

Meetverslag grasbekledingsproeven brandslangmethode Waddenzeedijk



Meetverslag grasbekledingsproeven brandslangmethode Waddenzeeidijk

Auteur(s)

Ligaya Wopereis

Paul van Steeg

Meetverslag grasbekledingsproeven brandslangmethode Waddenzeedijk

Opdrachtgever	RWS-WVL
Contactpersoon	Dhr. M. van Damme
Referenties	Plan van Aanpak KPP 2021 project HV02 2021 – Versterking Onderzoek Waterveiligheid, 27-8-2021
Trefwoorden	Erosie, brandslangmethode, grasbekleding, overgangen

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	03-12-2021
Projectnummer	11206793-001
Document ID	11206793-001-ZWS-0003
Pagina's	91
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ligaya Wopereis	
	Paul van Steeg	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
2.0	Ligaya Wopereis	Andre Koelewijn	Goaitske de Vries	
	Paul van Steeg			

Samenvatting

Gras en klei zijn veelgebruikte materialen om de kern van de dijk te beschermen tegen hydraulische belasting. Hierdoor speelt de erosieve eigenschappen van gras en klei een belangrijke rol om een juiste inschatting te maken van de kans op overstroming als gevolg van een dijkdoorbraak. De erosieve eigenschappen van beide materialen zijn echter moeilijk te bepalen door het complexe karakter en de heterogeniteit van gras en klei. Er zijn daardoor veel proeven nodig om deze erosieve eigenschappen beter in beeld te krijgen.

Bestaande methodieken zijn niet goed geschikt om de benodigde grote hoeveelheid data te verzamelen. Dit komt omdat ze óf erg grootschalig en duur zijn (simulatoren en golfgoten), óf ze worden juist op een te kleine schaal toegepast. De brandslangmethode is een goed alternatief; het is een laagdrempelige aanpak die ook het dominante effect van de gestructureerdheid van klei en de mate van samenhang van een grasbekleding in beschouwing neemt.

In september 2021 zijn acht proeven uitgevoerd met deze methode op het binnentalud van de Waddenzeedijk in Friesland. Zeven van de proeven zijn uitgevoerd op een testlocatie zonder overgang en één is uitgevoerd op een testlocatie met een opsluitband als overgang.

De proeven op de testsectie zonder overgang zijn uitgevoerd om het effect van verschillende instellingen (met name de spuihoek en de stroomsnelheid) beter in beeld te krijgen.

De resultaten van de herhalingsproeven laten een fors verschil zien in schadediepte, -lengte en -breedte. Ondanks de grote afwijking van resultaten lijkt de brandslangmethode geschikt om proeven uit te voeren op gras zonder overgang. Wel dient er een framework opgesteld te worden waarmee de resultaten kunnen worden geduid. Dit framework dient zowel een fysische component als een statistische component te hebben.

De brandslangmethode lijkt minder geschikt voor proeven op overgangen doordat het dan moeilijk is om de methode goed in te stellen. De waterstraal moet net boven de overgang spuiten zonder te veel op de overgang zelf te spuiten. Een mogelijke oplossing hiervoor is om een hoge stroomsnelheid te kiezen, om een continue waterstraal te hebben, wat makkelijker in te stellen is.

Met deze acht proeven is veel data gewonnen en meer inzicht gekregen in de werking van het systeem, namelijk de respons (erosieve eigenschappen) van een graszode op verschillende belastingen aangebracht door de spuitmond. Deze data kan worden gebruikt om de brandslangmethode verder te ontwikkelen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Brandslangmethode	7
1.3	Eerder uitgevoerde testen met de brandslangmethode	8
1.3.1	Brandslangmethode: grasblokken van locatie 'Blija'	8
1.3.2	Deltagoot test: grasblokken van locatie 'Blija'	9
1.4	Doel	10
1.5	Opzet van dit rapport	11
2	Testopstelling	12
2.1	Locatie	12
2.2	Gras- en kleikwaliteit	13
2.3	Gebruikte materialen	16
2.4	Aanvoer en afvoer van water	17
2.5	Positionering spuitmond	17
2.6	Aangebrachte belasting	19
3	Proevenprogramma	21
3.1	Algemeen	21
3.2	Programma van één proef	22
3.3	Metingen	22
3.3.1	Stroomsnelheid	23
3.3.2	Erosiekuil	23
3.3.3	Overige waarnemingen	24
4	Resultaten	27
4.1	Metingen	27
4.2	Waarnemingen	28
5	Discussie	33
5.1	Globale analyse	33
5.2	Discussie	34
6	Conclusies en aanbevelingen	37
6.1	Conclusies	37
6.2	Aanbevelingen	37
6.2.1	Instellingen	37
6.2.2	Proevenprogramma	38
6.2.3	Metingen	38
6.2.4	Duiding en interpretatie van de resultaten	38

A	Samenvatting resultaten van alle proeven	40
B	Factsheet proef 1a	41
B.1	Eigenschappen proef	41
B.2	Proefverloop	41
B.3	Diepte metingen	47
C	Factsheet proef 1b	49
C.1	Eigenschappen proef	49
C.2	Proefverloop	49
C.3	Diepte metingen	53
D	Factsheet proef 1c	55
D.1	Eigenschappen proef	55
D.2	Proefverloop	55
D.3	Diepte metingen	59
E	Factsheet proef 1d	61
E.1	Eigenschappen proef	61
E.2	Proefverloop	61
E.3	Diepte metingen	65
F	Factsheet proef 1e	67
F.1	Eigenschappen proef	67
F.2	Proefverloop	67
F.3	Diepte metingen	71
G	Factsheet proef 2e	73
G.1	Eigenschappen proef	73
G.2	Proefverloop	73
G.3	Diepte metingen	77
H	Factsheet proef 1e-bis	79
H.1	Eigenschappen proef	79
H.2	Proefverloop	79
H.3	Diepte metingen	83
I	Factsheet proef 1e-ter	85
I.1	Eigenschappen proef	85
I.2	Proefverloop	85
I.3	Diepte metingen	89

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

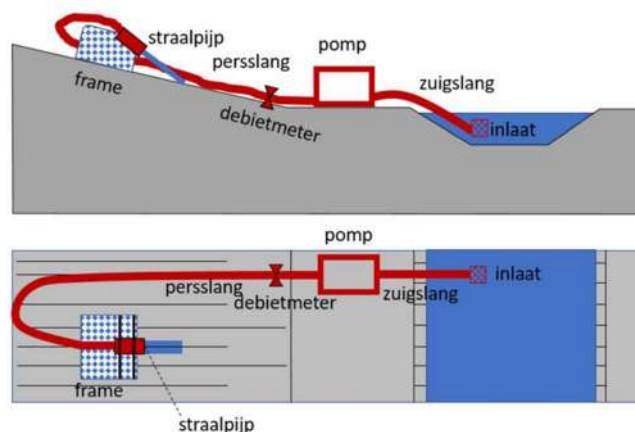
Gras is een veelgebruikt materiaal om de kern van een dijk te beschermen tegen hydraulische belasting. Vaak is daaronder een kleilaag aanwezig waarop het gras groeit. De sterkte van de dijk is hierdoor afhankelijk van de erosieve eigenschappen van gras en klei. Om een juiste inschatting te maken van de kans op overstroming als gevolg van een dijkdoorbraak is kennis van deze sterkte en de hydraulische belasting nodig.

Het complexe karakter en de heterogeniteit van gras en klei maken het erg lastig om de erosieve eigenschappen van deze materialen te kunnen vaststellen, wat essentieel is om de dijksterkte te kwantificeren. Hiertoe is het nodig om data te kunnen verzamelen zodat er goede correlaties kunnen worden gevonden tussen de erosieve eigenschappen van grasbekledingen en kleilagen, en andere eigenschappen van die materialen.

Bestaande methodieken zijn niet goed geschikt om de benodigde grote hoeveelheid data te verzamelen. Dit komt omdat ze óf erg groot en duur zijn (simulators en golfgoten), óf ze geven belastingen welke op een te kleine schaal worden toegepast, waardoor bijvoorbeeld het waarschijnlijk dominante effect van de gestructureerdheid van klei of de mate van samenhang van een grasbekleding niet goed wordt meegenomen. Het is daarom opportuun om een laagdrempelige methodiek op een geschikte schaal verder te ontwikkelen om daarmee veel data te verzamelen. Hiermee kunnen de erosieve eigenschappen in-situ worden vastgesteld of geclassificeerd. Om hieraan tegemoet te komen is de zogenoemde brandslangmethode ontwikkeld.

1.2 Brandslangmethode

De ontwikkeling van de brandslangmethode is beschreven in Deltares (2020), het basisconcept is weergegeven in Figuur 1.1. De opstelling bestaat uit een inlaat, zuigslang, pomp, debietmeter, persslang en een frame waarop de straalpijp is gemonteerd. Hiermee wordt een continue stromingsbelasting op een vaste locatie gerealiseerd.



Figuur 1.1 Basisconcept brandslangmethode (overgenomen uit Deltares, 2020).

Deltares (2020) beschrijft eerste oriënterende testen (Figuur 1.2) met deze zogenoemde 'brandslangmethode' en concludeert dat de werkbaarheid hoog is en dat testen op locatie door twee personen kunnen worden uitgevoerd.



Figuur 1.2 Impressie van de eerste oriënterende testen met de brandslangmethode (overgenomen uit Deltares, 2020).

1.3 Eerder uitgevoerde testen met de brandslangmethode

In de eerste helft van 2021 zijn meer oriënterende testen uitgevoerd op een losstaand grasblok (l x b x h = circa 2 x 2 x 1 m³). Het doel van deze testen was om meer ervaring met de methodiek op te doen en een gevoel te krijgen ten aanzien van de optredende erosiesnelheid als functie van specifieke instellingen van de brandslangmethode. De voornaamste instellingen zijn de stroomsnelheid en de hoek van inval van de straal.

De eerdere testen zijn uitgevoerd op een grasblok van de locatie 'Blija' welke ten behoeve van een onderzoeksproject uit een dijk is gestoken en naar Deltares in Delft is getransporteerd om in de Deltagoot te testen. Aangezien dit grasblok uiteindelijk niet is gebruikt in de Deltagoot leende dit zich er goed voor om een oriënterende test op uit te voeren met de brandslangmethode. Een impressie van deze testen is weergegeven in Figuur 1.3. Overigens zijn ook in de Deltagoot testen uitgevoerd op blokken uit dezelfde locatie. De testen met de brandslang zijn gerapporteerd in Deltares (2021b) en samengevat in Paragraaf 1.3.1, de testen met de Deltagoot zijn gerapporteerd in Deltares (2020a) en samengevat in Paragraaf 1.3.2.



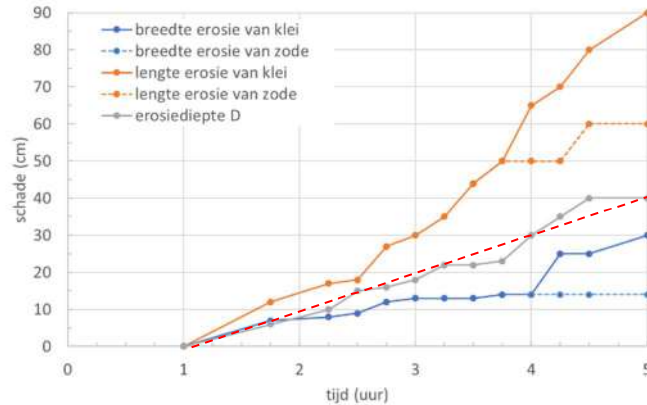
Figuur 1.3 Impressie van de tweede oriënterende testen op grasblok 'Blija' (overgenomen uit Deltares, 2021b).

De locatie 'Blija' is gekenmerkt door een gesloten grasbekleding bestaande uit een monocultuur van Engels raaigras waarbij de wortels niet verder reikten dan een diepte van 20 cm. De klei was sterk gestructureerd en brokkelig.

1.3.1 Brandslangmethode: grasblokken van locatie 'Blija'

Bij de test met de brandslang ontstond de eerste schade aan het grasbekleding na een uur. Vervolgens nam de diepte van het erosiegat toe met een erosiesnelheid van circa 10 cm/uur. Na in totaal 5 uur is de test afgebroken en betrof de erosiediepte circa 40 cm. De erosiediepte

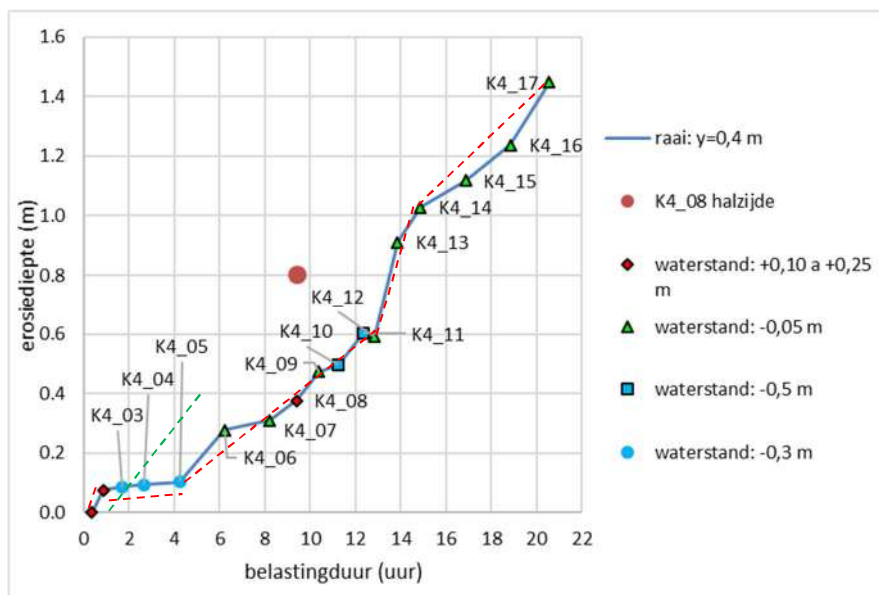
ontwikkelde zich redelijk lineair met de tijd, zie ook Figuur 1.4. Er is tevens een proef uitgevoerd met kale klei (de toplaag van circa 25 cm is met een spade verwijderd alvorens de proef werd uitgevoerd). De erosie bij deze proef ging bijzonder snel: de proef is na 3 minuten afgebroken vanwege de zeer snelle erosie welke optrad. Het verschil in erosiesnelheid wordt voornamelijk veroorzaakt door het al dan niet aanwezig zijn van de grasbekleding, kennelijk vertraagt de aanwezigheid van de grasbekleding, na initiële schade, de voortgaande erosie van de onderlaag.



Figuur 1.4 Grootste erosiediepte als functie van de belastingduur. Testresultaat van proeven met brandslangmethode op gras en klei van Blija. De figuur is integraal overgenomen uit Deltares (2021b) m.u.v. de rode onderbroken lijnen, deze zijn t.b.v. de analyse onder deze figuur toegevoegd.

1.3.2 Deltagoot test: grasblokken van locatie 'Blija'

Bij de Deltagoottest is de locatie Blija getest in de golfoploopzone. De waterstand gedurende de proeven is gevarieerd tussen -0,3 m en +0,25 m ten opzichte van de overgang tussen de harde bekleding en het grasbekleding. De significante golfhoogte tijdens de proeven bedroeg $H_{m0} = 2,0$ m en de piekperiode was gelijk aan $T_p = 5,5$ s. Het betrof een 1:4 talud. De graskwaliteit was waarschijnlijk lager dan bij de brandslangtesten uitgevoerd in de eerste helft van 2021 vanwege het verblijf in de Deltagoot (o.a. gebrek aan natuurlijk licht). Het is overigens maar de vraag of de erosieve eigenschappen daardoor ook zijn afgenomen. Gedurende de 21,5 uur durende belasting is de maximale erosiediepte circa 1,45 m geworden. Daarbij zijn door Deltares (2021a) twee fasen onderscheiden: de fase van het erosieproces (naar beneden gerichte erosie door het gras) en de tweede fase van het erosieproces, waarbij er een klif is gevormd en deze door de golven steeds verder naar boven migreert. Volgens Deltares (2021a) is de omslag tussen de 1^e en de 2^e fase bij deze proef na ongeveer 12 uur en bij een erosiediepte van ongeveer 60 cm. Overigens is dit een iets andere definitie dan falen van de graszode volgens de GEBU aanpak: daarbij treedt falen van de grasmat op zodra de zode is doorbroken en is de invloed van de zode op het erosieproces gering.



Figuur 1.5. Grootste erosiediepte als functie van de belastingduur. Testresultaat van Deltagootproeven met gras en klei van Blija. De figuur is integraal overgenomen uit Deltares (2021a) m.u.v. de rode onderbroken lijnen en de groene onderbroken lijnen; deze zijn t.b.v. de analyse onder deze figuur toegevoegd. De rode onderbroken lijnen zijn geschematiseerde erosiesnelheden. De groene onderbroken lijn is de geschematiseerde erosiesnelheid van de brandslangmethode (zie Paragraaf 1.3.1).

In Figuur 1.5 zijn, met behulp van rode onderbroken lijnen, vijf kenmerkende erosiesnelheden geïdentificeerd. Hoewel deze vrij arbitrair zijn gekozen wordt ingeschat dat dit afdoende is om een eerste globale inschatting te maken van de erosiesnelheid.

Tabel 1. Globale inschatting van de erosiesnelheid over verschillende intervallen bij de test op Blija gras in de Deltagoot

Id	tijd (uur)	erosiediepte (cm)	erosiesnelheid (cm/uur)	Fase
1	0-1	0-8	8	Fase 1 (zode)
2	1-4	8-11	1	Fase 1 (toplaag)
3	4-12	11-60	6	Fase 1
4	12-14.5	60-100	16	Fase 2 (klif)
5	14.5-20.5	100-145	8	Fase 2 (klif)

Grofweg kan worden gesteld dat de erosiesnelheid (diepte) als gevolg van een belasting met de brandslang (10 cm /uur in de bovenste 40 cm) een zwaardere belasting is dan de belasting door werkelijke golven laag in de golfoploopzone en met een significante golfhoogte van $H_{m0} = 2$ m (1 cm/uur a 8 cm/uur in de bovenste 40 cm).

1.4 Doel

In het kader van het KPP project 'Versterking Onderzoek Waterveiligheid'- deelproject 'Overgangen' zijn een week lang, in september 2021, vervolgprouven met de brandslangmethode uitgevoerd op een dijksectie van de Waddenzeedijk in Friesland.

Het doel van deze prouven was om het effect van verschillende instellingen van de brandslangmethode beter in beeld te krijgen. Hiermee kan een betere (praktische) affiniteit gekregen worden met de werking van het systeem en een beter inzicht verkregen worden in de respons (erosieve eigenschappen) van een graszode op de belasting door de brandslangmethode.

Voorliggend rapport beschrijft deze proeven. Dit draagt bij aan de langetermijn ambitie om de erosieve eigenschappen van grasbekledingen, onderlagen en overgangen beter en laagdrempeliger in te kunnen schatten. De proeven zijn uitgevoerd in de periode 6-10 september 2021 door dhr. J. Molenaar en ir. L. Wopereis van Deltares.

1.5 Opzet van dit rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de testopstelling. Hoofdstuk 3 beschrijft het proevenprogramma en de uitgevoerde metingen. Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten. Hoofdstuk 5 bevat de discussie en in Hoofdstuk 6 worden de conclusies en aanbevelingen weergegeven.

2 Testopstelling

2.1 Locatie

De proeven zijn uitgevoerd op het binnentalud van de Waddenzeedijk ter hoogte van de betonnen overgangen die in 2016 zijn aangelegd (Figuur 2.1). Deze zijn geplaatst aan de westkant van de kruising tussen de Boonweg en de Zeedijk, in Sint Jacobiparochie, Friesland (53°17'32.7"N 5°34'26.7"E). De testsectie ligt tussen hectometerpaal 15.5 en 15.6, en is in beheer bij het Wetterskip Fryslân.



Figuur 2.1 Locatie van de brandslangproeven op de Waddenzeedijk, september 2021.

