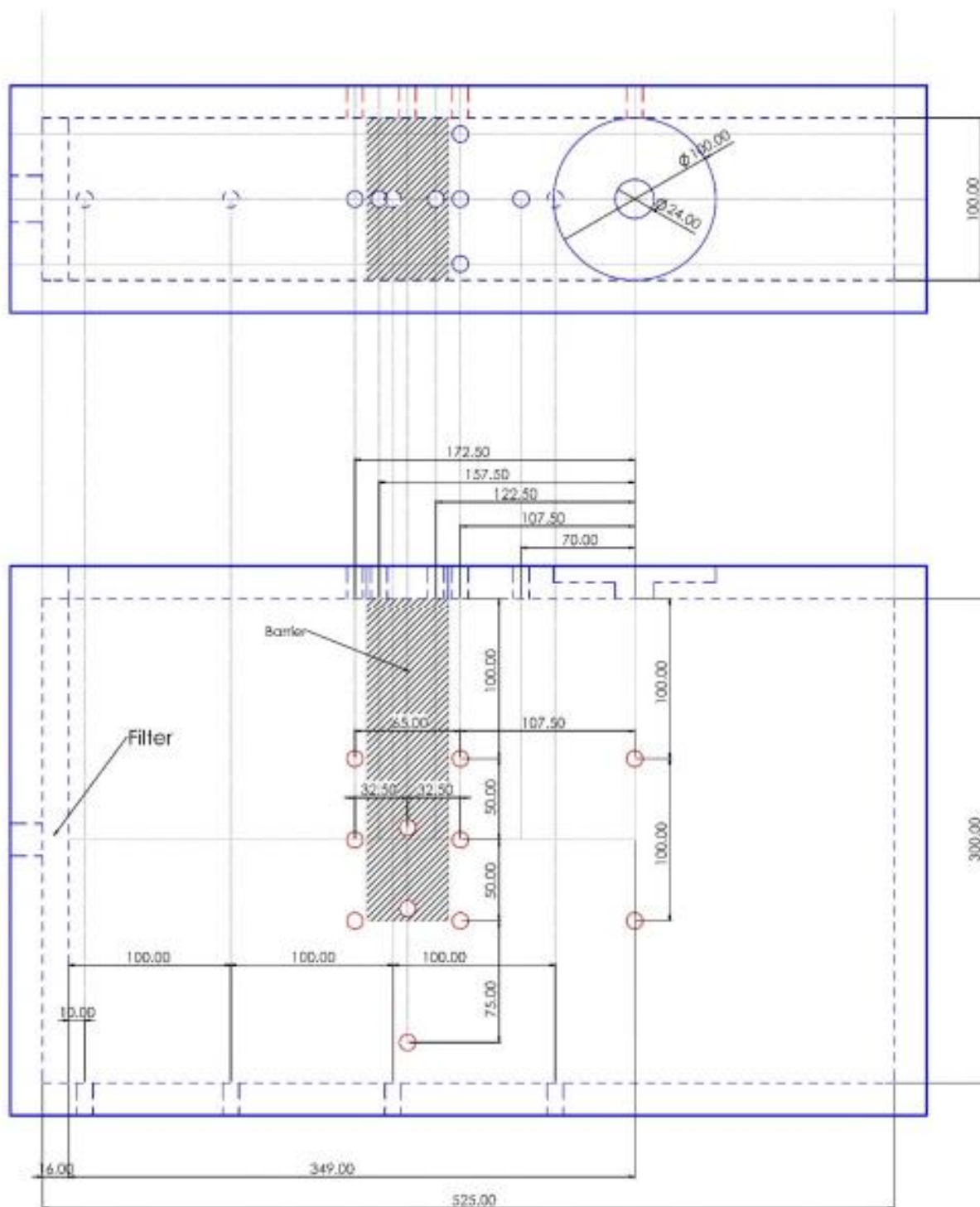
TU Delft. (2023, februari 8). *innovation-project/soseal*. Opgehaald van tudelft: <https://www.tudelft.nl/innovatie-impact/home-of-innovation/innovation-projects/soseal>

Van Beek, V. M. (2015). *BACKWARD EROSION PIPING*. Delft: TU Delft.

Van der Poel, J. T. (1998). *A preparation technique for very homogenous sand models and CPT research*. Delft: Centrifuge 98.

Wiggers, A. (2019). *POV PipingPortaal*. Tiel: Waterschap Rivierenland.

Bijlage 1. Afmetingen Rotated box



Bijlage 2. Stappenplan SoSEAL maken

1. Weeg de juiste hoeveelheid Aluminium (Al) en organisch materiaal (HUMIN-P775, OM) af, volgens onderstaande Tabel.

SoSEAL vlokken(g)	OM (g)	Al (g)	OM (mol)	Al (mol)
50	57,50	28,97	1,99	0,12
40	46,00	23,17	1,59	0,10
30	34,50	17,38	1,20	0,07
25	28,75	14,48	1,00	0,06
20	23,00	11,59	0,80	0,05
15	17,25	8,69	0,60	0,04
10	11,50	5,79	0,40	0,02
5	5,75	2,90	0,20	0,01
1	1,15	0,58	0,04	0,00



2. Meng het Al met gedestilleerd water.
3. Meng het OM met kleine schepjes per keer met gedestilleerd water. Dit moet voorzichtig gebeuren omdat het OM moeilijk oplost.



4. Mix de twee mengsels met elkaar.



5. Meet de Ph van het mengsel, dit moet tussen de 3,0 en 3,5 zijn.



6. Laat het mengsel 12 uur rusten.
7. Scheidt de vlokken van het water, doormiddel van een centrifuge. Het mengsel dient gecentrifugeerd te worden op 2500 rpm voor 20 min.



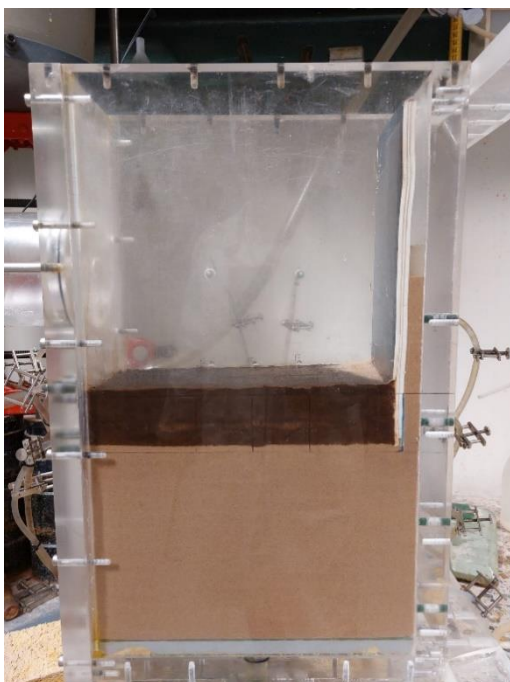
8. Haal de vlokken uit de centrifuge bekken.



9. Mix de SoSEAL vlokken met B15 zand.



10. Het SoSEAL is klaar om aan te brengen in de Rotated box.

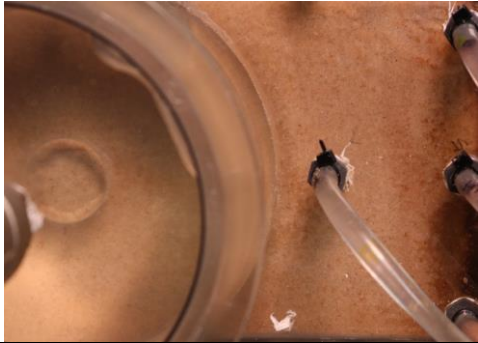
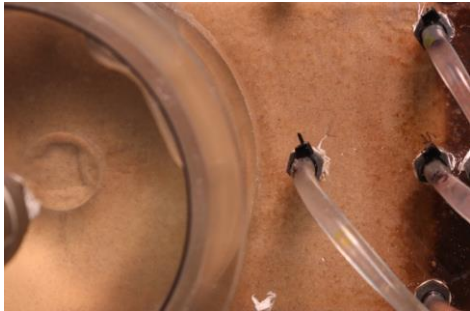
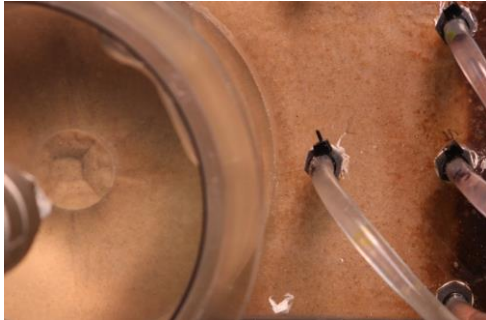
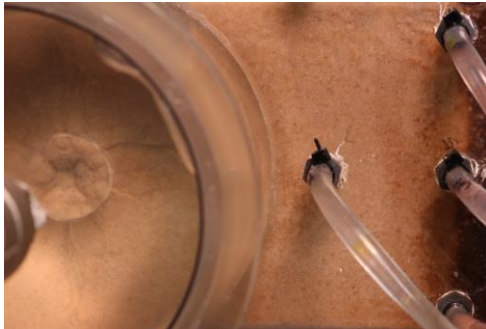