Op deze locatie zijn een twintigtal testsecties gebouwd in de periode augustus – september 2016, zie schematisatie in Figuur 2.2. De opbouw van deze testsecties is beschreven in Deltares (2016). De testsecties hebben een lengte (parallel aan de as van de dijk) van 5 m, een breedte (parallel aan het talud) van 2 m en zijn aangebracht op een sectie met als talud helling 20°. De brandslangproeven zijn uitgevoerd op één testsectie zonder overgang (D.1a) en één testsectie met overgang en zonder versterkingsmaatregel (D.2a). De codering van de testsecties is aangegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.2 Schematisatie van testsecties overgenomen van Deltares (2016).

- A. Doorgroeibaar medium	(7x)
o A.1 Doorgroeisteen	(1x)
o A.2 Doorgroeibaar flexibel materiaal	(5x)
o A.3 Doorgroeibaar vormvast raster	(1x)
- B. Reststerkte / verborgen bekleding	(3x)
o B.1 Reststerkte kleilaag	(1x)
o B.2 Steenzetting	(2x)
- C. Lokaal versterken grasbekleding	(2x)
o C.1 Endo Mycorrhiza	(1x)
o C.2 Geinjecteerde vezels	(1x)
- D. Referentiesecties	(8x)
o D.1 zonder overgang	(3x)
o D.2 met overgang en zonder versterkingsmaatregel	(5x)
Totaal	(20x)

Figuur 2.3 Overzicht van type gebouwde overgangen (overgenomen van Deltares (2016)).

De overgangen zijn gebouwd door middel van vijf betonnen opsluitbanden per testsecties, zie Figuur 2.2. Deze hebben een dikte van 15 cm, een hoogte van 40 cm, een lengte van 1 m en liggen op 15 m van de binnenwaartse teen van de dijk. Een impressie van de locatie is op Figuur 2.4 te zien.



Figuur 2.4 Overzicht van locatie van de proeven (links) en overzicht van de overgang (rechts).

Deze testsecties waren gebouwd om proeven uit te voeren met de Deltagoot of golfploopsimulator. Dit maakt de locatie zeer geschikt om de brandslangmethode toe te passen omdat deze locatie voldoet aan de inhoudelijke en logistieke eisen (Deltares, 2016).

2.2 Gras- en kleikwaliteit

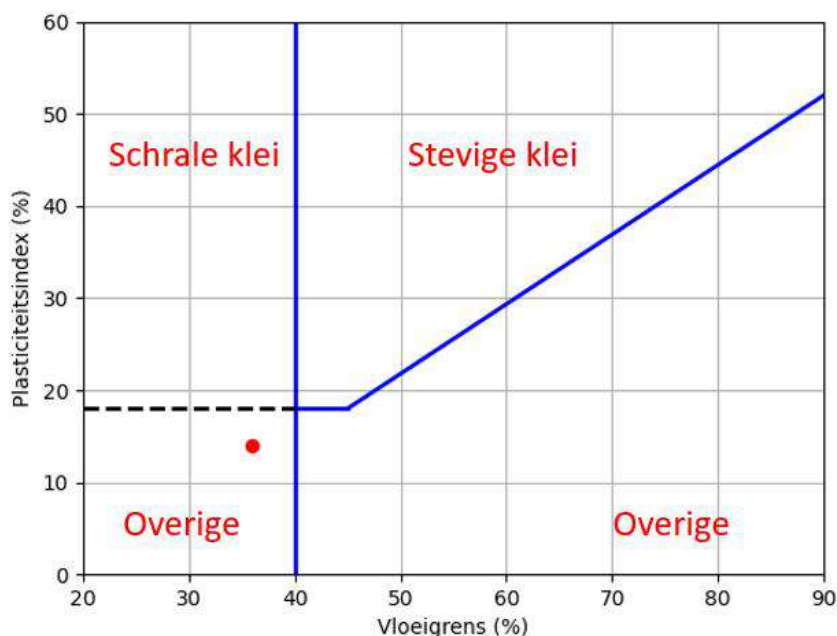
Het gras en de klei van de testsectie zijn in 2016 speciaal aangebracht en daardoor verschillen de eigenschappen van deze testsecties van de eigenschappen van de oorspronkelijke / naastgelegen materialen. Het gras en de klei zijn aangebracht door een gat van 40 cm diep op locatie te graven. De klei is vervolgens in twee lagen van 20 cm aangebracht en per laag twee keer afgetrild met een trilplaat. De klei is vervolgens voorzien van een dun laagje teelaarde (circa 5 cm) en het gras is daarop ingezaaid. Een meer uitgebreide uitleg van de aanleg van de overgangen is terug te vinden in Deltares (2016).

De toegepaste klei is bemonsterd en aan een laboratoriumonderzoek onderworpen. De resultaten van dit laboratoriumonderzoek zijn gerapporteerd in Deltares (2016) en samengevat in Tabel 2 en Figuur 2.5.

Tabel 2 Klei-eigenschappen.

Eigenschappen	Aangebrachte klei
---------------	-------------------

Fractie <63 µm t.o.v. 2 mm (%)	83,2
Vloeigrens (%)	36,0
Uitrolgrens (%)	22,0
Plasticiteitsindex (-)	14,0
Organische stofgehalte (%)	0,6
Watergehalte (%)	29,9



Figuur 2.5 Plasticiteitsindex als functie van de vloeigrens met grenzen volgens RWS (2019). Bij de gewijzigde versie in RWS (2021) is de horizontale onderbroken zwarte lijn toegevoegd en het onderste deel van de verticale lijn verwijderd. De rode stip geeft de gebruikte klei aan.

Volgens de methode RWS (2021) wordt de klei gekarakteriseerd als 'overige'. De conclusie van Deltares (2016) is dat de klei representatief is voor de minder erosiebestendige kleisoorten welke bij Nederlandse dijken worden toegepast.

De toegepaste grassoort op de testsecties is BG11, een mengsel met soortenrijk gras (Figuur 2.6). Dit mengsel wordt ook door Wetterskip Fryslân toegepast volgens Deltares (2016). Om de ontwikkeling van de grasbekleding op de testsecties te volgen zijn vijf veldbezoeken gemaakt, drie in 2018, één in 2019 en één in 2020. Tijdens deze veldproeven zijn visuele waarnemingen (waardering van bedekking, homogeniteit van de grasbekleding en bedekking grassen en kruiden) en metingen (wortellengte en worteldichtheids categorie conform VTV2006) gemaakt van de gras kwaliteit. Alle resultaten van de veldproeven zijn samengevat in EURECO (2020).



Figuur 2.6 Impressie van het gras BG11.

De resultaten van de visuele waarnemingen op 8 december 2020 voor beide gebruikte testsecties (met en zonder overgang) zijn weergegeven in Tabel 3. Hieruit blijken respectievelijk 8% en 3% kale plekken te zijn wat overeen lijkt te komen met de situatie tijdens de proeven in september 2021; het gras leek, tijdens de proeven, gesloten maar met zichtbare kale plekken tussen verschillende soorten gras (zie Figuur 2.7). Alle proeven zijn daardoor uitgevoerd op een locatie met kale plekken, de hoeveelheid daarvan kan per proef verschillen.

Tabel 3 Waardering van de bedekking, totale bedekking (grassen + kruiden) en bedekking grassen en kruiden voor de testsectie zonder overgang (H-1) en met overgang (H-2), 8 december 2020, overgenomen uit EURECO (2020).

Proef- vak	Toepassing	Bedekking waardering	Bedekking	Bedekking	Bedekking	Kaal/mos %
			grassen+kruiden %	grassen %	kruiden %	
H-1	Ref. zonder overgang	+++	92	60	32	8
H-2	Ref. met overgang	+++	97	84	13	3



Figuur 2.7 Waargenomen kale plek.

De resultaten van de worteldichtheidscategorie conform VTV2006 tijdens vier veldonderzoeken voor de testsectie zonder overgang is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Worteldichtheidscategorie (conform VTV2006) in 8 dieptelagen en totale wortellengte tijdens vier veldproeven, overgenomen uit EURECO (2020).

Behandeling	Laag (cm-mv)								Tot
	0-2,5	2,5-5	5-7,5	7,5-10	10-12,5	12,5-15	15-17,5	17,5-20	
Ref. hor. 01-08-2018	5,00	5,00	4,50	4,50	4,25	4,00	4,25	3,50	1271
Ref. hor. 14-11-2018	5,00	5,00	5,00	4,50	4,50	4,00	3,50	2,50	1344
Ref. hor. 02-12-2019	5,00	5,00	4,50	4,50	3,50	3,50	3,50	2,50	1098
Ref. hor. 08-12-2020	5,00	5,00	5,00	4,50	4,00	3,00	3,00	3,50	1168

Een samenvatting van de kwaliteit van het gras en de klei in de testsecties is gegeven in Tabel 5.

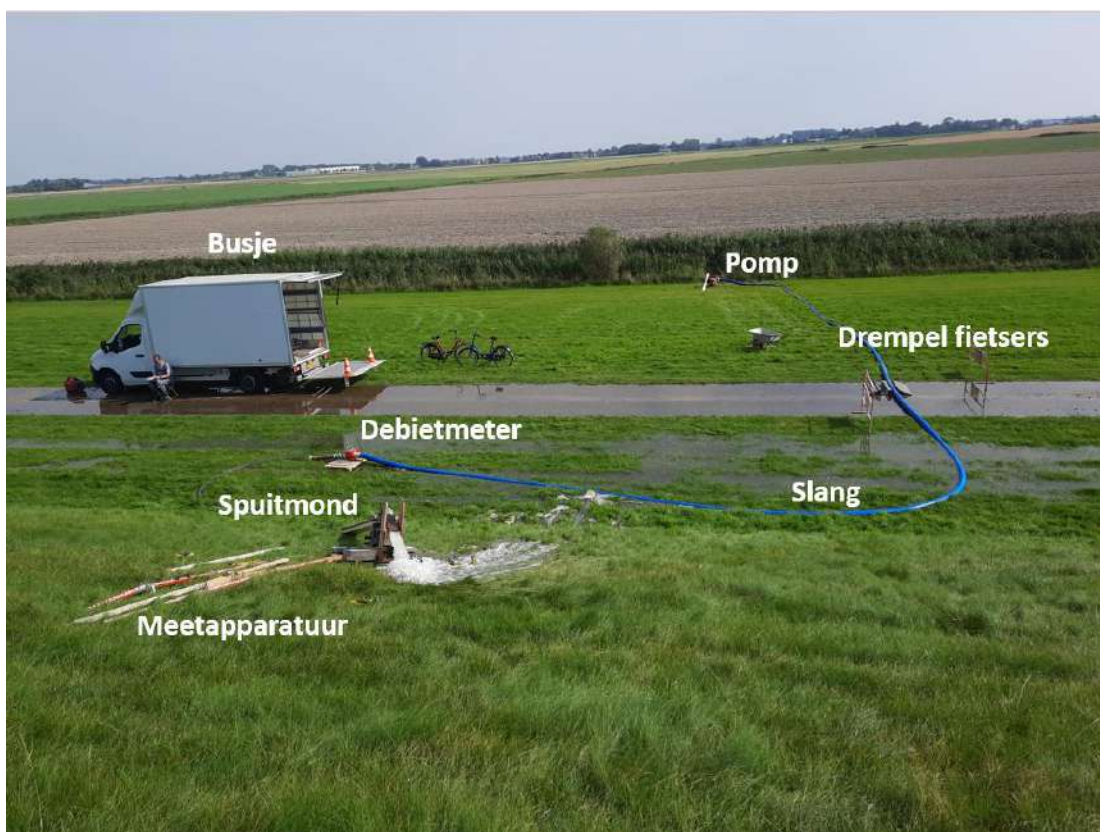
Tabel 5 Samenvatting eigenschappen van gras en klei op testsecties.

	Toegepast gras en klei bij testsecties
Dikte leeflaag (cm)	5
Kleiklasse (RWS, 2021)	Overige
Globale karakterisering gras	Soortenrijk, met zichtbaar kale plekken.

2.3 Gebruikte materialen

Al het benodigde materiaal (Figuur 2.8) is op maandag 6 september in een busje vanaf Delft naar de locatie gebracht. Iedere dag werd het materiaal geïnstalleerd en 's avonds weer afgebroken. Het gebruikte materiaal bestond uit:

- **Een vuilwaterpomp benzine 54 m³/uur**, deze is aangesloten op de sloot die rond 45 m van de binnenwaartse teen van de dijk ligt. De gehanteerde pomp heeft een verbruik van 1 volle tank (5 liter) per 90 minuten bij vol vermogen van de pomp.
- **De slang** moest over het fietspad gaan, daarom is **een drempel** geplaatst zodat fietsers de slang konden passeren.
- **Een debietmeter** om de stroomsnelheid te meten.
- **Een spuitmond** om het water op het gras te spuiten.
- **Meetapparatuur** om de lengte, breedte en diepte van de schade te meten.



Figuur 2.8 Opstelling van de proeven.

2.4 Aanvoer en afvoer van water

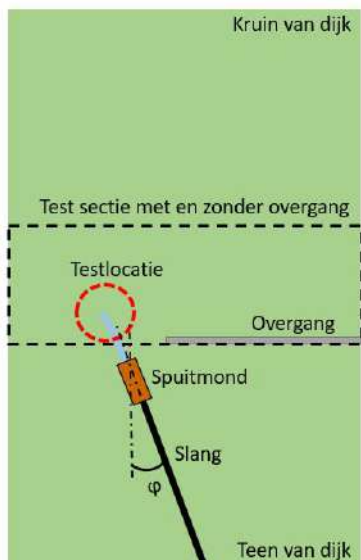
Het water werd aangevoerd door water van de naastgelegen sloot omhoog te pompen naar de testsecties. Met een inlaat, zuigslang en persslang werd het water naar de spuitmond gebracht. Daarbij waren er soms problemen met de pomp. Wanneer deze was uitgezet (bijvoorbeeld om een meting uit te voeren) en weer werd aangezet dan werkte deze soms niet meer. In dat geval moest de slang eerst open worden gemaakt om het water dat erin stond weg te laten stromen voordat de pomp weer kon starten. Dit werd waarschijnlijk veroorzaakt door lucht die was opgezogen door de pomp, maar de exacte reden is niet bekend. Het wordt aanbevolen om hiervoor, bij eventuele toekomstige proeven, een oplossing te verzinnen.

Het water werd afgevoerd langs het talud en infiltreerde in de dijk, de grond bij de binnenwaartse teen en meer stroomafwaarts. De spuitmond werd schuin tegen het talud geplaatst om het water van de spuitmond weg te laten stromen om verdere erosie te voorkomen (zie Figuur 2.9 en Figuur 2.11); wanneer deze loodrecht op de as van de dijk zou worden geplaatst dan zou het opgespoten water terug stromen over de testsectie en daarmee de stroming beïnvloeden.

Door de infiltratie van water in de dijk, vanwege de continue stroming van water tijdens een proef, werd het talud naast de testlocatie erg vochtig. De vochtigheid van de eerdere proeven zorgde ervoor dat de proeven (behalve de eerste proef) continu op een vochtige grond werden uitgevoerd.

2.5 Positionering spuitmond

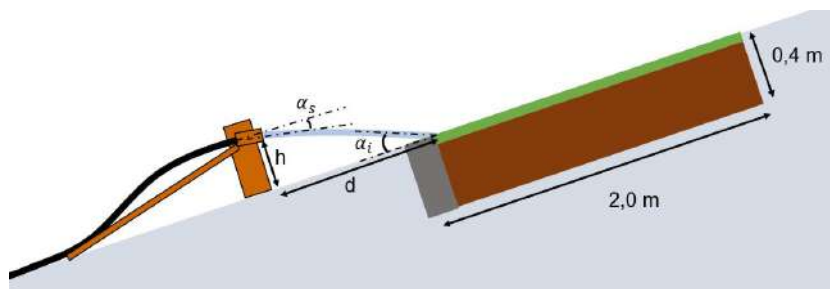
Zoals in Paragraaf 2.4 vermeld, werd de spuitmond schuin op het talud gezet onder een hoek φ (25° tot 30°) ten opzichte van het talud om het water langs het talud te laten afstromen zonder dat dit de testlocatie verstoort, zie Figuur 2.9.



Figuur 2.9 Bovenaanzicht – Schematisering van de spuitmond.

Verder zijn twee positioneringsparameters van de spuitmond van belang omdat ze invloed hebben op de invalshoek van de toegepaste belasting (Figuur 2.10):

- h : De hoogte van de spuitmond ten opzichte van het talud.
- α_s : De hoek van de spuitmond ten opzichte van het talud.



Figuur 2.10 Zijaanzicht – Schematisering van de spuitmond en de relevante parameters die de aangebrachte belasting beïnvloeden.

De hoogte van de spuitmond is bij alle testen constant gehouden op 30 cm boven het maaiveld. De hoek van de spuitmond (α_s) is per test aangepast om de invalshoek van de belasting (α_i) te veranderen. Met een kleinere of grotere hoek van de spuitmond was het mogelijk om de belasting te reduceren of te vergroten, zie Paragraaf 2.6. Een overzicht van de gebruikte hoek van spuitmond en invalshoek per proef is terug te vinden in Tabel 6.

De brandslang is op het bijbehorende frame op het gras geplaatst en het frame is verzwaaard met tegels. De aanvoerslang is omhoog geleid door deze te ondersteunen met balken, zie Figuur 2.11.



Figuur 2.11 Impressie van de spuitmond, hoek van spuitmond 20° en stroomsnelheid 7,5 ms..

2.6 Aangebrachte belasting

De belasting op de testsectie is aangebracht met de waterstraal van de spuitmond. De belangrijkste parameters die deze belasting beïnvloeden, zijn de kracht van de waterstraal en de invalshoek van de waterstraal (α_i), zie Figuur 2.10. Deze twee parameters zijn beide sterk afhankelijk van de stroomsnelheid (v), zie Paragraaf 3.3.1. De invalshoek van de waterstraal (α_i) is ook nog afhankelijk van de hoek van de spuitmond (α_s) en de hoogte van de spuitmond (h).

De hoek van de spuitmond (α_s) had veel invloed op de invalshoek (α_i) bij grote stroomsnelheden ($v = 7,5$ m/s of 6,0 m/s), en had minder invloed bij lagere stroomsnelheden ($v = 4,5$ m/s) (zie Tabel 6 in §3.1). Figuur 2.12 tot en met Figuur 2.14 geven een impressie van de aangebrachte belasting bij verschillende instellingen van de spuitmond.



Figuur 2.12 Aangebrachte belasting bij stroomsnelheid van 7,5 m/s en een hoek van spuitmond van $\alpha_s = 20^\circ$.



Figuur 2.13 Aangebrachte belasting bij stroomsnelheid van 4,5 m/s en een hoek van spuitmond van $\alpha_s = 10^\circ$.



Figuur 2.14 Aangebrachte belasting bij stroomsnelheid van 4,5 m/s en een hoek van spuitmond van $\alpha_s = 5^\circ$.

3 Proevenprogramma

3.1 Algemeen

Twee testsecties zijn getest; één testsectie zonder overgang en zonder versterkingsmaatregel (D.1a) en één testsectie met overgang maar zonder versterkingsmaatregel (D.2a). Op de eerste testsectie, zonder overgang, zijn zeven proeven uitgevoerd. Op de tweede testsectie met overgang en eveneens zonder versterkingsmaatregel is één proef uitgevoerd. Een overzicht van alle uitgevoerde proeven en hun instellingen is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Overzicht van alle uitgevoerde proeven.

Proeven	1a	1b	1c	1d	1e	2e	1e-bis	1e-ter
Testsectie	D.1a	D.1a	D.1a	D.1a	D.1a	D.2a	D.1a	D.1a
Stroomsnelheid - v (m/s)	7,5	6,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Hoek spuitmond - α_s (°)	20	20	20	10	5	5	5	5
Invalshoek - α_i (°)	22	25	31	31	30	30	30	30
Hoek op het talud - ϕ (°)	30	30	30	25	25	25	25	25
Hoogte spuitmond h (m)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Afstand spuitmond tot impact locatie - d (m)	0,75	0,70	0,60	0,85	0,85-0,90	0,85-0,90	0,85-0,90	0,85-0,90

Het belangrijkste doel van de proeven was om het begin van erosie (het moment dat de wortels zichtbaar zijn totdat ze doorbroken zijn) goed in beeld te krijgen. Hiervoor is een lage belasting nodig om het erosieproces langzamer te maken en daarmee beter in beeld te krijgen. Er was echter besloten om te beginnen met de grootste belasting. Immers, mocht er bij die proeven geen schade optreden dan zouden de proeven met een lagere belasting niet meer nodig zijn.