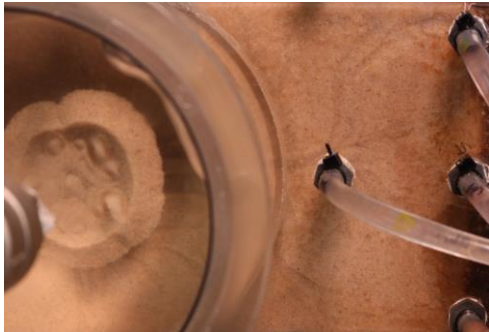
Bijlage 3. Stappenplan opbouwen proefopstelling

1. Controleer groene filtermaterialen in de stijgbuizen.
2. Zorg dat in- en uitlaat & de stijgbuizen dichtzitten.
3. Vet de bovenste cilinder en dop in met vacuüm gel.
4. Plaats de dop en de bovenste cilinder op de box.
5. Zet de box rechtop en vul met ontluicht water van onderaf tot circa 1/3
6. Ontluicht het inlaatfilter door voorzichtig aan te stampen.
7. Vul de box zoals is benodigd. Zorg voor voldoende ontluichtwater in de box, en zorg dat er geen luchtbelllen in de box zitten. Laat zand in de box regenen en verdicht door te stampen. Schrijf het gewicht van toegevoegd zand op.
8. Veeg overtollig zand weg om de deksel te kunnen sluiten. Gebruik hiervoor een recht stuk metaal.
9. Weeg al het materiaal dat eventueel uit de box is gevallen.
10. Maak de bouten schoon.
11. Vet de rubberen plaat in met vacuüm gel en plaats op de box.
12. Plaats de kap en dicht de box. Draai de bouten kruisgewijs stevig aan.
13. Draai de box voorzichtig in verticale positie.
14. Vul de cilinder bovenaan met water en verwijder voorzichtig de dop.
15. Vul volledig aan met ontluicht water en controleer of er geen luchtbelllen in de box aanwezig zijn.
16. Sluit de in- en uitlaat aan.
17. Draai de stijgbuizen open.
18. Zorg dat de in- en uitlaat op gelijk niveau liggen en draai voorzichtig de uitlaat en vervolgens de inlaat open.
19. Controleer of er geen lucht in het systeem en stijgbuizen zitten en wacht tot stijgbuizen gelijk staan. Dit duurt circa 2 uur
20. Stel de camera's goed af en zorg dat deze voorzien zijn van een lege SD-kaarten.
21. Plaats lampen.
22. Plaats een weegschaal en emmer bij de uitlaat om het debiet te meten.
23. Starten met testen!

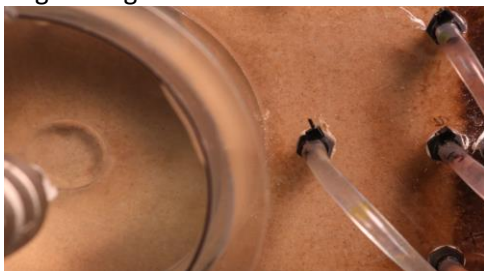
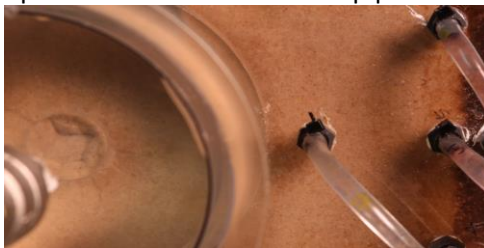
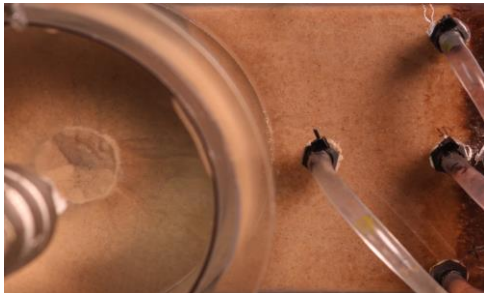
Bijlage 4. Observaties laboratoriumproeven

100-5-a

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
3,0	15	Bij de uitlaat is het zien dat er kleine borelingen plaats Begint langzaam te borrelen. 
4,0	20	Pipe begint met ontwikkelen. 
6,0	30	Twee pipes ontwikkelen zich loodrecht ten opzichte van de barrière. Ook ontwikkelen twee pipes zich richting de barrière. Deze pipes zijn erg breed. 
7,0	35	Pipe tot aan de rand van de cilinder. 

18,0	110	Twee pipes reiken bijna de barrière. 
28,0	145	Pipe heeft de barrière bereikt. Er is eerst een grote pipe die richting de barrière groeit. Als deze pipe bijna de barrière heeft bereikt zijn er aftakkingen van deze pipe die ook verder ontwikkelen. 
48,0	200	Erg veel zandtransport treedt op. Dit zijn geen pipes meer maar vlakken zand die wegstromen. Na circa 10 minuten begon de barrière met eroderen. Aan de achterzijde van de barrière ontstond een gat waar zand was weggevoerd. Vervolgens vervormde de barrière richting de uitlaat. Ook zakte de barrière een klein stukje waardoor er een gat door de barrière vormde. Dit zorgde voor hydraulische kortsluiting en extreme zand transport. Dit was dan ook het einde van de proef. 

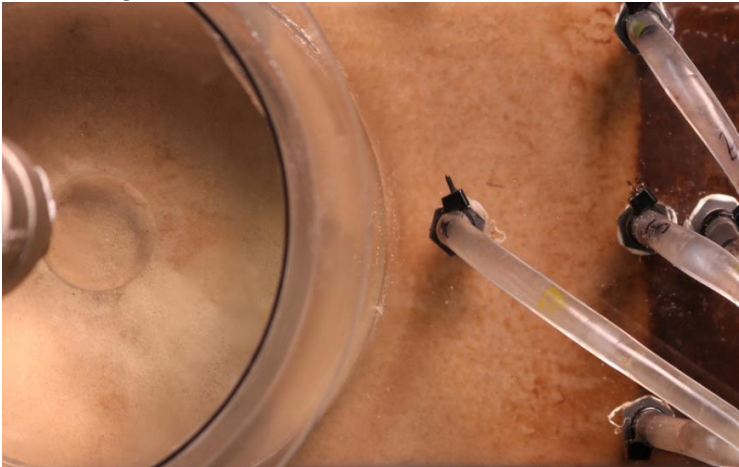
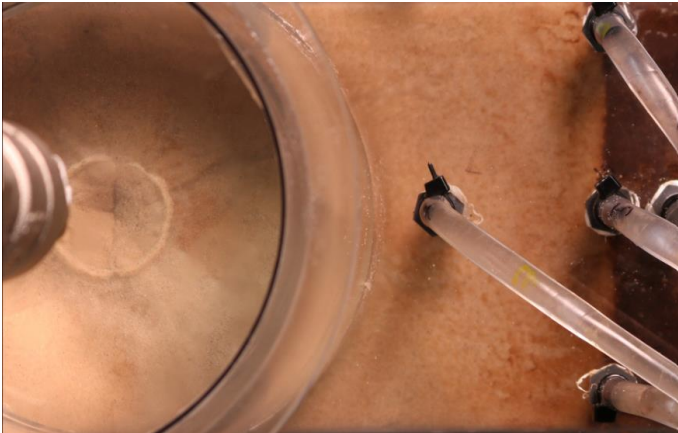
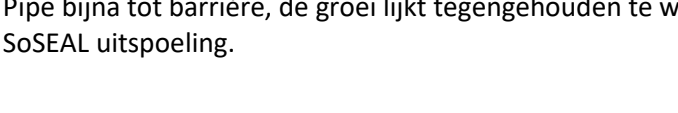
100-5-b

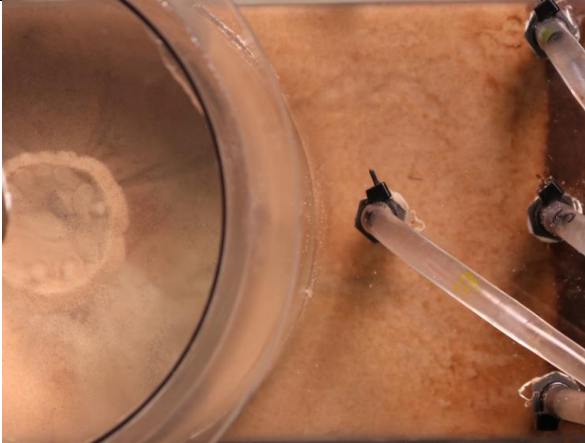
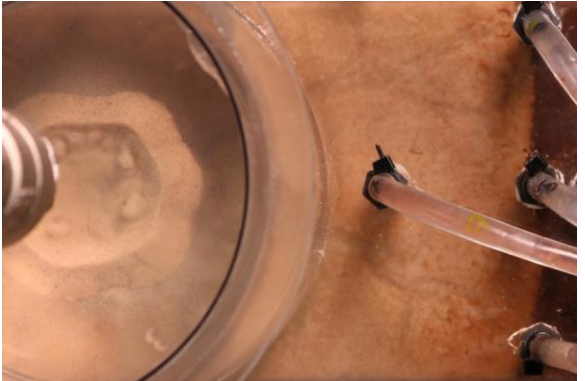
Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
3,0	15	Begint langzaam te borrelen. 
4,0	20	Pipes beginnen met ontwikkelen. Twee pies loodrecht ten opzichte van barrière en een pipe richting de barrière. 
8,0	40	Pipe tot voorbij stijgbuisje h7. De pipe ontwikkelde in een stuk vanaf voor de rand van de cilinder tot aan het stijgbuisje. 
20,0	125	Twee pipes bijna tot de barrière. Een grote pipe is gevormd die ten hoogte van stijgbuisje h7 is opgesplitst. Deze twee pipes groeien vrijwel gelijk aan elkaar richting de barrière. 
46,0	210	Barrière faalde op vrijwel dezelfde wijze als proef -100-5-a. einde proef. 