Proef 1a is uitgevoerd met de grootste stroomsnelheid die de pomp kon leveren (7,5 m/s). De invalshoek is gebaseerd op de eerder uitgevoerde brandslangproeven (Deltares 2021b). Destijds werd een invalshoek van 20° gebruikt.

Omdat er snel schade ontstond, zijn Proef 1b en Proef 1c uitgevoerd met een lagere snelheid, respectievelijk 6,0 m/s en 4,5 m/s. Bij beide proeven ontstond weer snel schade en daarom is geprobeerd om de hydraulische belasting bij proeven 1d en 1e nog lager gemaakt door de hoek van de spuitmond (α_s) te verminderen van 20° naar 10° en 5° respectievelijk. Echter, door de lage toegepaste stroomsnelheid, is de invalshoek ter plaatse van het talud (α_i) bij deze twee proeven gelijk aan de invalshoek bij Proef 1c, zie Tabel 6. Proef 1c tot en met Proef 1e zijn dus alle drie te beschouwen als herhalingsproeven.

Proef 2e was een proef op een overgang van een betonband naar gras, deze werd uitgevoerd met dezelfde instellingen als Proef 1e (laagste hydraulische belasting), omdat werd verwacht dat schade sneller zou optreden.

Proeven 1e-bis en 1e-ter zijn uitgevoerd om de reproduceerbaarheid van de brandslangmethode te kunnen vaststellen. Met deze twee laatste proeven zijn uiteindelijk vijf herhalingsproeven uitgevoerd (1c, 1d, 1e, 1e-bis en 1e-ter) .

3.2 Programma van één proef

Het proefprogramma bestaat uit het aantal uitgevoerde metingen, de tijd tussen de metingen en totale duur van de proef. Tijdens elke meting moest de pomp gestopt worden. Zonder de pomp te stoppen was het niet mogelijk om metingen uit te voeren. De duur van de proeven was niet constant doordat het stopcriterium werd aangepast gedurende de verschillende proeven. Deze was gebaseerd op het gedrag van het gras en de klei. De initieel gedefinieerde stopcriteria waren:

- 1 Stoppen met belasten wanneer er geen erosie meer optreedt. Dit criterium bleek niet goed toepasbaar te zijn doordat het heel lang kon duren voordat dit stadium bereikt werd.
- 2 Stoppen met belasten wanneer er te veel modeffecten plaatsvinden. Bijvoorbeeld als de spuitmond in zijn eigen water spuit. Dit gebeurde bij Proef 1b.

Proef 1a verliep over een duur van 238 min met de eerste meting na 13 minuten. Het interval tussen de daaropvolgende metingen was 10, 15, 20, 30, 60 en 90 minuten. Omdat Proef 1a erg diep werd en niet leek te stoppen met verdiepen (stopcriterium 1 werd niet bereikt) werd Proef 1b korter gemaakt om tijd te besparen. Deze proef verliep over een duur van 193 min met de eerste meting na 13 min en daarna elk uur. Metingen bij Proef 1b bleek niet vaak genoeg te zijn daardoor werd bij Proef 1c gemeten na telkens 11, 17, 30, 90 en 30 minuten. Deze proef kende een duur van 178 min. Bij proef 1b ontstond nagenoeg een evenwichtssituatie, i.e. er trad nauwelijks verdere erosie op.

Daarna werd besloten om metingen op constante tijden uit te voeren zodat de proeven gemakkelijker met elkaar zouden kunnen worden vergeleken, zie Tabel 7. Proef 1d en Proef 1e hebben geen vijfde meting en hebben daardoor een totale belastingtijd van 65 min. Echter was het waardevol om de proeven langer uit te voeren om meer inzicht te krijgen in het erosie proces. Hierdoor zijn de drie laatste proeven 40 min extra belast (meting 5).

Tabel 7 Programma van proeven vanaf proef 1d. Voor proef 1d en 1e is geen 5^{de} meting uitgevoerd.

Meting nummer	1	2	3	4	5	Totaal
Belasting tijd (min)	5	10	20	30	40	105

3.3 Metingen

Elke meting diende uitgebreid genoeg te zijn om een afdoende beeld van de schadeontwikkeling te verkrijgen maar niet te ingewikkeld, dit om de doorlooptijd van de proeven te minimaliseren. De doorlooptijd van één meting bedroeg gemiddeld circa 15 minuten. Daarbij is een assenstelsel gehanteerd welke is weergegeven in Figuur 3.1. De oorsprong en oriëntatie van de x-as is dezelfde als bij Deltares (2016); de x-as is horizontaal en evenwijdig met de hoofdas van de dijk. De y-as ligt loodrecht op de x-as en loopt evenwijdig aan de taludhelling. De oorsprong ((x,y) = (0,0)) ligt op de hoek (onder, westzijde) van testsectie D.1a.



Figuur 3.1 x en y referentie vlak.

De volgende metingen zijn per proef gemaakt:

- Vóór het begin van de proeven:
 - Hoek en locatie van spuitmond noteren (zie Paragraaf 2.5).
 - Foto's van beginsituatie maken (weergegeven in de factsheets, Bijlage B tot en met Bijlage I).
- Tijdens elke meting:
 - Stroomsnelheid meten (zie Paragraaf 3.3.1).
 - Foto's van de situatie maken (weergegeven in de factsheets, Bijlage B tot en met Bijlage I).
 - Lengte, breedte en diepte meten van de erosiekuil (zie Paragraaf 3.3.2);
 - Waarnemingen noteren (zie Paragraaf 3.3.3).

3.3.1 Stroomsnelheid

De stroomsnelheid heeft veel invloed op de erosieve eigenschappen van gras en klei. Hoe groter de stroomsnelheid hoe sneller het erosieproces. Daarom werden in deze proeven verschillende stroomsnelheden toegepast.

De stroomsnelheid bij het verlaten van de spuitmond (v) is als volgt berekend:

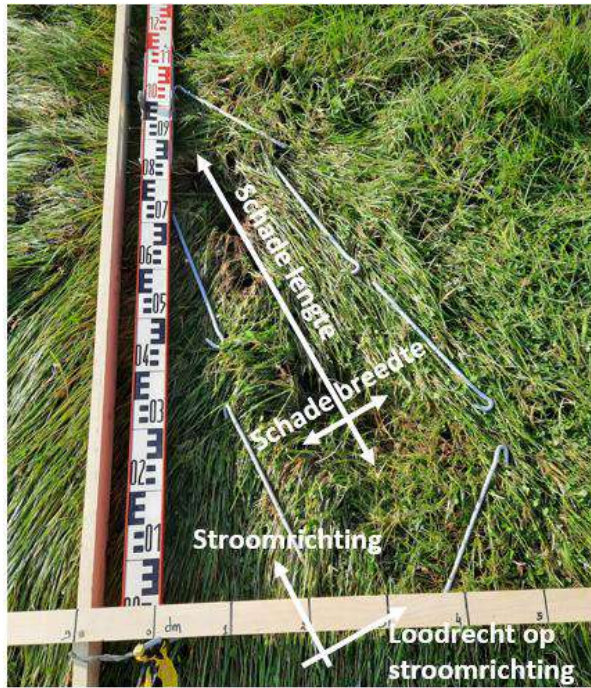
$$v = \frac{q}{A}$$

Waarbij q het debiet (m^3/s) en A de oppervlakte van de uitstroomzijde van de spuitmond (m^2).

Het debiet is bepaald met behulp van een debietmeter (type Flowmaster 250DL). De spuitmond is rechthoekig met afmeting van 2 cm x 10 cm ($A = 0,002 \text{ m}^2$). Het debiet kon worden geregeld door een afsluiter bij de pomp of door een afsluiter bij de debietmeter handmatig te wijzigen. Bij lage stroomsnelheden werkt het debiet aanpassen met de afsluiter bij de debietmeter beter dan met de afsluiter bij de pomp, in het laatste geval bleek de pomp veelal uit te vallen. Een overzicht van de gebruikte gemiddelde stroomsnelheid per proef is terug te vinden in Tabel 6.

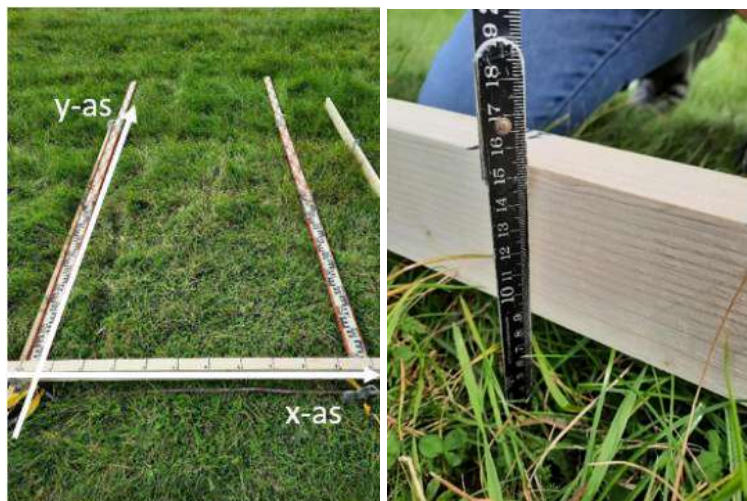
3.3.2 Erosiekuil

De karakteristieke lengte en breedte van de schade zijn gemeten met behulp van een duimstok. De 'lengte' heeft dezelfde oriëntatie als de stroomrichting, de 'breedte' is daar loodrecht op, zie ook Figuur 3.2. Bij een niet-uniforme schade is het breedste stuk gebruikt om de breedte van de schade te meten.



Figuur 3.2 Meting van maximale schade lengte en breedte.

Omdat de schade niet een constante diepte heeft is elke 10 of 5 cm in x en y-richting de diepte genoteerd. De diepte van de schade was zonder een referentievlak moeilijk te bepalen, daarom is de hoogte van de schade ten opzichte van een balk gemeten, zie Figuur 3.3. Met de bekende referentiehoogte van de balk ten opzichte van het maaiveld was het vervolgens mogelijk om de schadddiepte te bepalen. Deze referentiehoogte is voor elke proef genoteerd. De diepte van de schade is gedefinieerd als de maximale gevonden diepte tijdens de meting. Heatmaps en dieptemetingen per proef zijn in de factsheets (Bijlage B tot en met Bijlage I) weergegeven. Hiermee is een goed beeld gekregen van het schadeverloop gedurende de proeven.



Figuur 3.3 Links x en y referentie vlak. Rechts voorbeeld van een hoogte meting met balk.

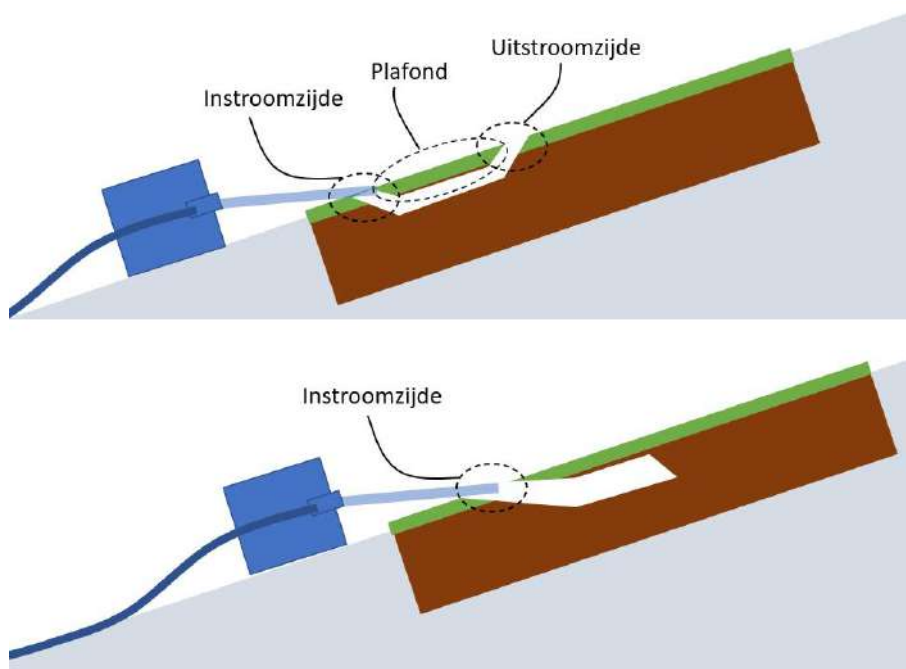
Een overzicht van alle schadddiepte, -lengte en -breedte is terug te vinden in Tabel 12 in Bijlage A. Meer uitgebreide metingen zijn per proef weergegeven in de factsheets (Bijlage B tot en met Bijlage I).

3.3.3 Overige waarnemingen

Bij elke meting zijn ook verschillende andere waarnemingen uitgevoerd. De volgende observaties zijn genoteerd of achterhaald aan de hand van de gemaakte foto's:

- De vochtigheid van de grond. Deze waarneming is gemaakt door beredenering:

- Droog door een gebrek aan regen enkele dagen ervoor en relatief hoge temperaturen (orde 20° C).
- Nat van eerdere, naastgelegen proeven. Tijdens de proeven wordt water in de dijk geïnfiltreerd en wordt ook de omgeving vochtig.
- Nat gemaakt door van te voren water vanaf te laten stromen.
- Kuileigenschappen:
 - Tijdstip wanneer de kuil zichtbaar was.
 - De aanwezigheid van water in de kuil.
 - Vorm van de kuil (zie Figuur 3.4):
 - Tunnel gevormd met instroomzijde en uitstroomzijde.
 - Gat die onder de zode doorgroeit met alleen instroomzijde.
 - Geen kuil.
- De staat van de zode, hieronder valt (zie Figuur 3.5):
 - Geen wortels zichtbaar, zode in (vrijwel) ongeschonden staat.
 - Wortels zichtbaar.
 - Wortels uitgetrokken.
 - Duidelijk gat in de zode (zode doorbroken).



Figuur 3.4 Schematisatie van de vorm van de kuil. Tunnel (boven), gat dat onder de zode doorgroeit (onder).



Figuur 3.5 Staat van zode zoals in dit rapport gedefinieerd. Geen wortels zichtbaar (links boven). Wortels zichtbaar (rechts boven). Wortels uitgetrokken (links onder). Zode doorbroken (rechts onder).

Alle waarnemingen zijn niet continu maar gekoppeld aan een meting met bijbehorende belastingtijd. Hierdoor is het exacte tijdstip waarop bijvoorbeeld de wortels zichtbaar waren niet bekend. Daarom is het belangrijk, vooral in het begin, om vaak te meten.

Deze waarnemingen zijn, vanwege het subjectieve karakter, moeilijk te bepalen en bij Proef 1a tot en met Proef 1e waren niet alle observaties genoteerd maar achteraf achterhaald op basis van de gemaakte foto's, die mede hierom ook in de bijlagen zijn opgenomen. Vanwege het subjectieve karakter dienen de waarnemingen als indicatief te worden gezien.

4 Resultaten

De resultaten van de metingen (diepte, lengte en breedte van de erosiekuil in de tijd) zijn weergegeven in Paragraaf 4.1. Paragraaf 4.2 bevat de waarnemingen per proef (vochtigheid van de grond, kuilvorm en staat van de zode). Een meer gedetailleerd overzicht van de eigenschappen, verloop van de proef, foto's en dieptemetingen (gepresenteerd in heatmaps) per proef is beschikbaar in de factsheets in Bijlage B tot en met Bijlage I. Bijlage A bevat een overzicht van de uiteindelijke erosiediepte, -lengte en -breedte per proef en de bijbehorende karakteristieken.

4.1 Metingen

De ontwikkeling van de erosie is in dit rapport op twee manieren weergegeven:

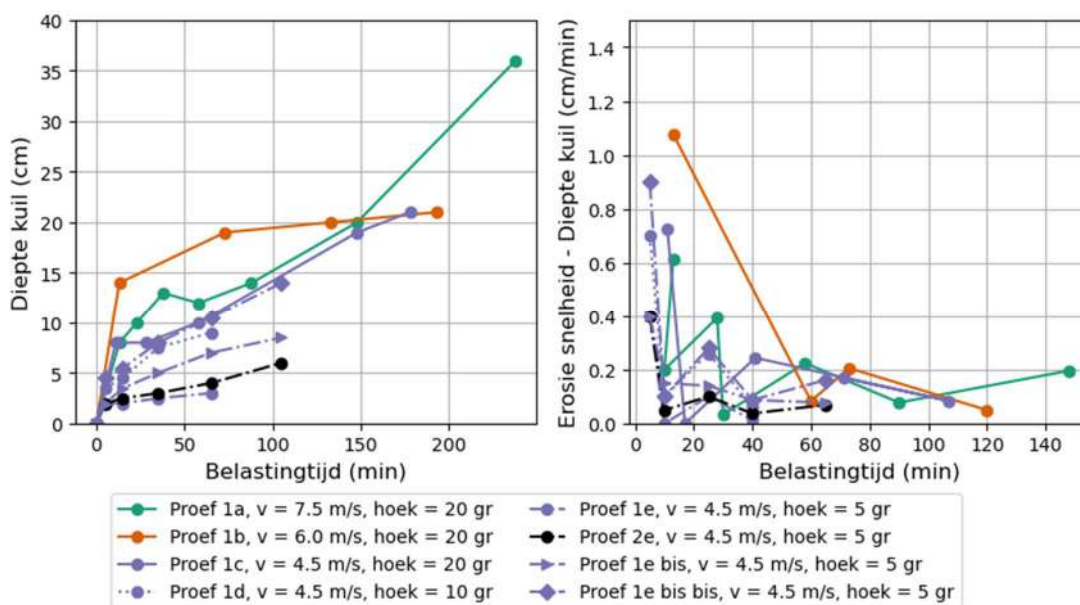
- Afmeting van de kuil (diepte, lengte en breedte) als functie van de tijd.
- Erosiesnelheid (in diepte-, lengte- en breedterichting) als functie van de tijd.

De definities van de afmetingen van de kuil (diepte, lengte en breedte) zijn beschreven in Paragraaf 3.3.2. De erosiesnelheid is als volgt bepaald:

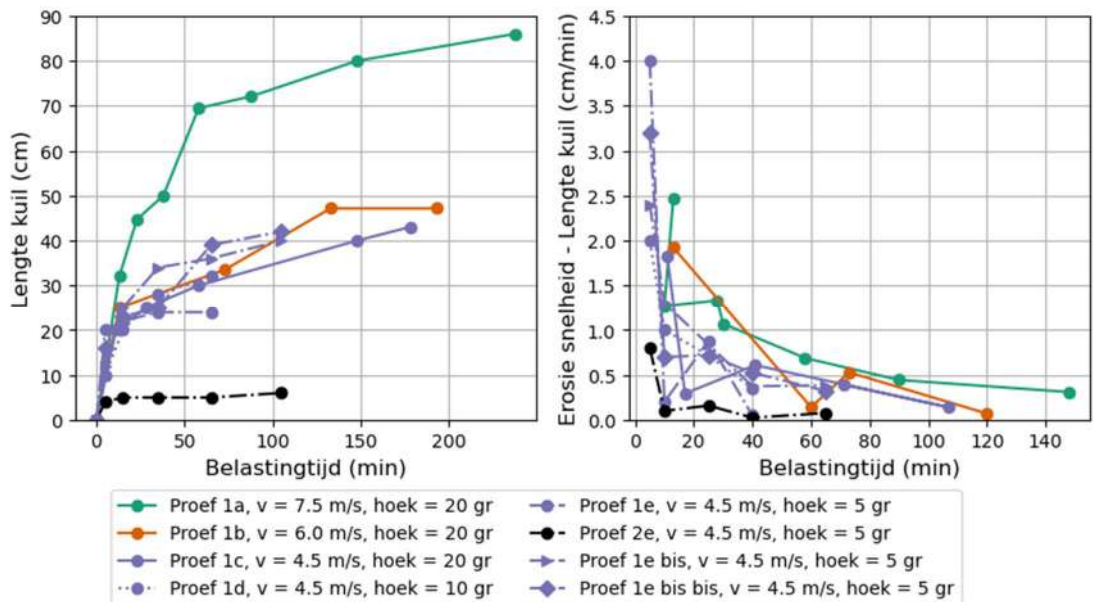
$$e_{t+1} = \frac{s_{t+1} - s_t}{t_{t+1} - t_t}$$

Met e (cm/min) de erosie snelheid, s_t (cm) de schade op tijdstip t en t_t (min) de belastingtijd op tijdstip t .