Herhalingstest 100-20-a

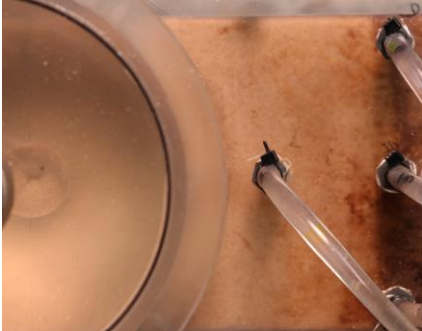
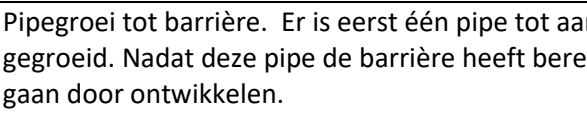
Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
8,0	40	Pipegroei begint binnen in de cilinder 
13,0	65	Pipegroei tot de rand van de cilinder. 
35,0	125	Pipegroei bijna tot barrière, circa 1 cm vanaf barrière. 
39,0	130	Pipegroei direct na het verhogen van het verval tot barrière. Er groeide twee pipes vrijwel gelijk aan elkaar richting de barrière. 
72,0	155	Blijven meerdere pipes ontwikkelen en verbreden, deze pipes stoppen bij de SoSEAL barrière en hier vinden geen processen of erosie meer plaats. Einde van de proef. 

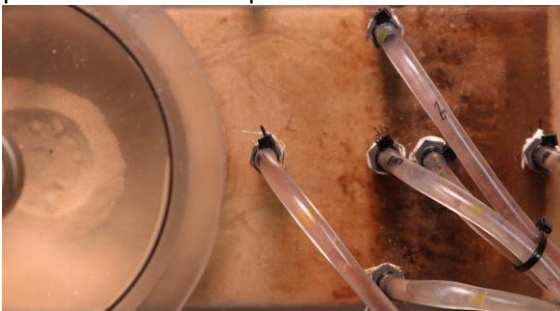
S-100-25-a

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
4,0	20	Uitlaat begint te borrelen. 
8,0	40	Pipe begint met groeien. 
19,0	95	Eerste pipe rijkt tot buiten de cilinder. 
42,0	210	Pipe bijna tot barrière, de groei lijkt tegengehouden te worden door SoSEAL uitspoeling. 

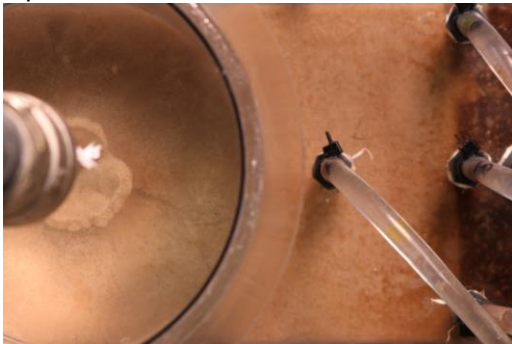
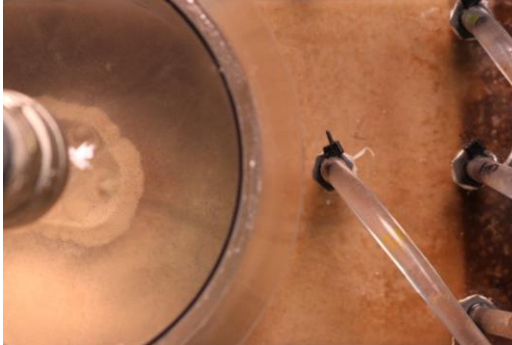
			
54,0	270	Twee pipes bijna tot aan de barrière. Twee pipes hebben zich gelijk aan elkaar tot stijgbuis h7 ontwikkeld. Daarna is de eerste pipe tot bijna tegen de barrière gegroeid. Vervolgens is de tweede pipe doorontwikkeld tot de barrière. 	
104,0	385	Pipe bereikt de barrière. De barrière erodeert niet, einde proef. 	

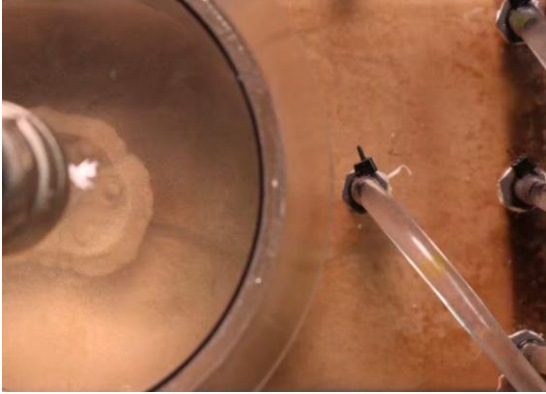
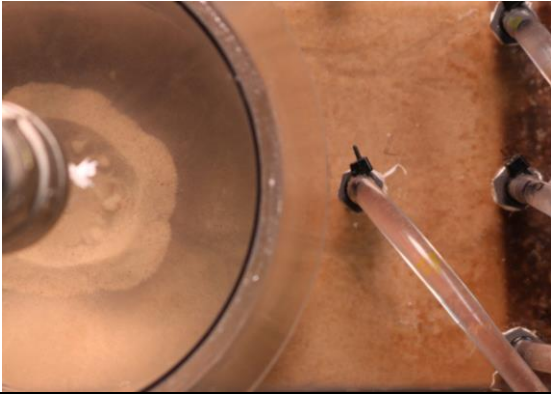
S-25-25-a

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
4,0	20	Uitlaat begint te borrelen. 
15,0	75	Start van de pipegroei zowel richting barrière als naar achteren. 
20,0	100	Pipegroei tot aan de rand van de cilinder. 
34,0	180	Pipegroei bijna tot barrière, lijkt tegengehouden te worden door een kleine uitspoeling SoSEAL. 
38,0	200	Pipegroei tot barrière. Er is eerst één pipe tot aan de barrière gegroeid. Nadat deze pipe de barrière heeft bereikt is de tweede pipe gaan door ontwikkelen. 

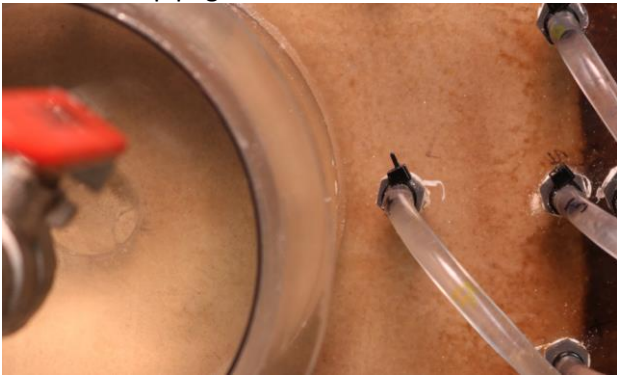
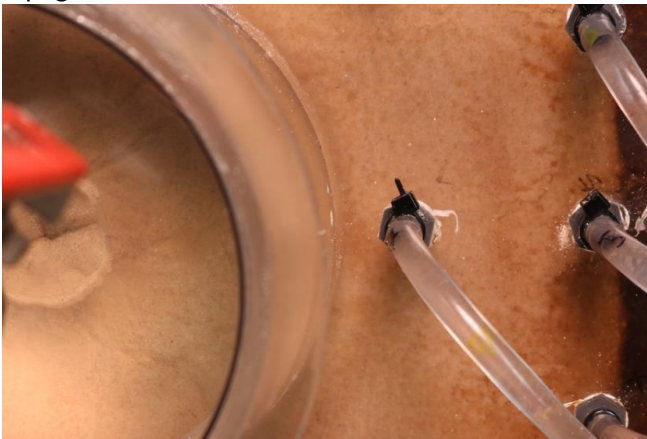
			
62,0	255	Tweede pipe tot barrière. 	
90,0	290	Blijven meerdere pipes ontwikkelen en verbreden, deze pipes stoppen bij de SoSEAL barrière en hier vinden geen processen of erosie meer plaats. Einde van de proef. 	

S-25-25-b

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
6,0	30	Uitlaat begint met borrelen. 
9,0	45	Pipes beginnen met ontwikkelen. 
16,0	80	Pipe tot aan de rand van de cilinder. 
35,0	185	Pipe bijna tot de barrière. 

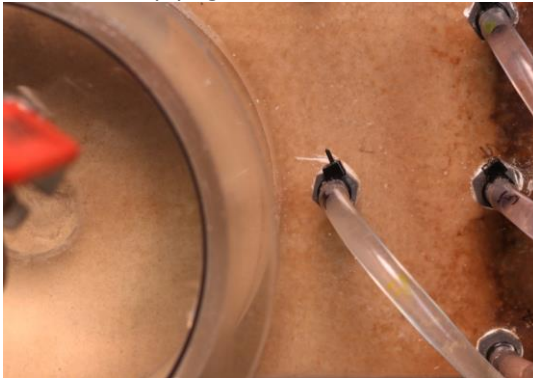
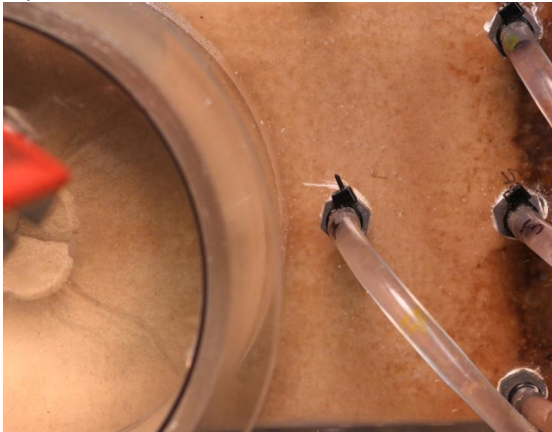
41,0	215	Eerste pipe heeft de barrière bereikt. Er groeit één grote pipe tot aan de barrière. Pas na dat deze pipe de barrière heeft bereikt ontwikkelen er meerdere pipes. 
84,0	340	Tweede pipe heeft de barrière bereikt. 
104	370	Meerdere pipes hebben de barrière bereikt. Er vindt geen erosie van de barrière plaats, einde van de proef. 

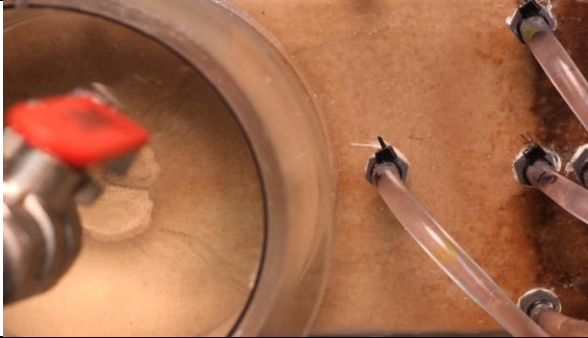
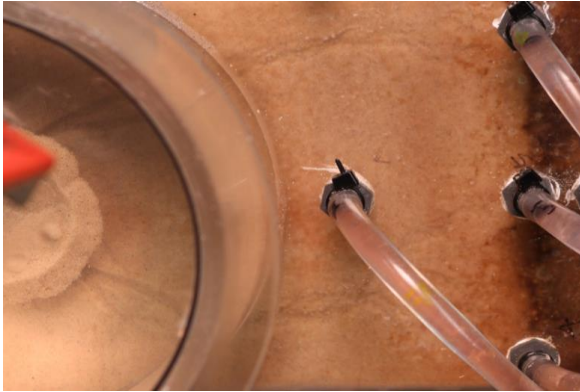
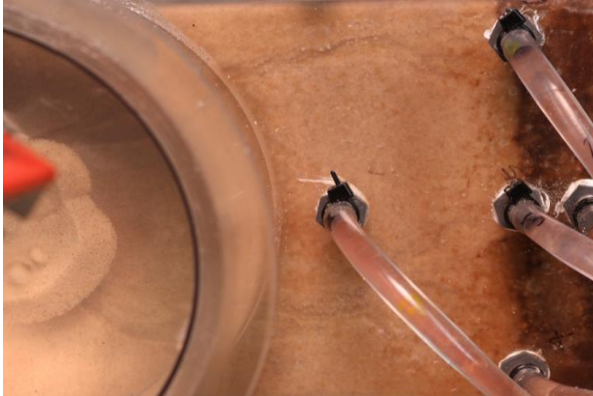
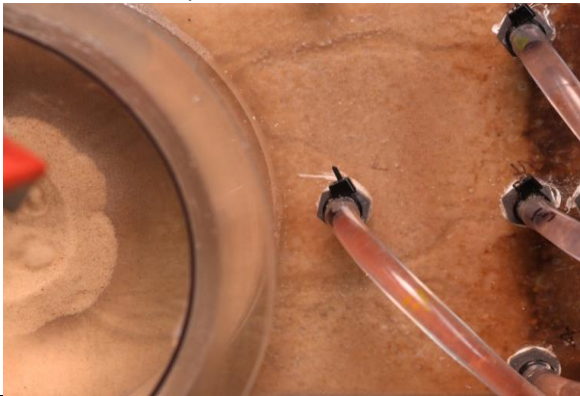
S-100-28-a

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
7,0	35	Uitlaat begint te borrelen. 
8,0	40	Start van de pipegroei in de cilinder. 
33,0	165	Pipegroei tot buiten de cilinder. 
80	330	Twee pipes bijna tot aan de barrière.

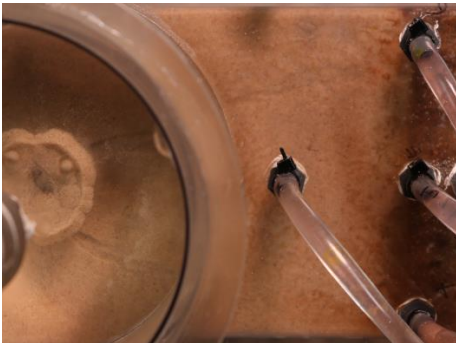
			
104	395	Pipes hebben de barrière net niet bereikt. Geen erosie te zien bij de barrière. Einde proef. 	

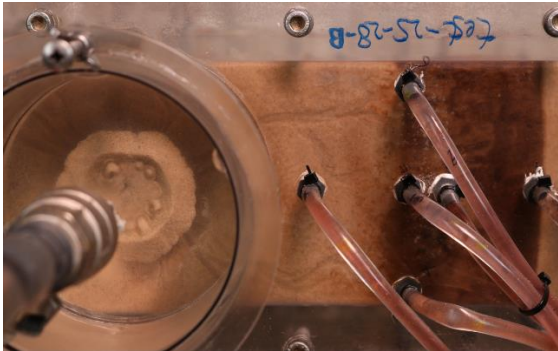
S-25-28-a

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
6	30	Uitlaat begint met borrelen. 
9	45	Start van de pipegroeï in de cilinder. 
22	115	Pipe reikt tot buiten de cilinder. 
34	180	Twee Pipes tot aan stijgbuis h7.

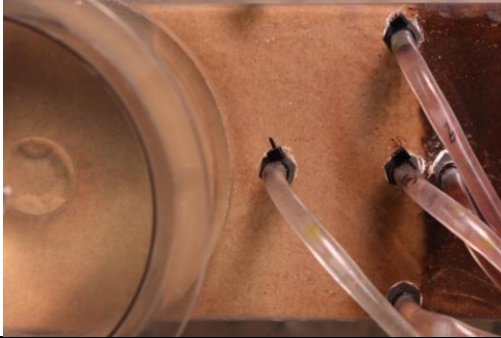
			
60	275	Twee pipes lopen vrijwel gelijk aan elkaar richting de barrière. Circa 1 cm vanaf de barrière lijken de pipes tegengehouden te worden door SoSEAL uitspoeling. 	
80	325	Pipe reikt de barrière. 	
104	370	Blijven meerdere pipes ontwikkelen en verbreden. Geen erosie aan de barrière, einde proef. 	

S-25-28-b

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
5	25	Uitlaat begint te borrelen. 
8	40	Pipegroei begint in de cilinder. 
23	115	Pipe rijkt tot buiten de cilinder. 
53	230	Pipe blijft op circa 1 cm van de barrière. Een tweede pipe ontwikkelt zich ook verder tot buiten de cilinder. 

71	280	Pipe heeft de barrière bereikt. 
105	345	Meerdere pipes blijven zich vormen en verbreden. Geen erosie te zien bij de barrière, einde proef. 