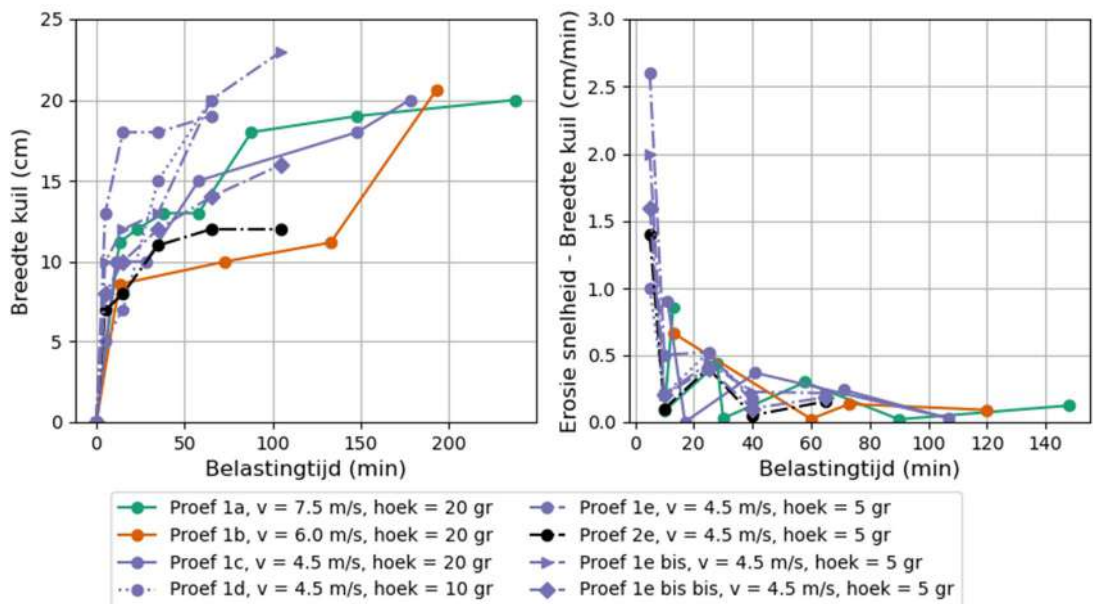
De afmeting van de kuil en de erosiesnelheid als functie van de tijd is weergegeven in Figuur 4.1, Figuur 4.2 en Figuur 4.3 voor respectievelijk de diepte, lengte en breedte van de kuil.



Figuur 4.1 Erosiediepte als functie van de tijd voor alle proeven (links). Erosiesnelheid in diepterichting als functie van de tijd voor alle proeven (rechts). De verschillende kleuren geven de verschillende stroomsnelheden aan. De zwarte lijn betreft de proef met een overgang. De paarse lijnen zijn herhalingsproeven. De doorgetrokken lijnen zijn proeven met een hoek van de spuitmond van 20°, de gestippelde lijn (··) is een proef met een hoek van de spuitmond van 10° en de streep-stippellijnen (-·-) zijn proeven met een hoek van de spuitmond van 5°.



Figuur 4.2 Erosielengte als functie van de tijd voor alle proeven (links). Erosiesnelheid in lengterichting als functie van de tijd voor alle proeven (rechts). De verschillende kleuren geven de verschillende stroomsnelheden aan. De zwarte lijn betreft de proef met een overgang. De paarse lijnen zijn herhalingsproeven. De doorgetrokken lijnen zijn proeven met een hoek van de spuitmond van 20°, de gestippelde lijn (···) is een proef met een hoek van de spuitmond van 10° en de streepstippellijnen (-.-) zijn proeven met een hoek van de spuitmond van 5°.



Figuur 4.3 Erosiebreedte als functie van de tijd voor alle proeven (links). Erosiesnelheid in breedterichting als functie van de tijd voor alle proeven (rechts). De verschillende kleuren geven de verschillende stroomsnelheden aan. De zwarte lijn betreft de proef met een overgang. De paarse lijnen zijn herhalingsproeven. De doorgetrokken lijnen zijn proeven met een hoek van de spuitmond van 20°, de gestippelde lijn (···) is een proef met een hoek van de spuitmond van 10° en de streepstippellijnen (-.-) zijn proeven met een hoek van de spuitmond van 5°.

4.2 Waarnemingen

Tijdens elke meting zijn ook waarnemingen gedaan. Tabel 8 geeft per proef een overzicht van de bodemvochtigheid. Tabel 9 geeft per proef het meetnummer met bijbehorende belastingtijd

wanneer een kuil zichtbaar was en het meetnummer met bijbehorende belastingtijd wanneer continu water in de kuil zat. Tabel 10 geeft per proef de vorm van de kuil. Tabel 11 geeft per proef de staat van de zode (meetnummer en bijbehorende belastingtijd waarop de wortels zichtbaar, uitgetrokken of de zode doorbroken waren). De gehanteerde terminologie is toegelicht in Paragraaf 3.3.3.

Tabel 8 Overzicht bodemvochtigheid per proef.

Proef	Grond vochtigheid
1a	Droog
1b	Nat van eerdere naastgelegen proeven
1c	Nat van eerdere naastgelegen proeven
1d	Nat van eerdere naastgelegen proeven
1e	Nat van eerdere naastgelegen proeven
2e	5-10 min van te voren nat gemaakt omdat eerdere proeven een beetje verderop waren.
1e-bis	Nat van eerdere naastgelegen proeven
1e-ter	Nat van eerdere naastgelegen proeven

Tabel 9 Overzicht van kuilvorming voor alle proeven.

Proef	Kuil	Water in kuil
1a	Ja, na 13 min belastingtijd	Ja, onmiddellijk
1b	Ja, na 13 min belastingtijd	Ja, onmiddellijk
1c	Ja, na 11 min belastingtijd	Ja, na 58 min belastingtijd
1d	Ja, na 35 min belastingtijd	Nee
1e	Nee	Niet van toepassing
2e	Ja, na 5 min belastingtijd	Ja, onmiddellijk
1e-bis	Ja, na 35 min belastingtijd	Ja, na 65 min belastingtijd.
1e-ter	Ja, na 35 min belastingtijd	Ja, onmiddellijk

Tabel 10 Overzicht van de vorm van de kuil voor alle proeven.

Proef	Vorm van schade
1a	Een tunnel is gevormd. Uiteindelijk is de zode aan de bovenkant van de tunnel ('het plafond' helemaal doorbroken waardoor er geen tunnel meer zichtbaar was.
1b	Bij meting 2 was een tunnel gevormd (met een bredere onderkant dan proef 1a). Deze tunnel is na 193 min totale belastingtijd bijna helemaal doorbroken.
1c	Een tunnel is gevormd die na 178 min bijna helemaal doorbroken is.
1d	Een korte tunnel is gevormd.
1e	Wortels nog niet helemaal uitgetrokken na 65 min belastingtijd.
2e	Wortels beginnen uitgetrokken te worden na 105 min belastingtijd.
1e-bis	Geen tunnel, maar gat dat onder de zode doorgroeit.
1e-bis-bis	Geen tunnel, maar gat dat onder de zode doorgroeit.

Tabel 11 Overzicht van de staat van de zode voor alle proeven. Voor Proef 1a tot en met Proef 1e waren deze waarnemingen moeilijk te achterhalen aan de hand van foto's.

Proef	Wortels zichtbaar – Meting nummer (belastingtijd (min))	Wortels uitgetrokken – Meting nummer (belastingtijd (min))	Zode doorbroken (min) – Meting nummer (belastingtijd (min))
-------	---	--	---

1a	Niet bekend	Niet bekend	1 (13)
1b	Niet bekend	Niet bekend	1 (13)
1c	Niet bekend	Niet bekend	1 (11)
1d	1 (5)	2 (15)	3 (35)
1e	1 (5)	2 (15)	Niet bekend
2e	1 (5)	2 (15)	Niet bekend
1e-bis	1 (5)	2 (15)	3 (35)
1e-bis-bis	1 (5)	3 (35)	3 (35)

Bij het uitvoeren van alle proeven zijn drie aandachtspunten naar voren gekomen:

- Bij een stroomsnelheid van 4,5 m/s was de waterstraal niet meer continue maar 'wapperde' deze in een richting evenwijdig aan de stromingsrichting. Hierdoor was de belasting niet meer op één punt maar over een lijn van ongeveer 20 cm. Voor proef 2e met overgang was het daardoor moeilijk om direct naast de overgang te belasten.
- Het tijdstip waar wortels zichtbaar, uitgetrokken of doorbroken zijn is moeilijk te bepalen / definiëren en de resultaten ten aanzien van deze waarnemingen dienen derhalve ook met terughoudendheid geïnterpreteerd te worden.
- De vochtigheid van de grond is een belangrijk criterium dat niet kwantitatief werd gemeten. In de toekomst kan het nuttig zijn om deze nauwkeuriger te meten.

Figuur 4.4 geeft het uiteindelijke schadebeeld per proef.





1c)



1d)



1e)



2e)



1e-ter)



1e-bis)

Figuur 4.4 Foto's van de uiteindelijke schade van elke proef. Het bleek lastig om de schade goed vast te leggen op de foto. De schade was aanzienlijker dan de schade-impressie die door deze foto's wordt verkregen.

5 Discussie

5.1 Globale analyse

Idealiter zou er een correlatie gevonden worden tussen bijvoorbeeld de stroomsnelheid van de belasting en de erosiediepte op een bepaald moment (bijvoorbeeld na een uur). Echter, op basis van de resultaten van de verschillende proeven met een stroomsnelheid van 4,5 m/s (de paarse lijnen in de figuren in Hoofdstuk 4) kan worden gesteld dat de spreiding van de resultaten ten aanzien van de optredende mate van erosie (lengte, diepte en breedte van de kuil) erg hoog is.

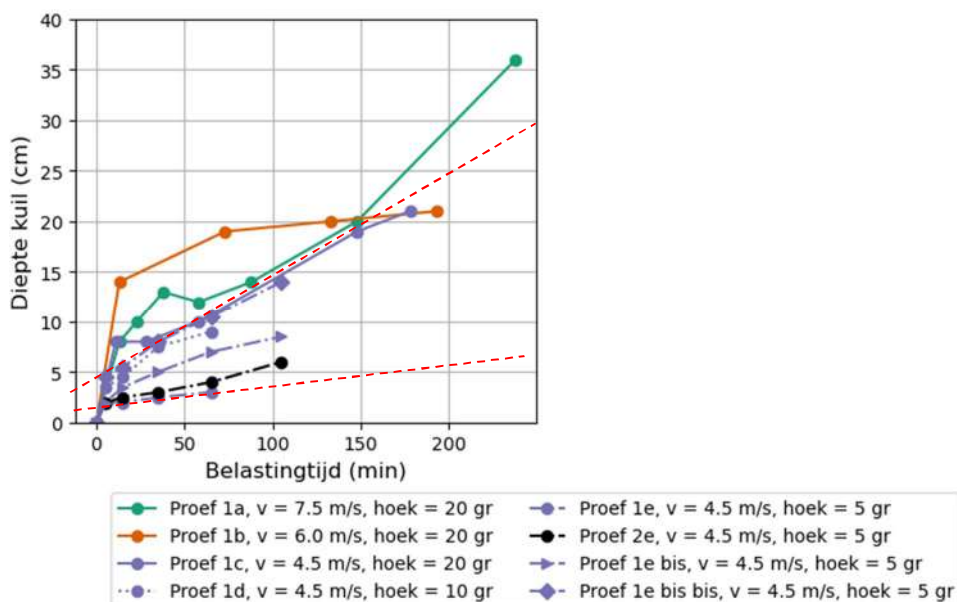
De mate van spreiding is grofstoffelijk ingeschat op basis van de erosiediepte en de erosiesnelheid.

Erosiediepte

Ter illustratie is de spreiding van de erosiediepte grofstoffelijk gekwantificeerd door de erosiediepte van deze vijf proeven te bepalen na 1 uur belasten. Het gemiddelde daarvan was 7,9 cm en de standaardafwijking (van deze steekproef) was 3,0 cm. De variatiecoëfficiënt is dan 0,39 wat relatief hoog is. Mogelijk wordt deze variatie fors lager wanneer er wordt gekeken naar een grotere gemiddelde diepte zoals bijvoorbeeld 20 cm.

Erosiesnelheid

De spreiding van de erosiesnelheid is grofstoffelijk inzichtelijk gemaakt door de vijf herhalingsproeven te beschouwen en de minimale en maximale gradiënt van de diepte van de kuil in de tijd (= erosiesnelheid) te bepalen. De gradiënten zijn weergegeven met de rode onderbroken lijnen in Figuur 5.1. De maximum erosiesnelheid is circa 6 cm/uur. De minimum erosiesnelheid is circa 1,2 cm/uur: dit is een factor 5 verschil.



Figuur 5.1. Proefresultaten waarbij de minimale en maximale gradiënten van de erosiediepte grofstoffelijk zijn bepaald en zijn weergegeven met de rode onderbroken lijnen.

Door de hierboven beschreven spreiding zal het niet helemaal mogelijk zijn om een correlatie te kunnen identificeren op basis van een enkele proef zoals het geval was bij een stroomsnelheid van 6,0 m/s en 7,5 m/s.

Dit valt ook te zien in het schadeverloop; er wordt niet een duidelijke trend gezien. Zo is bijvoorbeeld de ontwikkeling van de schadediepte van Proef 1a relatief laag op basis van wat men zou verwachten op basis van de andere proeven met lagere belastingen. Echter: de ontwikkeling van de schadelengte is bij Proef 1a weer vrij groot. Beseft dient te worden dat de heterogeniteit optreedt in zowel de lengterichting, de breedterichting als in de diepterichting.

Een mogelijk verklaring voor de afwijking van Proef 1a is dat deze proef op droge grond is uitgevoerd terwijl dit bij de andere proeven niet het geval was.

De proef met de overgang (2e) heeft redelijk beperkte schade. Mogelijke redenen daarvoor zijn:

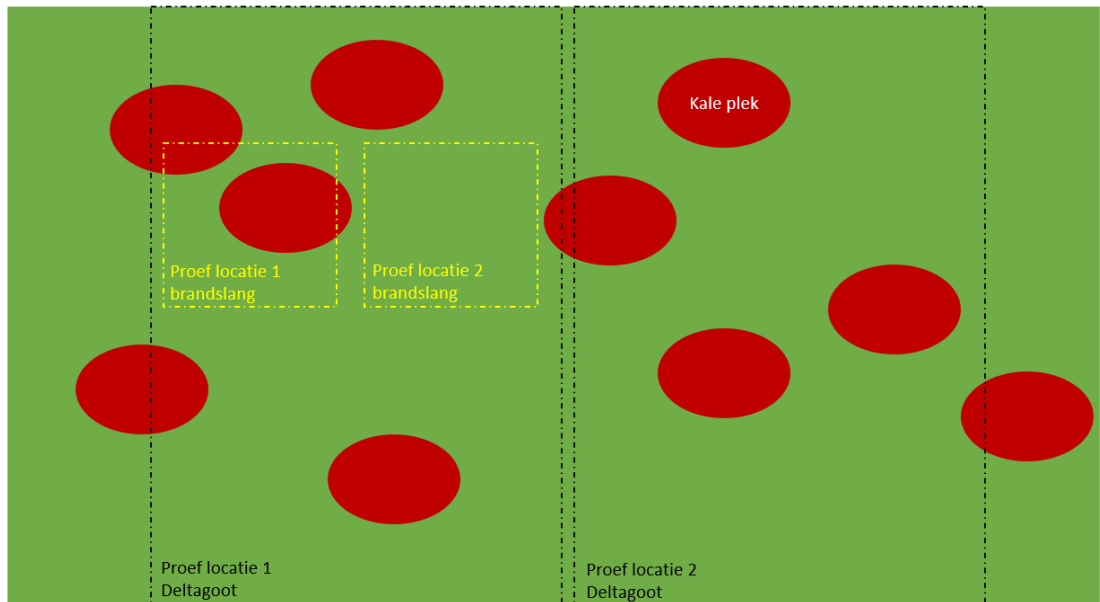
- Het was moeilijk om de belasting net op/voorbij de overgang te plaatsen omdat, door een te lage stroomsnelheid, de waterstraal niet continu was maar enigszins wapperde. Hierdoor is ook schade ontstaan 20 cm boven de overgang in plaats van alleen net daarnaast. Daardoor was de belasting op de overgang zelf gereduceerd.
- Er ontstond snel een plas water waardoor de belasting mogelijk gedempt werd.
- Een deel van de belasting werd overgenomen door de betonwand.
- Het wortelpakket leek sterker te zijn naast de overgang. Dit komt waarschijnlijk omdat de betonnen band meer opwarmt, zodat met name aan het begin van het groeiseizoen deze zone profiteert van een wat hogere bodemtemperatuur. Ook blijft het hier vochtiger ('plas water' is natuurlijk altijd hier wat opgesloten), wat met name in droge zomers een voordeel kan zijn dat kan opwegen tegen het verwarmingseffect.

5.2 Discussie

Het is lastig om de resultaten goed te kunnen duiden. Heterogeniteit lijkt een sterk storende factor te zijn wat mogelijk opgelost kan worden door meerdere herhalingsproeven uit te voeren. Hiermee kan een gemiddelde waarde en standaardafwijking gevonden worden van de schadediepte, -lengte of -breedte per belastingtijd. Een andere manier is om de gemiddelde waarde en spreiding uit te drukken van de benodigde belastingtijd om een bepaalde diepte te bereiken (bijvoorbeeld 10 of 20 cm). Dit heeft wel als praktisch nadeel dat alleen metingen kunnen worden uitgevoerd wanneer de stromingsbelasting wordt stop gezet. Dit is op gezette tijden waardoor het punt van de gewenste diepte mogelijk 'gemist' wordt en op basis van interpolatie zal moeten worden bepaald.

De heterogeniteit in resultaten is waarschijnlijk ook terug te vinden in andere proefmethoden zoals de golfploopsimulator, golfoverslagsimulator of Deltagoot. Maar waarschijnlijk in veel minder mate omdat het oppervlakte dat direct wordt belast veel breder (en langer) is. De belaste breedte bij de golfploopsimulator is orde 2 m, de belaste breedte bij de golfoverslagsimulator is orde 4 m en de belaste breedte in de Deltagoot is doorgaans 2 of 4 meter. De spuitmond van de brandslangmethode, en daarmee de belaste breedte, is maar 0,1 m. Daarbij wordt opgemerkt dat spuitmonden van verscheidene andere proeven zoals de JET test slechts 13 mm breed zijn. Bij sommige testmethoden is de breedte van het te beproeven monster groter dan de breedte van de belasting (de kuil kan immers breder worden dan de breedte van de belasting). Daarbij valt nog te bediscussiëren wat de karakteristieke breedtemaat is (belasting of monster). Vooralsnog wordt er vanuit gegaan dat de breedte van de belasting hierbij karakteristiek is aangezien redelijkerwijs kan worden aangenomen dat de primaire interesse in de maximum erosiediepte ligt en deze waarschijnlijk zal optreden in het deel van het monster dat direct belast wordt.

Proeven met een groter belastingoppervlak hebben een proeflocatie met minder heterogeniteit, dit is schematisch geïllustreerd in Figuur 5.2. Daarin valt te zien dat bij een Deltagootproef er altijd wel een slechtere locatie (rode ovals) voorkomt waardoor de sterkte zal worden gedomineerd. Bij een proef met de brandslangmethode is dat niet het geval.



Figuur 5.2 Proef locatie van de Deltagoot vs. proeflocatie van de brandslang. De rode cirkels representeren kale plekken in het gras. Hieruit is het duidelijk dat de qua omvang kleinere brandslangproeven meer afwijking zullen hebben in resultaten. De verhouding tussen het oppervlak van de belasting met de brandslang (orde 0,01 m²) en het oppervlak van de belasting met de Deltagoot (orde 4 m²) is in werkelijk vele malen groter dan hier aangegeven.

Het uiteindelijke doel van de ontwikkeling van de brandslangmethode is om te kunnen komen tot een laagdrempelige manier waarop de erosieve eigenschappen van materialen zoals gras, klei en overgangen onder hydraulische belasting kunnen worden geclassificeerd of relatief met elkaar kunnen worden vergeleken. Deze classificatie dient zo goed als mogelijk aan te sluiten op (geschematiseerde) fysica van de te beschouwen materialen. Een generieke methode om erosie van klei te beschrijven is gegeven door:

$$E = K(\tau - \tau_c)^\alpha \quad \text{voor } \tau > \tau_c$$

$$E = 0 \quad \text{voor } \tau \leq \tau_c$$

Waarbij E de erosiesnelheid [m/s], K de erodeerbaarheid, τ de schuifspanning [N/m²], τ_c de kritieke schuifspanning [N/m²] en α een coëfficiënt, welke bij klei vaak als 1 wordt beschouwd. (De eenheid van K is afhankelijk van de waarde van α).

Het schadeproces aan grasbekledingen en overgangen onder golfoploop- of golfoverslagbelasting wordt in Nederland beschreven met de zogenoemde cumulatieve overbelastingmethode. De sterkte van de grasbekleding wordt in die methode geschematiseerd tot de kritieke stroomsnelheid (U_c):

$$D = \sum_{i=1}^N (\alpha_m u_i^2 - \alpha_s u_c^2)$$

Waarbij D een schadegetal (m²/s²), u de optredende stroomsnelheid op de beschouwde locatie [m/s], u_c de kritische stroomsnelheid [m/s], N het aantal optredende golven [-] en α_m en α_s correctiefactoren voor de invloed van overgangen of andere discontinuïteiten [-]. In dit geval is de parameter u_c dus de parameter welke de sterkte van de grasbekleding representeert.

Vanuit de geschematiseerde situatie ligt de interesse puur in de sterkte van de te beschouwen (gras- of klei)bekleding. In het geval van grasbekledingen is dit de parameter u_c (en mogelijk de parameter α_s). In een wat generieker geval (bijvoorbeeld klei) is dit de kritieke schuifspanning τ_c en de erodeerbaarheidcoëfficiënt K .

De door de brandslangmethode aangebrachte belasting is niet één-op-één te vergelijken met de belastingen die worden gegenereerd tijdens golfaanval. De kritieke snelheid waarbij erosie begint en de erodeerbaarheid die volgen uit de brandslangmethode zijn daarom niet direct te relateren aan de genoemde parameter u_c (grasbekledingen) en τ_c en K (kleibekledingen) die volgen uit proeven op prototype schaal. De proeven met de brandslangmethode zijn een

onderdeel van een breder onderzoek om te kijken of de relatieve verandering in parameters tussen materialen vergelijkbaar is zodat na kalibratie van de uitkomsten tussen de kleinschalige en prototype testen de uitkomsten van grootschalige proeven gemakkelijk worden vertaald naar andere bekledingen en kleisoorten. Bijvoorbeeld, door de erosiebestendigheid van overgangsconstructies te vergelijken met die van de nabijgelegen grasmat kan eventueel op een eenvoudige manier worden aangetoond dat de overgangen erosiebestendiger zijn dan de grasmat. Op basis van de uitkomsten van kleinschalige proeven kan dan mogelijk ook worden gekomen tot een nieuwe classificatiemethode. In tegenstelling tot andere reeds bestaande kleinschalige proeven zoals de JET is het idee achter de brandslangmethode dat de belasting over een breder oppervlakte wordt uitgevoerd waardoor de uitkomsten minder afhankelijk zijn van kleine variaties in erosie-eigenschappen en de proef ook gemakkelijk uit te voeren is op overgangen in materialen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Begin september 2021 zijn acht brandslangproeven uitgevoerd op de Waddenzeedijk in Friesland. Zeven proeven zijn uitgevoerd op een testsectie zonder overgang en zonder versterkingsmaatregel, waaronder vijf herhalingsproeven. Eén proef is uitgevoerd op een testsectie met overgang maar zonder versterkingsmaatregel. Het doel van deze proeven was voornamelijk om ervaring op te doen met de brandslangmethode.

De proeven op de testsectie zonder overgang zijn uitgevoerd om het effect van verschillende instellingen (met name de spuithoek en de stroomsnelheid) beter in beeld te krijgen.

De resultaten van de herhalingsproeven laten een fors verschil zien in schadediepte, -lengte en -breedte. Dit lijkt gedomineerd te worden door de heterogeniteit van de sterkte van de gras/kleibekleding. Dit geeft aan hoe belangrijk het is om herhalingsproeven uit te voeren om een beter beeld te krijgen van de spreiding in de resultaten en dus de betrouwbaarheid van deze methodiek. Ondanks de grote afwijking van resultaten lijkt de brandslangmethode geschikt om proeven uit te voeren op gras zonder overgang. Wel dient er een framework opgesteld te worden waarmee de resultaten kunnen worden geduid. Dit framework dient zowel een fysische component als een statistische component te hebben.

De proef op de overgang was moeilijk in te stellen doordat de waterstraal net op de overgang moest zijn. Door de lage stroomsnelheid was de waterstraal niet continu waardoor ook gras net boven de overgang beschadigd werd. De resultaten van deze proef geven daardoor mogelijk een onderschatting van de schade. Hierdoor lijkt de brandslangmethode minder geschikt voor overgangsproeven. Een mogelijke oplossing hiervoor is om een hogere stroomsnelheid te kiezen om de waterstraal continu net boven de overgang te laten spuiten. Belangrijk is om niet te veel op de overgang zelf te spuiten anders wordt een deel van de belasting overgenomen door de betonwand.

Met deze acht proeven is significante ervaring opgedaan en data ingewonnen. De brandslangmethode lijkt geschikt om, op termijn, samen met grootschalige proeven, een toekomstige classificatiemethode uit te werken, en een relatie te leggen met de parameters in de cumulatieve overbelastingmethode.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van de opgedane inzichten wordt het volgende aanbevolen:

6.2.1 Instellingen

De instellingen die aanbevolen worden voor een test met de brandslangmethode is een stroomsnelheid van 6,0 m/s met een invalshoek (α_i) tussen de waterstraal en het talud van 30°. De reden voor de aanbeveling van 6 m/s is tweeledig:

1. De erosie trad vrij langzaam op waardoor de doorlooptijd van een test relatief hoog was en er soms ook geen significante erosie werd bereikt. Bij sterkere grasbekledingen zal dit naar verwachting nog meer het geval zijn.
2. Bij een stroomsnelheid van 4,5 m/s was de positie van de straal niet stabiel, deze 'wapperde' enigszins. Bij een stroomsnelheid van 6 m/s was dit niet het geval.

Het is van belang om de instellingen op de verschillende locaties gelijk te houden zodat verschillende locaties of condities met elkaar vergeleken kunnen worden.

Indien de focus ligt op het in kaart brengen van begin van erosie (en minder op de vervolgerosie) kan worden overwogen om het proevenprogramma zodanig in te steken dat er met twee stroomsnelheden wordt beproefd, bijvoorbeeld met 4,5 m/s en 6,0 m/s. Deze keuze zal afhankelijk zijn van het nog te ontwikkelen theoretische kader zoals bijvoorbeeld het zoeken naar de aansluiting met de cumulatieve overbelastingsmethode.

6.2.2 Proevenprogramma

Een aandachtspunt bij het uitvoeren van brandslangproeven is de belastingtijd tussen metingen. Theoretisch gezien zijn veel metingen gewenst om veel datapunten te krijgen, praktisch gezien zijn zo weinig mogelijk metingen gewenst vanwege de tijdsduur van een onderbreking ten behoeve van metingen. Ook zal een meting telkens een nat/droog-cyclus introduceren die net als het tijdelijk wegvallen van de stromingsdruk ook invloed kunnen hebben op het proefverloop.

Gezien het karakter van de schadeontwikkeling kan het interval tussen twee metingen toenemen gedurende de test. Aanbevolen wordt om bij toekomstige proeven metingen uit te voeren na 15, 30, 60 en 60 min belastingtijd. Het voordeel van dergelijke vastgestelde waarden is dat de proeven goed met elkaar vergelijkbaar zijn; bijvoorbeeld door de diepte op een bepaald tijdstip vast te stellen en dan niet van interpolatie afhankelijk te zijn.

De totale belastingtijd wordt dan 165 min. Dit is bijna 3 uur. De stoptijd per meting is circa 15 minuten, dus in totaal circa 1 uur. De mobilisatie en demobilisatietijd per dag wordt ingeschat op in totaal 2 uur. Bij een ervaren en op elkaar ingespeeld uitvoeringsteam en zonder praktische tegenslagen zouden er dus 2 proeven op één dag kunnen worden uitgevoerd. Wanneer twee proeven parallel worden uitgevoerd en er sprake is van een ervaren team is het wellicht mogelijk om vier proeven per dag uit te voeren hoewel daar nog geen ervaring mee is opgedaan. In dat geval dienen de meeste materialen wel dubbel te worden aangevoerd waardoor de (huur) kosten en mobilisatie en demobilisatietijd omhoog gaan.

Het aanbevolen stopcriterium wordt dan een bepaalde totale belastingtijd. Echter, het is mogelijk ook wenselijk om een tweede stopcriterium te hebben: te denken valt bijvoorbeeld aan een maximale kuildiepte van 20 cm.

6.2.3 Metingen

Naast de kwantitatieve metingen (kuildiepte, -breedte en -lengte) zijn waarnemingen ook erg belangrijk om zo precies mogelijk te noteren. Bij elke meting zijn de volgende waarnemingen belangrijk:

- De staat van de zode: wortels zichtbaar, uitgetrokken of doorbroken.
- De vorm van de kuil: aanwezigheid van een kuil, een gat dat onder de zode doorgroeit of tunnelvorming.
- De aanwezigheid van water in de kuil.

Verder is het ook aan te raden om vóór de proef meer aandacht te besteden aan het inschatten van de bodemvochtigheid. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk een grote invloed op de resultaten.

6.2.4 Duiding en interpretatie van de resultaten

Vooralsnog wordt aanbevolen om elk proef minstens vijf keer te herhalen. Dit geeft een beeld van de betrouwbaarheid van de resultaten. Om het aantal benodigde herhalingen beter te onderbouwen wordt aanbevolen om een bureaustudie uit te voeren. Echter moeten eerst meer proeven worden uitgevoerd, met de hierboven aanbevolen instellingen, om de benodigde gegevens voor de bureaustudie te verkrijgen.

Verder is het belangrijk om de resultaten van de brandslangmethode te vergelijken met data van grootschalige proeven.

Literatuur

- Deltares, 2016. Bouw overgangen – verslag van uitgevoerde werkzaamheden op de dijk in augustus 2016. Deltares rapport met kenmerk 1230042-005-ZWS-0002, 25 november 2016, v1
- Deltares, 2020. Ontwikkeling brandslangmethode. methode om erosie van gras en klei te categoriseren. Deltares rapport met kenmerk 11205235-002-ZWS-0006, 8 december 2020, v1.1
- Deltares, 2021a. Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken, Meetverslag Deltagootproeven. Deltares rapport met kenmerk 11204841-006-HYE00004, v1 d.d. 12-03-2021
- Deltares, 2021b. Testen op grasbekleding met brandslangmethode. Deltares rapport met kenmerk 11206793-001-ZWS-0001, v1 d.d. 25-08-2021
- EURECO ecologisch onderzoek & advies, 2020. Project overgangen 2016-2020 verslag van het veldbezoek in 2020.
- RWS (2019). Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 november 2019
- RWS (2021). Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 mei 2021
- VTV(2006). Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007.

A Samenvatting resultaten van alle proeven

Tabel 12 Samenvatting resultaten van alle proeven.

Proef	1a	1b	1c	1d	1e	2e	1e-bis	1e-ter
Stroomsnelheid - v (m/s)	7,5	6,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Hoek spuitmond - α_s (°)	20	20	20	10	5	5	5	5
Invalshoek - α_i (°)	22	25	31	31	30	30	30	30
Totale belastingtijd (min)	238	193	178	65	65	105	105	105
Maximum diepte (cm)	36	21	21	9	3	6	8,5	14
Maximum lengte in stroomrichting (cm)	86	47	43	32	24	6	40	42
Maximum breedte loodrecht op stroomrichting (cm)	20	21	20	20	19	12	23	16

B Factsheet proef 1a

B.1 Eigenschappen proef

Proef 1a verliep over twee dagen (06/09/2021 tot 07/09/2021) met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 7,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Droog.
- Locatie spuitmond: (x= 83 cm, y= -35 cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 20°.
- Invalshoek (α_i): 22°.
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 30°.
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 75 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 14 cm.

B.2 Proefverloop

Op 06/09/2021 is proef 1a laat in de middag begonnen doordat daarvoor alle materialen van Delft moesten worden gebracht en de pomp en spuitmond moesten worden getest om te zien wat de maximale debiet was. Doordat de pomp slecht werkte was er nog meer vertraging met het begin van de eerste proef. Uiteindelijk was het mogelijk om met proef 1 te beginnen en de testsectie voor 15 min te belasten. Na de eerste meting bleek er al initiale schade te zijn, de wortels waren zichtbaar. Doordat de pomp weer moeilijk deed is de proef de volgende dag weer gestart nadat de pomp ingeruild werd. In het begin van de tweede dag was een tunnel gevormd met een bovenste graszode laag die nog intact bleef tot 38 min belastingtijd. Daarna werd de tunnel langzaam doorbroken. Een foto van de beginsituatie is weergegeven in Figuur 0.1.

Proef 1a werd belast voor: 13, 10, 15, 20, 30, 60, 90 min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.2 tot en met Figuur 0.5. Na deze proef was de schade 36 cm diep, 86 cm lang en 20 cm breed. Het schadeverloop is weergegeven in Figuur 0.7. De metingen met waarnemingen zijn vermeld in Tabel 13.



Figuur 0.1 Begin situatie van proef 1a.



Figuur 0.2 Schade bij meting 1 proef 1a.



Figuur 0.3 Schade bij meting 2 proef 1a.



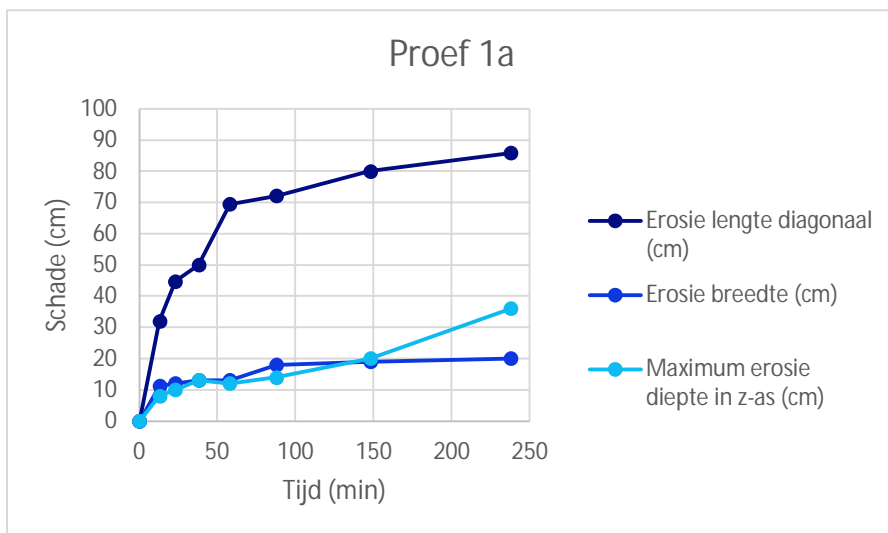
Figuur 0.4 Schade bij meting 3 proef 1a.



Figuur 0.5 Schade bij meting 4 proef 1a.



Figuur 0.6 Schade bij meting 5 (links) en 7 (rechts) proef 1a.



Figuur 0.7 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1a.

Tabel 13 Metingen en waarnemingen van proef 1a.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie (cm)	lengte	Erosie breedte (cm)	– Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	16:04	13.00	13	920	7,7	32	11	8	Wortels uitgetrokken. Geen water in kuil.	
2	10:18	10	23	900	7,5	45	12	10	Duidelijk gat in zode. Tunnel gevormd met de zode aan de bovenkant van de tunnel nog intact. Een beetje water in kuil.	
3	11:20	15	38	900	7,5	50	13	13	Zode aan de bovenkant van de tunnel is een beetje doorbroken, maar niet helemaal Deze is circa 55cm lang. Een beetje water in kuil.	
4	11:54	20	58	890	7,4	69	13	12	Nog steeds een tunnel tot y=80cm. Nu is de zode aan de bovenkant van de tunnel helemaal doorbroken. Water spuit onder het gras door. Lengte van de tunnel is 60cm. Een beetje water in kuil.	
5	12:30	30	88	885	7,4	72	18	14	Tunnel is in het midden doorbroken.	
6	13:45	60	148	900	7,5	80	19	20	Geen tunnel meer. De zode op het dak van de tunnel is doorbroken.	
7	15:00	90	238	900	7,5	86	20	36	Erg breed en diep gat. Water in kuil.	

C Factsheet proef 1b

C.1 Eigenschappen proef

Proef 1b verliep in de ochtend van 08/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 6 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door de proef van de vorige dag.
- Locatie spuitmond: ($x= 160$ cm, $y= -30.6$ cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 20° .
- Invalshoek (α_i): 25° .
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 30° .
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 70 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 14 cm.

C.2 Proefverloop

Proef 1b was hetzelfde als proef 1a maar met een lagere stroomsnelheid. Echter schade is sneller ontstaan. Er ontstond al snel een diep gat die redelijk horizontaal was waardoor er water achterbleef in dit gat. Na 73 en 133 min belastingtijd was bijna geen verschil meer in diepte metingen. Een foto van de begin situatie is weergegeven in Figuur 0.9.

Proef 1b werd belast voor: 13 min en daarna drie keer 60 min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.10 tot en met Figuur 0.13. Metingen waren minder vaak gemaakt vergeleken met proef 1a om de proef langer te laten lopen. Na deze proef was de schade 21 cm diep, 47 cm lang en 21 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.14. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 14.



Figuur 0.9 Begin situatie van proef 1b.



Figuur 0.10 Schade bij meting 1 van proef 1b.



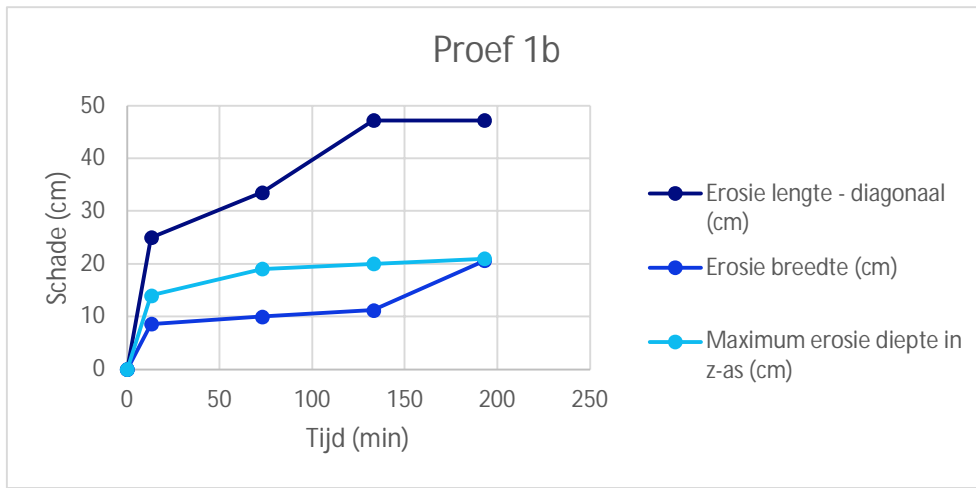
Figuur 0.11 Schade bij meting 2 van proef 1b.



Figuur 0.12 Schade bij meting 3 van proef 1b.



Figuur 0.13 Schade bij meting 4 van proef 1b.