S-100-(L)-a

Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
3	15	Uitlaat begint te borrelen. 
6	30	Pipegroei begint in de cilinder. 
10	55	Pipe rijkt tot buiten de cilinder. 
19	105	Pipe blijft op circa 1 cm van de barrière. 

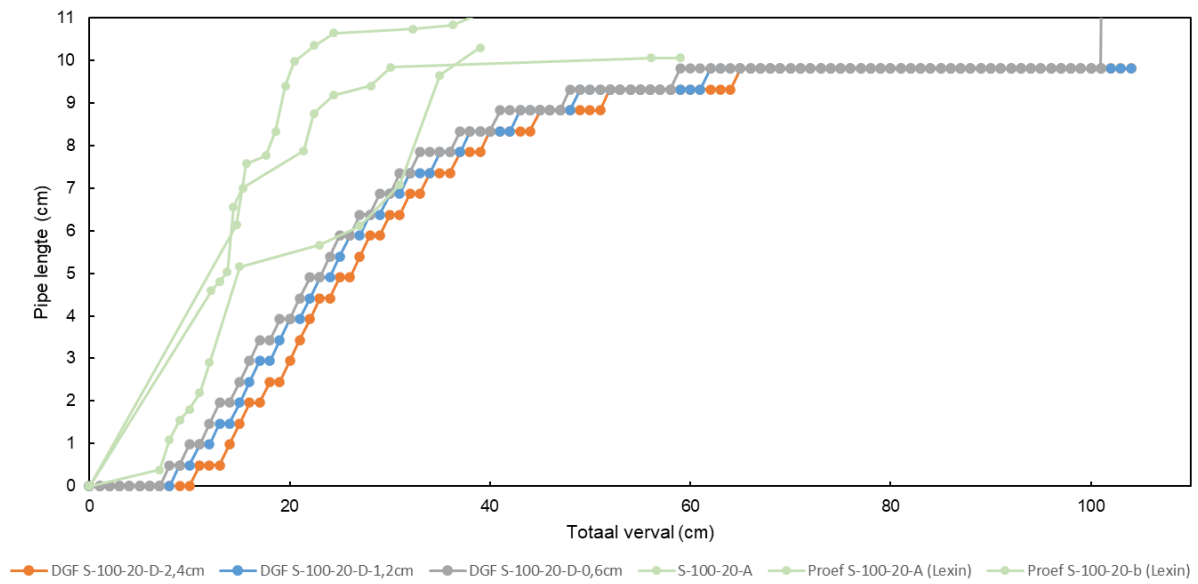
34	170	Pipe heeft de barrière bereikt. 
72	265	Er treedt een stromend vlak op dat niet meer afneemt. Dit duurde circa 15 minuten. Vervolgens vervormde het bovenste gedeelte van de L-vormige barrière richting de uitlaat. Vervolgens groeide een pipe door de barrière wat leidde tot het falen van de barrière. 

S-100-(L)-b

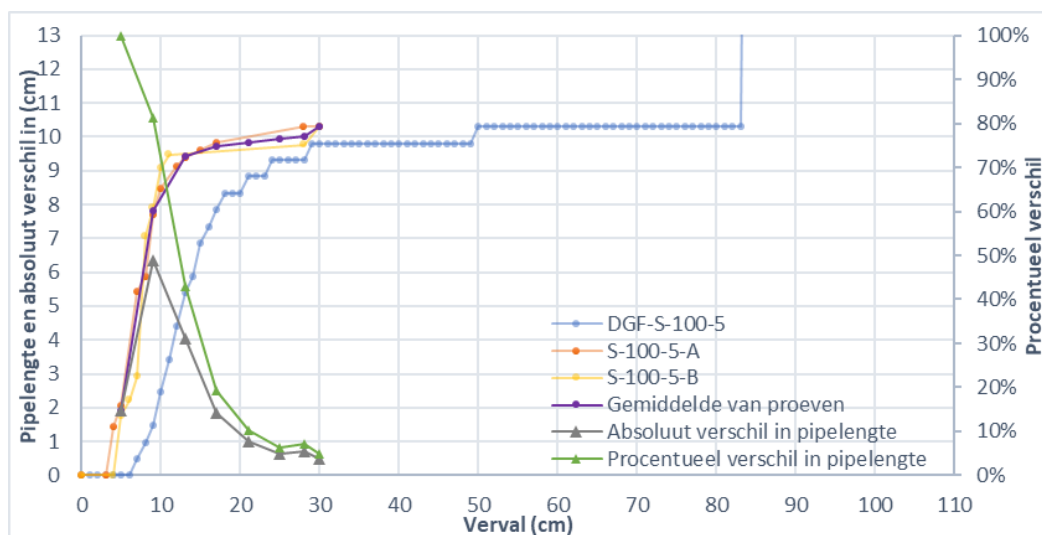
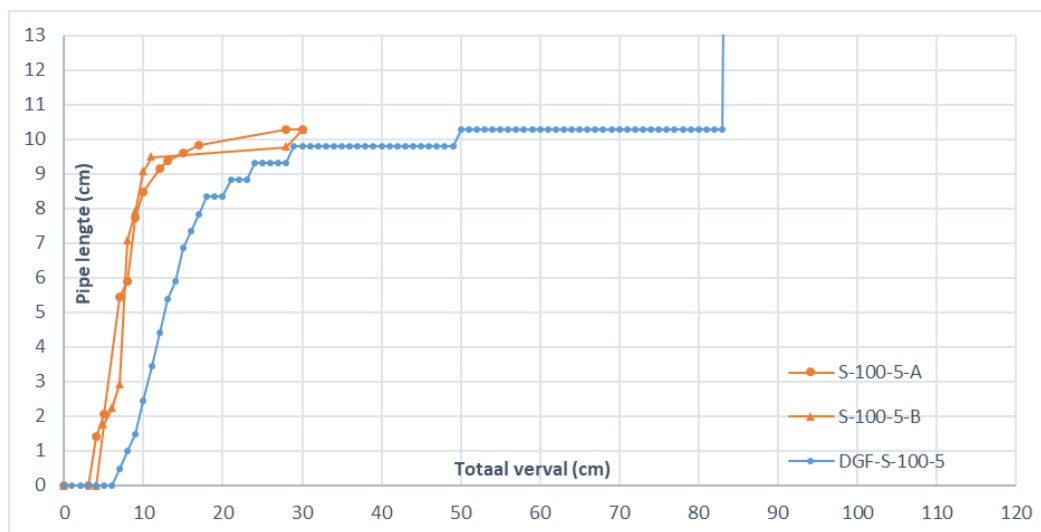
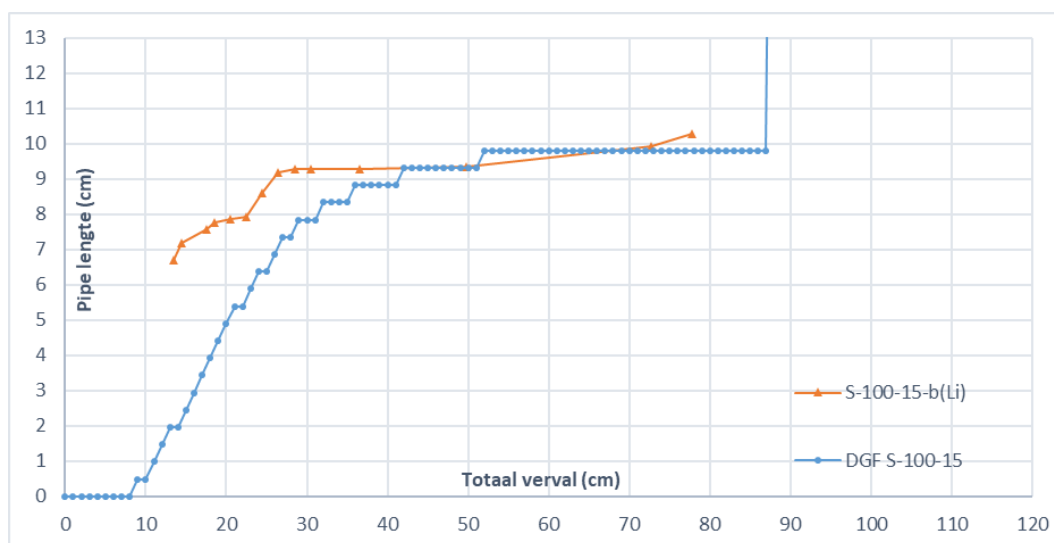
Verval (cm)	Tijd (min vanaf start proef)	Observatie
4	20	Uitlaat begint te borrelen. 
11	55	Pipe rijkt tot buiten de cilinder. 
22	110	Pipe blijft op circa 1 cm van de barrière. 
34	160	Pipe heeft de barrière bereikt. 

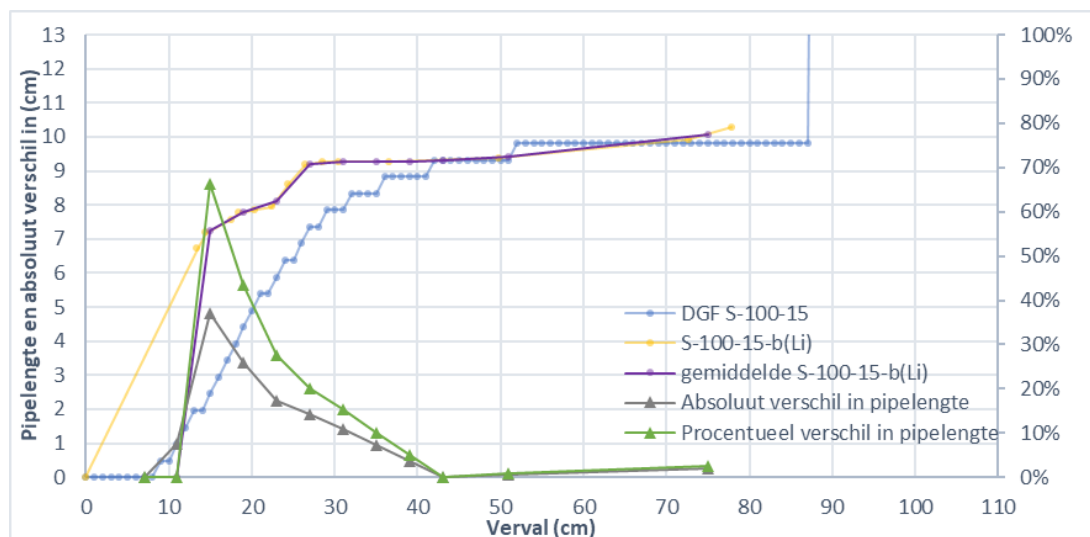
76	270	Tijdens het falen van de barrière trede vrijwel exact hetzelfde proces op als bij S-100-(L)-a. 
----	-----	--

Bijlage 5. Gevoeligheidsanalyse grootte uitlaat

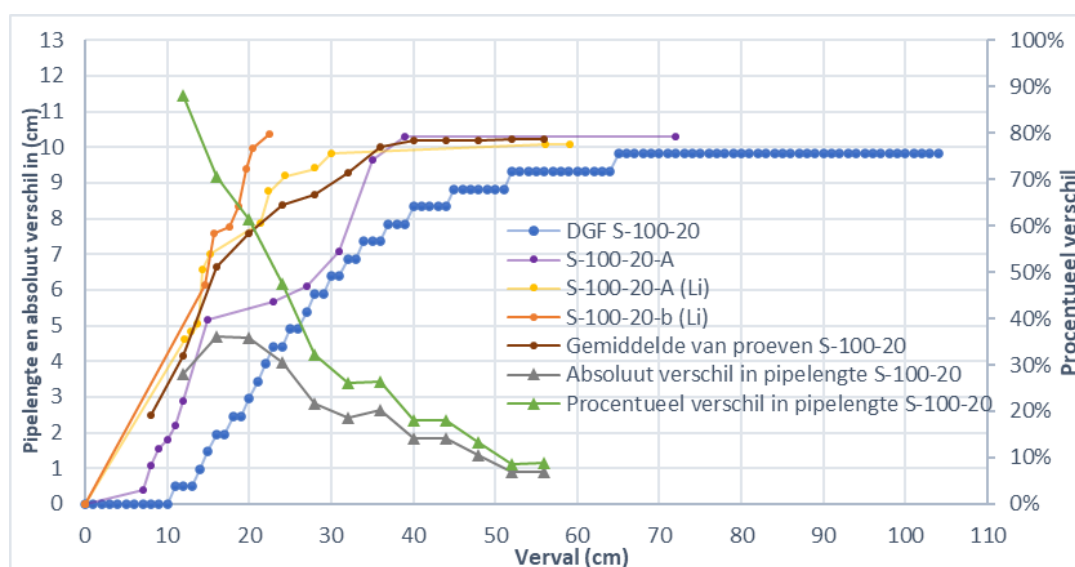
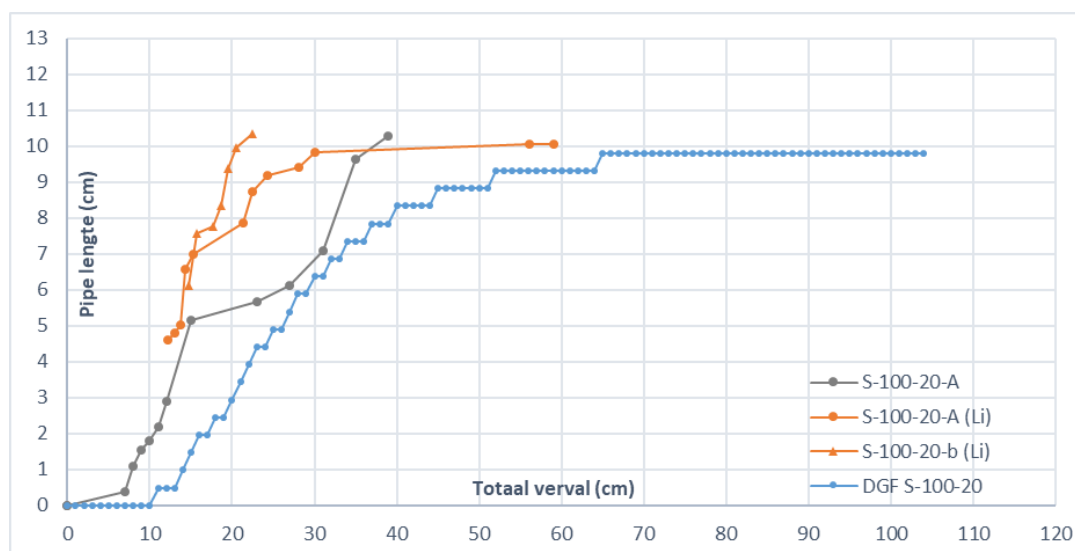


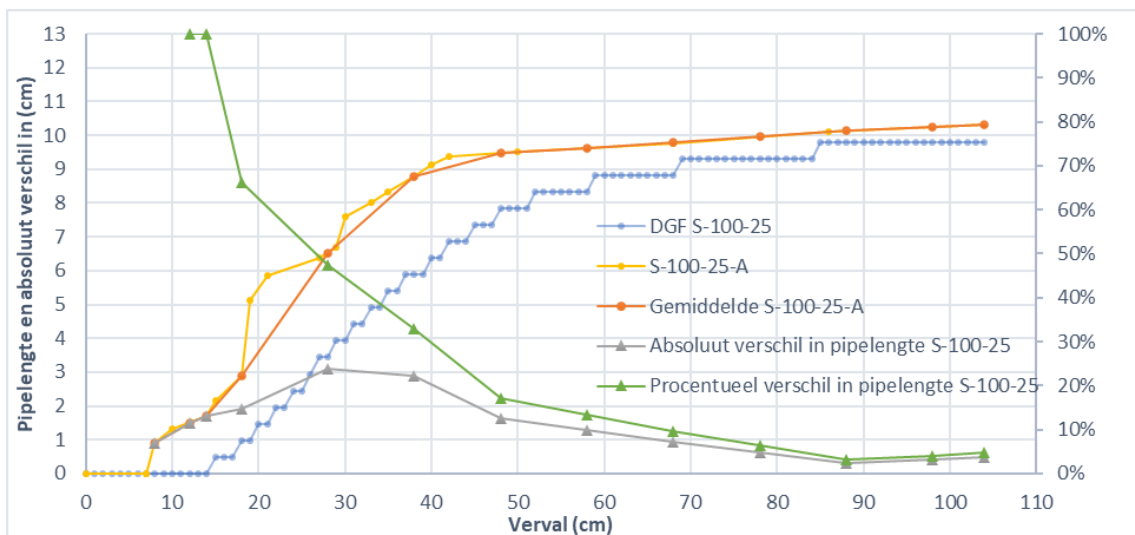
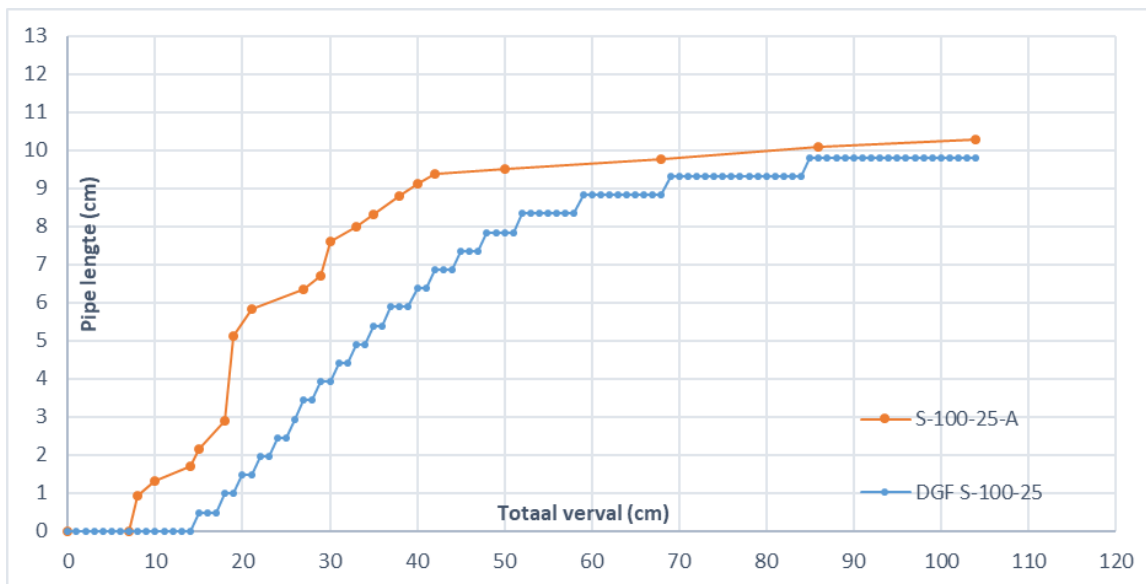
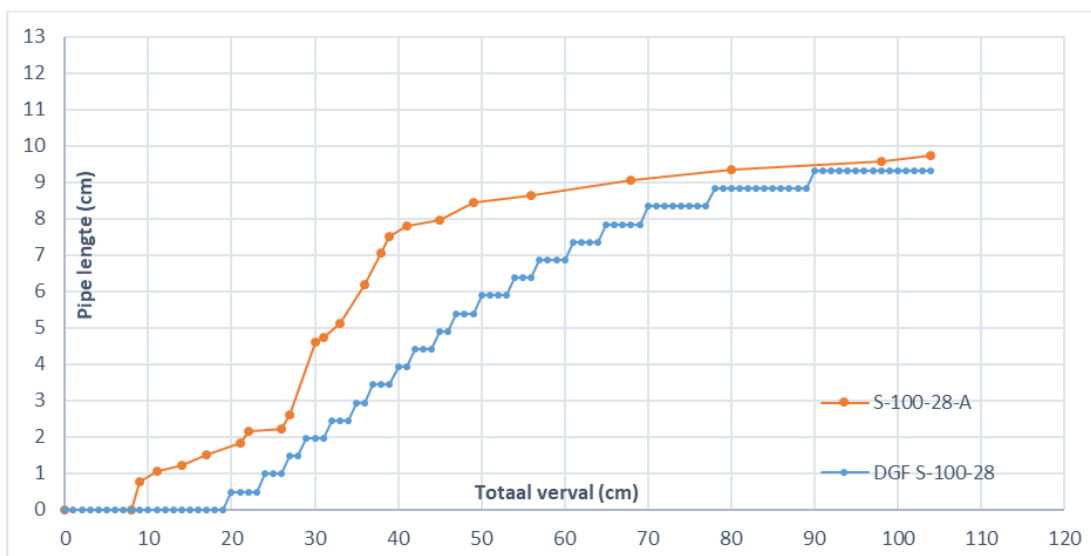
Bijlage 6. Pipegroei grafieken alle proeven

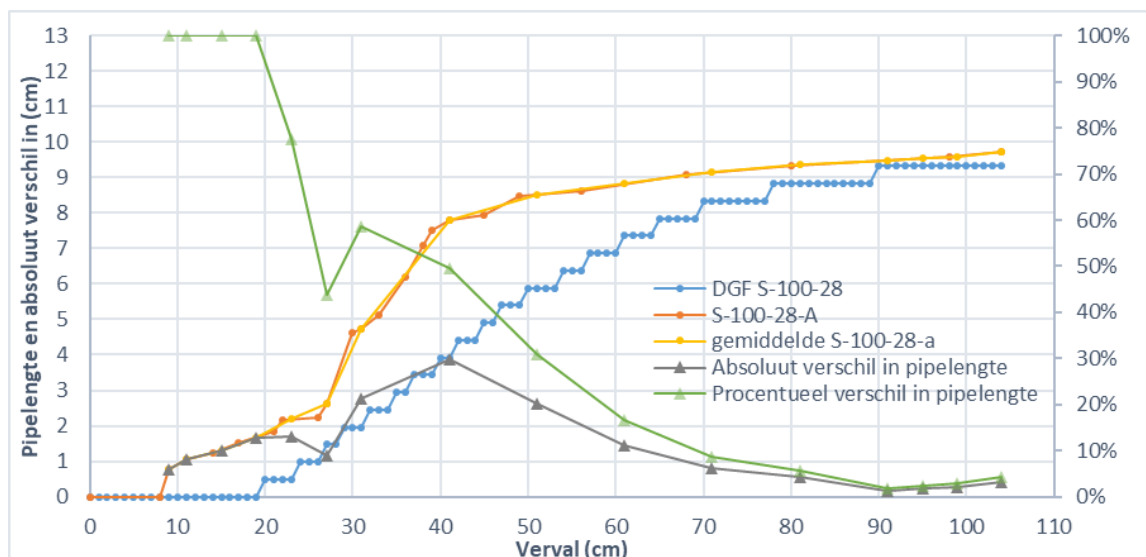
S-100-5**S-100-15**



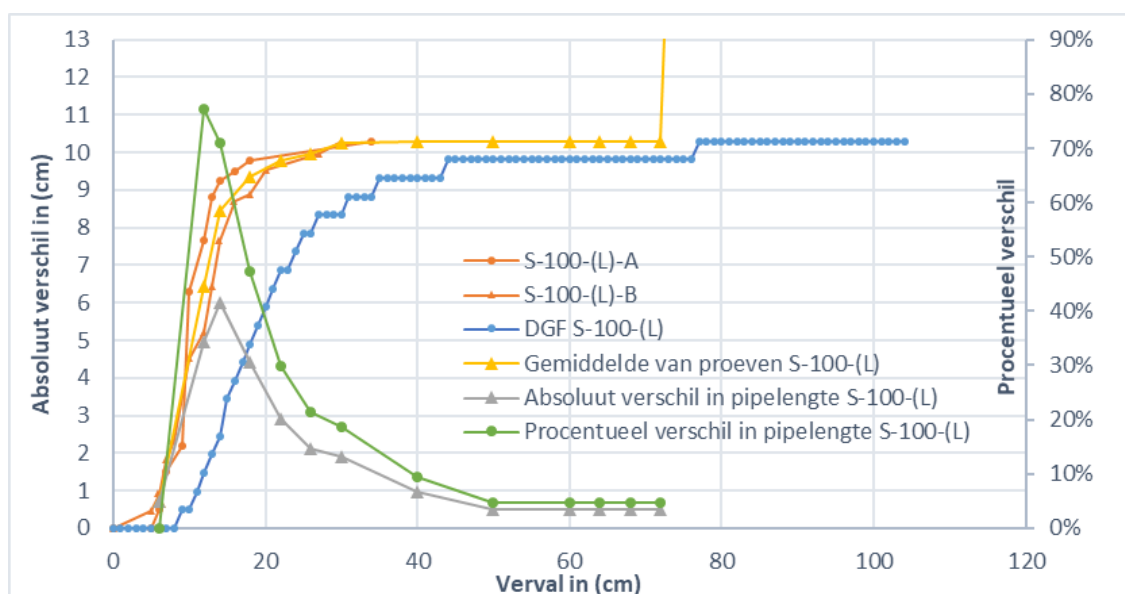
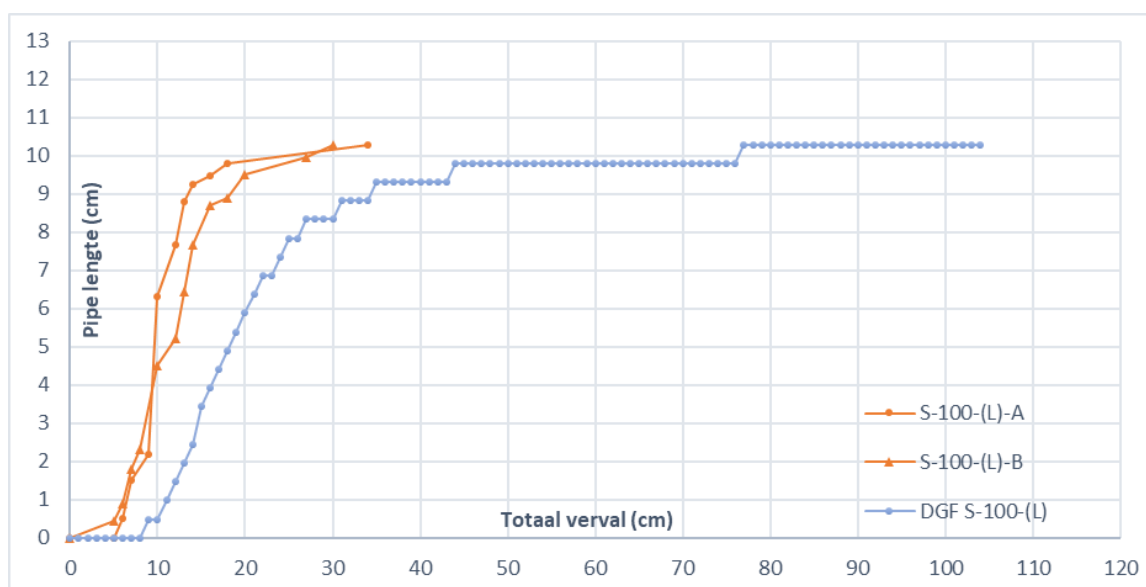
S-100-20