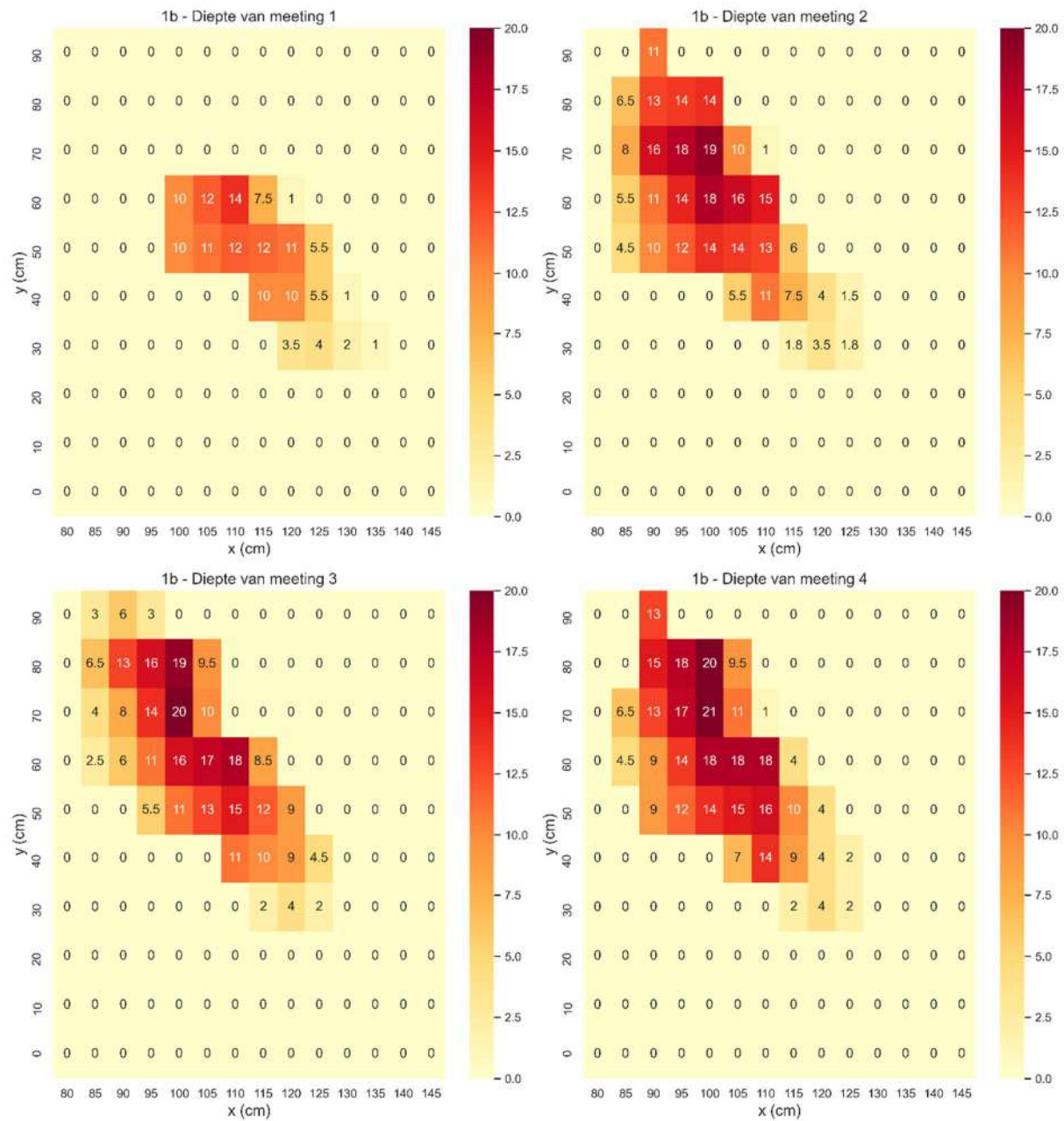
Figuur 0.14 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1b.

Tabel 14 Metingen en waarnemingen van proef 1b.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	09:30	13	13	730	6,1	25	9	14	Wortels zichtbaar op sommige plekken en uitgetrokken op andere.
2	09:55	60	73	720	6,0	34	10	19	Wortels doorbroken, tunnel vorming. Water in het gat
3	11:12	60	133	730	6,1	47	11	20	Basis van tunnel nog breder. Nog meer water in het gat
4	12:30	60	193	720	6,0	47	21	21	Tunnel bijna helemaal doorbroken. Veel water in gat.

C.3 Diepte metingen

Figuur 0.15 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.15 Proef 1b - Diepte metingen 1, 2, 3 en 4 van proef 1b na respectievelijk 13, 73, 133 en 193 min belastingtijd.

D Factsheet proef 1c

D.1 Eigenschappen proef

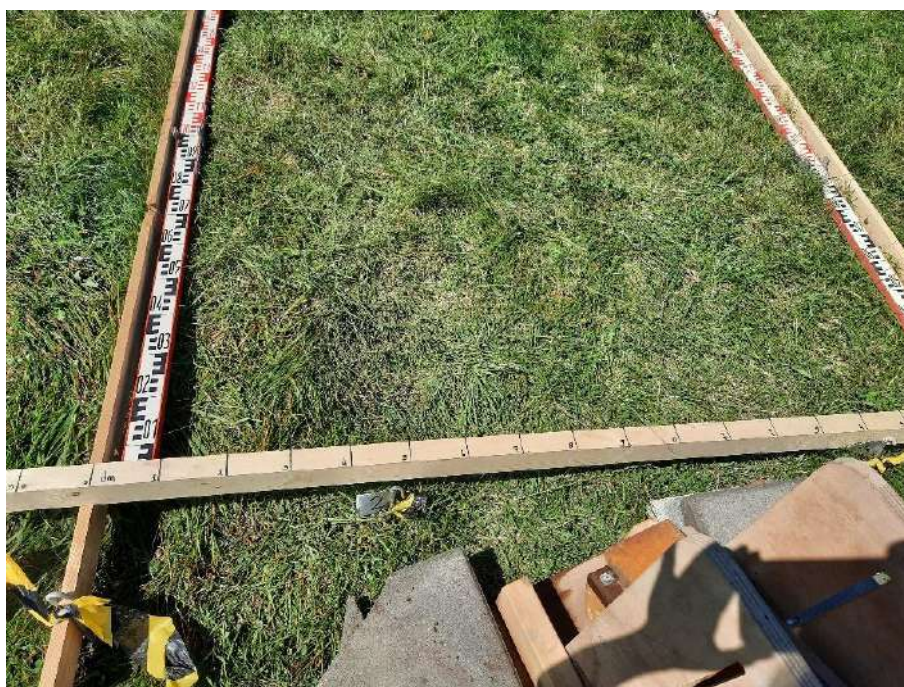
Proef 1c verliep in de middag van 08/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 4,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door de ochtend proef.
- Locatie spuitmond: ($x= 240$ cm, $y= -42$ cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 20° .
- Invalshoek (α_i): 31° ;
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 30° .
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 60 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 14 cm.

D.2 Proefverloop

Proef 1c was dezelfde proef als proef 1b maar met een lagere stroomsnelheid. Er ontstond weer snel schade (na minder dan 10 min). Na 58 min belasting bleef ook een beetje water in het gat (maar minder dan bij proef 1b omdat het gat minder diep was).

Proef 1c werd belast voor: 11, 17, 30, 90 en 30min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.10 tot en met Figuur 0.13. Het was besloten om vanaf nu vaker te meten en minder lang te belasten om een duidelijker beeld te krijgen van het begin van schade. Na deze proef was de schade 21 cm diep, 43 cm lang en 20 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.22. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 15.



Figuur 0.16 Begin situatie van proef 1c.



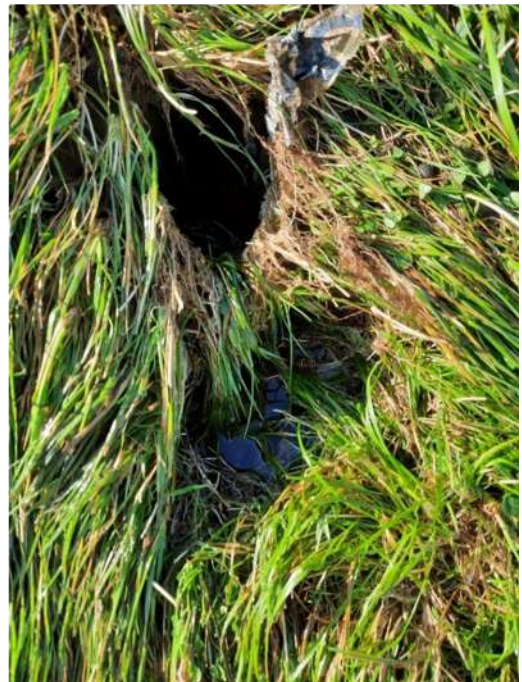
Figuur 0.17 Schade bij meting 1 van proef 1c.



Figuur 0.18 Schade bij meting 2 van proef 1c.



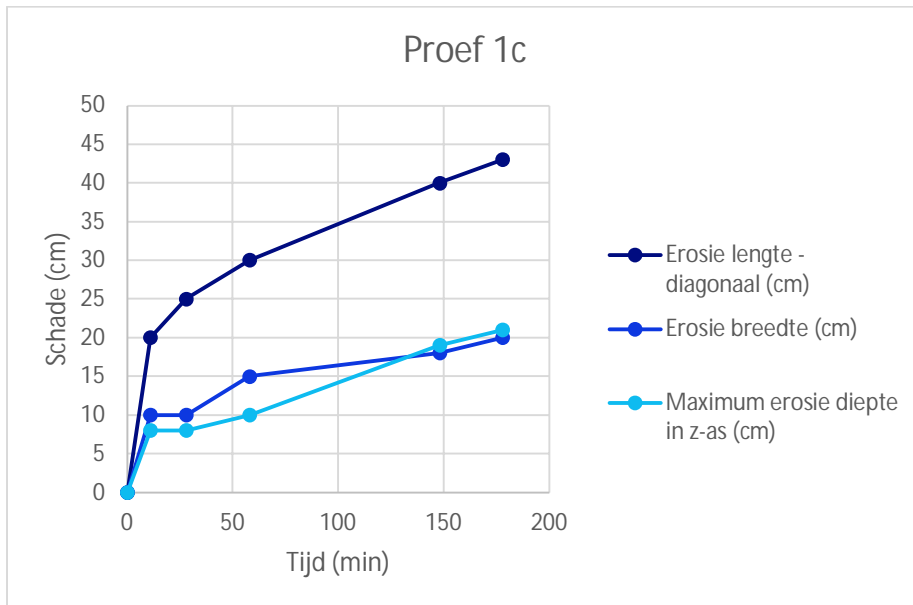
Figuur 0.19 Schade bij meting 3 van proef 1c.



Figuur 0.20 Schade bij meting 4 van proef 1c.



Figuur 0.21 Schade bij meting 5 van proef 1c.



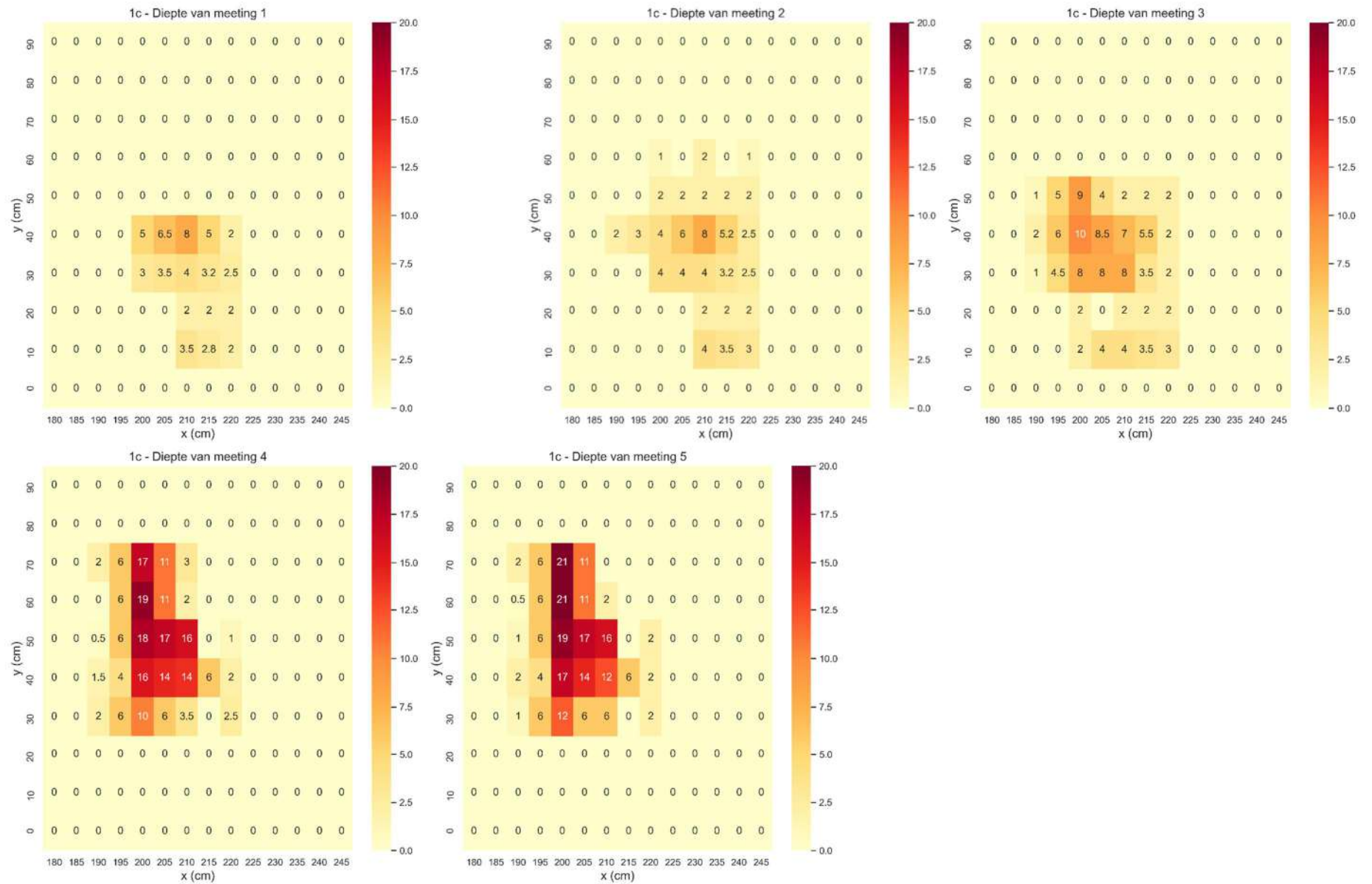
Figuur 0.22 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1c.

Tabel 15 Metingen en waarnemingen van proef 1c.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	13:37	11	11	550	4,6	20	10	8	Een kuil lijkt zichtbaar te zijn op de foto's.
2	14:13	17	28	540	4,5	25	10	8	
3	14:40	30	58	540	4,5	30	15	10	Korte tunnel gevormd. Kuil gevormd met water erin.
4	15:23	90	148	540	4,5	40	18	19	Gat veel breder geworden. Tunnel bijna helemaal doorbroken. Water in kuil.
5	17:10	30	178	540	4,5	43	20	21	Gat nog breder. Tunnel bijna gebroken. Water in kuil

D.3 Diepte metingen

Figuur 0.23 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.23 Proef 1c - Diepte metingen 1, 2, 3, 4 en 5 van proef 1c na respectievelijk 11, 28, 58, 148 en 178 min belastingtijd.

E Factsheet proef 1d

E.1 Eigenschappen proef

Proef 1d verliep in de ochtend van 09/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 4,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door de proeven van de vorige dag.
- Locatie spuitmond: (x= 330 cm, y= -30 cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 10°.
- Invalshoek (α_i): 31°.
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 25°.
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 85 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 16 cm.

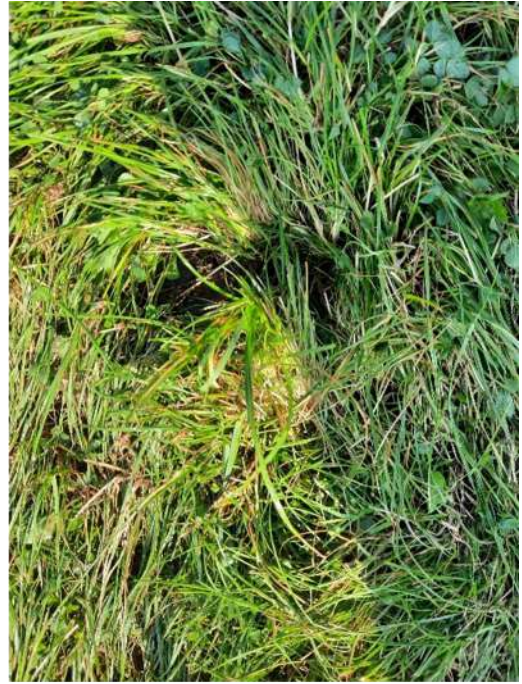
E.2 Proefverloop

Proef 1d was dezelfde proef als proef 1c maar met een lagere hoek van de spuitmond.

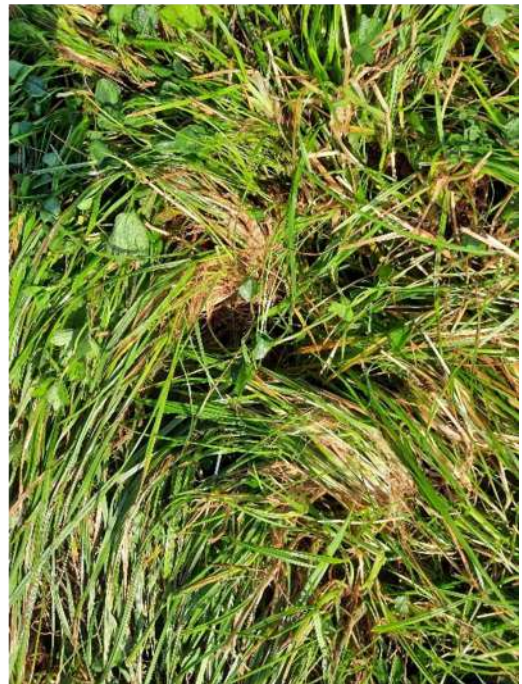
Proef 1d werd belast voor: 5, 10, 20 en 30min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.25 tot en met Figuur 0.28. Vanaf nu zijn de belasting tijden ongeveer constant gehouden (als de schade nog niet zichtbaar was en er nog tijd over was om die dag nog een meting te doen was er nog een belasting van 40 min erbij gekomen). Na deze proef was de schade 9 cm diep, 32 cm lang en 20 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.29. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 16.



Figuur 0.24 Begin situatie van proef 1d



Figuur 0.25 Schade bij meting 1 proef 1d.



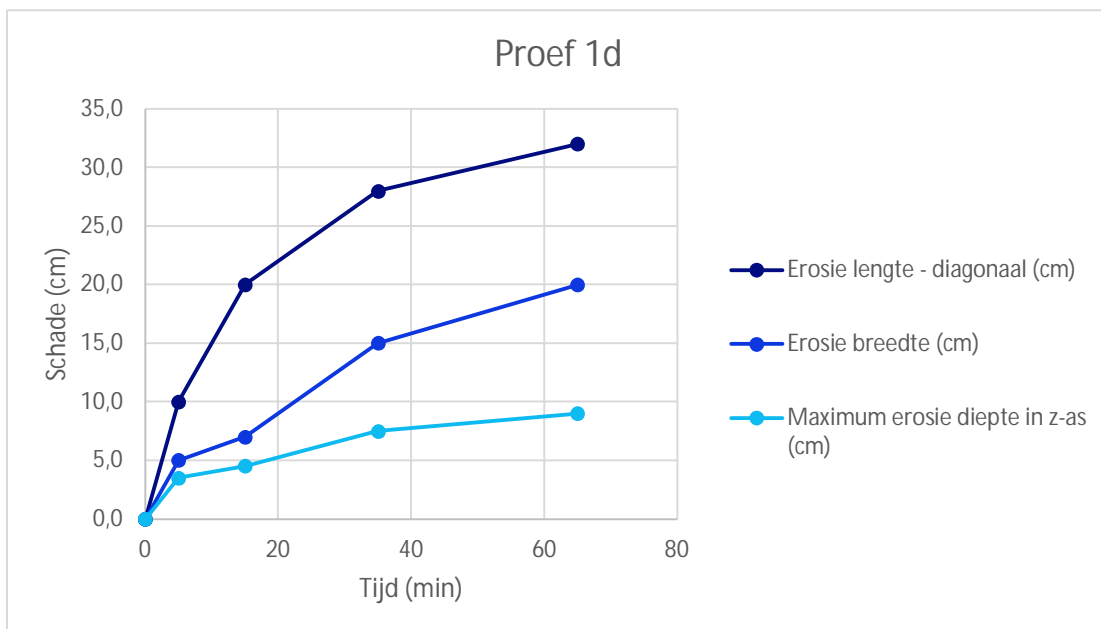
Figuur 0.26 Schade bij meting 2 proef 1d.



Figuur 0.27 Schade bij meting 3 proef 1d.



Figuur 0.28 Schade bij meting 4 proef 1d.



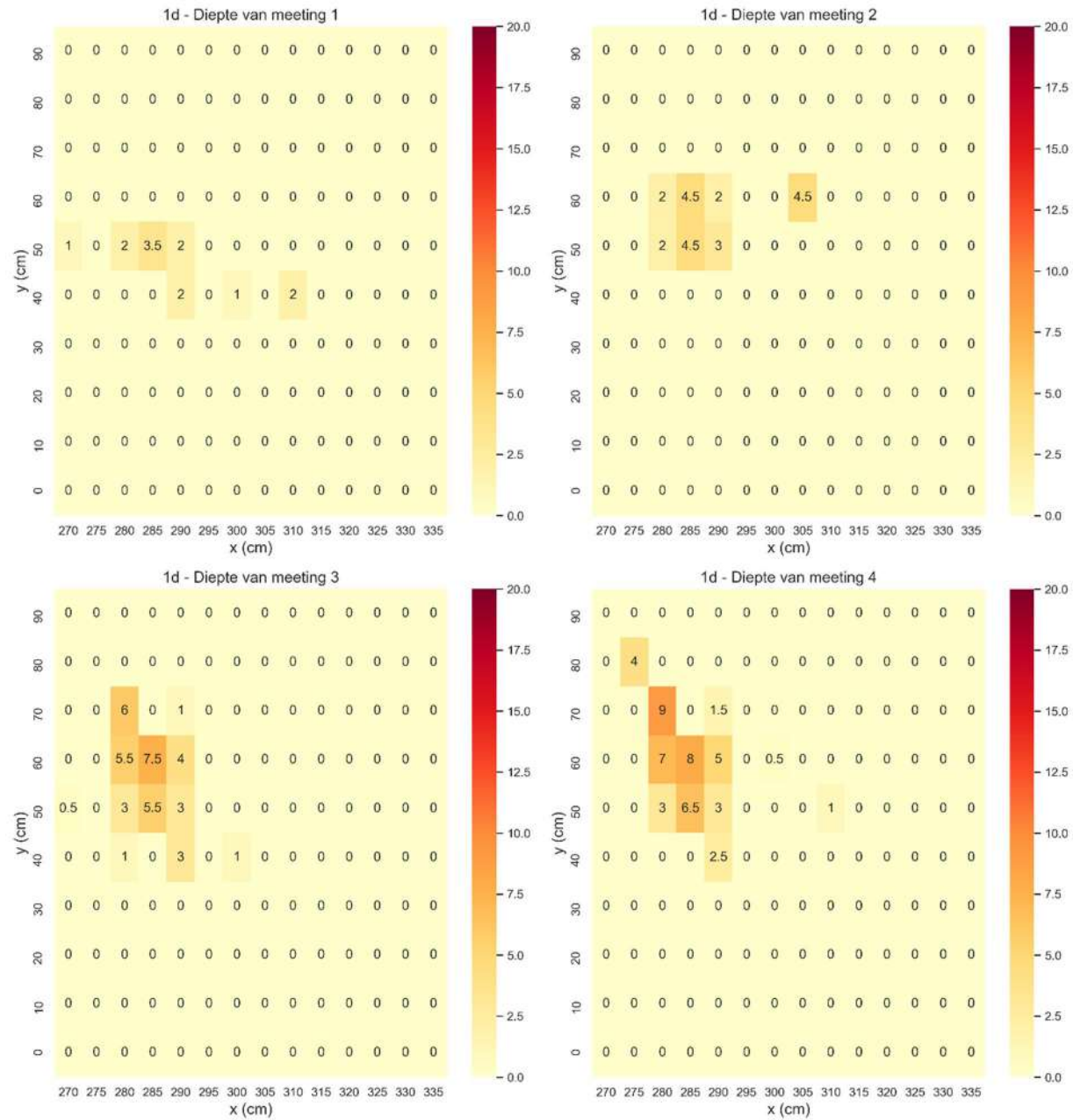
Figuur 0.29 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1d.

Tabel 16 Metingen en waarnemingen van proef 1d.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	09:10	5	5	540	4.5	10.0	5.0	3.5	Wortels zichtbaar. Nog geen kuil zichtbaar.
2	09:25	10	15	535	4.5	20.0	7.0	4.5	Wortels uitgetrokken. Klein kuil zichtbaar, nog geen water.
3	09:47	20	35	540	4.5	28.0	15.0	7.5	Wortels doorbroken. Tunnel is gevormd. Geen water in kuil, bij y=75cm is 2cm breed gras zonder wortels
4	10:17	30	65	540	4.5	32	20	9.0	Tunnel nog zichtbaar, geen water in kuil.

E.3 Diepte metingen

Figuur 0.23 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.30 Proef 1d - Diepte metingen 1, 2, 3 en 4 van proef 1c na respectievelijk 5, 15, 35 en 65 min belastingtijd.

F Factsheet proef 1e

F.1 Eigenschappen proef

Proef 1e verliep in de begin middag van 09/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 4,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door de ochtend proef.
- Locatie spuitmond: (x= 395 cm, y= -50 cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 5°.
- Invalshoek (α_i): 30°.
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 25°.
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 85 cm;
- Referentie voor dieptemetingen: 15 cm.

F.2 Proefverloop

De spuitmond heeft een hoek van 5° in proef 1e om de schade verloop nog langzamer te laten gaan vergeleken met eerdere proeven. Hierdoor zou een betere beeld kunnen ontstaan van het begin van schade. Het begin situatie van de proef is weergegeven in Figuur 0.31.

Proef 1e werd belast voor: 5, 10, 20 en 30 min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.32 tot en met Figuur 0.35. Het was besloten om niet langer met deze proef te gaan omdat het schade verloop heel constant was. Na deze proef was de schade 3 cm diep, 23 cm lang en 19 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.36. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 17.



Figuur 0.31 Begin situatie van proef 1e.



Figuur 0.32 Schade bij meting 1 van proef 1e.



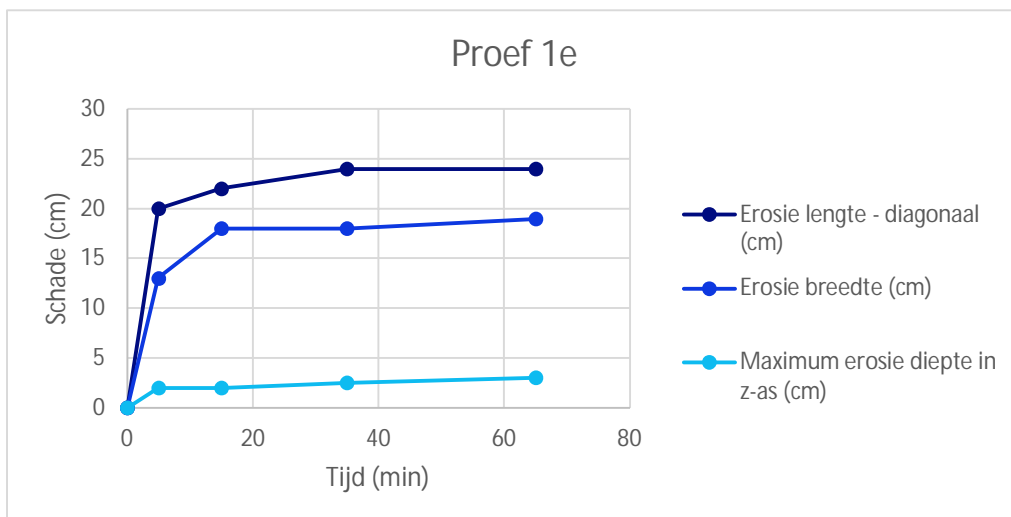
Figuur 0.33 Schade bij meting 2 van proef 1e.



Figuur 0.34 Schade bij meting 3 van proef 1e.



Figuur 0.35 Schade bij meting 4 van proef 1e.



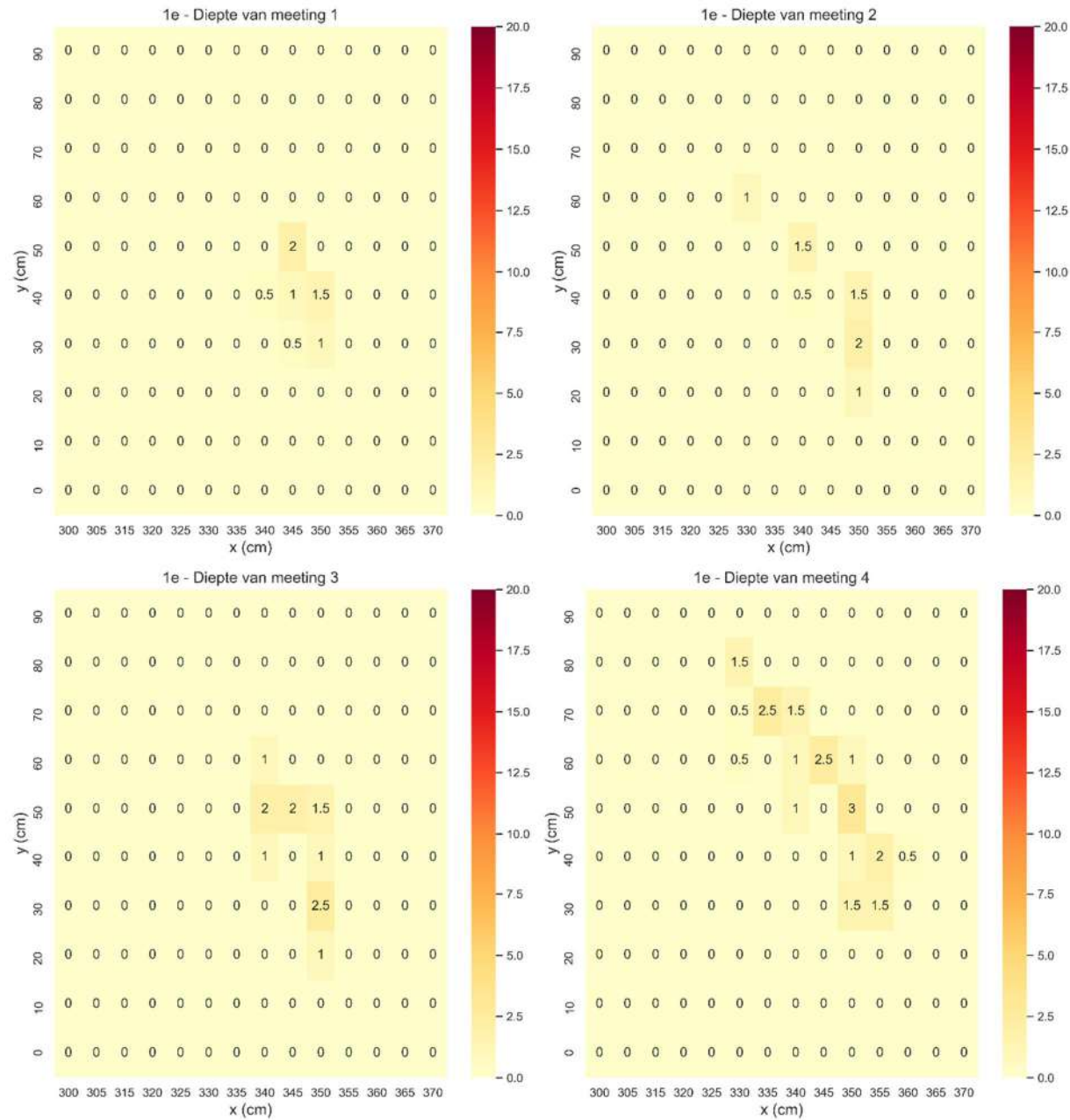
Figuur 0.36 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1e.

Tabel 17 Metingen en waarnemingen van proef 1e.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	12:01	5	5		0.0	20.0	13.0	2.0	Begin van schade: wortels zijn zichtbaar. Zwakke plek met open zode daar is eerste schade ontstaan. Dit heeft erosie veroorzaakt tot een diepte van 2cm. Geen zichtbaar kuil.
2	12:17	10	15		0.0	22.0	18.0	2.0	Wortels een beetje meer zichtbaar. Geen zichtbare kuil.
3	13:14	20	35		0.0	24.0	18.0	2.5	Wortels nog zichtbaar, beginnen uitgetrokken te worden. Nog geen kuil zichtbaar.
4	13:52	30	65		0.0	24	19	3.0	Wortels een beetje meer uitgetrokken. Nog geen kuil zichtbaar.

F.3 Diepte metingen

Figuur 0.37 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.37 Proef 1e - Diepte metingen 1, 2, 3 en 4 van proef 1c na respectievelijk 5, 10, 20 en 30 min belastingtijd.

G Factsheet proef 2e

G.1 Eigenschappen proef

Proef 2e verliep in de middag van 09/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 4,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door 15 minuten water eroverheen te laten stromen.
- Locatie spuitmond: ($x= 520$ cm, $y= -78$ cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 5° .
- Invalshoek (α_i): 30° .
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 25° .
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 85 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 15 cm.

G.2 Proefverloop

Proef 2e was een proef op een overgang. Omdat de proeflocatie een beetje verderop van de eerder proeven was, is water gedurende vijf/tien minuten overheen gestroomd om de vochtigheid zo goed mogelijk vergelijkbaar te krijgen als bij de andere proeven. Het was lastig om de straal van de spuitmond exact op de overgang te zetten omdat het water straal wapperde door de lage debiet.

Proef 2e werd belast voor: 5, 10, 20, 30 en 40 min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.39 tot en met Figuur 0.43. Na deze proef was de schade 6 cm diep, 6 cm lang en 12 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.44. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 18.



Figuur 0.38 Begin situatie van proef 2e.



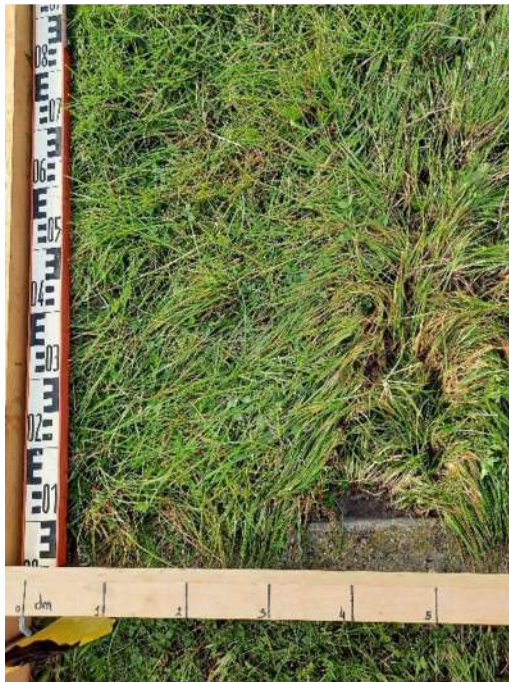
Figuur 0.39 Schade bij meting 1 proef 2e.



Figuur 0.40 Schade bij meting 2 proef 2e.



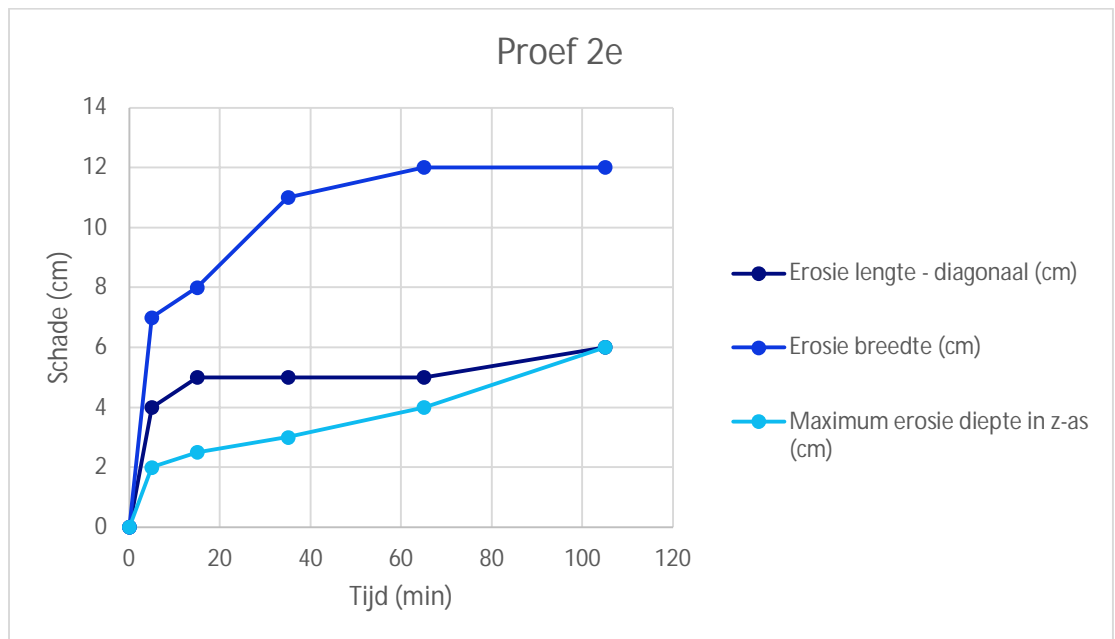
Figuur 0.41 Schade bij meting 3 proef 2e.



Figuur 0.42 Schade bij meting 4 proef 2e.



Figuur 0.43 Schade bij meting 5 proef 2e.



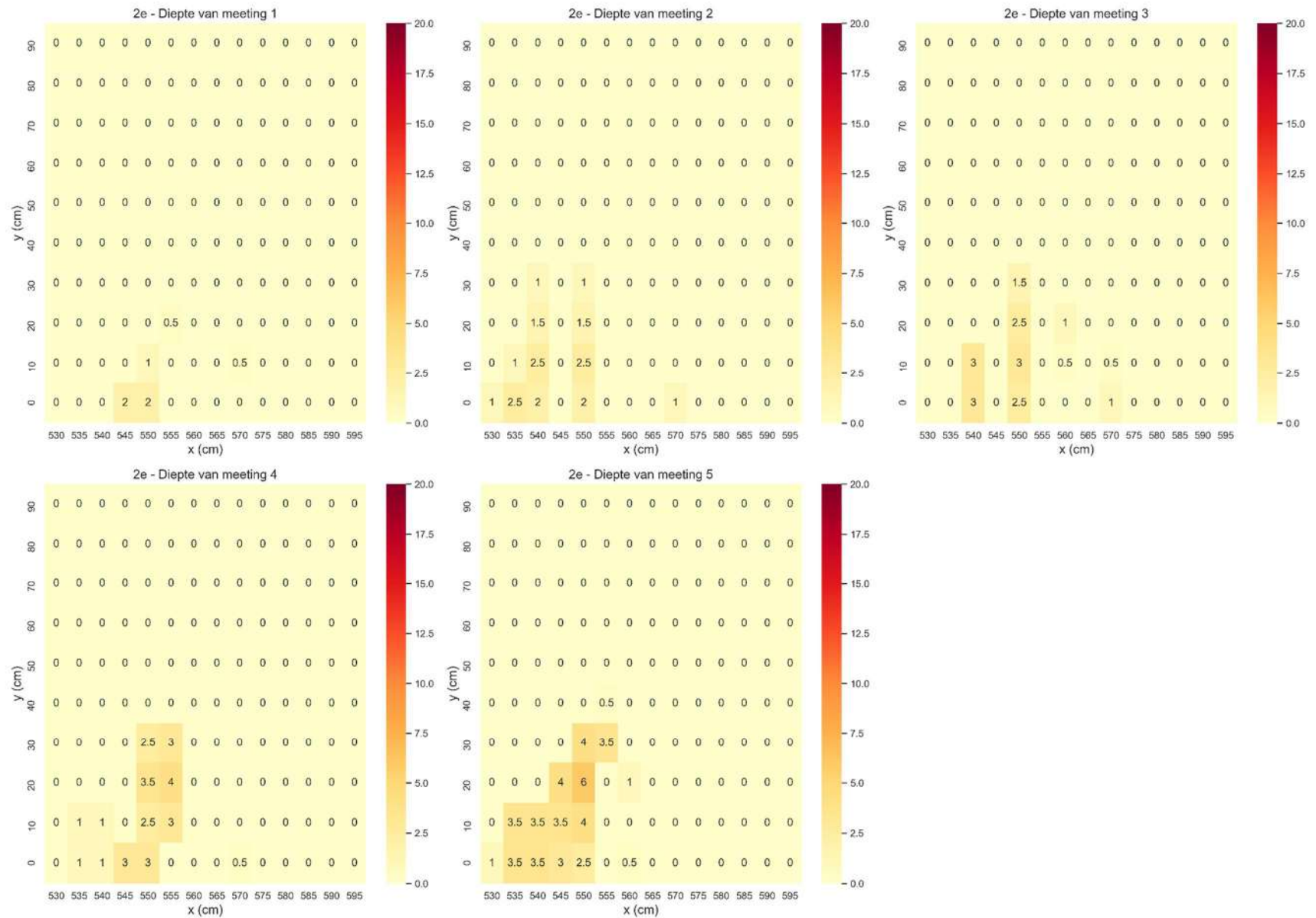
Figuur 0.44 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 2e.