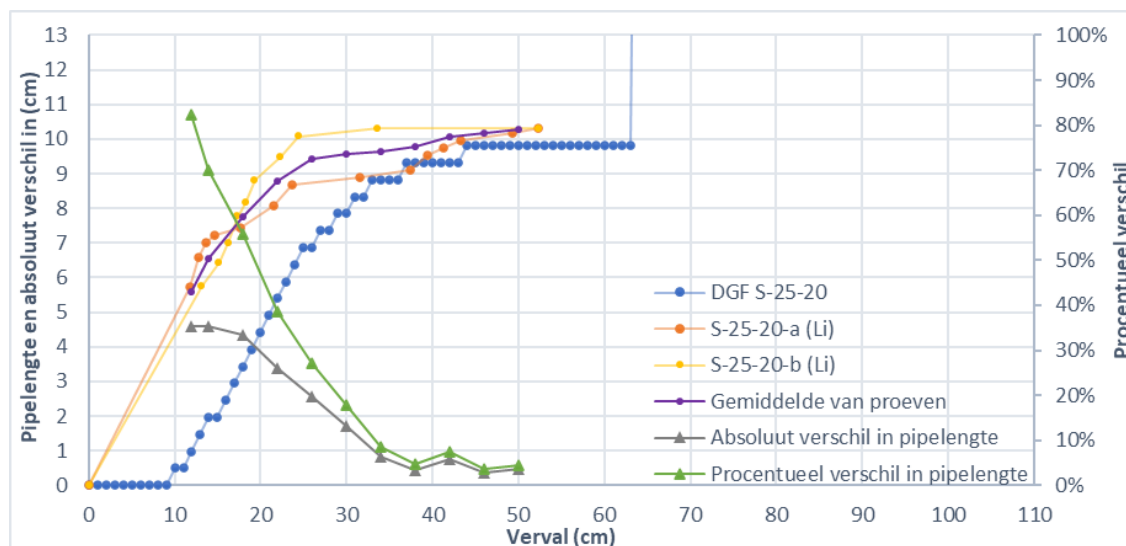
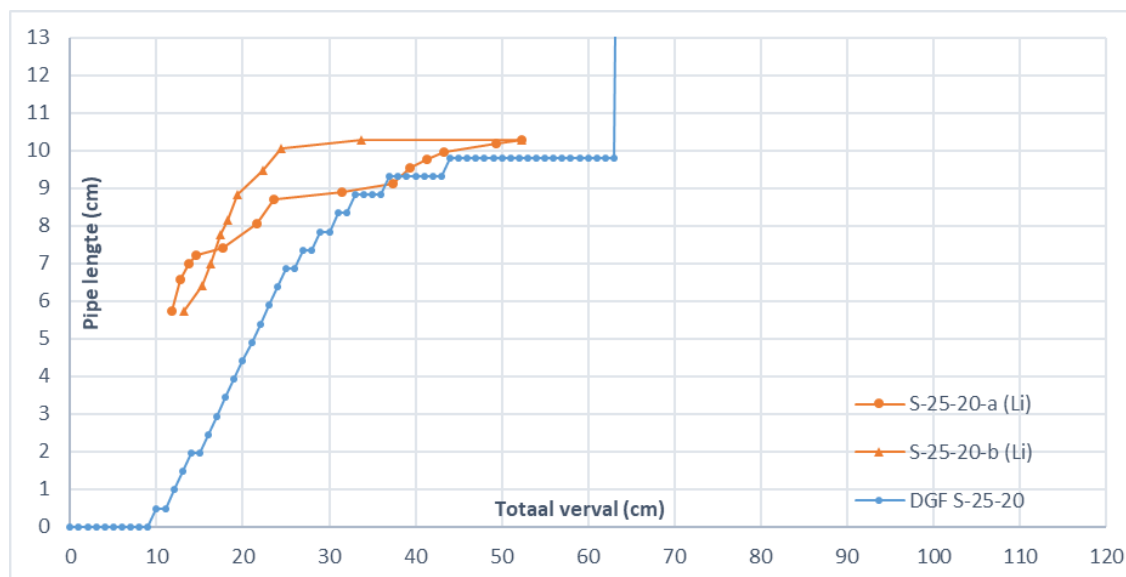
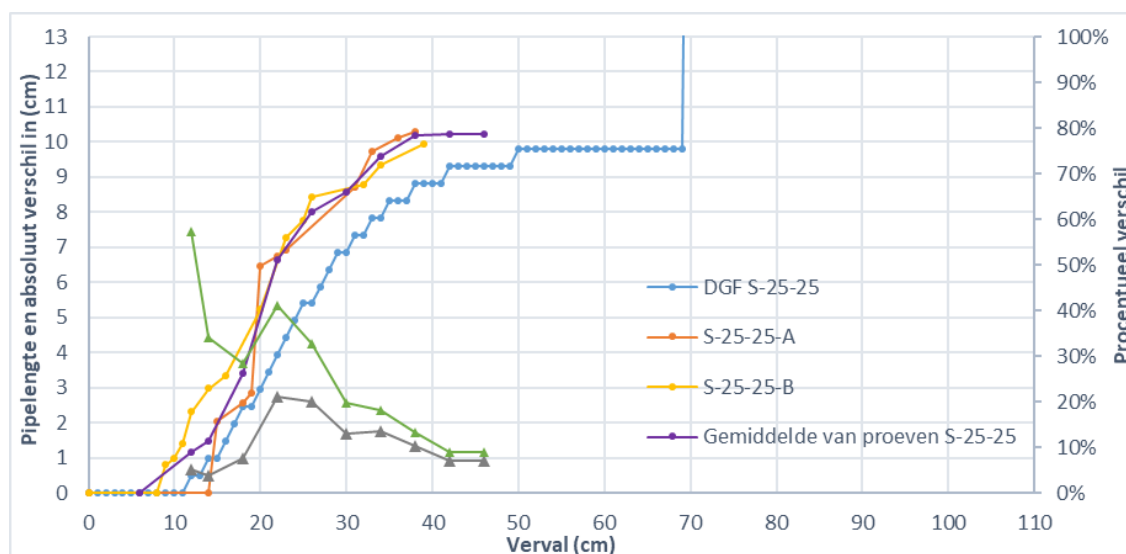


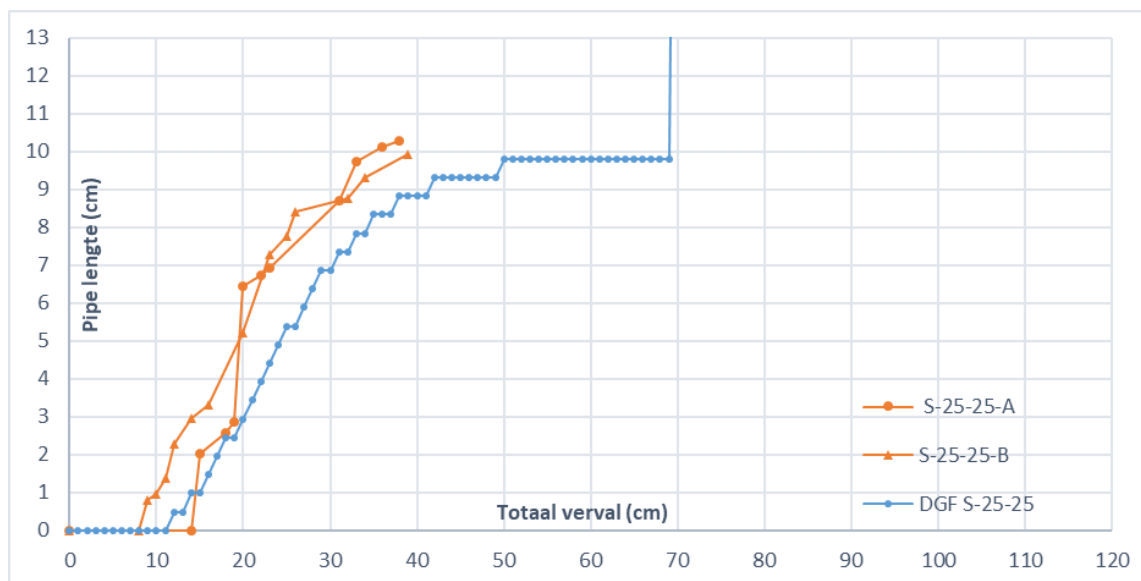
S-100-25**S-100-28**



S-100-(L)



S-25-20**S-25-25**



S-25-28