Tabel 18 Metingen en waarnemingen van proef 2e.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	15:15	5	5	540	4.5	4.0	7.0	2.0	Wortels zichtbaar. Heel ondiep kuil gevormd aan het rand van de overgang met 1 of 2 mm laag water. Zo'n 10-15 cm boven de overgang zit ook een beetje schade met zichtbare wortels.
2	15:25	10	15	540	4.5	5.0	8.0	2.5	Geen grote verandering in situatie. Wortels misschien een beetje meer zichtbaar. Een beetje water blijft nog steeds liggen. Schade net boven groeit verder.
3	16:00	20	35	540	4.5	5.0	11.0	3.0	Schade aan de rand van de overgang wordt groter. Worden zijn zichtbaar maar nog niet uitgetrokken. Schade boven groeit nog steeds. Meer water in kuil.
4	16:30	30	65	540	4.5	5	12	4.0	Geen grote verandering in situatie. Wortels nog niet uitgetrokken. Schade lijkt erger te zijn geworden bij de rand van de overgang. Ongeveer 5 cm water in kuil.
5	17:10	40	105	540	4.5	6	12	6.0	Wortels beginnen uitgetrokken te worden, veel water in kuil.

G.3 Diepte metingen

Figuur 0.45 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.45 Proef 1e-2 - Diepte metingen 1, 2, 3, 4 en 5 van proef 1c na respectivelijk 5, 15, 35, 65 en 105 min belastingtijd.

H Factsheet proef 1e-bis

H.1 Eigenschappen proef

Proef 1e-bis verliep in de ochtend van 10/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 4,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door de proeven van de vorige dag.
- Locatie spuitmond: (x= 450 cm, y= -45 cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 5°.
- Invalshoek (α_i): 30°.
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 25°.
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 85 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 16 cm.

H.2 Proefverloop

Proef 1e-bis was een herhalingsproef van proef 1e. Beide proeven hadden ongeveer dezelfde grond vochtigheid.

Proef 1e-bis werd belast voor: 5, 10, 20, 30 en 40 min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.47 tot en met Figuur 0.51. Na deze proef was de schade 8,5 cm diep, 40 cm lang en 23 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.52. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 19.



Figuur 0.46 Begin situatie van proef 1e-bis.



Figuur 0.47 Schade bij meting 1 proef 1e-bis.



Figuur 0.48 Schade bij meting 2 proef 1e-bis.



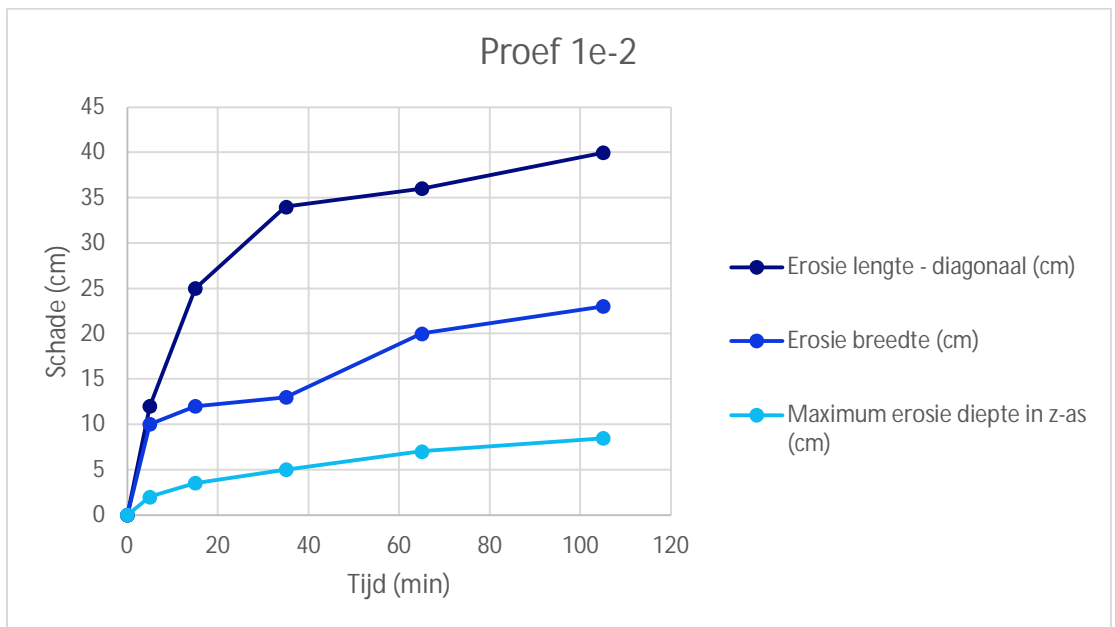
Figuur 0.49 Schade bij meting 3 proef 1e-bis.



Figuur 0.50 Schade bij meting 4 proef 1e-bis.



Figuur 0.51 Schade bij meting 5 proef 1e-bis.



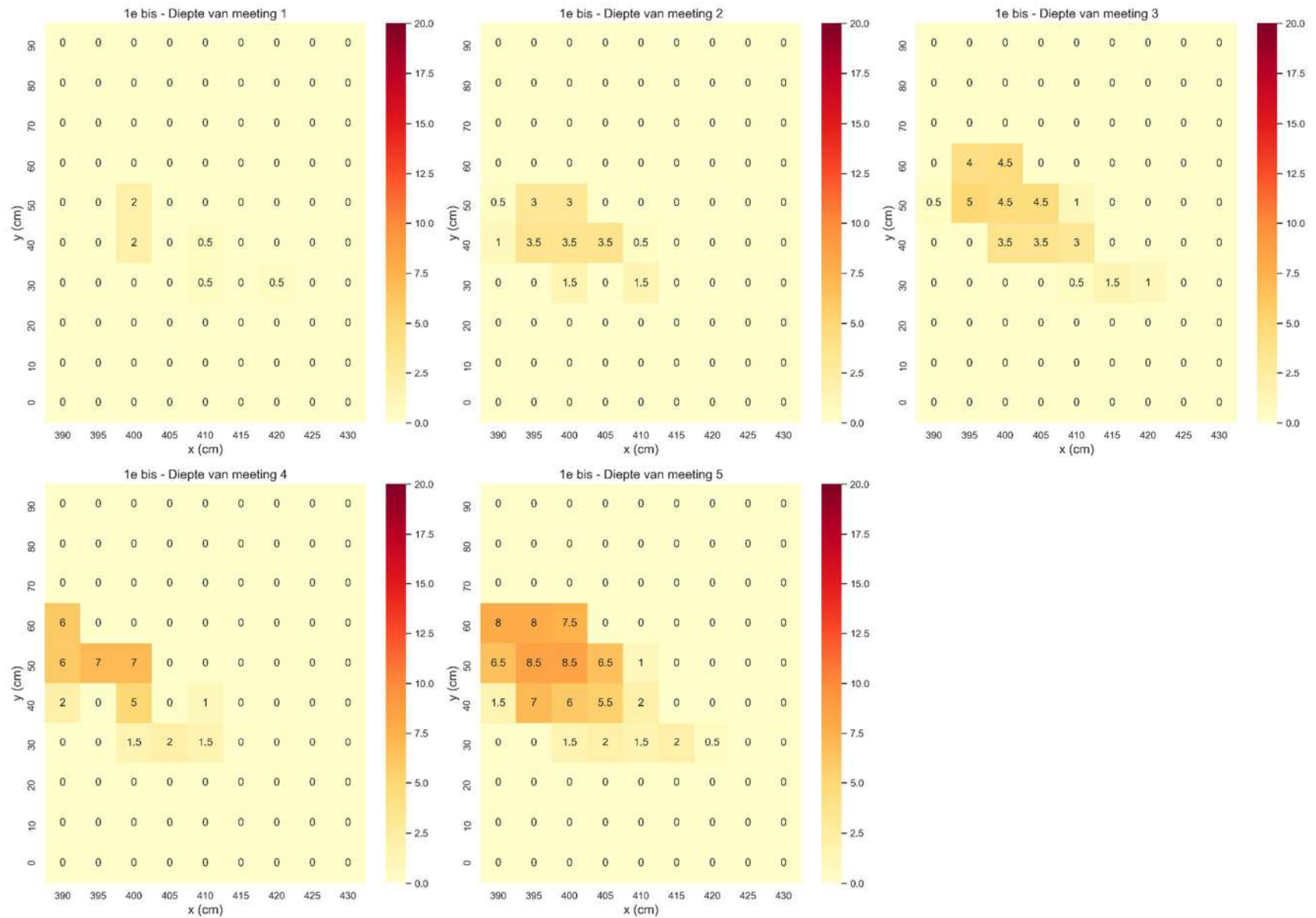
Figuur 0.52 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1e-bis.

Tabel 19 Metingen en waarnemingen van proef 1e-bis.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	08:58	5	5	540	4.5	12	10	2	Wortels zichtbaar en begin uitgetrokken. Geen zichtbare kuil.
2	09:11	10	15	540	4.5	25.0	12.0	3.5	Wortels uitgetrokken, nog geen kuil zichtbaar.
3	09:28	20	35	535	4.5	34.0	13.0	5.0	Kleine doorbraak in wortelpakket (rond 2 cm) waardoor een kuil begint te vormen. Wel nog een sterk wortelpakket omheen. Geen water.
4	10:00	30	65	540	4.5	36	20	7.0	Kuil wordt groter. Er is water in kuil.
5	10:40	40	105	540	5	40	23	8.5	Grote kuil ontstaan onder een sterk nog samenhangt wortelpakket. Laag water in kuil.

H.3 Diepte metingen

Figuur 0.53 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.53 Proef 1e-bis - Diepte metingen 1, 2, 3, 4 en 5 van proef 1e-bis na respectievelijk 5, 10, 20, 30 en 40 min belastingtijd.

I Factsheet proef 1e-ter

I.1 Eigenschappen proef

Proef 1e-ter verliep in de middag van 10/09/2021 met de volgende uitgangspunten:

- Stroomsnelheid (v): 4,5 m/s.
- Initiële grondvochtigheid : Vochtig door de ochtend proef.
- Locatie spuitmond: (x= 240 cm, y= -42 cm).
- Hoek van de spuitmond (α_s): 5°.
- Invalshoek (α_i): 31°.
- Hoek van spuitmond op talud (φ): 30°.
- Afstand spuitmond tot impact locatie in stroomrichting: 60 cm.
- Referentie voor dieptemetingen: 14 cm.

I.2 Proefverloop

Proef 1e-ter was een herhaling van proef 1e. Beide proeven hadden ongeveer dezelfde grondvochtigheid.

Proef 1e-ter werd belast voor: 5, 10, 20, 30 en 40 min. Foto's van de schade na elke belastingstap zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 0.55 tot en met Figuur 0.59. Na deze proef was de schade 14 cm diep, 42 cm lang en 16 cm breed. De schade verloop is weergegeven in Figuur 0.60. De metingen met waarnemingen zijn in Tabel 20.



Figuur 0.54 Beginsituatie van proef 1e-ter.



Figuur 0.55 Schade bij meting 1 proef 1e-ter.



Figuur 0.56 Schade bij meting 2 proef 1e-ter.



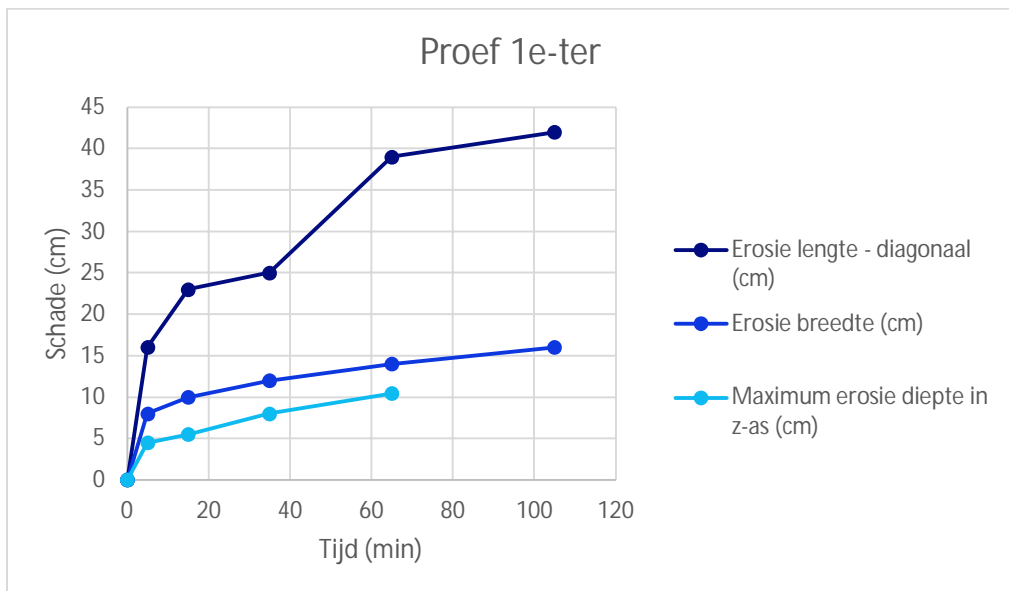
Figuur 0.57 Schade bij meting 3 proef 1e-ter.



Figuur 0.58 Schade bij meting 4 proef 1e-ter.



Figuur 0.59 Schade bij meting 5 proef 1e-ter.



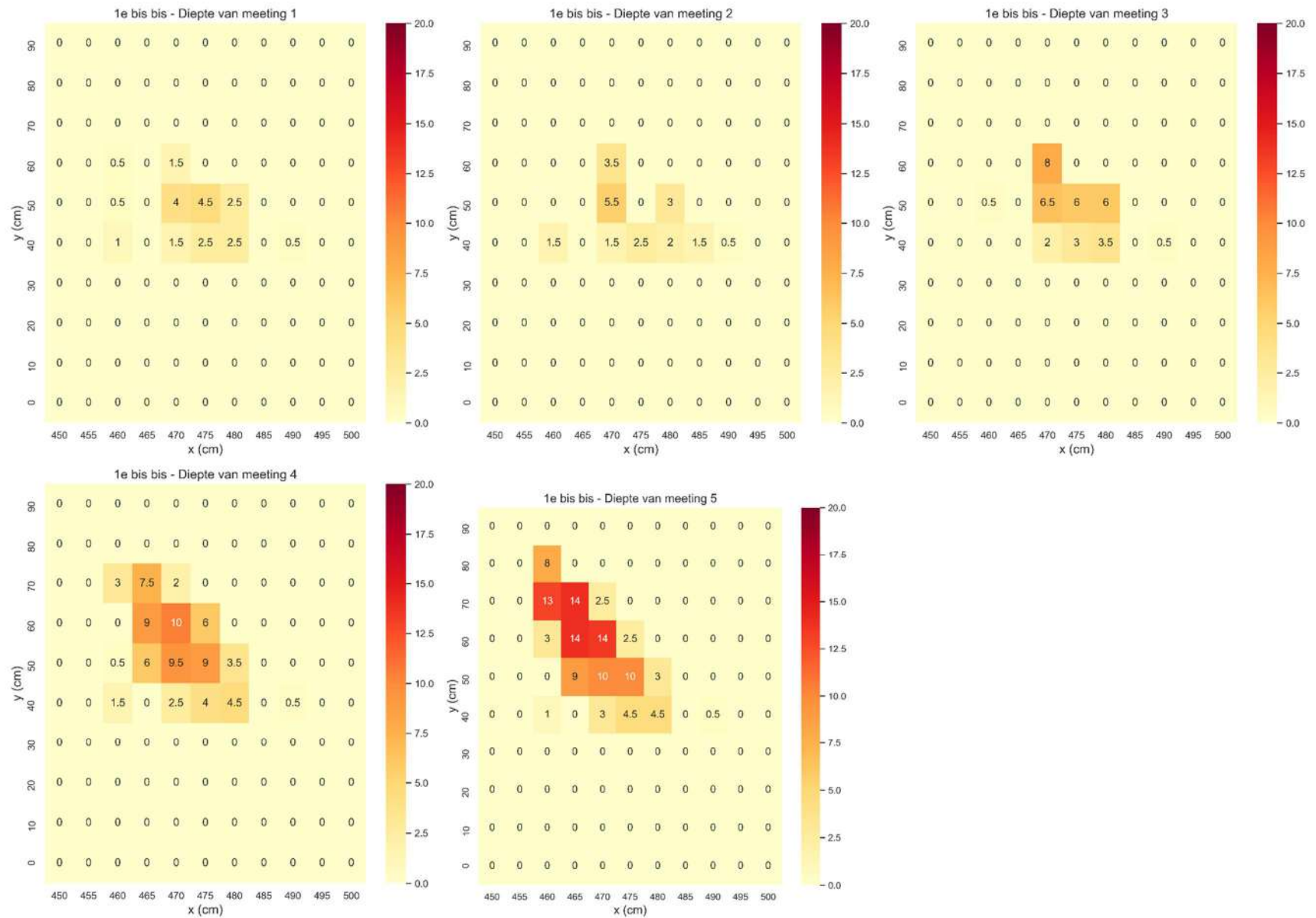
Figuur 0.60 Diepte, lengte en breedte van de schade tijdens proef 1e-ter.

Tabel 20 Metingen en waarnemingen van proef 1e-ter.

Meting nummer	Tijd start	Belasting tijd (min)	Totaal belasting tijd (min)	Debiet (l/min)	Snelheid (m/s)	Erosie lengte (cm)	Erosie breedte – (cm)	Erosie diepte (cm)	Waarnemingen
1	11:30	5	5	540	4.5	16.0	8.0	4.5	Wortels zichtbaar. Nog geen kuil zichtbaar.
2	11:45	10	15	541	4.5	23.0	10.0	5.5	Wortels zichtbaar. Nog geen kuil zichtbaar.
3	12:05	20	35	542	4.5	25.0	12.0	8.0	Wortel beginnen uitgetrokken te worden. Nog geen kuil zichtbaar.
4	12:35	30	65	543	4.5	39	14	10.5	Wortels zijn doorbroken. Kuil is gevormd met water erin. Kuil gaat onder het grasmat
5	13:15	40	105	544	4.5	42	16	14	Kuil is groter geworden met nog water erin.

I.3 Diepte metingen

Figuur 0.23 geeft een overzicht van de schade diepte op verschillende tijdstippen.



Figuur 0.61 Diepte metingen 1, 2, 3, 4 en 5 van proef 1e-ter na respectivelijk 5, 10, 20, 30 en 40 min belastingtijd.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl